

Mario Padelin

13803



ZAŠTITA OD GROMA

ŠKOLSKA KNJIGA—ZAGREB



Urednik
dr. ŽELJKO MATUTINOVIC

Recenzenti
dr. IVO HRS
dr. ZVONIMIR KRULC

Republička zajednica za znanstveni rad
SR Hrvatske finansijski je pomogla objavljivanje ovog djela

Katalogizacija u publikaciji — CIP
Nacionalna i sveučilišna biblioteka, Zagreb

UDK 551.594.21:614.8-084](035)

PADELIN, Mario

Zaštita od groma / Mario Padelin. — Zagreb
: Školska knjiga, 1987. — 311 str. : ilustr. ;
24 cm

Bibliografija: str. 309—311.

Tisak OGNJEN PRICA, Zagreb

Prof. dr. **MARIO PADELIN**

Profesor Elektrotehničkog fakulteta
Sveučilišta u Zagrebu

ZAŠTITA OD GROMA



ŠKOLSKA KNJIGA

ZAGREB, 1987

KNJIŽNICA

Elektrotehničkog fakulteta

ZAGREB

13803

5359



0000000072984

KNJIZNICA
ELEKTROTEHNIČKOG FAKULTETA
ZAGREB

Inv. br.

13803

Sign.:

5359

Mojoj kćerki Tamari

Sadržaj

Predgovor	XI
---------------------	----

Prvo poglavlje

1. RAZVOJ ZAŠTITE OD GROMA	1
1.1. Kratki pregled povijesnog razvoja zaštite od groma	1
1.2. Statistička raspodjela oluja i udari groma u zemlju. Izokeraunička razina	5
1.3. Odnos između izokerauničke razine i gustoće udara groma u zemlju	8
1.4. Utjecaj zemljišta	10
1.5. Olujni oblaci i atmosferski elektricitet. Nastajanje olujnih oblaka	11
1.6. Pojava korone na zemlji (Elmova vatra)	12
1.7. Razvoj udara groma, njegove karakteristične veličine i popratne pojave	13
1.7.1. Razvoj udara groma	13
1.7.2. Vrste i polaritet groma	16
1.7.3. Karakteristične veličine struje groma	17
1.7.4. Tjemena vrijednost struje groma	18
1.7.5. Strmina struje groma	19
1.7.6. Naboj struje groma	20
1.7.7. Kvadratni impuls struje groma	21
1.7.8. Rekapitulacija	21
1.8. Struja munje kao narinuta udarna struja	22
1.9. Proizvodnja struje munje u laboratorijima	25
1.10. Električna i magnetska polja	25
1.11. Inducirani naponi	26
1.12. Optičko djelovanje	27
1.13. Akustičko djelovanje — zračni tlak	28
1.14. Mehaničko djelovanje	29
1.15. Termičko djelovanje	30

Drugo poglavlje

2. GLAVNI ELEMENTI ZAŠTITE OD GROMA	32
2.1. Opasnosti za zgrade i ostale objekte	32
2.2. Principi zaštitnih mjera za zgrade i ostale objekte	33

Treće poglavlje

3. ZAŠTIĆENA PODRUČJA I ZAGRIJAVANJE VODIČA	36
3.1. Zaštićena područja i geometrijsko-električni model	36
3.2. Zaštićeni prostor šipkaste hvataljke	40
3.3. Zaštićeni prostor horizontalne hvataljke	43
3.4. Zaštićeni prostor više horizontalnih hvataljki	45
3.5. Zaštićeni prostori bilo kakvih hvataljki koje su bilo kako raspoređene	47
3.6. Čestoća udara groma u neki objekt	48
3.7. Zagrijavanje vodiča što odvođe struju groma	50

Četvrto poglavlje

4. UZEMLJENJE	55
4.1. Karakteristike zemljišta	57
4.2. Horizontalno ukopani uzemljivači (trakasti uzemljivači)	59
4.3. Okomito ukopani uzemljivači (štapni uzemljivači)	60
4.4. Temeljni uzemljivači	61
4.5. Kombinirani uzemljivači	62
4.6. Paralelno spojeni trakasti uzemljivači	62
4.7. Paralelno spojeni štapni uzemljivači	63
4.8. Kombinacija štapnih i trakastih uzemljivača	64
4.9. Prstenasti uzemljivači	65
4.10. Udarni otpor rasprostiranja	66
4.11. Neka razmatranja o uzemljenju gromobranskih instalacija	73

Peto poglavlje

5. IZJEDNAČAVANJE POTENCIJALA	75
5.1. Praktička razmatranja	77
5.2. Napon samoindukcije u zamkama kuda prolazi struja groma	81
5.3. Proračun induciranih napona i sigurnosnih razmaka	83
5.4. Geometrijske karakteristike osnovnih zamki	87
5.5. Geometrijska karakteristika prve osnovne zamke	87
5.6. Geometrijska karakteristika druge osnovne zamke	89
5.7. Metoda superpozicije geometrijskih karakteristika	91
5.8. Pravila superpozicije	94
5.9. Geometrijske karakteristike praktičkih kombinacija zamki	95

Šesto poglavlje

6. VRSTE I IZVEDBE GROMOBRANSKIH INSTALACIJA	100
6.1. Šipkasti gromobrani	100
6.2. Gromobranska instalacija na principu Faradayeve kletke	102
6.3. Osnovni kriterij za dimenzioniranje gromobranskih instalacija u obliku zamki	103
6.4. Gromobranske instalacije nekih tipičnih objekata	108

Sedmo poglavlje

7. OPASNOST ZA LJUDE OD UDARA GROMA	111
7.1. Izravni udari groma u čovjeka	111
7.2. Posredni udari groma u čovjeka	112
7.3. Zaštitne mjere	113
7.4. Opasnost za čovjeka kad se zaštićuje loše izvedenim gromobranskim instalacijama	114

Osmo poglavlje

PROČITAT

8. PUTNI VALOVI	118
8.1. Oblici valova kojima se služimo prilikom računanja	120
8.2. Vodovi koji se računju	121
8.3. Primjeri korištenja Petersenovim pravilom za računanje napona i struja u transformatorskim stanicama	122
8.4. Prolazak vala kroz induktivitet uključen između dva voda	125
8.5. Prolazak vala pokraj kapaciteta	132
8.6. Prolazak beskonačno dugačkog vala s položenim čelom pokraj kondenzatora	138
8.7. Kratki valovi	140
8.8. Valovi eksponencijalnog oblika	145
8.9. Titrajni krug	147

Deveto poglavlje

9. ZAŠTITA NADZEMNIH VODOVA	153
9.1. Udar groma u dalekovod bez zaštitnog užeta	154
9.2. Udar groma u stup ili u zaštitno uže	157
9.3. Zaštita dalekovoda zaštitnim vodičima i određivanje zaštitnog kuta pomoću elektrometrijskog modela. Osnove modela	158
9.4. Grafička konstrukcija modela	160
9.5. Dijagram za praktičku upotrebu	162
9.6. Udar u okolinu voda	164

Deseto poglavlje

10. ODVOĐENJE STRUJE GROMA ZAŠTITNIM UŽETOM	165
10.1. Točniji proračun napona na vrhu stupa	167
10.2. Utjecaj induktiviteta stupa i njegova otpora uzemljenja na smetnje pri likom udara groma. Povratni preskoci	171

Jedanaesto poglavlje

11. NEKA PRAKTIČKA RAZMATRANJA KAD ŠTITIMO NADZEMNE VODOVE	174
11.1. Mjere kojima se smanjuju povratni preskoci	175
11.2. Mjere za sprečavanje povreda izolacije	180
11.3. Zaštita izolacije nadzemnih vodova od 10 i 20 kV od izravnih udara	180
11.4. Jednostavna zaštitna iskrišta i njihovo djelovanje	182
11.5. Upotreba i vrste iskrišta	184
11.6. Ispitivanje i podešavanje zaštitnih iskrišta	186
11.7. Opće upute za upotrebu iskrišta	188

Dvanaesto poglavlje

12. PRENAPONI NASTALI UDAROM GROMA U KABELIMA KOJI SU POLOŽENI U LOŠE VODLJIVOM TLU I ZAŠTITA	190
12.1. Udar groma u kraj kabela	196
12.2. Zaštita kabela	197

Trinaesto poglavlje

13. ODVODNICI PRENAPONA	201
13.1. Odvodnici prenapona promjenljiva otpora ili ventilni odvodnici. Fizi- kalna zbivanja	203
13.2. Val na ventilnom odvodniku u elektroenergetskim sistemima	205
13.3. Nailazak beskonačno dugačkog vala strma čela na ventilni odvodnik	208
13.4. Način spajanja odvodnika prenapona	210
13.5. Izvedbe i vrste ventilnih odvodnika	211
13.6. Izbor ventilnih odvodnika	214
13.6.1. Nazivni napon odvodnika	215
13.6.2. Proradni napon	217
13.6.3. Nazivna struja	219
13.6.4. Preostali napon	220
13.6.5. Tendencije razvoja ventilnih odvodnika	221
13.7. Cink-oksadni odvodnici	222
13.7.1. Izvedba i rad cink-oksadnog odvodnika u pogonu	224
13.8. Cijevni odvodnici	225

Četrnaesto poglavlje

14. ZAŠTITA ELEKTROENERGETSKIH POSTROJENJA	229
14.1. Zaštita elektroenergetskih postrojenja od izravnih udara groma	229

14.2. Zaštita postrojenja od posrednih udara groma ili zaštita od putnih valova	231
14.3. Zaštićeni prilazi	235
14.4. Mjesto ventilnog odvodnika u postrojenjima koja su priključena na nadzemne vodove	237
14.5. Upotreba kondenzatora	246
14.6. Pojednostavljene sheme zaštite	248
14.7. Zaštita postrojenja nazivnih napona od 10 i 20 kV	251
14.8. Praktička razmatranja	254
14.9. Zaštita stanica koje su priključene na kraju nadzemnih vodova ili na kraju otcjepa duljih od 200 m (završne stanice)	255
14.10. Zaštita stanica kroz koje prolaze nadzemni vodovi (prolazne stanice) ili se nalaze na kraju otcjepa duljine manje od 150 do 200 m	257

Petnaesto poglavlje

15. ZAŠTITA POSTROJENJA PRIKLJUČENIH NA NADZEMNE VODOVE PREKO KABELA	259
15.1. Utjecaj ventilnog odvodnika	262
15.2. Zaštita transformatora koji je priključen na kombinaciji nadzemnog voda i kabela	268
15.3. Zaštita generatora	271
15.3.1. Zaštita generatora izravno spojenih s mrežom	272
15.3.2. Zaštita generatora u blok-spoju	276

Šesnaesto poglavlje

16. DIMENZIONIRANJE KONDENZATORSKIH ODVODNIKA	278
16.1. Vrste kondenzatorskih odvodnika i njihove osobine	284
16.2. Druge mogućnosti zaštite pomoću kondenzatora	286

Sedamnaesto poglavlje

17. NAČELA KOORDINACIJE IZOLACIJE	288
17.1. Koordinacija izolacije. Povijesni razvoj	288
17.2. Klasična metoda koordinacije izolacije	290
17.2.1. Usklađivanje otpornosti izolacije s veličinom prenapona i zaštitnim aparatima	293
17.3. Dimenzioniranje izolacije primjenom statističko-matematičkih metoda	295
17.3.1. Slučajna priroda prenapona	296
17.3.2. Slučajna priroda otpornosti izolacije	297
17.3.3. Dimenzioniranje izolacije s obzirom na prenapone	299
17.3.4. Dimenzioniranje zaštićene izolacije	301
17.3.5. Dimenzioniranje zaštitnih aparata	302
17.3.6. Usklađivanje izolacije u transformatorskoj stanici od 400 kV	303
17.4. Pojednostavljena metoda koordinacije izolacije	304

Literatura	309
----------------------	-----

Predgovor

Grom je uvijek privlačio pažnju ljudi svojim kretanjem u atmosferi, praćen izvanredno lijepom svjetlošću i bljeskom, uz isto tako snažnu i zastrašujuću grmljavinu. Grom je vjesnik blagotvorne kiše prijeko potrebne za život na Zemlji, ali je, na žalost, i uzročnik mnogih šteta i nesreća. O toj se pojavi vjekovima razmišljalo i pisalo. Ljudi su je dugo vremena pokušavali objasniti, tumačili su je na različite načine i uzaludno tražili zaštitu.

Čovjek, kao znatiželjno i hrabro stvorenje, nije nikad odustao u borbi s nepoznatom i hirovitom prirodom. Uvijek je nastojao da barem djelić njezinih tajni podvrgne svojoj volji i razumu. U novije vrijeme razvoj svih naučnih područja, omogućio je ljudima da proniknu dublje u nepredvidive mogućnosti i snagu prirode te da se barem donekle zaštite od njezina štetnog djelovanja.

Moj interes za temeljitija razmišljanja o ovoj problematici pojavio se tokom rada na održavanju elektroenergetskih postrojenja u sjevernoj Hrvatskoj, a zatim tokom predavanja studentima i inženjerima na Elektrotehničkom fakultetu u Zagrebu.

U tekstu koji slijedi neće biti u cjelini izložena sva složena i još nedovoljno utvrđena zbivanja povezana s ovom pojavom, nego će se s gledišta inženjera opisati niz osnovnih zahvata što ih treba poduzeti da bi se usmjerile i obuzdale snažne struje koje se na zemlji pojavljuju prilikom udara groma. U prvim poglavljima iznose se glavne osobine ove pojave koje je potrebno poznavati da bi se mogla djelotvorno provesti zaštita ljudi i drugih objekata na tlu. U ostalim poglavljima posebno je opisana zaštita elektroenergetskih sistema. Prilikom izlaganja ovih zbivanja služilo se najjednostavnijim električnim i matematičkim modelima kako bi osnovne misli u tehnici zaštite bile što jasnije i shvatljivije.

Ovaj je tekst napisan u nadi da će se studentima i inženjerima elektrotehnike omogućiti bolje razumijevanje prilikom učenja, a i prilikom primjene zaštite od groma u praksi.

Najveće zadovoljstvo će mi biti ako sam ovim radom, barem malo, pomogao na nekom mjestu da ljudskih žrtava i šteta od groma bude manje.

Zagreb, travnja 1984.

Mario Padelin

1. Razvoj zaštite od groma

1.1. Kratki pregled povijesnog razvoja zaštite od groma

Gromom ili munjom nazivamo praktički u cjelini tok atmosferskog izbijanja koji nastaje između elektriziranih oblaka i zemlje. Ovdje, međutim, treba napomenuti da bi se naziv »grom« ili »grmljavina« morao više odnositi na akustički učinak atmosferskog izbijanja, dok bi pod nazivom munja trebalo podrazumijevati svjetlosni učinak. I jedan i drugi učinak izazvani su u osnovi prolaskom struje groma.

Munja ili grom je prirodna pojava koja je oduvijek privlačila pažnju ljudi. Sasvim je sigurno da je već pračovjek zapazio i osjetio na sebi i svojoj okolini djelovanje ove pojave. Prve utiske o tome stekao je kad je vidio da udari groma mogu zapaliti drveće, oštetiti kamenje i, što je najgore, ubiti bilo kakvo živo biće na zemlji. Čovjek se u to vrijeme, tjeran nagonom samoodržanja, sakrivao pred takvom opasnošću duboko u svoju pećinu i čekao da nevrijeme prođe. Bili su to najvjerojatnije prvi kontakti sa zamršenim, složenim i opasnim snagama prirode.

Kad bi promatrao udare groma iz daljine, čovjek se možda divio njegovu veličanstvenom toku, a kad bi osjetio i vidio njegovo štetno djelovanje, onda ga se počeo bojati. U granicama svojih vrlo skromnih znanja o prirodnim pojavama on je u tim prvim danima pokušao ovu pojavu protumačiti na svoj način. No, to u ono vrijeme nije bilo moguće postići jer ljudi tad nisu mogli proniknuti ni utvrditi složene veze u prirodnim zakonima. Čovjek je u to vrijeme bio pun predrasuda i sujevjerja, pa je, videći da udari groma dolaze iz atmosfere, odnosno po njegovim predodžbama da dolaze s neba, objašnjavao ovu pojavu kao djelovanje nekih natprirodnih i božanskih sila, koje je upućeno njemu kao opomena ili kazna za učinjene grijehe. U tom poštovanju, pomiješanome sa strahom, on je ovu pojavu obožavao, njoj se divio i prinosio joj razne žrtve. Na starim crtežima, zapisima i spomenicima mogu se naći oblici natprirodnih bića — bogova, kojima su veoma često prinošene žrtve, uz razne religijske obrede, s namjerom da se ublaže udari groma koji izazivaju štete, smrt ljudi i životinja.

U grčkoj mitologiji spominje se u legendama da je bog Zeus, gnjevan na čovjeka, poslao »ognjenu strijelu« — munju koja ga je uništila. S obzirom na to da se ta pojava smatrala u to vrijeme djelovanjem božje ruke, neki su držali da je smrt od udara groma uzvišena smrt i da čovjek udaren gromom odlazi u nebo među bogove. Naprotiv, stari Rimljani

smatrali su smrt od udara groma grešnom, pa su gromom unesrećene ljude pokapali odmah na licu mjesta, bez ikakvih pogrebnih svečanosti. No, kakva god bila moralna tumačenja tih događaja, intimni osjećaj da je život dragocjen natjerao je čovjeka da se od groma pokuša zaštititi. U to je vrijeme vladalo vjerovanje da kamen uzet s mjesta udara groma može poslužiti kao zaštita jer po ondašnjim shvaćanjima grom ponovno ne udara na isto mjesto. Bilo je i primjera da se takav kamen upotrebljavao kao lijek.

Kako je vrijeme prolazilo, stečena iskustva bila su sve brojnija, pa su se o toj pojavi počele stvarati prve fizikalne slike. Opazilo se da grom može izazvati vatru i da uz njega dolaze i kiše, a dobre i loše strane tih pojava bile su našim precima u ono vrijeme poznate. Zato su prvi pokušaji tumačenja kako grom nastaje povezani s pojavom vatre. Mislilo se, naime, da grom nastaje onda kad se u određenim uvjetima zapale razne eksplozivne smjese, pare ili plinovi, pa čak i sam zrak.

Intuitivan i znatiželjan da dozna o onome što se događa oko njega, čovjek je promatrao nebo i oblake iz kojih su gromovi dolazili, pa je na osnovi njihove boje i veličine pokušao zaključivati o tome hoće li doći do udara groma ili ne. Ali svi takvi pokušaji nisu davali zadovoljavajuće odgovore na niz pitanja koja nude složeni prirodni zakoni. Zato nije ni čudo što se ovoj pojavi pridavalo i dalje božansko porijeklo, sve do najnovijeg vremena. Za ondašnje prilike ovaj je problem bio nerješiv i o nekoj imalo djelotvornijoj zaštiti nije moglo biti riječi. Grom je palio i dalje kolibe i kućice ondašnjih ljudi, ubijao njih i životinje.

Postupno, bez obzira na strah i nemoć, ljudi ipak stupaju u borbu protiv ove opasne pojave. To je bilo davno, još prije naše ere. U prilog toj tvrdnji idu arheološke iskopine u Egiptu, gdje su nađeni natpisi na zidovima pojedinih hramova iz kojih se može zaključiti da su oko hrama u Edfu bili postavljeni vrlo visoki stupovi radi otimanja ove »vatre s neba«. Ti su stupovi bili na vrhu zaoštreni, a preko cijele površine obloženi bakrenim pločicama. Zatim je dalje tu i detaljan opis, od prije nekoliko tisuća godina, iz kojega se može razumjeti da je i Solomonov hram bio zaštićen metalnim krovom i preko oluka vezan za zemlju. Ističe se da ga ni jednom grom nije oštetio. Prema starim zapisima i svi hramovi u Palestini imali su takvu zaštitu. Osim toga i pojedine su druge građevine bile pokrivane metalnim plaštem, a oko njih su ukopavani dugački metalni stupovi. Teško je reći koliko je takva zaštita u ono vrijeme dobro i funkcionirala, ali mnogo povjesničara koji su to područje proučavali smatra da je ona u načelu bila za ono vrijeme ispravno zamišljena. Međutim, tad, a i mnogo kasnije, u srednjem vijeku, nije se znalo ništa o prirodi atmosferskoga električnog izbijanja, pa se ni djelotvorna zaštita nije mogla dobro izvesti. Još su se u srednjem vijeku pokušavali jakim zvukom crkvenih zvonara udaljiti olujni oblaci i tako spriječiti eventualni udari groma na nekom području. Taj način zaštite dovodio je ponekad i do usmrćenja zvonara, pa je ondašnji sujevjerni svijet takvog stradanika smatrao grešnikom. To vjerovanje, na žalost, održalo se još ponegdje i do danas.

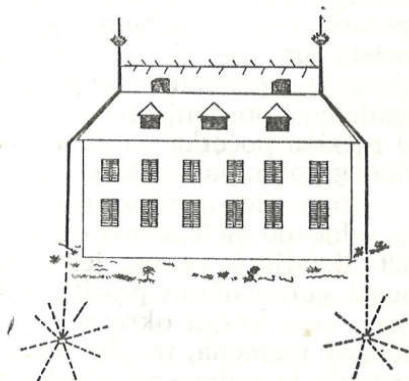
Prolazila su stoljeća, a prave zaštite nije moglo biti. Slabo fizikalno poznavanje te pojave nije dopuštalo da se njezino štetno djelovanje spriječi.

Tek otkriće elektriciteta trenjem šipke od jantara i drugi eksperimenti u ovoj domeni, a pogotovo otkriće lajdsenske boce, naveli su istraživače da izvrše uporedbu električne iskre stvorene u laboratoriju s »materijom« groma.

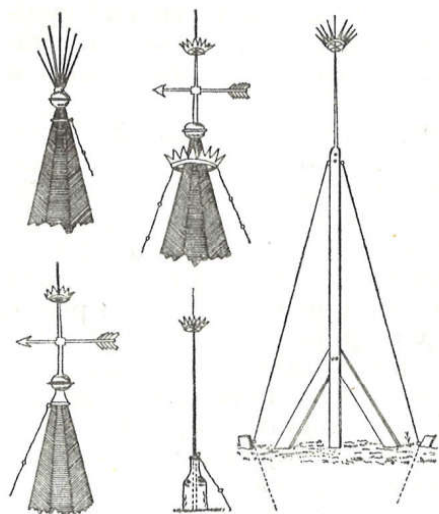
Maštoviti i opasni eksperimenti koji su izvedeni u 18. stoljeću doveli su znanstvenike do zaključka da je »materija« groma identična elektricitetu koji su oni proizveli na zemlji. Jedan takav opasni eksperiment izvršio je Benjamin Franklin i time potvrdio da je udarac groma izbijanje statičkog elektriciteta prikupljenoga u olujnim oblacima. On je u mjesecu lipnju 1752, za vrijeme oluje, pustio visoko zmaya s dobro zaoštrenim šiljkom na vrhu, a pridržavao ga je užetom na kojeg je kraju bio privezan teški metalni ključ. Pokraj sebe imao je dvije lajdsenske boce. Budući da se uže za vrijeme eksperimenta ovlaživalo i postalo vodljivo, on je to uže, s ključem na kraju, pridržavao svilenom vrpcom i približavao jednoj lajdsenskoj boci. Kad je nastupilo nekoliko uzastopnih izbijanja munje, preskočila je jaka električna iskra između ključa i lajdsenske boce. Oprezno je privukao ključu i drugu lajdsensku bocu, pa je ponovno između njih došlo do preskoka električne iskre. Nakon tog eksperimenta Franklin je zaključio da je »materija groma« snažan električni naboj i da je taj naboj groma jednak po naravi onom naboju koji se dobiva trenjem u laboratorijima. Time je, zapravo, vjekovna tajna groma ili munje bila u fizikalnom smislu otkrivena i borba protiv te pojave postaje definitivno problem stručnjaka i učenjaka. Franklin je nakon spomenutog eksperimenta prihvatio činjenicu o identičnosti tih pojava i došao na ideju da ostvari zaštitu od groma svojim poznatim gromobranima (sl. 1.1). Već nakon godine dana postavljeni su prvi gromobrani na zgradama u Philadelphiji. Njih su dobili i svjetionici, kule i brodovi, a postavljaju se ondje gdje je najčešće dolazilo do udara groma. Zanimljivo je pogledati na slici 1.1. kakve su se gromobranske instalacije za zgrade predlagale i izvodile 1778. godine, odnosno tridesetak godina nakon Franklinovih otkrića. Iz te je slike očito da se Franklinov gromobran, koji je još danas u upotrebi, sastoji od hvataljki, odvoda i uzemljivača, dakle od svih onih osnovnih elemenata koje i danas ima svaka gromobranska instalacija. Hvataljka je bila namijenjena za mjesto udara groma, odvod prema zemlji ima funkciju provođenja struje groma izvan zgrade, a uzemljivaču je zadatak da tu struju provede nesmetano kroz zemlju.

Postavljanje prvih gromobrana izazvalo je već u to vrijeme rasprave trebalo li da vrh gromobrana bude oštar šiljak ili zaobljen u obliku kugle. Zato su već 1777. godine obavljani eksperimenti kojima se pokazalo da je šiljak djelotvorniji od kugle, pa je on kao element gromobranske zaštite zadržan i do današnjih dana. Na slici 1.2. nacrtani su vrhovi gromobranskih hvataljki iz tog vremena.

Na slici se može vidjeti da su oni, zadržavajući svoj šiljasti oblik, bili lijepo izvedeni i kombinirani, te su prido-



Sl. 1.1. Zaštita od groma zgrade iz 1778. godine



Sl. 1.2. Vrhovi na hvataljkama gromobrana iz 1778. godine

nosili i skladnom izgledu cijelog objekta. Pretpostavljajući da je hvataljka morala biti apsolutno provodna za struju groma, šiljci su u to vrijeme bili katkada pozlaćeni, da ne bi zaždali.

Upotrebom prvih gromobrana, kojima se u početku htio samo uhvatiti grom, došlo se i do istraživanja njihova zaštitnog prostora. Tako već u to vrijeme više učenjaka predlaže načine i metode kojima se određuje zaštitni prostor nekoga gromobrana. Na osnovi eksperimenata i detaljnih opažanja savjetovalo se ljudima da se drže daleko od velikih objekata, osamljenih stabala, a posebno se isticala opasnost od stajanja na uzvišenim predjelima, jer tad čovjek svojim tijelom može izazvati udar groma kao neki metalni stup. Neposredno poslije Franklinova otkrića znanstveno je znanje o toj po-

javi i dalje bilo skromno. Ali iz 1778. godine ipak ima nekoliko vrijednih pisanih radova i pravila kako se treba štititi od groma u sredinama koje nemaju posebno izvedene gromobranske instalacije, onako kako su se one tad izvodile.

Razlog za tako relativno spori razvoj zaštitnih mjera bio je u tome što je nastanak olujnih oblaka složen, a udar je groma izuzetno brza pojava, koju nije moguće točnije odrediti po svjetlosnim i akustičnim efektima, jedino dostupnim ljudskim osjetilima. Tek u posljednjih stotinu godina, uz pomoć novih aparata, omogućeno je da se detaljnije upozna i nastajanje te pojave u oblacima, pa, što je najvažnije, njezino kretanje i djelovanje prilikom izbijanja prema tlu.

O nastanku elektriciteta u oblacima ima različitih teorija, koje se osnivaju na osmatranju nastajanja oblaka, električnog naboja u njemu i polarizacije tog naboja u samom oblaku. Danas se za takva istraživanja koriste brzi avioni i sateliti, opskrbljeni najsuvremenijim uređajima za mjerenje i promatranje pojava u atmosferi. Osim toga, postavljeni su paralelno i posebni uređaji na zemlji koji omogućuju praćenje te pojave od njezina početka pa do kraja. To su razne vrste mjerača jakosti električnog polja, pa i radarski uređaji.

Što se tiče one faze razvoja ove pojave kada nastaje izbijanje prema tlu, odnosno mehanizma udara groma u zemlju, i o tome nije bilo moguće ništa detaljnije saznati jer se ta pojava, zbog velike brzine kretanja, nije mogla golim okom pratiti. Tek se pronalaskom Bojsove rotirajuće kamere, koja brzim okretanjem dobaša omogućuje veliki broj snimaka u jedinici vremena, moglo saznati kako izgledaju pojedine faze razvoja i kretanja te pojave od oblaka prema zemlji. Prilike na probojnom putu, odnosno u samom kanalu groma veoma su složene, pa i do danas nisu sasvim obrazložene. Međutim, fizikalna je slika svih tih zbivanja danas

već dosta zaokružena i dopunjena mjerenjem amplituda i snimanjem oblika struja groma, koje se nakon udara kreću zemljom ili pogođenim objektom. Za mjerenje struja groma danas se upotrebljavaju magnetski registratori, a za utvrđivanje njihova oblika koristimo se katodnim oscilografima. Poznavanje jakosti tih struja i njihova oblika danas je temeljni podatak na kojem se osniva cijela tehnika zaštite od groma.

Jedno od pitanja koja se nameću pri projektiranju zaštite je koliko puta i gdje najčešće dolazi do udara groma. Zato se posljednjih godina vrlo intenzivno utvrđuju područja gdje više, a gdje manje dolazi do udara. Prema tim podacima poduzimaju se strože ili blaže mjere zaštite, što je od presudne važnosti za ekonomičnu zaštitu, ne smanjujući pri tome sigurnost ljudi i objekta koji želimo štititi. Nekad su to bili nesigurni podaci, koje su registrirali ljudi svojim osjetilima, videći svjetlost groma ili osluškujući grmljavinu. Danas se na tom području istraživanja upotrebljavaju vrlo osjetljivi akustički i optički aparati, a u novije se vrijeme koristimo specijalno konstruiranim registratorima koji automatski prikupljaju podatke o broju udara groma na određenim mjestima ili na nekom razmaku od njih.

Sve ovo što smo u kratkome povijesnom pregledu iznijeli upućuje na dug i mukotrpan put koji su ljudi prošli da bi zaštitili svoj život i svoja dobra od opasne prirodne pojave.

Na žalost, uz sva nastojanja i golemi napredak koji je na tom području ostvaren, još i dalje, doduše manje, ljudi stradaju od udara groma i trpe velike materijalne štete. Međutim, treba se boriti, treba i dalje istraživati, pa će se možda pomalo, kap po kap, oduzeti prirodi pravo da svojom snagom otežava naš život na Zemlji.

1.2. Statistička raspodjela oluja i udari groma u zemlju.

Izokeraunička razina

Više činilaca djeluje na pojavu atmosferskog izbijanja. To nam pokazuje i činjenica da se grom ili munja ne pojavljuje u svim krajevima jednaki broj puta. Mogli bismo reći da npr. u polarnim krajevima gotovo uopće nema gromova, a to su, naprotiv, u pojasu oko ekvatora veoma česte pojave.

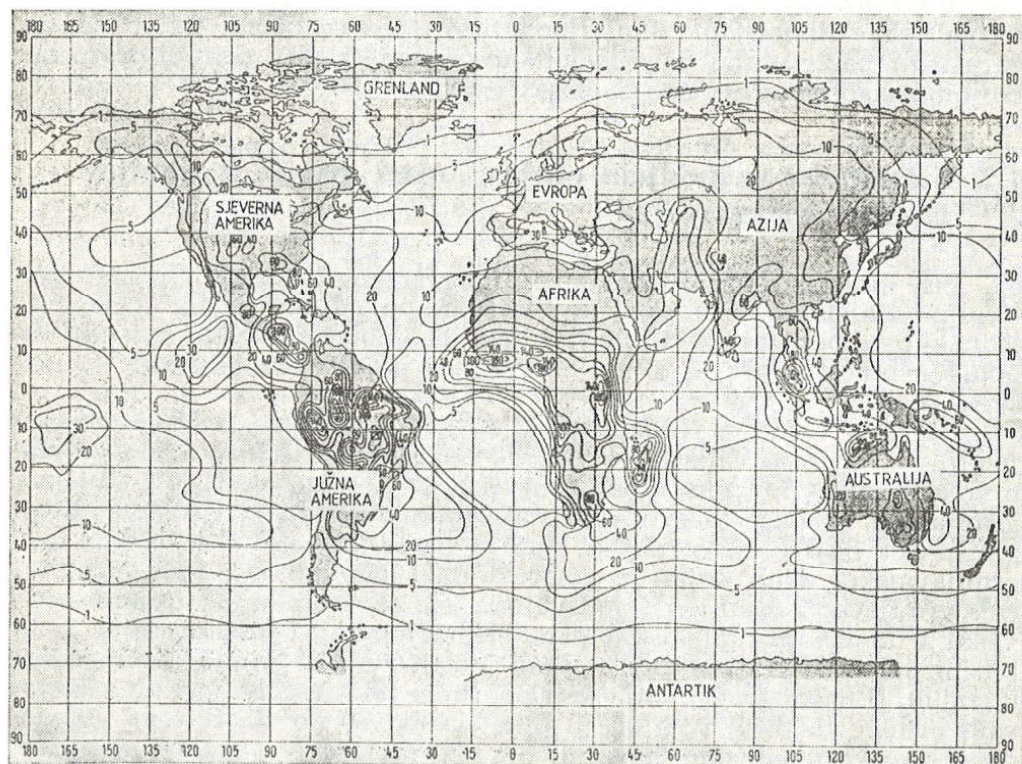
Nikad se točno ne može predvidjeti kad će doći do izbijanja prema zemlji, ali su dosadašnja iskustva ipak pokazala da je broj udara groma u toku godine povezan s pojavom grmljavine. Što više puta čujemo grmljavinu, bit će i više udara groma prema zemlji i više šteta. Broj grmljavina bilježe meteorološke stanice, pa se tako došlo do pojma tzv. grmljavinskog dana, kojim se označava onaj dan kad se barem jedanput čula grmljavina. Tako je na područjima oko ekvatora registrirano u prosjeku i do 200 grmljavinskih dana godišnje, a u Švedskoj, koja je u blizini polarnih krajeva, registrirano je samo 5—10 grmljavinskih dana u godini. U našoj zemlji, koja je u području relativno umjerenih klimatskih prilika, taj broj se kreće u prosjeku od 30 do 40. Iz toga vidimo da se broj grmljavinskih dana mijenja kad prelazimo iz jednog područja u drugo. Zato se grmljavinski dani registriraju svake godine u mnogim meteorološkim stanicama. Na osnovi tako prikupljenih podataka izrađuju

se tzv. izokerauničke karte. Na takvim su kartama linijama povezana međusobno ona mjesta kod kojih se registrirao jednak prosječni broj grmljavinskih dana u godini. One se mogu izraditi i tako da prikazuju ne samo mjesto s jednakim prosječnim brojem grmljavinskih dana nego da zatvorenim linijama predočuju i cijela područja s jednakim srednjim brojem takvih dana.

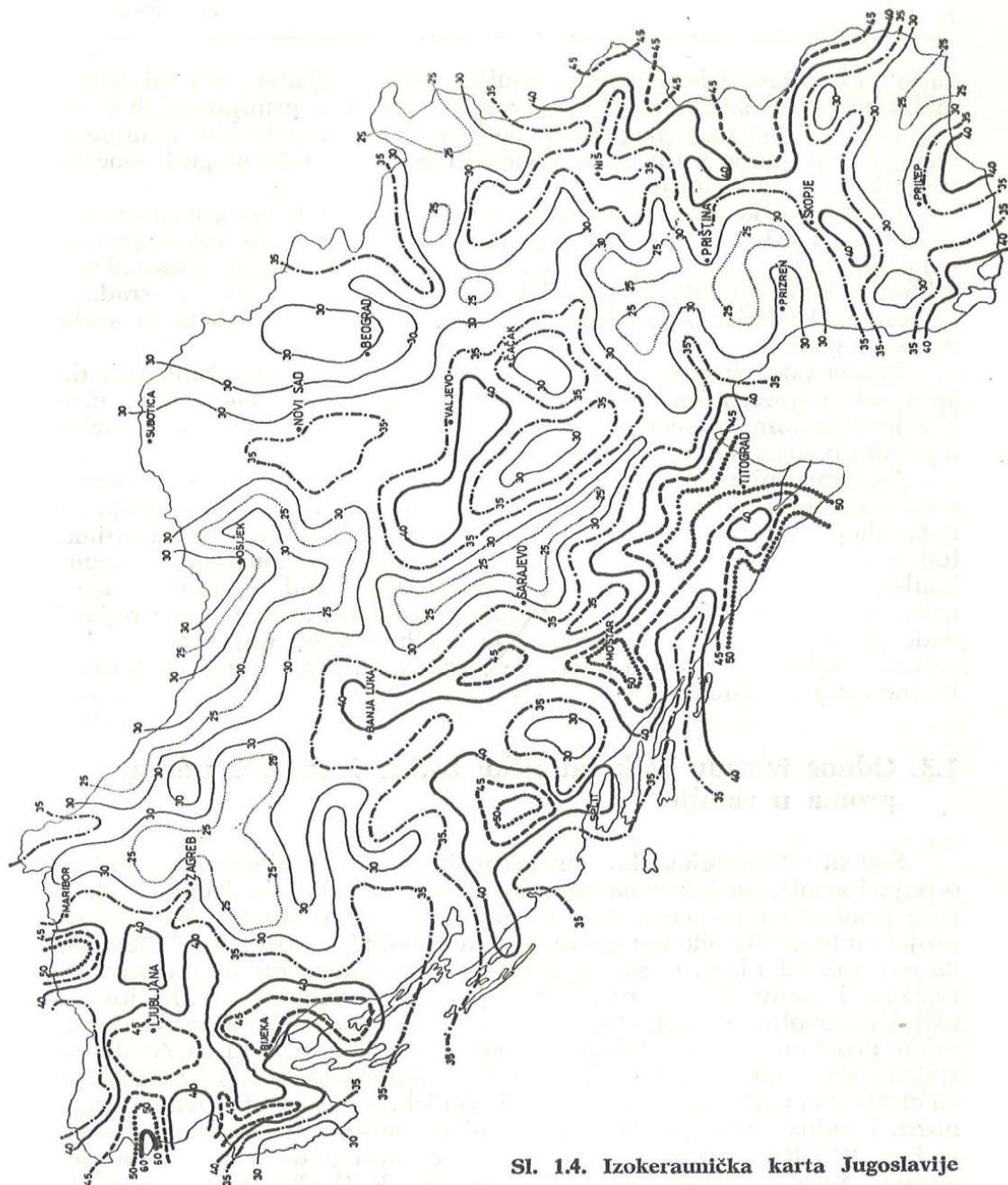
Da bi se otprilike uvidjelo koliko su česte grmljavinske oluje na pojedinim područjima u svijetu, na slici 1.3. prikazana je izokeraunička karta cijele zemaljske kugle. Odmah se može uočiti da polarna područja imaju vrlo mali broj grmljavinskih dana (prosječno 1 dan), a taj broj naglo raste što se više približavamo ekvatoru, na gotovo 200 dana u godini. To su područja centralne Afrike i ona oko rijeke Amazone. U Zapadnoj Evropi i SR Njemačkoj taj se broj kreće oko 20 grmljavinskih dana u godini, a u Francuskoj otprilike između 15 i 20. Jugoslavija i Italija imaju u prosjeku nešto veći broj grmljavinskih dana, između 30 i 40 dana u jednoj godini.

Za područja koja imaju npr. veliki broj takvih dana kažemo da imaju visoku izokerauničku razinu. Pri tome mislimo na prosječni broj grmljavinskih dana u godini.

Ta je definicija relativno jednostavna, ali ipak omogućuje da se statistički srede određeni podaci što olakšavaju da se barem donekle predvidi broj udara groma u zemlju.



Sl. 1.3. Raspodjela prosječnog broja grmljavinskih dana u godini, na našoj planeti



Sl. 1.4. Izokeraunička karta Jugoslavije

Na slici 1.4. je radi informacije prikazana izokeraunička karta Jugoslavije izrađena na osnovi prikupljenih podataka o broju grmljavinskih dana između 1948. i 1966. godine. Na toj karti vidimo da šira područja oko Ljubljane, Rijeke, Mostara i Titograda imaju prosječno oko 40—50 grmljavinskih dana, odnosno da se nalaze na visokoj izokerauničkoj razini. Područja uz Savu, Moravu i Vardar imaju manji broj takvih dana. U cjelini, relativno prema drugim zemljama u svijetu, možemo računati

da je naša država jako ugrožena grmljavinskim olujama. Ima čak nekih malih područja naše zemlje gdje je registrirano i 70 grmljavinskih dana u godini. Radovi na prikupljanju podataka o grmljavinskim danima u našoj zemlji i dalje traju, pa se detaljniji podaci o tome mogu i ponešto promijeniti u budućnosti.

Izokerauničke karte izrađene prema prosječnom broju grmljavinskih dana u toku jedne godine, ne daju baš dublji uvid u grmljavinske prilike u nekom kraju. Grmljavine nisu tokom godine jednoliko raspoređene. Njihov nastanak vezan je za godišnje doba. Zato se u svijetu izrađuju izokerauničke karte s prosječnim brojem grmljavinskih dana za svaki mjesec u godini.

Prema podacima koji su prikupljeni kod nas mogli bismo reći da su u našim sjevernijim krajevima grmljavinski dani mnogo češći u proljetnim i ljetnim mjesecima nego za vrijeme jeseni i zime. To nije tako u južnim područjima naše zemlje.

Najnaprednije zemlje skupljaju podatke o pojavi grmljavina ne samo u toku godine i mjeseca nego čak i u toku jednog dana. Istraživanja su pokazala da je grmljavine najviše u poslijepodnevnim i večernjim satima (od 14 do 22 sata). Takvi podaci omogućuju da se orijentiramo ne samo koliko puta možemo očekivati udare groma nego i kad takvi udari mogu uslijediti. Na osnovi takvoga detaljnijeg pregleda kretanja ove pojave dade se bolje organizirati održavanje nekih vitalnih objekata i voditi računa o njihovoj općoj ili pogonskoj sigurnosti (npr. o sigurnosti elektroenergetskog sistema).

1.3. Odnos između izokerauničke razine i gustoće udara groma u zemlju

S gledišta stručnjaka koji projektiraju gromobransku zaštitu, podaci o pojavi grmljavinskih dana nisu dovoljni jer u mnogim danima kad se čuje grmljavina ne mora doći do udara groma u zemlju. Zato bi za projektante zaštite bilo mnogo važnije znati koliki je broj udara u zemlju, na površini od 1 km². Dosad se u tom smislu mnogo radilo, izvršena su različita istraživanja, ali rezultati kojima bi se moglo koristiti još su uvijek nedovoljni. U posljednje se vrijeme, povezano s tim istraživanjima, mjere promjene jakosti električnog polja na nekom mjestu na Zemlji za vrijeme atmosferskog izbijanja. U tim se mjeranjima polazi od činjenice da električno polje naglo oslabi poslije tih izbijanja. Ta istraživanja organizira i radna grupa pri Međunarodnoj organizaciji za visokonaponske vodove (CIGRE), a aparat koji se upotrebljava u te svrhe je »brojač munja«. Njega su konstruirali E. T. PIERCE i R. H. GOLDE na tehničkoj visokoj školi u Darmstadtu i dosad je postavljen u mnogim zemljama, npr. SR Njemačkoj, Čehoslovačkoj, Finskoj, Švedskoj, Norveškoj i kod nas u SR Sloveniji. Njegov princip rada sličan je onome u radio-prijemnika, zato je na taj brojač priključena antena duljine otprilike 20 m, koja je razapeta između drvenih stupova i na visini od 5 m nad zemljom. Shema jedne takve stanice za brojenje munja prikazana je na slici 1.5.

Kad nastupi udar groma u okolici promjera i do 30 km, tad se nad antenom u stanici promijeni jakost električnog polja i to brojač registri-

ra. Antena je aparata podešena na prijem onih impulsa kojima je frekvencija do 1 kHz.

Međutim, registriranje ovog aparata ipak ne daje pouzdane i sasvim upotrebljive podatke iz dva razloga. Prvo, on je osjetljiv na promjene jakosti električnog polja na relativno širokom području i, drugo, ne registrira samo promjene električnog polja nastale udarom groma u tlo, nego i one promjene jakosti polja koje se zbivaju nad antenom i onda kad dođe do izbijanja u oblaku ili između oblaka. A taj je broj izbijanja kod grmljavinskih oluja redovito mnogo veći od onih koja se kreću prema zemlji. Taj broj, doduše, ovisi o tome gdje se nalazimo na kugli zemaljskoj, jer grmljavinske oluje u tropskim krajevima nemaju iste karakteristike kao one u krajevima s umjerenom klimom. Dakle, ovaj jednostavni aparat, što se danas još upotrebljava, nije selektivan i registrira svaku promjenu električnog polja pri bilo kojoj vrsti izbijanja, pa se iz njegovih podataka ne može odmah izračunati broj udara groma na 1 km², koji bi najviše zanimao stručnjaka za zaštitu.

Da bi se ta nesavršenost izbjegla, počeli su se upotrebljavati optički brojači gromova, koji slikaju jedan dio olujnog neba i, koristeći se podacima o negdje poznatom broju udara u zemlju, omogućuju da se zaključuje na osnovi odnosa između svih izbijanja i izbijanja prema zemlji. Moglo bi se, polazeći od svih ovih istraživanja, uzeti da odnos između svih izbijanja i izbijanja prema zemlji iznosi u tropskim krajevima 7, a u krajevima s umjerenom klimom od 2 do 3.

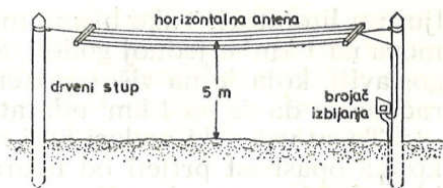
U najnovije vrijeme počeo se pomalo upotrebljavati i brojač munje, koji radi na principu radiogoniometrijske triangulacije na osnovi radiogoniometrijske detekcije elektromagnetskog polja koje je izazvano izbijanjima. Taj je aparat mnogo savršeniji od običnog brojača gromova, ali je još malo u upotrebi.

Na osnovi svih istraživanja, a pretežno onih rezultata koje je prikupila radna grupa stručnjaka CIGRÉ, mnogi istraživači pokušali su pronaći matematičku formulu kojom bi se izračunao broj udara groma na 1 km² u jednoj godini, ako je poznata izokeraunička razina na tom području. Mnogo je izraza predloženo, od kojih će se ovdje navesti samo jedan:

$$N_s = N_i (0,1 + 0,35 \sin \alpha) (0,4 \pm 0,2). \quad (1.1)$$

Pri tome je N_s broj gromova koji su udarili na 1 km² u toku jedne godine, N_i je izokeraunička razina tog područja, a α je kut koji pokazuje geografsku širinu tog područja.

Iz svega ovoga izlazi da ne mogu sasvim sigurno poslužiti rezultati dobiveni dosadašnjim istraživanjima, mjerenjima i računanjem, te da na tom području treba još dugo raditi. Međutim, ipak se došlo barem do podataka koji mogu poslužiti kao orijentacija i koji se tu i tamo pojav-



Sl. 1.5. Osnovna shema stanice za brojenje munja

ljuju u literaturi. Tako bismo mogli za Srednju Evropu računati s 5 gromova na 1 km^2 u jednoj godini, a s 4 groma na 1 km^2 u Francuskoj. U Jugoslaviji, koja je na višoj izokerauničkoj razini od spomenutih zemalja, računa se da će na 1 km^2 udarati grom 6 do 7 puta godišnje.

To su već neki podaci koji nam pokazuju, relativno dosta pouzdano, kolika opasnost prijeti od udara groma. Ako računamo da će pretežno biti pogođene zgrade gdje se stanuje, onda na tu opasnost moramo ozbiljno računati.

Broj udara groma na 1 km^2 neobično je vrijedan podatak i dobro će poslužiti kad se projektira gromobranska zaštita električnih dalekovoda ili nekih drugih objekata koji zauzimaju izuzetno velike površine i visine.

Međutim, za projektiranje zaštite objekata normalnih veličina, kao što su to obične stambene zgrade, tornjevi, odašiljači itd., taj podatak nije dovoljan i iz njega se ne da zaključiti koliko puta takvi objekti mogu biti udareni munjom. Naime, taj se podatak još uvijek odnosi na veću površinu nego što je zauzimaju objekti normalne veličine, pa se iz njega ne može procijeniti opasnost za takve objekte. Zato se odnedavno nastoji ustanoviti izravan broj udara groma u zgrade, tornjeve itd., koji bi onda poslužio kao osnova u projektiranju zaštite manjih objekata. Kad nije poznat ovaj broj, tada broj udara groma na 1 km^2 po godini treba preračunati na veličinu i visinu objekta kojemu želimo projektirati gromobransku zaštitu. Za taj račun imaju empirijske formule, što će se poslije pokazati.

1.4. Utjecaj zemljišta

Osim veze koju broj grmljavinskih dana ima s brojem udara groma prema tlu dobro je razmotriti utječe li na taj broj udara prema zemlji i lokalni oblik ili sastav zemljišta. Danas se i takvi utjecaji razmatraju, ali su rezultati tih istraživanja još veoma skromni i ne daju pouzdane zaključke. Na primjer, više je ili manje sigurno da se oblaci koji dovode do oluje kreću uglavnom istim putovima, što je ovisno o lokalnom obliku zemljišta. Ta okolnost izgleda da mnogo utječe na gustinu nepogoda, a onda i na broj udara groma. Takva su područja poznata i registrirana. Ali to je opći utjecaj konfiguracije zemljišta. Međutim, da li osim tih činilaca utječu i neke druge lokalne okolnosti, kao što su neko visoko brdo, voda, stupanj ionizacije zraka itd., o tome se malo zna. Prema najnovijim istraživanjima moglo bi se čak reći da te lokalne okolnosti nisu presudne za broj udara groma prema zemlji. Naime, predvodnik groma, koji se počne kretati od oblaka prema zemlji, ne »razlikuje« prilike na površini tla. Njemu su svi oblici zemljišta, sastav tla i objekti na zemlji »ravnopravni«. Prema današnjim gledanjima, mjesto udara groma može se utvrditi tek kad se glava kanala groma približi zemlji na nekoliko desetaka metara. Dakle, odluka o mjestu udara nastaje tek u nekoliko posljednjih trenutaka. Grom će tad udariti u najbliže mjesto na zemlji, koje ne mora biti ni voda, ni vrh neke planine, ni drugi istureni objekti. I zaista, često su registrirani udari groma u podnožje neke planine, a ne u njezine vrhove, zatim udari u neke manje objekte iako su se oni nalazili u blizini većih objekata itd.

Što se tiče sastava zemljišta, mogli bismo općenito reći da i sastav u geološkom smislu nije odlučan za mjesto udara groma. Međutim, istraživanja nekih stručnjaka dopuštaju mogućnost da zemljište s malim specifičnim otporom tla zna biti privlačno za udar groma. No, ta se pretpostavka i dalje provjerava i tu činjenicu ne bismo mogli uzeti zasad u razmatranje.

1.5. Olujni oblaci i atmosferski elektricitet. Nastajanje olujnih oblaka

Tipični olujni oblak je kumulonimbus. Njegov je naziv nastao od latinske riječi *cumulus*, što znači gomila, i *nimbus* — kišni oblak. To je oblak velike mase koji se vertikalno diže u visinu od 10 do 15 km i izgleda kao jedno visoko brdo ili glomazni toranj.

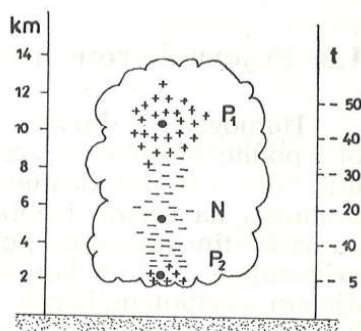
Jedan takav oblak može se protezati nad više kvadratnih kilometara, a osnovica mu je udaljena od tla 2—3 km (sl. 1.6).

Kumulusni oblaci nastaju u toploj polovici godine, kad se tlo zagrije pa se s njega diže topli zrak i kreće prema hladnijoj visokoj atmosferi, gdje se počinje hladiti. Ako je zrak bio vlažan, vodena se para kondenzira stvarajući kišne kapljice vode. U najvišim slojevima atmosfere događa se da kondenzirane vodene pare prelaze i u led ili ledene kristale. Tako se može reći da su kumulonimbusi na vrhu sastavljeni pretežno od čestica leda. Na zemlji je to nevjerojatno praćeno jakim olujnim vjetrom, pljuskovima kiše, krupe ili grada. Ono traje otprilike najviše dva sata.

Međutim, nas ovdje ne zanimaju mnogo sve složene pojave oko nastajanja oblaka jer bi nas to daleko odvelo. Privlači nas samo električna komponenta ove pojave jer je poznato da munja ili grom nastaje samo onda kad se u takvim oblacima usput stvori toliko naboja da dolazi do električnog izbijanja unutar oblaka ili prema tlu.

Na tim istraživanjima dosad su radili mnogi učenjaci i svaki je od njih svojim gledanjima pridonio da se što više otkriju komplicirane zakonitosti pri nastajanju atmosferskog elektriciteta i polarizacije tog naboja u njemu. Vrlo ozbiljno su uzimane u obzir teorije C. T. R. Wilsona i G. C. Simpsona, koje upućuju na elektriziranje kišnih kapi pod utjecajem strujanja vjetra sa zemlje prema visokim slojevima atmosfere i zbog sudaranja kišnih kapi s ionima koji se nalaze u zraku. Jednako tako uzeti su u obzir i Simpsonovi i Robinsonovi dopunjeni radovi koji ističu tri zone naboja u olujnom oblaku: pozitivnu zonu, na samom ulazu zračne struje u oblak, zatim pretežno negativnu zonu i na samom vrhu oblaka opet pozitivnu zonu. Na osnovi tih i drugih istraživanja, koja su dugo trajala, moglo bi se ukratko reći kako se stvara i polarizira atmosferski elektricitet.

Kad topli zrak sa zemlje struji prema višim slojevima atmosfere i kad je zrak u



Sl. 1.6. Olujni elektrizirani oblak

atmosferi vlažan i pun kapljica vode, tad se pri određenoj brzini tog vjetra kišne kapi, usmjerene prema tlu, kreću i sudaraju jedna s drugom. To kretanje prilično je kaotično. Međutim, prilikom tog sudaranja velike će se kapljice vode rasprsnuti na sitnije i veće. Tako nastale, sitnije će kapljice pri rasprskavanju ostati električni negativno nabijene; dakle bit će negativni ioni, a budući da su lagane, njih će zračna struja, koja dolazi sa zemlje, odnositi u gornje slojeve oblaka. Tamo će se one taložiti na druge neutralne kapljice jer struja zraka u većim visinama obično slabi. Tako negativno nabijene kapljice vode tad se spuštaju ponovno prema zemlji. Veće kapljice vode, koje su nastale rasprskavanjem, teže su i pri rasprskavanju ostaju na svojim mjestima i nisu nošene strujom zraka sa zemlje. Tako možemo reći da topli vjetar koji struji s tla i formira kumulonimbus svojim kretanjem, mehaničkim putem, stvara u oblaku električne naboje, i ne samo to nego obavlja i polarizaciju tih naboja unutar oblaka. U jednom se dijelu oblaka skupljaju pozitivni naboji, a u drugome ostaju negativni naboji.

Dosadašnja istraživanja pokazuju da su ti procesi veoma složeni, zato mjesta gdje će se prikupiti pozitivni ili negativni naboji mogu biti različita. Međutim, ipak se može tvrditi da većina oblaka u svojem donjem dijelu ima negativni naboj, iako se u toj negativnoj masi donjeg dijela oblaka mogu naći i manji otoci pozitivnog naboja. Gornji dio oblaka, koji zna biti sastavljen i od leda, ima pozitivni električni naboj (sl. 1.6). Takav tipični grmljavinski oblak nosi svojstva dipola, odnosno generatora u kojem vladaju jaka električna polja i vrlo visoki električni naponi. Oni mogu dovesti do električnih izbijanja kad njihova vrijednost prekorači određene granice.

Tako elektrizirano tijelo, taj olujni oblak, relativno blizu zemlje, izaziva i na njezinoj površini povećanje jakosti električnog polja, koje inače za vrijeme lijepog vremena iznosi svega oko 100 V/m. Ako se dogodi da električno polje zbog blizine tog oblaka poprimi na tlu vrijednosti od 15 do 20 kV/m, onda je za očekivati da će nastupiti izbijanje naboja iz oblaka prema zemlji.

Pretpostavljajući da je električno polje između podnožja oblaka i zemlje homogeno, prema nekim se približnim procjenama može računati da razlika napona između oblaka i zemlje iznosi i nekoliko desetaka milijuna volta.

1.6. Pojava korone na zemlji (Elmova vatra)

Homogeno električno polje između oblaka i tla nastalo bi onda kad bi i podnožje oblaka i zemlja bili idealno ravni. Međutim, to u prirodi nije tako. Tlo nije idealno ravno i svaka oštrija zakrivljenost ili zašiljeni predmeti na njemu izobličuju homogenu raspodjelu električnog polja, pa se na tim mjestima povećava njegova vrijednost. Tu pojavu (sl. 1.7) prikazujemo većom koncentracijom električnih silnica i gušćom raspodjelom ekvipotencijalnih ploha. Grubo se kvantitativno može uzeti da bi jedna polukugla koju bismo položili na zemlju, povećala na tom mjestu srednju jakost električnog polja tri puta. Ako bismo umjesto polukugle na to mjesto postavili elipsoid, kojeg omjer velikog i malog pro-

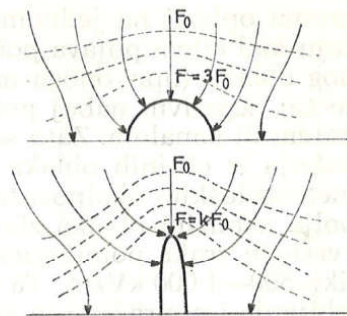
mjera iznosi 30, tad bi se na njemu jakost električnog polja povećala čak 300 puta.

Budući da je probojna čvrstoća zraka oko 3000 kV/m, postaje razumljivo kako će u tako posebnim prilikama biti dovoljno da se pojavi srednja jakost polja od samo 10 kV po metru pa da na tom vrhu počnu tinjava izbijanja (korona), što redovito prethode svakome konačnom probuju zraka.

U prirodi, u takvim okolnostima, zašiljeni predmeti, drveće, tornjevi, a također kosa i prsti čovjekovi, mogu postati izvori elektrona koji se u okolišnom zraku spajaju s nabojima suprotna predznaka. Ta pojava korone u prirodi naziva se i »tiho izbijanje«. Ono je u početku svog nastajanja nevidljivo i jedva se čuje. Međutim, kad takvo izbijanje na istaknutim predmetima postane jače, a to se događa s približavanjem olujnog oblaka zemlji, tad se u pozadini tamnih grmljavinskih oblaka ili noćnog neba daje golim okom zapaziti da iz tih zašiljenih predmeta izlazi jaka bijelozelenkastoplava svjetlost. Ona ponekad zna biti toliko jaka da izgleda kao da gore vrhovi tvorničkih dimnjaka ili kula. Taj fenomen bio je opažen još od davnina na vrhovima kopanja koje su nosili vojnici, a opazili su ga i mornari na jarbolima svojih brodova i nazvali »vatom sv. Elma«.

Legende o povijesnim događajima govore o tome da se Hanibalovim vojnicima, kada su prelazili Alpe, na kopljima pojavila jaka vatra, tako da je iz daljine izgledalo kao da se kreće mnogo plamenova. Pridavajući toj pojavi, u ono vrijeme, božansko značenje, oni su je shvatili kao predznak novih pobjeda što ih čekaju. Elmove je vatra od davnina bila poznata i ljudima koji su se kretali ili živjeli u planinama, pa im je to služilo kao upozorenje da vrlo lako i brzo može doći do udara groma na tom mjestu i da se odatle moraju što prije udaljiti.

Potrebno je na kraju spomenuti da se Elmove vatra pojavljuje intenzivnije na objektima većih dimenzija. Ona se zapaža i na manjim objektima, ali ako su oni na povišenim mjestima. Tako se ona može pojaviti na nekome metalnom stupu postavljenome na vrh nekog brda. Elmove vatra olakšava udar groma u to mjesto. Takav udar groma koji je vidljiv prije sa zemlje nazivamo »uzlaznim udarom groma«. Pojava Elmove vatre, odnosno to električno predizbijanje na zemlji, uvijek se više ili manje vidljivo pojavljuje, ali tipično je i najintenzivnije kod pozitivnog udara groma. To znači, kod udara groma iz oblaka koji je bio negativan u svojem donjem dijelu i kad je takav oblak na zemlji inducirao pozitivne naboje.



Sl. 1.7. Promjene raspodjele električnog polja

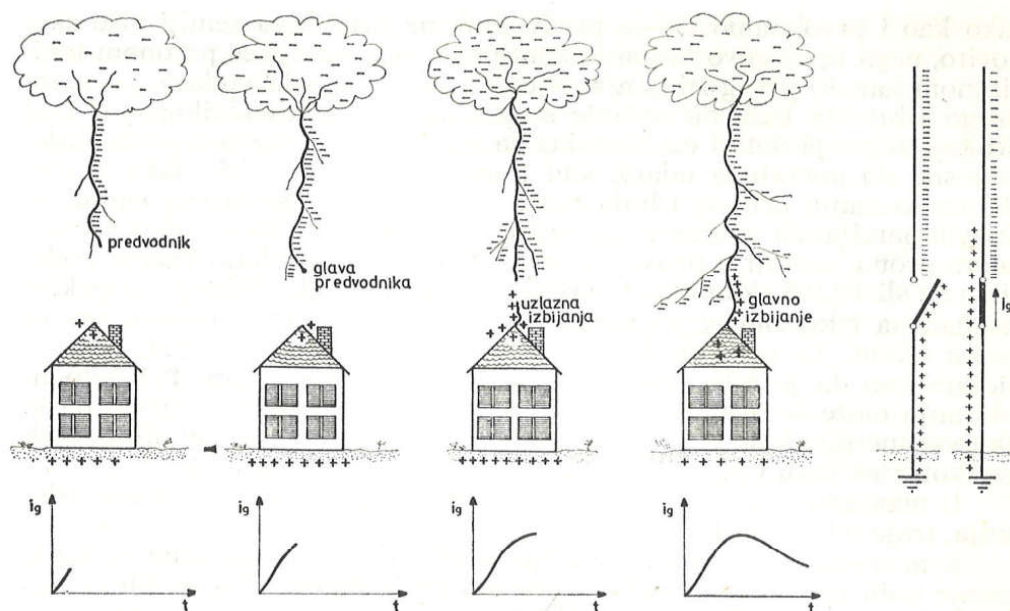
1.7. Razvoj udara groma, njegove karakteristične veličine i popratne pojave

1.7.1. Razvoj udara groma

Najčešći su udari groma negativnog polariteta, koji počinju od oblaka, a svršavaju na tlu. Zato će se fizikalna zbivanja pri razvoju

groma opisati na jednome takvom tipičnom primjeru, odnosno na slučaju kad cijela pojava počinje iz negativno nabijenih jezgri nekoga olujnog oblaka (npr. onoga na sl. 1.6). Snimajući tu pojavu utvrđeno je da se taj negativni naboj počinje kretati prema zemlji jednim ioniziranim putem ili kanalom. Zato se pod gromom ili munjom razumijeva izbijanje naboja iz olujnih oblaka koji su se na njima nagomilali u određenim meteorološkim okolnostima. Taj trenutak nastupa kad jakost električnog polja u blizini oblaka zbog tih nagomilanih naboja prekorači probojnu čvrstoću zraka pomiješanoga s kapljicama vode, koja tamo iznosi otprilike $500\text{--}1\,000\text{ kV/m}$. Ta prva faza razvoja groma naziva se prethodno izbijanje i popraćeno je slabijim svjetlucanjem. Izbijanje se dalje probija skokovito i krivudavo, kroz još neprobijenu i malo ioniziranu atmosferu, prema tlu. Pojedinačni skokovi nastaju svakih 40 do $100\text{ }\mu\text{s}$ na udaljenosti od otprilike 50 m. Nakon svakog preskoka obično se mijenja smjer izbijanja, zato i izbijanje izgleda stepenasto (sl. 1.8), a od glavnog stabla ili predvodnika groma odvaja se više grana, od kojih sve traže put prema nabojima suprotna polariteta u zraku ili prema protivnim nabojima na zemlji. Prosječna brzina kretanja te pojave računa se da iznosi $0,15\text{ m}/\mu\text{s}$. Prilikom napredovanja prema tlu to se izbijanje širi i grana, a svjetlucanje ioniziranih putova postaje sve jače i jače. Budući da predvodnik izlazi iz jezgre negativno nabijenog oblaka, kanal je kuda se on kreće pun negativnih naboja. Što se njegova »glava« ili »čelo« više približava zemlji, ono, na nekom objektu ili stablu ili bilo gdje drugdje, sve više privlači suprotne, pozitivne naboje. To je privlačenje sve jače što je glava predvodnika bliža. Zato dolazi do toga da na zemlji naglo raste jakost električnog polja između »glave« predvodnika i tla, pa se može dogoditi da na nekome mjestu na zemlji vrijednost premaši i električnu čvrstoću zraka. U tom se slučaju na tlu ili na nekome određenom objektu pojave uzlazna izbijanja suprotna polariteta, koja služe kao neka vrsta hvataljki za sve bližu glavu predvodnika. Tu smo pojavu već upoznali kad smo spominjali »Elmovu vatru«. Pri takvim odnosima, u nekom trenutku, dođe do dodira između glave predvodnika i uzlaznog izbijanja, a u istom trenutku nastupa i prodor pozitivnog naboja sa zemlje u negativno nabijeni ionizirani kanal. U kanalu se neutraliziraju naboji suprotnih predznaka. To je glavno pražnjenje i traje $70\text{--}100\text{ }\mu\text{s}$, a popraćeno je vrlo jakim svjetlucanjem i bljeskovima. Na slici 1.8. taj je dodir shematski prikazan uključivanjem jednog rastavljača između zemlje i glave negativno nabijenog kanala. Taj se kontakt može shvatiti na taj način kao da je nastao kratki spoj između oblaka i zemlje. I zaista, pogođenim objektom u tim trenucima teče kratkotrajno vrlo jaka udarna struja prema oblaku, pa se ta pojava naziva i »povratnim udarom«. Osim toga, govorimo da u tim trenucima zemljom protječe jaka struja groma. To je posljednja faza jednog udara.

To kretanje negativnog naboja od oblaka prema tlu i dodir s objektima na zemlji, sa svim popratnim efektima, odvija se veoma brzo pa sve faze njegova razvoja nije moguće pratiti golim okom. Zato se cijeli tok pojave može bolje i detaljnije ocijeniti prema slici 1.9. Tu je shematski predložen cijeli razvoj udara groma na osnovi podataka koji su dobiveni snimanjem pomoću rotirajuće kamere, prema Martinu A. Umanu.



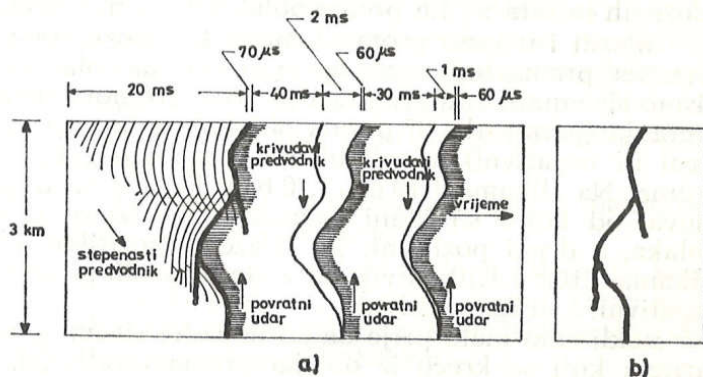
Sl. 1.8. Razvoj izbijanja iz negativnog oblaka prema zemlji

Na toj slici prikazan je dinamički izgled pojave udara groma (sl. 1.9.a) i onaj izgled groma kako ga mi vidimo svojim očima, dakle njegov statički izgled (sl. 1.9.b).

Na slici 1.9.a vidi se kako se predvodnik izbijanja stepenasto približava zemlji, zatim kad se otprilike pojavljuje uzlazno izbijanje na tlu koje će ga prihvatiti. Ta se dva izbijanja spajaju i tako nastaje glavno izbijanje, odnosno povratni udar, kada zemljom teče vrlo jaka struja. To je ono izbijanje koje smo malo prije detaljnije opisali.

Međutim, cijeli proces udara groma ili munje ne mora nakon prvog izbijanja prestati. Naime, čim prestane teći struja prvog izbijanja, može poslije otprilike $50\text{--}100\text{ }\mu\text{s}$ nastupiti i drugo izbijanje. To se događa zbog toga što oblak ima više naboja na različitim mjestima, koji se nisu uspjeli neutralizirati jednim udarom. To drugo izbijanje nastaje jednako

Sl. 1.9. Shema razvoja udara u zemlju prema Martinu A. Umanu: a) dinamički izgled; b) statički izgled



tako kao i prvo, samo što se predvodnik ne približava zemlji više skokovito, nego je njegovo kretanje kontinuirano, a odvija se po onom ioniziranom kanalu prvog izbijanja. Njegova je putanja krivudava, pa se za drugo izbijanje kaže da počinje s »krivudavim predvodnikom«. I kod drugog izbijanja dolazi do kontakta sa zemljom i do glavnog pražnjenja, odnosno do povratnog udara, kad tlom teče ponovno vrlo jaka struja. Brzina kretanja drugog izboja nešto je manja od one prvog izbijanja. Takvih parcijalnih izbijanja zna biti više, a računa se da se cijela pojava udara groma sastoji u prosjeku od 4—5 parcijalnih udara. Prema podacima na slici 1.9.a vidimo da se sve to događa u vrlo kratkim vremenskim razmacima i logično je da pojedine faze te pojave nije moguće pratiti golim okom. Ta nam cijela pojava izgleda kao na slici 1.9.b, gdje je vidimo kao da je bila sastavljena od samo jednog udara. Pri jednom izbijanju može se računati da se izbija naboj od samo 20—100 C i da je ukupna energija koja se prenosi vrlo malena. Ali kanalom i zemljom ipak kratkotrajno teku vrlo jake struje koje dosežu i do 200 000 A.

U prosjeku se može uzeti da cijeli događaj, sastavljen od više izbijanja, traje od 0,2 do 1 s.

Sam mehanizam udara u zemlju, pod kojim razumijevamo kretanje munje onih posljednjih nekoliko metara prije dodira s tlom, bit će još detaljnije opisan u idućim poglavljima.

1.7.2. Vrste i polaritet groma

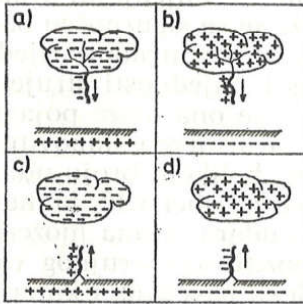
Do sad smo fizikalna zbivanja pri kretanju groma tumačili uz pretpostavku da su izbijanja nastala iz negativnog oblaka i da su se kretala od oblaka prema tlu. Dakle, analizirali smo negativne udare groma, koji se pojavljuju u 80—90% slučajeva, i to pretežno u krajevima s umjerenom klimom. Međutim, ima i drugih rasporeda naboja u oblacima pa i drugih vrsta udara groma po polaritetu i po smjeru kretanja.

U posljednjih 50 godina istraživanja su o putanji i polaritetu atmosferskog izbijanja znatno napredovala u Americi, a posebno u ispitnim stanicama koje su postavljene na brdu San Salvatore u Švicarskoj. Moderni aparati omogućili su da se mnogo dozna o karakterističnim veličinama atmosferskog izbijanja. Tako su fotografski snimci pokazali da smjer kretanja atmosferskog izbijanja može biti različit. Katkad se grom kreće iz oblaka prema zemlji (silazni gromovi), a katkad obrnuto, od izloženih mjesta na tlu prema oblaku (uzlazni gromovi) (sl. 1.10).

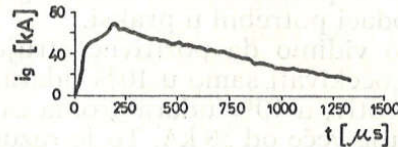
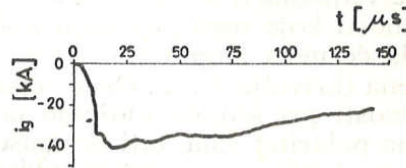
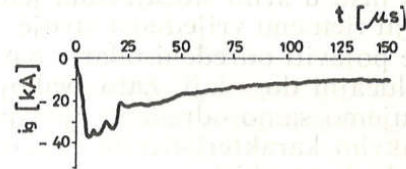
Silazni i uzlazni gromovi mogu biti pozitivnog i negativnog polariteta, već prema tome kakvog je polariteta oblak što ih je izazvao. Kad bismo sistematizirali sve moguće vrste gromova uzimajući u obzir smjer kretanja (prema tlu ili prema oblaku), a zatim i njihov polaritet (pozitivni ili negativni), mogli bismo ustanoviti četiri vrste tipičnih udara groma. Na slikama 1.10.a i 1.10.b prikazane su dvije vrste silaznih gromova, od kojih su jedni negativni, jer izlaze iz negativno nabijenog oblaka, a drugi pozitivni, jer izlaze iz pozitivno nabijenog oblaka. Na slikama 1.10.c i 1.10.d dvije su vrste uzlaznih gromova, od kojih su jedni negativni, a drugi pozitivni.

Rekli smo malo prije da su najčešći silazni gromovi negativnog polariteta koji se kreću iz oblaka prema zemlji (sl. 1.10.a). Ta vrsta se

izbija u obliku jednoga strujnog impulsa, a vidimo ih kako se kreću od oblaka prema zemlji kroz ionizirani kanal. Vrijeme trajanja takvog impulsa iznosi otprilike $100 \mu\text{s}$. Poslije toga njegova vrijednost sve više slabi. Silazni gromovi pozitivnog polariteta su rijetki, a njihovi strujni impulsi duže traju, čak i do $1000 \mu\text{s}$, pa se mora računati s vrlo jakim strujama.



Sl. 1.10. Četiri moguće vrste munje



Sl. 1.11. Negativni i pozitivni oblici struja groma

1.7.3. Karakteristične veličine struja groma

Struja je groma sa stajališta zaštite najvažnija veličina jer ona prilikom udara groma protječe pogođenim objektom. Ona može, prema onome što smo rekli, biti negativnog i pozitivnog polariteta. Na slici 1.11. prikazani su neki oblici struje groma onako kako su ih snimili i zabilježili u ispitnim stanicama na brdu San Salvatore u Švicarskoj.

Negativni udari groma stvaraju strujne valove koji se po obliku relativno mnogo razlikuju jedan od drugoga. Trajanje čela negativnoga strujnog vala u prvom izbijanju iznosi od 10 do $15 \mu\text{s}$. Već pri drugom izbijanju trajanje čela takvoga strujnog vala je kraće, ali je zato njegov hrbat ravniji nego kod prvog izbijanja.

Tjemene su vrijednosti strujnog vala u drugom izbijanju manje od tjemene vrijednosti strujnog vala prvog izbijanja.

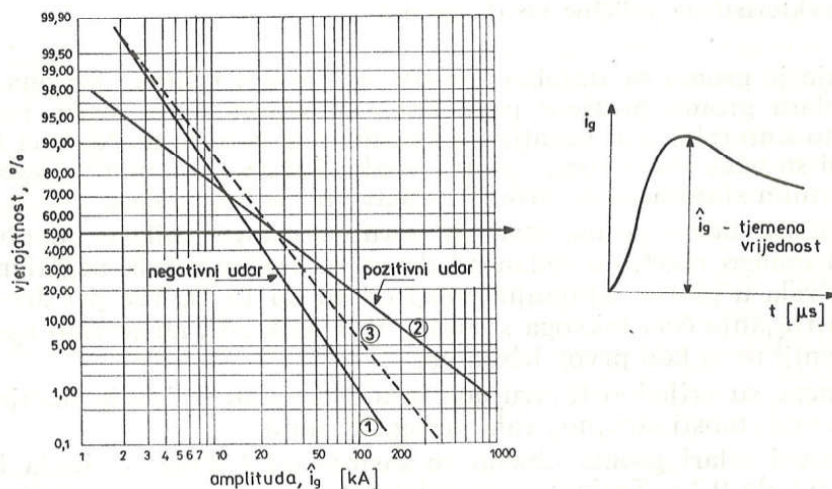
Pozitivni udari groma obično se sastoje od jednog izbijanja koje traje od $0,1$ do $0,2$ s. Trajanje čela relativno je dosta dugo i kreće se u granicama od 20 do $50 \mu\text{s}$. Ali zato tjemene vrijednosti pozitivnih strujnih valova mogu poprimiti i vrijednosti veće od 1000 kA .

1.7.4. Tjemena vrijednost struje groma

Strujni valovi, bilo pozitivni ili negativni, koji nastaju pri udaru, imaju svoje karakteristične veličine. Jedna od njih je tjemena vrijednost ili amplituda strujnog vala, pod kojom razumijevamo najveću trenutnu vrijednost struje $\hat{i}_g$. Iako su strujni valovi pri svakom udaru groma slična oblika, oni nisu jednake veličine, pa onda ni njihove tjemene vrijednosti nisu u svim slučajevima jednake. One se mijenjaju; svaki udar ima svoju tjemenu vrijednost struje i ne može se sa sigurnošću očekivati da će se pojaviti određeni udar s baš određenom tjemenom vrijednošću. To su slučajni događaji. Zato svakoj tjemenoj vrijednosti struje groma pridružujemo samo određenu vjerojatnost da se ona može pojaviti. Još češće takvim karakterističnim veličinama pridružujemo stanovitu vjerojatnost da će one biti premašene, odnosno pri kolikom broju udara groma će te vrijednosti biti prekoračene. Zato su na slici 1.12. kumulativne vjerojatnosti koje nam pokazuju kod koliko udara groma možemo očekivati da će neka amplituda negativnog i pozitivnog strujnog vala biti premašena (krivulja 1 i 2). Osim toga uz njih su navedene i kumulativne vjerojatnosti pri kojima možemo očekivati da će neka amplituda, bez obzira na polaritet vala, biti premašena (globalna raspodjela — krivulja 3). One su dobivene na osnovi podataka prikupljenih po svijetu nakon istraživanja ove pojave. Vjerojatnosti za takve događaje su na slici 1.12. navedene u postocima. Praktički gledajući, iz tih raspodjela mogu se izvući podaci potrebni u praksi.

Tako vidimo da pozitivne struje groma amplitude više od 150 kA možemo očekivati samo u 10% udara.

Naprotiv, u 10% udara groma za očekivati je da će se pojaviti negativne struje veće od 50 kA. To je razumljivo kada se zna, da su negativne struje groma mnogo slabije od pozitivnih.



Sl. 1.12. Raspodjela tjemених pozitivnih i negativnih vrijednosti struja groma, te globalna raspodjela

Dalje vidimo da npr. u 50% udara groma možemo očekivati da će struje biti veće od 25 kA, ali pri tome mislimo na pozitivne ili negativne struje zajedno (globalna raspodjela).

Sovjetski učenjaci predlažu za globalnu vjerojatnost y da će neka amplituda struje groma biti premašena, izračunavanje pomoću izraza:

$$\log y_1 = 2 - \frac{\hat{i}_g}{60}, \quad (1.2)$$

pri čemu je $\hat{i}_g$ amplituda struje groma u (kA). Računanje po tom izrazu daje nešto malo drukčije rezultate od onih koji su prikazani dijagramima na slici 1.12.

Tjemena vrijednost struje groma najvažnija je karakteristična veličina jer pomoću nje ćemo npr. izračunati najveći pad napona $U_R = \hat{i}_g \cdot R$ koji ona stvara na nekom otporu na zemlji.

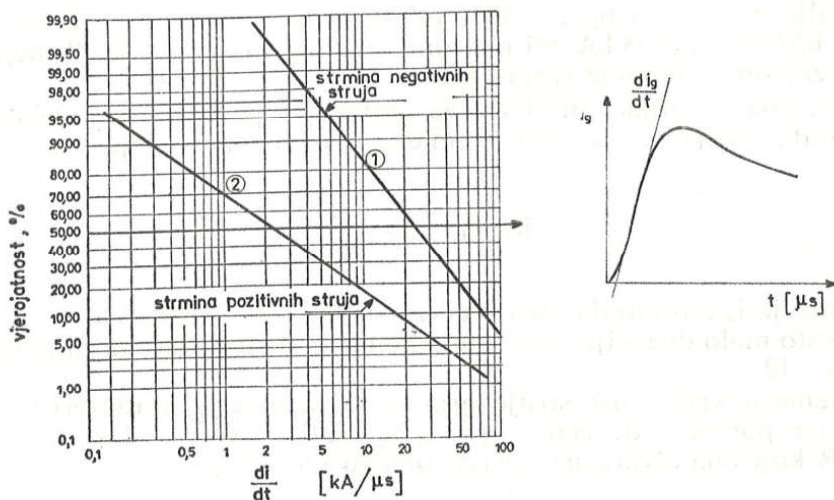
1.7.5. Strmina struje groma

Struja groma ima oblik jednoga strujnog impulsa, kao što je to prikazano na slici 1.12. Taj strujni udar relativno vrlo brzo postizava svoju najveću vrijednost, koja se zatim nešto sporije smanjuje. Te nagle promjene struje stvaraju pri udaru groma u neki objekt jako promjenljiva magnetska polja što dovodi do opasnih napona samoindukacije.

Sve se struje groma na svom čelu ne mijenjaju jednakom brzinom. Neke se mijenjaju brže, a neke sporije. Za one koje se brzo mijenjaju kažemo da imaju veliku strminu, a sve druge imaju malu strminu. Zato je strmina struje groma njezina karakteristična veličina jednako tako važna kao i tjemena vrijednost ili amplituda. Strmine struje groma ili brzina promjene te struje $s = (di/dt)$ računa se po jedinici vremena (A/s) ili (kA/ μ s).

Istraživanja u Švicarskoj pokazala su da je strujama negativnih gromova, iako imaju općenito manju amplitudu od onih pozitivnih gromova, strmina mnogo veća nego u struja pozitivnih gromova. Tako možemo reći da kod 50% negativnih udara groma strmine njihovih struja premašuju 20 kA/ μ s, a u 50% pozitivnih udara groma strmine njihovih struja premašuju samo 2 kA/ μ s. Širi pregled o tome kolikom vjerojatnošću možemo očekivati da će određena strmina struje biti premašena, može se naći na slici 1.13, gdje su navedene raspodjele kumulativnih vjerojatnosti za strmine pozitivnih i negativnih struja groma.

Tjemene vrijednosti struja mogu biti različite, a jednako tako i pripadajuće strmine na čelu strujnog vala. Drugim riječima, između tjemених vrijednosti struja groma koje se u prirodi pojavljuju i pripadajućih strmina na njihovu čelu nema nekoga čvrstog odnosa. Ako je npr. tjemena vrijednost neke struje groma velika, ne mora biti i njezina strmina velika. To se zna slučajno dogoditi, ali ne mora biti. Dapače, jake struje velikih tjemених vrijednosti često imaju malu strminu. Dakle, strmina je jedna karakteristična vrijednost struje groma. Ona sama po sebi, svojom veličinom u dimenzioniranju zaštite ima važnu ulogu, što



Sl. 1.13. Raspodjela strmina na čelu struja groma

će se vidjeti iz daljnjih izlaganja, a ovdje samo napomenimo da se pomoću nje računa induktivni pad napona kad takva struja prolazi nekim vodičem. Taj pad napona tad iznosi $U_L = L (di_g/dt)$.

1.7.6. Naboj struje groma

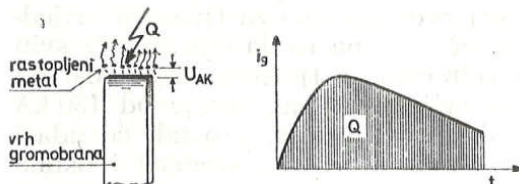
Osim tjemene vrijednosti $\hat{i}_g$ (kA) i strmine struje groma s (kA/μs) još je dobro navesti kao karakterističnu veličinu struje groma i ukupnu količinu naboja Q (As) koja se neutralizira prilikom udara. Ukupna količina naboja u prosjeku nije velika i iznosi desetak kulona, ali u vrlo jakim izbijanjima ona poprima i vrijednosti do 300 kulona.

Ta je veličina naboja Q mjerodavna i o njoj ovisi količina pretvorene energije, i to neposredno na mjestu udara groma ili na svim drugim mjestima gdje dođe struja groma u obliku električnog luka izoliranim putem. Budući da se na mjestu udara ili na mjestu kontakta pri neutraliziranju naboja oslobađa stanovita količina energije i pretvara u toplinu, količina će naboja Q imati utjecaja na topljenje vrha nekog gromobrana ili će ta količina energije rastopiti djelić aluminijskog oklopa na nekom avionu. Na onom mjestu gdje struja groma u obliku električnog luka dotakne neki metalni predmet pretvorena se energija može izračunati kao produkt naboja Q i katodnog pada napona U_{AK} (sl. 1.14). Dakle, pišemo da pretvorena energija na mjestu udara iznosi:

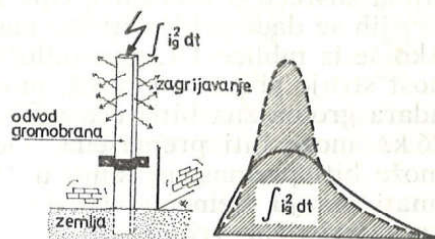
$$W = Q U_{AK}. \quad (1.3)$$

Za dimenzioniranje gromobranskih instalacija dopušteno je uzeti uz normalne zahtjeve sigurnosti da naboj iznosi 50 As, a pri strožim zahtjevima sigurnosti možemo uzeti da će naboj Q iznositi 300 As. Katodni pad

napona pri dodiru glave kanala groma s vrhom gromobrana uzimamo da iznosi svega nekih desetak volti. Osim toga udar groma vrlo kratko traje, pa i pretvorena energija W vrlo je mala. Oštećenja su na mjestu udara zato relativno malena, pa je zato teško u prirodi naći točno mjesto gdje je grom udario.



Sl. 1.14. Pretvorba energije na mjestu udara ovisno o količini naboja Q



Sl. 1.15. Zagrijavanje vodiča kvadratnim impulsom struje groma $\int i_g^2 dt$

1.7.7. Kvadratni impuls struje groma

Struja groma prolazi najviše metalnim vodičima gromobranske instalacije i ona može te vodiče zagrijati. Zato je potrebno istaknuti još jednu karakterističnu veličinu struje izbijanja, mjerodavnu za zagrijavanje vodiča kuda ona prolazi i za određivanje njihovih presjeka. Tu veličinu nazivamo kvadratnim impulsom struje groma i označujemo je sa $\int i_g^2 dt$. Budući da struja groma prolazi vodičima koji imaju omski otpor i za koji pretpostavljamo da je konstantan, energija koja se potroši na tom vodiču bit će jednaka umnošku kvadratnog impulsa struje groma s otporom tog vodiča, pa ona iznosi:

$$W = R \cdot \int i_g^2 \cdot dt \quad (Ws). \quad (1.4)$$

Tu je R otpor vodiča u Ω , a i_g je trenutna vrijednost struje groma u (A) (sl. 1.15).

1.7.8. Rekapitulacija

Da bismo se mogli dobro zaštititi od groma, moramo dobro poznavati njegova fizikalna svojstva i način na koji se ta fizikalna svojstva pokazuju u prirodi na nekim objektima pa i u laboratorijima. Dakle, općenito rečeno, moramo dobro poznavati djelovanje groma. Međutim, djelovanja i posljedice udara munje veoma su složene i može se doći do pogrešnih zaključaka ako nema podataka koji su dobiveni mjerenjem u prirodi i na drugim objektima ili ako ih nismo u mogućnosti utvrditi u laboratorijima. Zato je od izuzetne važnosti prikupiti ili dobiti sredene podatke koji nam omogućuju da ocijenimo djelovanje struje groma kako bismo izračunali zaštitu. Najvažniji podaci su: tjemena vrijednost struje

groma $\hat{i}_g$ (kA), naboj Q (As), strmina struje s (kA/ μ s), kvadratni impuls struje groma $\int i^2 \cdot dt$ u (As²), trajanje struje groma u (s) i valni otpor kanala u (Ω), te broj izbijanja.

Od svih mogućih vrijednosti koje mogu poprimiti spomenute karakteristične veličine struje groma, u tablici 1.1. navedene su samo one što se najčešće upotrebljavaju u grubim proračunima i na mnogim se mjestima susreću u literaturi. One služe za grubu orijentaciju i usporedbu. Iz njih se daje zaključiti što nas sve očekuje na tlu pri udarima groma. Ako se iz tablice 1.1. npr. odlučimo pri proračunima za tjemenu vrijednost struje groma od 26 kA, moramo računati na to da ona u 50% svih udara groma zna biti veća od 26 kA, odnosno da tjemena vrijednost od 26 kA može biti premašena. Tjemena vrijednost pak struje od 180 kA može biti premašena samo u 1% svih udara groma, a ostali će udari imati manju tjemenu vrijednost itd. Tako su redom sređene i ostale karakteristične vrijednosti.

Tablica 1.1. Karakteristične vrijednosti struja groma

Vjerojatnost prekoračenja	Tjemena vrijednost	Naboj	Strmina	Kvadratni impuls struje	Trajanje
P%	$\hat{i}_g$ (kA)	Q (As)	(kA/ μ s)	(kA ²)	(s)
50	26	9	48	0,54	0,09
10	73	69	54	1,5	0,56
1	180	330	97	35	2,7

O pažljivom odabiru ovih veličina u proračunu ovisi sigurnost zaštite i njezina ekonomičnost. No o zaštiti svakog objekta treba posebno odlučivati, a podaci se mogu uzimati još detaljnije.

Od svih mogućih vrijednosti koje mogu poprimiti te karakteristične veličine struje, dobro je ovdje ipak istaknuti da se za praktičke proračune računa sa srednjim vrijednostima ili s visokim vrijednostima karakterističnih veličina. Prve su navedene u prvom redu, a druge u trećem redu tablice 1.1.

1.8. Struja munje kao narinuta udarna struja

Da bismo bolje razumjeli, odnosno točnije procijenili kako se munja kreće i razvija između oblaka i zemlje, trebalo je taj put munje pokušati predložiti nekom električnom shemom. U toku istraživanja ove problematike takvih je pokušaja bilo više. Nešto što je svim tim različitim nadomjesnim shemama zajedničko i što ih na neki način karakterizira jest činjenica da između zemlje i oblaka vlada prije udara jako električno polje. Zato sve te sheme kao zamjenu za to polje imaju jedan ili više nabijenih kondenzatora koji služe kao izvori takve struje.

Prvu takvu shemu vidimo na slici 1.16, a predložio ju je 1926. godine R. Rüdemberg. Na toj shemi kondenzator C , kao izvor struje, napaja

Sl. 1.16. Nadomjesna shema puta prilikom izbijanja

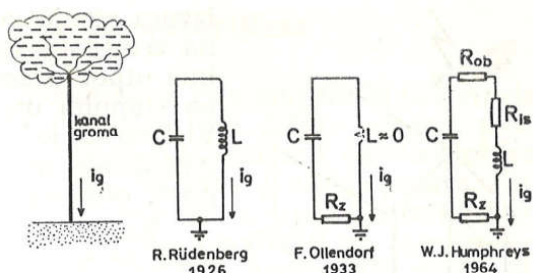
induktivitet L kojim se struja munje probija od oblaka prema tlu. Međutim, tako zamišljeni strujni krug stvarao bi neprigušene titraje.

Poslije se, mjereći atmosferske prenapone na nadzemnim vodovima, utvrdilo da se struja munje zapravo sastoji od prigušenih aperiodskih titraja. Nešto ih je moralo prema tome na njihovu putu prigušivati.

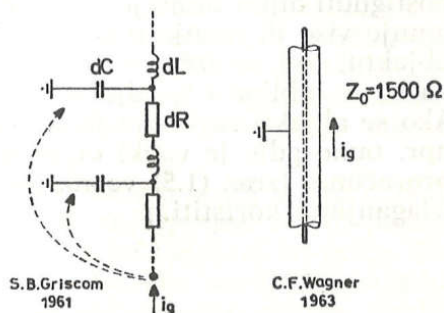
To prigušenje struje munje F. Ollendorf 1933. godine tumači utjecajem otpora uzemljenja pogođenog objekta. Njegova nadomjesna shema puta munje daje značenje otporu uzemljenja R_z koji se toj struji suprotstavlja.

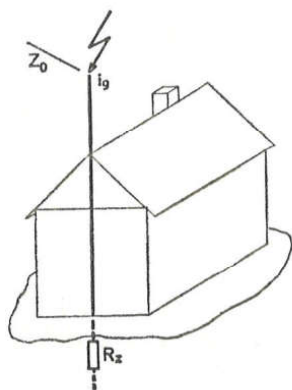
Još potpunija objašnjenja za prigušenje struje groma daje svojom nadomjesnom shemom W. J. Humphreys 1964. godine. On osim otpora uzemljenja R_z uzima da se struji munje suprotstavlja i otpor oblaka R_{ob} i otpor puta kojim prolazi vidljiva iskra R_{is} .

Potpunije nadomjesne sheme pojavile su se šezdesetih godina ovog stoljeća (sl. 1.17). One nam prikazuju kako ide s vremenom prodor glavnog izbijanja, odnosno glavni udar, koji dolazi iz točke na zemlji, a ne iz oblaka, i ide u nabijeni prostor nadomješten nekim vodičem. Dakle, promatra se obrnuto. S. B. Griscom je to nabito stanje vodilice prikazao na jednome diferencijalnom dijelu sheme pomoću kapaciteta dC , zatim put iskre pomoću otpora dR i induktiviteta dL . Konačnu idealnu shemu ili ekvivalentnu shemu kretanja struje groma dao je i C. F. Wagner 1963. godine na približno točan i za praksu upotrebljiv način, uzimajući veliki otpor vodilice kao unutrašnji otpor izvora struje groma. To je bilo moguće učiniti jer elementi L i C vodilice formiraju četverpol. Za tu vrijednost unutrašnjeg otpora izvora struje munje, odnosno za njegov valni otpor, bilo je mnogo proračuna i procjena, ali izgleda da se u novije vrijeme prihvaća procjena da taj valni otpor iznosi oko 1500Ω , a označava se u literaturi obično sa z_0 . Međutim, o vrijednosti tog otpora ima još mnogo dilema, pa neki autori uzimaju tu vrijednost mnogo manju, npr. 600Ω i 400Ω itd. Ako struja munje pri udaru naiđe na znatno manje otpore nego je valni otpor njezina izvora, onda se ona neće mnogo promijeniti i možemo tad uzeti da je ta struja tome pogođenom objektu na neki način utisnuta ili narinuta. U praksi zaista otpori uzemljenja u najvećem broju pogođenih objekata i jesu mnogo manji od valnog otpora



Sl. 1.17. Nadomjesna shema valnog otpora prilikom izbijanja





Sl. 1.18. Udar groma u zgradu

kombinaciji otpora uzemljenja R_z i valnog otpora Z_0 izvora struje groma, pa imamo:

izvora struje udara. Tako neka kuća, sagrađena na zemljištu specifičnog otpora tla od 100Ω m, ima otpor uzemljenja $R_z = 33 \Omega$ ako je uzemljena štapnim uzemljivačem duljine 3 m (sl. 1.18). Vidimo da je u tome praktičkom primjeru otpor pogođenog objekta mnogo manji od valnog otpora, odnosno od unutarnjeg otpora z_0 izvora.

Kada bismo htjeli točnije računati ove odnose, tada bi bilo potrebno prema dosadašnjim izlaganjima otpor uzemljenja R_z pogođene zgrade shvatiti kao otpor paralelno priključen valnom otporu Z_0 izvora struje. A znamo iz osnova elektrotehnike da je pad napona u bilo kojoj paralelnoj grani jednak padu napona na ukupnoj kombinaciji. Zato ćemo u našem slučaju napisati da je pad napona na otporu uzemljenja pogođene zgrade jednak padu napona na paralelnoj

$$i R_z = i_g \frac{R_z \cdot Z_0}{Z_0 + R_z} \quad \text{ili} \quad i = i_g \frac{Z_0}{Z_0 + R_z}. \quad (1.5)$$

Odatle dalje izlazi da će za malu vrijednost otpora uzemljenja R_z prema Z_0 ($R_z \ll Z_0$) struja kroz otpor uzemljenja biti približno jednaka struji groma ($i \approx i_g$).

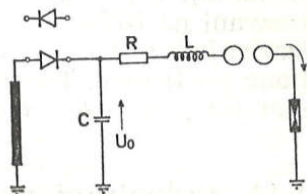
U našem primjeru, gdje smo uzeli da je $R_z = 33 \Omega$ i $Z_0 = 1500 \Omega$ uz pretpostavku da je došlo do udara strujom $i_g = 100$ kA, prema izrazu (1.5) kroz otpor bi uzemljenja protjecala struja od 97,8 kA. Kad bi otpor uzemljenja bio veći, tada se veći dio struje groma ne bi kretao našom instalacijom, nego drugim putovima kroz zgradu, što ne bi bilo dobro. Prema tome, struja se munje kod dobro uzemljene zgrade praktički ne mijenja. Tu pretpostavku tad možemo uzeti kao osnovu za dimenzioniranje zaštite, npr. prilikom određivanja presjeka vodiča, otpora uzemljenja itd. Dalje, podatke o struji groma, odnosno njezine dinamičke karakteristike koje su nam na raspolaganju, možemo uzeti uvijek kao temelj kad računamo zaštitu i različitih objekata, naravno ako su takvi objekti slično ili jednako građeni i nalaze se u istim ili sličnim prilikama s obzirom na postignuti otpor uzemljenja R_z . Pa kad smo već rekli da je veličina struje munje više ili manje u praktičkim slučajevima neovisna o pogođenom objektu, tad se izravno možemo, bez proračunavanja, osloniti na podatke iz tablice 1.1, gdje su gornje granične vrijednosti struje groma. Ako se objekti razlikuju jedan od drugoga i u specijalnim okolnostima, npr. tamo gdje je veliki otpor uzemljenja, potrebno je oprezno obaviti proračune. Izraz (1.5) veoma je važan, pa ćemo se njime i u daljnjim izlaganjima koristiti.

1.9. Proizvodnja struje munje u laboratorijima

Prirodne pojave nije uvijek lako oponašati. Posebno što se tiče struje groma. To su pojave koje se zbivaju u atmosferi, daleko od nas, naše kontrole, na vrlo dugom putu, čak od nekoliko kilometara. Sve to otežava da se u laboratorijima simulira i proizvede jednaka ili slična pojava. No, budući da je za zaštitu od groma mjerodavna ona struja koja teče pogodnim objektom, to ćemo se u laboratorijima ograničiti na simulaciju, odnosno proizvodnju tih struja, dakle, kako smo prije rekli, narinutih struja. U laboratoriju možda neće trebati proizvesti struje kakve se pojavljuju baš na pogodnim objektima, nego će se moći na osnovi slabijih proizvedenih struja katkad zaključiti o ponašanju jakih struja munje. Za proizvodnju i oponašanje struja služe udarni strujni generatori.

Električna shema jednoga udarnog strujnog generatora prikazana je na slici 1.19.

Djelovanje udarnoga strujnog generatora sastoji se u tome da se imitira stvarni način nastajanja struje munje u prirodi. Iz sheme zapažamo da se počinje izbijanjem jedne nabijene kondenzatorske baterije prethodno nabijene na neki napon U_0 . To se izbijanje energije usmjeruje prema nekom objektu koji želimo ispitati. Prije izbijanja podesimo induktivitet L i omski otpor R tako da na ispitivanom objektu dobijemo željeni oblik struje. Izbijanje počnemo približavanjem iskrišta. Veličina otpora R mora biti tako odabrana da ne nastanu titrajuće struje, nego baš jednopolne, slične struji groma.



Sl. 1.19. Shema generatora udarnih struja

1.10. Električna i magnetska polja

Popratne pojave pri nastajanju, kretanju i udaru munje su električna i magnetska polja. One su nam, s jedne strane, dobro došle i mogu nam koristiti kad istražujemo osobine munje, a, s druge strane, mogu nam nanijeti štete.

Električna i magnetska polja dobro su došla zato što omogućuju da na izvjesnoj udaljenosti od puta kojim se kreće struja munje doznamo neke njezine karakteristike. Na primjer, prema izmjerenoj veličini jakosti električnog polja zaključujemo o vremenu početka i načinu nastanka izbijanja ili npr. na osnovi izmjerene veličine magnetske indukcije, odnosno remanencije na metalnim dijelovima, spoznajemo jakost struje.

Djelovanje jednog ili drugog polja ovisi o tome u kojoj je fazi razvoj munje. U fazi nastajanja munje i njezina kretanja prema zemlji pojavljuje se na tlu isto takvom brzinom sve jače i jače električno polje. To traje sve dotle dok glava predvodnika groma dotakne zemlju, a onda to polje naglo oslabi. Ono se može ponovno pojaviti ako prema zemlji

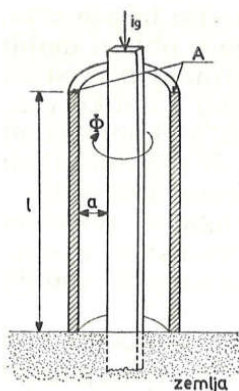
treba da dođe kroz isti kanal do ponovnog udara. Dodirom munje i zemlje nestaje električno polje, a ostaje samo pad napona u kanalu munje, koji iznosi oko 10 000 V/m. Tih nekoliko trenutaka teče struja koja oko sebe stvara magnetsko polje, što magnetskom indukcijom djeluje na metalne dijelove u blizini protjecanja struje. Magnetizirajućim djelovanjem tog polja koristimo se za mjerenje jakosti struje (magnetski štapići) ili pokretanje nekoga magnetskog releja za brojanje udara munje. Pri tome valja spomenuti da iz kanala kroz koji teku jake struje velikih promjena zrači jako magnetsko polje velike valne duljine; ono se vrlo oslabljeno osjeća i na udaljenosti od 1 000 km. Električno polje koje se pojavljuje pri nastajanju i kretanju predvodnika izbijanja, influencijom izaziva na metalnim dijelovima na zemlji naboj polariteta suprotna onome u glavi predvodnika. Takvi naboji, ako se pojave na izloženim mjestima kao što su to metalni šiljci, stabla, sljemena krovova zgrada, mogu izazvati, kako smo vidjeli, tinjavo izbijanje. Ako na tome ostane i završi se samo svjetlosnim efektima, ne treba se posebno zabrinjavati. Ali kad se naboji oslobode te veze pri udaru munje u zemlju, pa ako su bili izazvani na izoliranim metalnim predmetima, onda se oni neutraliziraju izazivajući preskoke iskrom koja u stanovitim okolnostima izaziva neželjene posljedice. To bi bile loše strane popratnih pojava. Zato svi takvi metalni predmeti moraju biti povezani s gromobranskom instalacijom.

1.11. Inducirani naponi

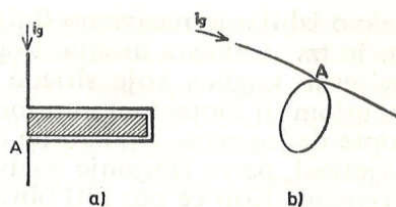
Struja munje koja teče svojim kanalom ili nekim drugim vodičem izaziva jače ili slabije magnetsko polje, već prema tome koje je ona jačine, odnosno kolika je njezina amplituda. Na to smo se u prethodnim izlaganjima već osvrnuli.

Međutim, ne valja zaboraviti da takva struja mijenja svoj oblik, pa će se u okolišu puta što njime protječe pojavljivati i magnetsko polje koje će biti promjenljivo. Posebno se ono brzo mijenja kad nailazi čelo strujnog vala, ponekad velike strmine. Posljedice brzog mijenjanja magnetskog polja su inducirani naponi koji mogu nastati u bilo kako kombiniranim metalnim zamkama što to promjenljivo magnetsko polje obuhvaćaju. Takvi se naponi uspostavljaju i u zamkama udaljenima od puta kojim teče struja munje. Tako se oni mogu pojaviti na dalekovodu ako na nekoj udaljenosti od njega teče struja svojim kanalom. Zatvorenu zamku u tom slučaju čine vodiči dalekovoda sa zemljom, pa kroz tu zamku tad prolazi promjenljivo magnetsko polje. Takvi su naponi relativno mali, a opasnost je za dalekovod neznatna zbog njegove dobre izolacije. Inducirani su prenaponi mnogo veći i opasniji ako su zamke u kojima se oni pojavljuju sasvim blizu kanala ili drugog vodiča kojim teče struja munje.

Na primjer, neka struja munje i_g protječe nekim gromobranskim odvodom i neka u blizini na udaljenosti »a« bude jedan drugi uzemljeni paralelni vodič polumjera r i duljine l , kao što je to prikazano na slici 1.20. Tad će se u zamci koju stvara dio gromobranskog odvoda i njemu bliži uzemljeni vodič, inducirati napon. Taj napon možemo mjeriti u točkama A, a izračunat ćemo ga prema približnom izrazu:



Sl. 1.20. Primjer induciranja napona zbog prolaska struje groma



Sl. 1.21. Zamke koje stvaraju gromobranski odvodi i zavoji u transformatorima

$$U = \frac{\mu_0}{2\pi} l \frac{di_g}{dt} \ln \frac{a}{r}. \quad (1.6)$$

U praksi su tako blizi vodiči koji oblikuju zamke vrlo česti. Jedan takav primjer stvaranja zamke nastaje kad gromobranski odvod koji provodi struju postavimo u zaštitnu okruglu cijev. Stvaranje takvih zamki vrlo je često kod zgrada građenih od armiranog betona. Zamke se ne moraju stvoriti samo na ovaj način, tj. približavanjem drugih vodiča onome kojim teče struja groma. Nekakvu zamku još može oblikovati i sam gromobranski odvod, zatim zavoji transformatora, releja itd. (sl. 1.21.a,b). U tim zamkama nastaju također visoki naponi zbog samoindukcije izazvane promjenljivim magnetskim poljem. Razmaci u točki A mogu biti kritični s obzirom na moguće preskoke. Zato oni ne smiju biti manji od približno 1/20 duljine cijele zamke. O tim će slučajevima biti još potanje riječi.

Primjer 1.1.

Zaštitna cijev duljine 2 m i unutrašnjeg polumjera od 4 cm obuhvaća dio gromobranskog odvoda promjera $d = 8 \text{ mm}$. Koliki će se napon pojaviti između gromobranskog odvoda i zaštitne cijevi u točki A? Neka strmina struje groma bude $30 \text{ kA}/\mu\text{s}$.

Rješenje:

$$U = \frac{\mu_0}{2\pi} l \cdot \frac{di_g}{dt} \ln \frac{a}{r} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot 2 \cdot \frac{30 \cdot 10^3}{10^{-6}} \ln \frac{0,04}{0,004} = 27,6 \text{ kV}.$$

1.12. Optičko djelovanje

Prema svjetlosnim učincima što ih izaziva atmosfersko izbijanje udomaćilo se munji pridavati različite narodne nazive. Tako, ako je izbijanje vidljivo našem oku u obliku jedne crte koja se u blizini tla grana, onda

takvo izbijanje nazivamo linijskom munjom, a ako ima više takvih crta, to je tzv. trakasta munja. Događa se da izbijanja vidimo u obliku malih svijetlih kuglica koje slijede jedna za drugom. To nazivamo perlantom munjom ili loptastom munjom ukoliko to izbijanje vidimo u obliku veće lopte dužeg repa. Katkad ne čujemo nikakvu grmljavinu, a vidimo samo svjetlost, pa to izbijanje nazivamo munjom sijevalicom ili svjetlucanjem vremena. Koji će put biti obrnuto: čujemo samo grmljavinu, a ne vidim svjetlost, pa je to tzv. tamna munja. Svjetlost munje nam se ponekad čini da »titra«, a to se događa onda kad u kratkim vremenskim razmacima od nekoliko stotinki sekunde prolazi nekoliko uzastopnih munja istim kanalom.

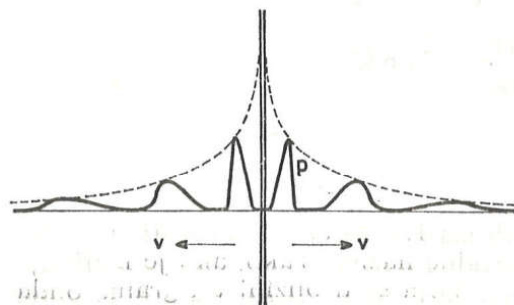
Danas, kad su fizikalna svojstva munje više ili manje istražena, možemo reći da su njezini svjetlosni učinci zapravo zračenje vruće plazme od cca 3 000 °C. Ti svjetlosni učinci atmosferskog izbijanja, koji su dostupni čovječjem oku, mogu navesti na pogrešne zaključke o obliku putanje munje i o njezinim pravim dimenzijama. Tek razvoj fotografije omogućio je da doznamo nešto više o tome. Snimajući munju ustanovilo se da je njezin svjetlosni promjer od 5 do 30 cm, ovisno o tome kakav smo film i ekspoziciju imali, a struja je munje koncentrirana na svega 1 mm promjera, kako je to laboratorijskim ispitivanjima utvrđeno.

1.13. Akustičko djelovanje — zračni tlak

U kanalu kojim teče struja izbijanja vlada visoka temperatura i visoki tlak pod kojim se nalazi vodljiva plazma. To stanje traje dok kanalom teče struja. Čim prestane teći struja koja je silama vlastitoga magnetskog polja bila sabijena na vrlo mali presjek, oslobađa se tlak plazme i širi se radijalno prema vani. Taj sada zračni tlak djeluje na naše uho i mi govorimo da čujemo grmljavinu. Ne razumijevajući pojavu grmljavine i bljeska dokraja, čovjek joj je u prošlosti, kako smo već spomenuli, pridavao i božansko porijeklo. Tako je stari germanski bog Donar sa svojim batom bio utjelovljenje grmljavine.

Tlačni val se giba. Najviši je tlak u samoj blizini, nekoliko centimetara od kanala munje, zatim se na nekoj udaljenosti on naglo smanjuje. Grmljavinu, koja je akustički učinak tog tlaka, čujemo na izvjesnoj udaljenosti od udara munje kao prasak uz tutnjavu, a ako smo još udaljeniji, čujemo je kao neku buku. Na udaljenosti već od 10 km ne čujemo od te pojave ništa. Ako bismo se nalazili sasvim blizu udara

munje u zemlju, moglo bi nam se dogoditi da, zbog visokog tlaka koji vlada u toj zoni, izgubimo svaki osjećaj za ta zbivanja u toj pojavi.



Sl. 1.22. Cilindrični tlačni valjak kod radijalnog širenja

Na slici 1.22. prikazan je tlačni val u gibanju, odnosno njegove amplitude na različitim udaljenostima od njegova izvora (kanala munje).

Da bi se bolje ocijenilo djelovanje zračnog tlaka pri udaru munje, u tablici 1.2. navedeni su podaci iz literature dobiveni laboratorijskim ispitivanjima uz pretpostavku da je kanalom tekla struja od 48 kA.

Tu su navedene prosječne vrijednosti tlaka p i brzine kretanja vala v na određenoj udaljenosti od kanala munje.

Tablica 1.2.

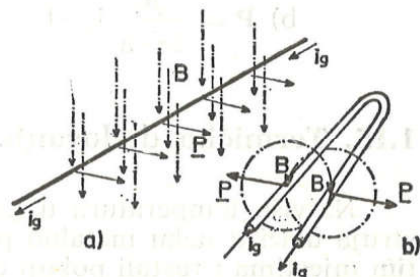
$i = 48 \text{ kA}$	r	0,15	0,5	1	5	m
	p	7	1,3	0,5	0,06	bar
	v	510	420	380	350	m/s

Rezultati pokazuju kako relativno vrlo brzo opadaju tlak vala p i njegova brzina v već na nekoliko metara od kanala munje.

1.14. Mehaničko djelovanje

Opazilo se da grom osim akustičkog i optičkog u prirodi ima i mehaničko djelovanje. Naime, utvrđeno je da je udar munje znao oštetiti dijelove zgrade, npr. dimnjak, ili razoriti stablo, mali drveni stup itd. Ali ne samo to. Još se opazilo da su se nakon prolaska struje munje kroz neke vodiče oni izobličili, posebno onda kad su bili ispunjeni stanoviti uvjeti smjera protjecanja struje. Znači, kad raspravljamo o struji munje, možemo govoriti i o nekoj sili koja je u stanju obaviti mehaničko djelovanje, npr. razarati ili deformirati itd. Utvrđeno je, dalje, da se ta sila pojavljuje na dva načina. Prvi, koji izaziva mehaničku silu, već smo opisali i tu smo silu shvatili kao tlak na naše uho kad kažemo da čujemo grmljavinu. Međutim, taj tlak postaje mnogo jači kad se cijela ta pojava zbiva u zatvorenom prostoru, a ne u zraku. Tako, ako struja munje prolazi kroz pukotine u zidu neke kuće, pa osobito ako su te pukotine vlažne, onda tlak u njima toliko naraste da ga stijenke zida ne mogu izdržati i nastupa oštećenje. Posebno se ta pojava očituje kad struja munje prolazi kroz kapilare nekog stabla ili drvenog stupa. Tada će, što se često i događa, doći do rasprsnuća stabla ili stupa.

Na drugi način djelovanja mehaničkih sila nailazimo onda kad struja munje prolazi nekim magnetskim poljem i reže njegove silnice (slika 1.23.a). To se događa npr. ako struja munje teče nekim vodičem, a on se



Sl. 1.23. Elektrodinamičke sile: a) vodič u homogenom polju; b) dva paralelna vodiča u međusobnom polju

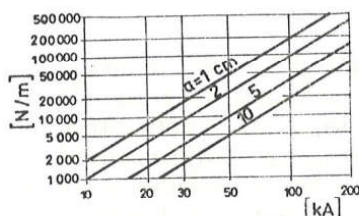
nalazi u magnetskom polju Zemlje. To se rijetko susreće, a i nije tako značajno jer je Zemljino magnetsko polje maleno pa su i sile koje nastaju male, a računale bi se prema izrazu $P = B \cdot i_g \cdot l$ (P je sila, B magnetska indukcija, i_g jačina struje groma, l duljina vodiča koji je potjecan strujom).

Mnogo se jače sile uspostavljaju pod utjecajem magnetskog polja koje je u nekoj petlji stvorila sama struja munje (sl. 1.23.b), odnosno pod utjecajem vlastitoga magnetskog polja.

Ta je sila jača, pa uz određeni razmak a između vodiča zamke i duljine l ona će biti proporcionalna čak kvadratu struje munje, pa je možemo izraziti formulom:

$$P = \frac{\mu_0}{2\pi a} i_g^2 l. \quad (1.7)$$

Ako u vodičima koji čine zamku struja protječe istim smjerom, onda njih ta izazvana sila privlači jednoga prema drugome. A ako tim vodičima teče struja različitim smjerovima, ta će ih sila udaljavati.



Sl. 1.24. Poprečne sile na paralelne vodiče

Uglavnom, sve mehaničke deformacije električnih instalacija ili aparata kroz koje je tekla struja munje nastaju zbog elektrodinamičkih sila. Da bi se dobio uvid kolika je njihova veličina po jedinici duljine vodiča, na slici 1.24. grafički je prikazana veličina te sile ovisno o struji munje za različite razmake vodiča »a«.

Primjer 1.2.

Valja izračunati silu po jedinici duljine kojom se dva paralelna vodiča neke zamke gromobranskog odvoda protjecanoga strujom groma $i_g = 100$ kA, odbijaju jedan od drugoga. Račun treba provesti jedanput uz pretpostavku da je razmak između njih $a = 10$ cm, a drugi put $a = 2$ cm.

Rješenje:

$$a) P = \frac{\mu_0}{2\pi \cdot a} i_g^2 \cdot l = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi \cdot 0,1} \cdot (10^5)^2 \cdot 1 = 2 \cdot 10^4 \text{ N/m};$$

$$b) P = \frac{\mu_0}{2\pi \cdot a} i_g^2 \cdot l = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi \cdot 0,02} \cdot (10^5)^2 \cdot 1 = 10^5 \text{ N/m}.$$

1.15. Termičko djelovanje

Najviša temperatura u kanalu groma postizava se na mjestu gdje struja ulazi u neku metalnu površinu, dakle na dnu kanala. Zato se na tim mjestima i rastali pokoji centimetar kvadratni metalne površine. Ali

to je tako malo da promjer tih rastaljenih dijelova površine ne iznosi više od 5 do 20 mm. Zato je te rupice i teško pronaći u prirodi ili na bilo kojem drugom mjestu koje nije posebno promatrano. To se tumači time što najveći dio energije munje prelazi zračenjem i pretlakom u okolinu, a manji se dio potroši na zagrijavanje i rastaljivanje metalne površine. Negdje taj potrošak energije na površini iznosi za srednje munje 150 Ws, a za jače munje najviše do 7 000 Ws. Može se računati da će jaka munja propaliti rupu promjera od 20 mm u čeličnom limu debljine 0,5 mm.

Kod ovoga termičkog djelovanja munje, odnosno pri taljenju materijala bilo površine ili vodiča, nastaju visoki tlakovi pa su zbog toga moguća i mehanička razaranja, posebno ako su te staze (vodiči) kojima teče struja u zidovima zgrada. Eventualni požari i eksplozije mogu se protumačiti kao posljedica iskrenja metalnih dijelova na mjestima gdje ulazi ili izlazi struja, ili su rezultati jakog zagrijavanja na mjestima gdje struja groma naiđe na veliki prijelazni otpor zbog lošeg kontakta ili drugih razloga.

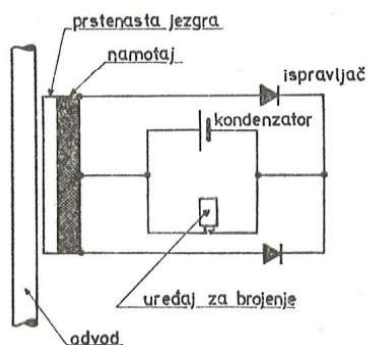
Vrlo se često protjecanje struje munje poslije udara nastavlja kroz zemlju. Pa budući da struja munje proizvodi toplinu, poslije prestanka strujanja nailazimo na izgorjeli pijesak cjevasta oblika. To su tzv. fuluriti.

2. Glavni elementi zaštite od groma

2.1. Opasnosti za zgrade i ostale objekte

Da bismo mogli ocijeniti opseg ugrožavanja zgrada ili nekih drugih objekata na zemlji što nastaju zbog udara groma, bilo bi najidealnije za to imati podatke. Zatim, dobro bi bilo znati počinjenu štetu takvim udarima i, eventualno, broj nastradalih u tim prilikama. Međutim, potonjih podataka o tome zasad u tolikoj mjeri nema. Zato se u posljednje vrijeme nastoji izbrojiti broj udara groma u različite zgrade, tornjeve, RTV-odašiljače i druge objekte.

U tu je svrhu konstruiran posebni brojač koji se uključuje u gromobranski odvod neke instalacije. On je tako izveden da može izmjeriti struje munje od 250 A do 100 kA tjemene vrijednosti. Takav uređaj prikazan je na slici 2.1, a djeluje tako da struja groma prolazeći odvodom magnetizira prstenastu jezgru, pa se u namotu inducira napon i prenosi se na krug sastavljen od jednog kondenzatora i brojila, međusobno paralelno povezanih. Kondenzator prikuplja naboje i polako se prazni preko brojila, koje se tad okrene i pokazuje novi broj. Inducirani napon tjera struju kroz jedan ili drugi ispravljač već prema tome kojeg je polariteta bila struja groma što je prošla odvodom. Zato i jesu dva ispravljača. Kad se budu mogla ugraditi takva brojila u različite objekte na zemlji,



Sl. 2.1. Brojač udara munja

imat ćemo uvid u koju vrstu objekta munja najčešće udara. No i kad doznamo koliki je broj udara munje u neku vrstu građevine, značit će to mnogo, ali još neće biti sve riješeno. Naime, za projektiranje dobre i ekonomične zaštite to nije dovoljno. Potrebni su još i podaci o štetama koje su takvi udari počinili na različitim vrstama zgrada. Tek iz takvih analiza u kojima se uzima u obzir i broj udara i počinjene štete za različite vrste građevina u toku izvsnog vremena, moći će se zaključivati o djelotvornosti i ekonomičnosti neke gromobranske instalacije. Prema istraživanjima u

Bavarskoj (Savezna Republika Njemačka), a na osnovi podataka prikupljenih u sedam godina (1956—1962), može se zaključiti da su u pro-

sjeku poljoprivredne zgrade, posebno one nenaseljene, pretrpjele otprilike deset puta više štete nego ostale zgrade u toku jedne godine.

Još bismo mogli, na osnovi skupljenih podataka u tim krajevima, izvesti neke za praksu korisne zaključke. Tako, očekujemo li da će na svaki km^2 udariti prosječno 5 munja svake godine, pa ako još pretpostavimo da je zgrada u gradu i da zauzima prostor od $1\,000\text{ m}^2$ prosječno, onda možemo očekivati, s obzirom na pretpostavljenu gustoću od 5 gromova u godini, da će u otprilike 200 godina jedna zgrada biti jedanput pogođena munjom. Računajući na sličan način za poljoprivredne zgrade, možemo očekivati da će one biti češće pogođene, svakih 130 godina.

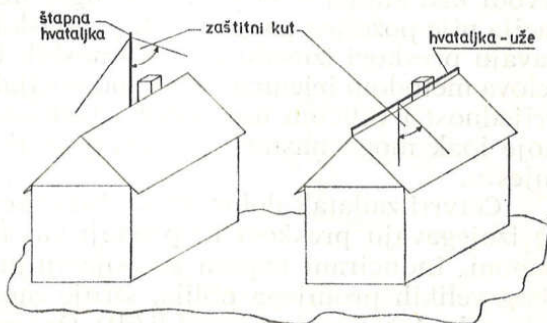
Kad se uzmu u obzir sve munje koje su udarile u zemlju tijekom jednoga dužeg perioda, npr. od nekoliko godina, tad moramo računati da sve munje ne naprave štetu, a da ona nije uvijek jednaka. Tako se, prema podacima iz istog izvora, može zaključiti da prosječno svaka dvadeseta ili trideseta munja počinu neku štetu. Požar izaziva prosječno svaka sedamdeseta munja na nenaseljenim poljoprivrednim zgradama, a kod naseljenih poljoprivrednih zgrada to vrijedi za svaku 280-tu munju. Ostalim zgradama to se događa prilikom udara svake 700-te munje. Podaci koji su prikupljeni u Bavarskoj i iz kojih su izvedeni ovi zaključci mogu, eventualno, vrijediti za područje srednje Evrope.

2.2. Principi zaštitnih mjera za zgrade i ostale objekte

Današnja gromobranska instalacija ima dva osnovna konstrukcijska elementa: hvataljke munje u obliku štapa i hvataljke munje u obliku užeta. Njima je zadatak da preuzmu na sebe izravni udar munje, pa je time neki objekt koji se nalazi ispod njih zaklonjen ili zaštićen. Veličina toga zaštitnog prostora ovisi o veličini prostornoga zaštitnog kuta koji ta dva elementa gromobranske instalacije stvaraju pod sobom (sl. 2.2).

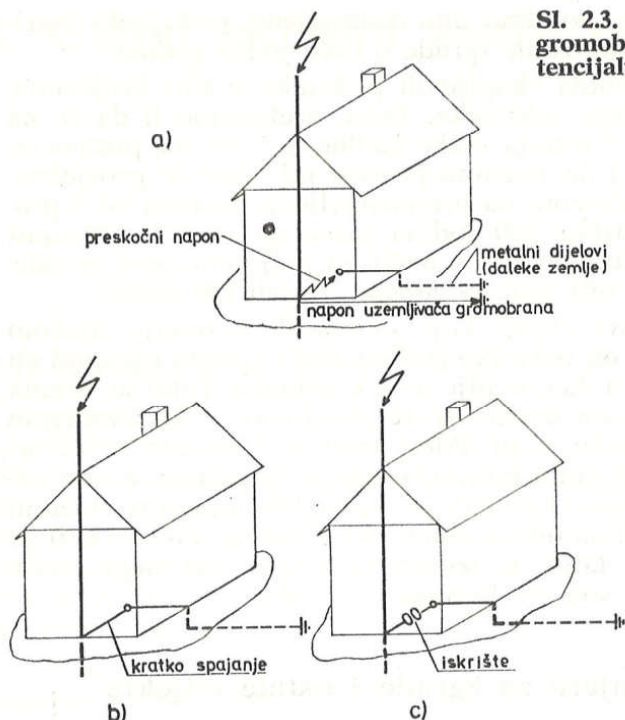
Dakle, to stvaranje zaštitnog prostora, odnosno to zaklanjanje objekta od izravnog udara munje, možemo smatrati prvim i najvažnijim zadatkom gromobranske instalacije.

Drugi je zadatak gromobranskih uređaja da prihvaćenu struju munje odvedu sa zgrade u zemlju kako se ona ne bi drugim putovima kretala kroz zgradu prema tlu. Zato se na zgradu postavlja jedan ili više odvoda. Takvi odvodi tad moraju izdržati toplinsko opterećenje koje stvara struja groma. Zato treba odrediti temperature upotrijebljenih vodiča ovisno o kvadratnom impulsu struje groma (J^2dt).



Sl. 2.2. Uređaji za prihvaćanje struje groma

Sl. 2.3. Sprečavanje preskoka između gromobrana i metalnih vodiča na potencijalu daleke zemlje



vati preskoke na druge metalne dijelove u blizini, a dolaze iz okolišne zemlje za koju računamo općenito da ima potencijal nula. Taj primjer je prikazan na slici 2.3.a, gdje u kuću ulazi npr. neki metalni vodič (vodovodna ili plinska cijev itd.).

To se može izbjeći na dva načina, dakle dvije su mogućnosti. Prvo, ako se to dade izvesti, treba smanjiti otpor uzemljenja na najmanje moguću vrijednost. Tad neće biti na tom otporu većeg pada napona (odnosno produkt $i_g \cdot R_z$ bit će mali), pa neće doći ni do preskoka. Drugo, ako se ne da smanjiti otpor uzemljenja, tad se razlika napona na tom mjestu može izbjeći tako da se međusobno poveže uzemljivač s metalnim dijelovima koji dolaze iz okoline. Takvo spajanje ostalih metalnih dijelova za gromobransku instalaciju nazivamo izjednačavanje potencijala (sl. 2.3.b). Izjednačavanje se dade izvesti i kratkotrajno, pomoću iskrišta. Ono se izvodi kad stalna veza između drugih instalacija i gromobranskih instalacija nije poželjna zbog drugih pogonskih razloga (sl. 2.3.c). Kad se sprečavaju preskoci između gromobranskih instalacija i drugih metalnih dijelova metodom izjednačavanja potencijala, onda redovno nije važno koju vrijednost i veličinu ima otpor uzemljenja R . O eventualnim teškoćama koje ipak mogu nastati pri takvoj vrsti zaštite bit će riječi na drugom mjestu.

Četvrti zadatak dobre gromobranske instalacije sastoji se u tome da se izbjegavaju preskoci ili proboji što ih mogu izazvati tzv. inducirani naponi. Inducirani naponi se pojavljuju u zamkama unutar instalacija zbog velikih promjena oblika struje munje, osobito njezine strmine na čelu vala dane izrazom $s = (di/dt)$. Oni mogu nastati na svim električnim

Treći je, dalje, zadatak gromobranske instalacije da se struja munje, koju su s hvataljki prihvatili odvođi instalacije, odvede nesmetano u zemlju. Zato se kao važan konstrukcijski element gromobranskih uređaja postavljaju uzduž kuće štapni prstenasti uzemljivači. No, kako je poznato, tu mogu nastati različite teškoće zbog toga što tje-mne vrijednosti struje i otpor uzemljenja izazivaju na uzemljivaču pad napona prema dalekoj zemlji (okolišnoj zemlji). Taj pad napona može uzroko-

telefonskim i televizijskim uređajima usprkos tome što je u kući provedeno izjednačavanje potencijala i što su time spriječeni preskoci i opasni dodiri povezano s djelovanjem struja munje.

Prema nekim podacima, u jednoj kvadratičnoj zamci veličine 1 m^2 koja se nalazi tik uz odvod gromobranske instalacije inducirao bi se napon od 100 kV kad bi strmina struje groma što protječe odvodom iznosila $80 \text{ kA}/\mu\text{s}$. Kad bi površina zamke bila veća, kad bi iznosila 2 m^2 , tad bi ista struja u njoj inducirala napon od 150 kV.

Kako se može spriječiti opasno djelovanje ovih induciranih napona? Na slici 2.4. tri su prikladne mjere pomoću kojih se može to postići:

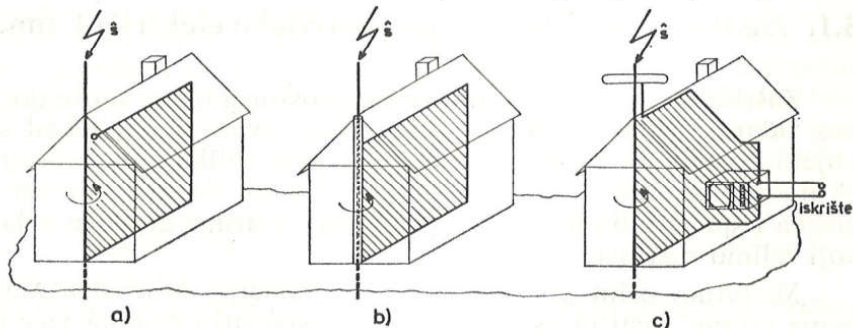
a) Prvo se može preskočni razmak u zamci učiniti tako velikim kako ne bi nastao proboj kroz zrak ili zid. Pri tome valja računati da je električna čvrstoća zida od cigle ili betona puno puta manja od probojne čvrstoće zraka. Dakle, kao prvo, treba razmak na onoj kritičnoj točki učiniti što je moguće većim (sl. 2.4.a).

b) Drugi način kojim sprečavamo preskoke na određenim mjestima sastoji se u tome da upotrijebimo izolaciju veće električne čvrstoće od onih probojnih napona koji će se u petlji inducirati. Takva izolacija može biti od PVC-materijala (sl. 2.4.b).

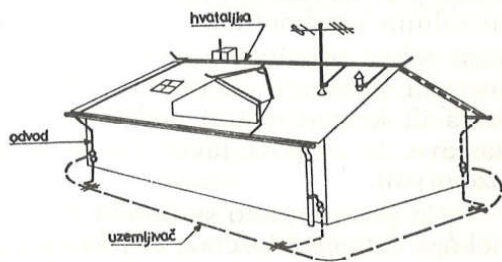
c) Treći način na koji štitimo neki aparat od štetnog djelovanja induciranih napona je ugradnja zaštitnih iskrišta na slabim izolacijskim mjestima, koja se spajaju paralelno s ugroženim aparatima. Tako se može zaštititi televizor (sl. 2.4.c).

Na slici 2.5. gromobranska je instalacija izvedena prema propisima koji vrijede u SR Njemačkoj. Takva instalacija ima hvataljku na sljemenu zgrade, odvod presjeka od 50 mm^2 i prstenasti uzemljivač koji se kod novogradnje polaže u temelje zgrade. Jednom takvom gromobranskom instalacijom bit će s velikom sigurnošću spriječeni požari.

O svim ovim zaštitnim mjerama, na ovom mjestu ukratko iznesenima, o njihovim lošim i dobrim stranama, bit će još potanje napisano.



Sl. 2.4. Sprečavanje preskoka koji nastaju zbog induciranih napona



Sl. 2.5. Obična gromobranska instalacija

3. Zaštićena područja i zagrijavanje vodiča

Kad zaštićujemo neki objekt od udara groma, mora se nastojati da vrsta zaštite koju postavljamo zadovoljava dva osnovna zahtjeva. Prvo je da sistemom zaštite zaklonimo neki objekt od izravnog udara, a drugo da se sistemom zaštite omogući dobar put (električki malog otpora), koji olakšava da struja groma bude lako i brzo odvedena u zemlju. Pri tome se instalacija ne smije zagrijavati, a otpor uzemljenja mora biti malen. Ta su dva osnovna zahtjeva tokom razvoja tehnike zaštite navodila stručnjake da stvore više sistema od kojih je svaki više ili manje dosta dobro štitio neki objekt. Neće biti opisana njihova konstrukcija jer se pretpostavlja da su te konstrukcije poznate, nego će se u ovom poglavlju prikazati samo dobre i slabe strane pojedinog sistema i njihove specifične mogućnosti upotrebe u posebnim uvjetima i u raznim okolnostima.

Dosad su poznate i u upotrebi su dvije vrste zaštite od groma različitih objekata, a to su: zaštita pomoću šipkastog gromobrana (Franklinov gromobran) i zaštita pomoću gromobranske instalacije (Faradayeva krletka). U ovom će se poglavlju osim zaštitnih područja gromobranskih instalacija opisati i problemi zagrijavanja takvih instalacija.

3.1. Zaštićena područja i geometrijsko-električni model

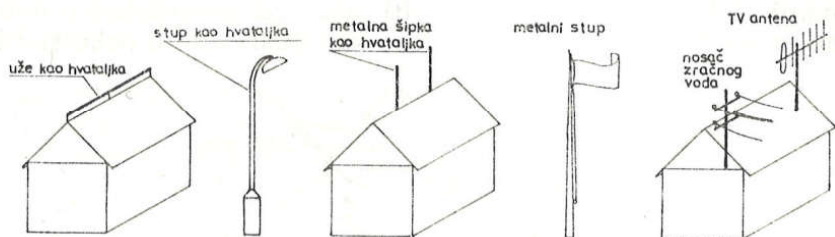
Zaštićenim područjem nazivamo prostor gdje ne može doći do izravnog udara groma. Zaštićeni se prostori stvaraju onda kad se na neki objekt postave gromobranske instalacije u obliku šipkastih gromobrana ili metalnih mreža. Njima je glavni zadatak da prihvate na sebe udar groma i spriječe da ne dođe do izbijanja u druge dijelove nekog objekta koji želimo zaštititi.

Međutim, osim gromobranskih instalacija, koje smatramo hvataljkama groma, zaštitni prostori dadu se ostvariti i drugim jače istaknutim metalnim predmetima i uređajima, kojima nije osnovna svrha da stvaraju takve prostore i time štite neki objekt od izravnog udara. Takvi metalni predmeti ili uređaji su npr. televizijske antene na krovovima kuća ili krovni nosači nadzemnih vodova, pa čak i metalni stjegovi za zastave, te stupovi javne rasvjete, naravno, ako su svi takvi predmeti uzemljeni.

Na primjer, ako se objekt nalazi u blizini nekoga metalnog stupa ili nekoga drugog izloženog objekta koji svojim hvataljkama stvara zaštitno

područje, tad na tom objektu možda neće trebati poduzimati neke posebne mjere zaštite (sl. 3.1).

U ovom poglavlju razmotrit će se kako se određuje veličina zaštićenog područja nekih hvataljki za koje smo unaprijed odredili da nas štite od udara groma. Točnije, u ovom će se poglavlju izložiti metode i način kako se određuje zaštitno područje i zaštitni kut takvih hvataljki. Prošlih desetak godina mnogo se radilo na tim problemima. Izvršena su mnoga teorijska i eksperimentalna istraživanja i više je pretpostavki predloženo stručnjacima iz cijelog svijeta. No čini se ipak da je najveću pažnju privukao način ustanovljivanja zaštićenih prostora pomoću »geometrijsko-električnog modela«. Stručnjaci koji su predložili taj model, nakon dugogodišnjeg opažanja i mjerenja tih pojava na nadzemnim vodovima i tornjevima najbolje su protumačili zaštitno djelovanje zaštitnih užeta i drugih visokih eksponiranih metalnih predmeta i objekata. Teorijske osnove na kojima počiva model otkrivaju nam i razloge za mnoge udare groma u bokove visokih objekata, što dosad nije bilo uvjerljivo rastumačeno. Taj model nam pruža osnovu da možemo matematički određivati zaštitne prostore i kutove bilo kakvih izloženih hvataljki groma.



Sl. 3.1. Neki primjeri hvataljki izravnog udara

Prije nego pridemo izlaganju ovog načina određivanja zaštićenih prostora, potrebno se prisjetiti svih onih bitnih fizikalnih zbivanja koja se pojavljuju prilikom udara groma. Ona su, doduše, opširno i u prošlim razmatranjima prikazana, ali ih je ovdje dobro ponovno istaknuti onoliko koliko je potrebno da bi teorijska osnova »geometrijsko-električnog modela« bila razumljivija i da bi se logično moglo opravdati izvođenje i računanje zaštićenih prostora i zaštitnih kutova. Potrebno je, osim toga, ovdje iznijeti ne samo dosad poznata fizikalna zbivanja pri udaru nego i neke novine iz te problematike. Jer, baš se na tim novijim ispitivanjima osniva teorija geometrijsko-električnog modela.

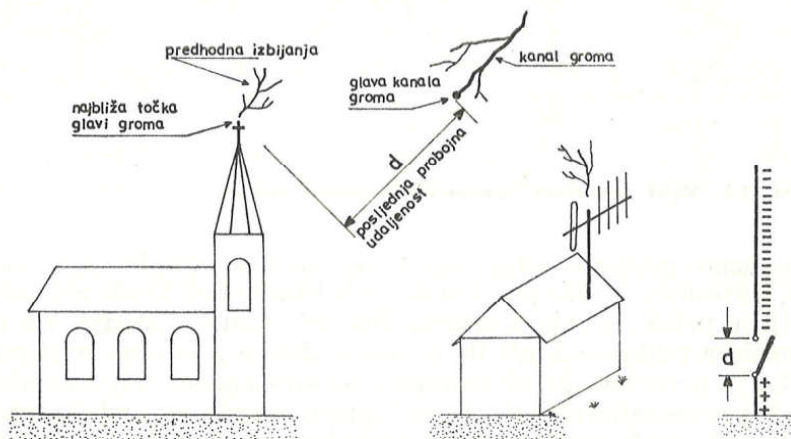
Budući da je ovdje riječ o razmatranju zaštićenih područja, promoviramo samo kako se pojave kreću onih nekoliko posljednjih trenutaka prije dodira glave groma sa zemljom.

Vidjeli smo u prethodnim razmatranjima da je put kojim se probija naboj prema zemlji ionizirani kanal. Taj naboj u kanalu može biti pozitivan ili negativan, već prema tome dolazi li do izbijanja negativnih ili pozitivnih oblaka. Pretežno se izbijaju negativni oblaci i to se u krajevima s umjerenom klimom događa u 80 do 90% slučajeva.

Kad se naboj ioniziranom vodilicom probija prema tlu, tad na površini zemlje naglo raste vrijednost električnog polja, koji put čak do

500 kV/m. To na zemlji ili, bolje, na nekome istaknutom objektu može izazvati prethodna ili tinjava izbijanja (sl. 3.2).

Takav tok događaja stvara dobre uvjete da u jednom trenutku iz neke udaljenosti r nastupi proboj između kanala groma i bilo koje najbliže točke na nekom objektu. Tu udaljenost nazivamo posljednjom dužinom probojne staze ili posljednjim probojnim razmakom. Električno polje koje je nekoliko trenutaka prije bilo vrlo jako, u tom trenutku dodira naglo slabi. Ali energija je neuništiva, pa će zato u tom trenutku nastati jako strujanje naboja iz zemlje u kanal. Prije kontakta s tlom, na površini zemlje i sa šipkastim gromobranom postojao je samo točkasti mirni naboj, a sada se taj naboj kreće i spaja s nabojem koji je stigao vodilicom groma. To je strujanje jače ili slabije pa zato govorimo o jačim ili slabijim strujama groma. Ako tako predočimo udar groma i ako utvrdimo, mjerenjem ili računanjem, veličinu struje koje teku pogođenim objektom i ustanovimo li veličinu razmaka r iz kojega je nastao udar groma u neki objekt, tad možemo predvidjeti i efikasnu zaštitu protiv tih struja. Zato je važno dobro uočiti dvije osobine tih zbivanja. Prva se sastoji u tome da je struja koja teče pogođenim objektom u kanal groma veća što je naboj u glavi groma bio veći i što je otpor tog objekta bio manji. Tako će uzlazna struja biti jača kad grom udari u dobro uzemljenu gromobransku instalaciju nego kad udari npr. u neko stablo.



Sl. 3.2. Udar groma iz određene probojne udaljenosti r

Druga vrlo važna osobina tih zbivanja u posljednjih nekoliko trenutaka sastoji se u tome što je prije udara električno polje na tlu bilo puno jače ako je naboj u glavi kanala groma bio veći. Ali u tim trenucima jakost električnog polja na zemlji ne ovisi samo o veličini naboja u glavi kanala groma nego što je još važnije, ona ovisi o udaljenosti r glave groma od tla ili objekta na koje je usmjeren udar.

Iz ovog izlaganja vidimo da su prilikom udara međusobno povezane i ovisne električne i geometrijske veličine, i to naboj u glavi groma ili struja koja teče pogođenim objektom i posljednji probojni razmak između pogođenog objekta i glave groma r .

Ta međusobna povezanost tih veličina dopušta da tok ovih zbivanja bude teorijska osnova »geometrijsko-električnog modela« pomoću kojega će se određivati ili računati zaštićeni prostori i zaštitni kutovi nekih hvataljki munje. Da bi se što praktičnije primijenio taj način utvrđivanja zaštitnog prostora, potrebno je te relativno složene odnose nešto pojednostaviti. Ali, zbog toga se moraju istaknuti još neke činjenice.

Naime, proboj nastaje u trenutku kad jakost električnog polja između glave groma i neke točke na tlu dostigne kritičnu vrijednost i postane veća od probojne čvrstoće zraka, a ona iznosi otprilike 500—600 kV/m. To sve skupa opet ovisi o količini naboja u glavi kanala groma, a osobito o posljednjoj probojnoj udaljenosti r glave od zemlje. Kad su ispunjeni svi ti uvjeti, iz određene udaljenosti od tla nastupa proboj prema zemlji, odnosno pogođenim objektom teče struja groma. Eksperimentima se utvrdilo da je tjemena vrijednost te struje u čvrstom i konstantnom odnosu s količinom naboja u glavi kanala. Mjerenja na brdu San Salvatore pokazala su da se jednim kulonom naboja u glavi groma izaziva, prilikom proboja, struja tjemene vrijednosti i do 15 kA. Takvi podaci nam omogućuju da dalje govorimo prilikom udara samo o veličini struje groma, a ne više o naboju. To je jednostavnije. Pa će se zato i važna veličina posljednjega probojnog razmaka r , koja nije jednaka za sve udare groma, izraziti ovisno o veličini struje što je protekla nekim objektom prilikom udara.

Prema podacima iz literature, nakon dugih istraživanja i pokusa, utvrđeno je da se duljina posljednjega probojnog razmaka ovisno od tjemene vrijednosti struje negativnih gromova može izračunati iz izraza:

$$r = 2 \hat{i}_g + 30 (1 - e_{6.8}^{\hat{i}_g}). \quad (3.1)$$

Tu je r , kako smo to nazvali, veličina posljednjega probojnog razmaka u (m), kad je tjemena vrijednost struje groma $\hat{i}_g$ u (kA).

Iako se fizikalna zbivanja kod negativnih i pozitivnih gromova nešto razlikuju, za jednu i za drugu vrstu tih atmosferskih udara računa se duljina posljednjega probojnog razmaka i prema izrazu:

$$r = 6,7 \hat{i}_g^{0.8}. \quad (3.2)$$

Pri tome je $\hat{i}_g$ tjemena vrijednost njihovih struja u (kA). Izvedena dva izraza otkrivaju da smo vrlo kompliciranu fizikalnu pojavu prilikom udara groma sveli na međusobnu ovisnost samo dviju veličina, od kojih je jedna geometrijska (razmak r), a druga električna (struja i_g).

Iz jednadžbi se još jasno vidi da će duljina posljednjega probojnog razmaka biti veća što je struja i_g jača. Tako, računajući po izrazu (3.2) za tjemenu vrijednost struje $\hat{i}_g = 3,1$ kA, posljednji probojni razmak r iznositi će 16,6 m, a za tjemenu vrijednost struje groma od 7,7 kA on će biti veći i iznositi će 34,3 m. Dakle, taj kratki račun nas upućuje na zaključak da posljednji probojni razmak nije za sve gromove jednak. Oni gromovi koji izazivaju jače struje uzrokuju proboj prema nekoj hvataljci iz veće daljine, a oni što izazivaju slabije struje teže dovode do proboja prema nekoj hvataljci, jer se njoj moraju više približiti. To nije dobro jer se tad može dogoditi da oni udare i u bokove visokih zgrada. Zato, želimo li da neka hvataljka groma dobro i sigurno štiti, da stvara siguran zaštitni prostor, moramo joj odrediti takve dimenzije i oblik koji će na

sebe prihvatiti svojim vrhom i one gromove što izazivaju i najmanje struje. To su osnovna stajališta koja nam dopuštaju da djelotvornost jedne gromobranske instalacije računamo pomoću geometrijsko-električnog modela.

Da bismo mogli u praksi izračunati zaštićene prostore i zaštitne kutove bilo kakvih hvataljki groma, moramo se najprije odlučiti za najmanje struje gromova koje su dosad opažene i odrediti onda posljednje probojne razmake r za takve gromove. Te su minimalne tjemene vrijednosti struje groma utvrđene za 90, 95 i 99% svih gromova i svrstane u tablici 3.1. U istoj tablici navedene su izračunate i zaokružene vrijednosti probojnih razmaka r u ovisnosti o tim strujama. Kod tih će razmaka dolaziti do proboja između glave groma i zemlje. Navedeni će podaci malo poslije poslužiti za utvrđivanja zaštitnih prostora nekih hvataljki groma.

Tablica 3.1. Posljednji probojni razmaci r ovisno o broju gromova koji su uzeti u obzir i o minimalnim tjemnim vrijednostima struja i_s

Broj svih gromova koji su uzeti u obzir u (%)	90	95	99
Najmanja tjemena vrijednost struje groma i_s u (kA)	7,7	3,9	1,6
Posljednji probojni razmak r u (m)	40	20	10

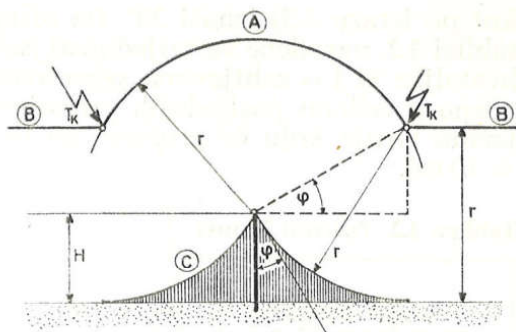
Podaci u tablici 3.1. omogućuju nam da se u praksi odlučimo za veće ili manje zaštitno djelovanje neke gromobranske hvataljke. Tako, ako zahtijevamo da ona normalno štiti, onda ćemo kontrolirati njezino zaštitno djelovanje kod probojnih razmaka od 40 m, a uz zahtjev da ona još sigurnije štiti, kontrolirat ćemo njezino zaštitno djelovanje pri probojnim razmacima od 20 m.

Pri zahtjevu da njezino zaštitno djelovanje bude ekstremno visoko, kontrolirat ćemo ga za probojne razmake od 10 m. Ili, drugim riječima, što budemo željeli viši stupanj zaštitnog djelovanja neke hvataljke, morat ćemo provjeravati štiti li ona i od vrlo slabih gromova, odnosno onih koji izazivaju relativno male struje. Jer, kad strujno slabi gromovi udara u nju, tad će sigurno i strujno jake gromove privlačiti. To omogućuje da u daljnjim izlaganjima pronalazimo zaštitne prostore i kutove različitih vrsta hvataljki (šipkastih gromobrana, zaštitnih užeta, tor-njeva itd.) koje imaju različitu visinu.

3.2. Zaštićeni prostor šipkaste hvataljke

Radi boljeg razumijevanja dosadašnjih izlaganja najprije će se razmotriti kako se određuje zaštitni prostor i zaštitni kut jedne šipkaste hvataljke visine H , ukopane u zemlju (sl. 3.3). Da bismo utvrdili zaštitno djelovanje jedne takve hvataljke, koristit ćemo se metodom »geometrijsko-električnog modela«, kojeg smo osnovna stajališta u prethodnim razmatranjima već iznijeli. Zato će se, naravno, upotrebljavati malo prije navedeni pojmovi i izračunati vrijednosti posljednjega probojnog raz-

Sl. 3.3. Zaštićeni prostor šipkaste hvataljke niže od posljednjega probojnog razmaka ($H < r$)



maka r između glave groma i zemlje, odnosno, u ovom primjeru, između glave groma i vrha hvataljke.

Pretpostavimo najprije da nam je visina hvataljke H manja od bilo kojega posljednjeg probojnog razmaka r , kao što je to na slici 3.3. prikazano ($H < r$). Nacrtajmo paralelno s površinom zemlje pravac na udaljenosti r , zatim iz vrha hvataljke opišimo kružnicu s polumjerom r . Označimo točke gdje se sijeku kružnica A i paralelni pravac s T_K i nazovimo ih kritičnim točkama. Prema onome što smo malo prije utvrdili, pratit ćemo zbivanja prilikom nailaska glave groma prema tlu. Ako glava prodre okomito ili pod bilo kojim kutom prema okomici na graničnu plohu označenu s A, do udara će groma doći u vrh hvataljke jer je upravo njemu glava groma najbliža iz tih položaja. Ako, pak, glava prodre do granične plohe označene s B, onda udar groma neće biti u vrh hvataljke, nego u zemlju. To je razumljivo jer je zemlja u tim slučajevima bliža glavi groma nego vrh hvataljke. Imaju samo dvije kritične točke iz kojih grom može udarati u zemlju ili u sam vrh hvataljke. Te smo točke označili s T_K . Ako iz tih dviju točaka kroz vrh hvataljke opišemo kružnicu s polumjerom r , dobit ćemo graničnu plohu C što određuje neki zaštićeni prostor u kojem neće doći do udara groma. Taj prostor je na slici 3.3. crtkano istaknut i ima otprilike oblik stošca. Sasvim je razumljivo, na osnovi pojma o posljednjemu probojnom razmaku r , da unutar tog prostora možemo biti sigurni. Naime, sve točke u tome zaštićenom prostoru udaljenije su od kritične točke T_K više nego iznosi duljina posljednjega probojnog razmaka. Čovjek ili objekt koji bi se nalazio u tom prostoru ne bi mogao biti direktno pogođen udarom groma.

No, katkad je potrebno veličine zaštićenog prostora brže odrediti za različite zahtjeve i za razne stupnjeve sigurnosti. Nije tada potrebno izraditi cijelu geometrijsku konstrukciju, nego će se takvi prostori moći odrediti i na osnovi zaštitnog kuta. Ako pogledamo odnose na slici 3.3, vidimo odmah da je moguće odrediti zaštitni kut iz izraza:

$$\sin \varphi = \frac{r - H}{r} \quad \varphi = \arcsin \frac{r - H}{r}, \quad (3.3)$$

pri čemu je H visina šipkaste hvataljke od površine tla u (m), a r je veličina probojnog razmaka u (m).

Izraz (3.3) omogućuje nam da brzo uočimo kako se mijenja zaštićeni prostor u okolišu neke šipkaste hvataljke ovisno o njezinoj visini H i posljednjem probojnom razmaku r koji smo odredili prema našim zahtjevima sigurnosti. Zato je predstavljenje zaštićenog prostora pomoću zaštitnog kuta vrlo praktično. Tako, za $H = 10$ m i $r = 20$ m zaštitni

kut po izrazu 3.3) iznosi 30° . Da bismo se u praksi što brže snalazili, u tablici 3.2. navedene su vrijednosti zaštitnog kuta ovisno o visini šipkaste hvataljke H i o zahtjevima sigurnosti koje smo unaprijed odabrali, odnosno o veličini posljednjih probojnih razmaka što zapravo označavaju jačinu struja koju će gromovi na tlu izazvati ($r = 40 \text{ m}$, $r = 20 \text{ m}$, $r = 10 \text{ m}$).

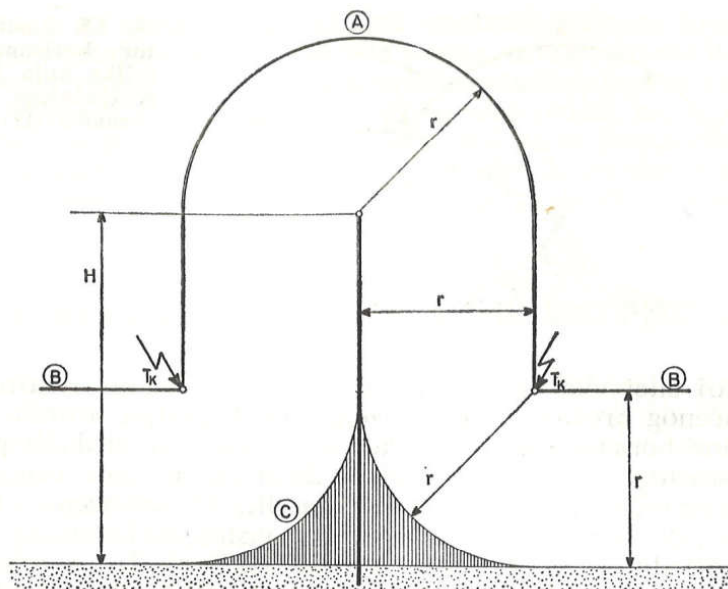
Tablica 3.2. Zaštitni kutovi

Visina šipkastih gromobrana H u (m)	Zaštitni kut φ°		
	Kod normalnih zahtjeva	Kod povišenih zahtjeva	Kod vrlo strogih zahtjeva
5	61	49	30
10	49	30	0
15	39	14	
20	30	0	

Dosad smo razmatrali kako nastaje i kako se mijenja zaštitni prostor šipkaste hvataljke ukopane u zemlji kad njezina visina H nikad ne premašuje vrijednost posljednjega probojnog razmaka ($H < r$).

Pretpostavimo sada da imamo neku šipkastu hvataljku koje je visina H uvijek veća od posljednjega probojnog razmaka ($H > r$). Takvi su odnosi česti u praksi. To su okolnosti kad kao hvataljke mogu poslužiti visoki metalni stupovi za rasvjetu, visoki dimnjaci neke tvornice, zatim televizijski ili radio-tornjevi postavljeni na izloženim mjestima itd. Zanimljivo je razmotriti zaštićene prostore tako visokih hvataljki, kad se zbog njihovih visina može dogoditi da iz glave groma koji se približava zemlji nastane proboj prema njihovim bokovima. Da bismo odredili zaštićeni prostor u takvim prilikama, primijenit će se isti postupak kojim smo se poslužili malo prije kad smo pretpostavljali da je visina hvataljke H manja od probojne udaljenosti r . Na slici 3.4. prikazan je taj geometrijski postupak pomoću kojega se ustanovljuje veličina zaštićenog prostora ako je $H > r$. Prilikom određivanja tog prostora dobro je upozoriti da je trebalo u određivanju kritičnih točaka T_K paziti na to da se granična ploha A drži na jednakoj udaljenosti r — ne samo od vrha hvataljke nego i od njezinih bokova, što je na slici i označeno. Kad se na takav način došlo do položaja kritičnih točaka, onda je lako kao i u prethodnom primjeru naći graničnu plohu C kojom se određuje zaštićeni prostor. Iz slike 3.4. možemo zaključiti da hvataljke samo svojom visinom ništa posebno ne utječu na visinu zaštićenog prostora. Naime, vidi se iz slike da veći dio visine takvih hvataljki ne stvara takve prostore i da u njezine bokove može doći do izravnih udara onih gromova koji izazivaju male struje. Osim toga sama visina hvataljke ne znači ništa posebno za širinu zaštićenog prostora.

Dosadašnja razmatranja nas tako navode na zaključak, a na slici se to vidi, da jedna visoka šipkasta hvataljka stvara zaštićeni prostor samo do onog dijela svoje visine koji je jednak posljednjemu probojnom razmaku r što smo ga unaprijed kao zahtjev postavili.



Sl. 3.4. Zaštićeni prostor šipkaste hvataljke više od posljednjega probojnog razmaka ($H > r$)

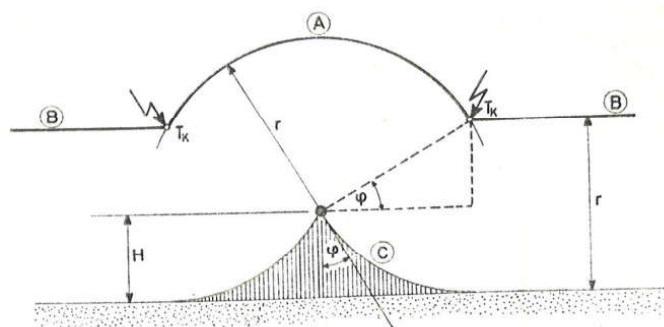
Na to je ovdje trebalo upozoriti jer se, bez dubljih razmatranja, manje upućenim osobama može učiniti da su u širem okolišu visokih objekata sasvim sigurni od izravnih udara groma, a to nije tako.

Potrebno je, prema ovom što smo iznijeli, svaki slučaj pažljivo razmotriti i tek onda donijeti ocjenu o djelotvornosti zaštite neke visoke hvataljke.

3.3. Zaštićeni prostor horizontalne hvataljke

Horizontalnim hvataljkama možemo nazvati trake gromobranskih instalacija koje se postavljaju na krovove zgrada, zatim zaštitnu užad na nadzemnim električnim vodovima ili nad postrojenjima itd. To su općenito razapeta užad kojima je osnovna namjena da prihvate izravne udare groma, ili su to druga razapeta užad koja služe drugim svrhama, ali se zna dogoditi da i ona budu podvrgnuta neposrednim udarima. Ovdje će se, kao i u prethodnim poglavljima, razmatrati kako te hvataljke stvaraju zaštićeni prostor i koliki je taj prostor. Taj će se problem i sada rješavati primjenjujući postupak na koji nas upućuje geometrijsko-električni model. Treba tu istaknuti da jedna horizontalno razapeta hvataljka nema bokova, pa iako je postupak određivanja njezina zaštićenog prostora jednak kao kod šipkaste hvataljke, ipak su njezini zaštićeni prostori drukčiji.

Na slici 3.5. prikazan je način kako se utvrđuje takav prostor neke horizontalne hvataljke kad joj je visina nad zemljom H manja od posljednjega probojnog razmaka r ($H < r$).

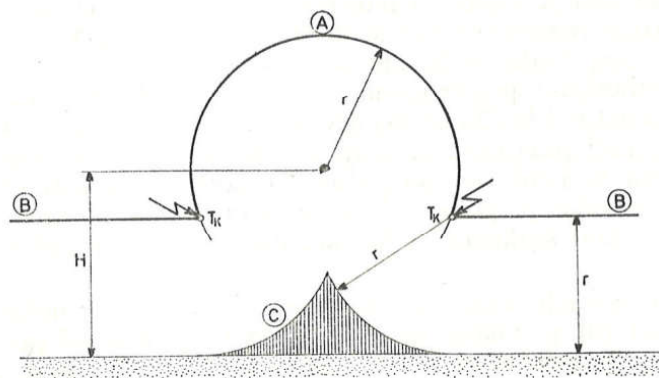


Sl. 3.5. Zaštićeni prostor horizontalne hvataljke koja je niža od posljednjega probojnog razmaka ($H < r$)

Na istoj slici vidi se i postupak kojim se računa zaštitni kut φ . Oblik zaštićenog prostora kod horizontalnih hvataljki proteže se uzduž cijele duljine horizontalne hvataljke, pa je zato on drukčiji po obliku od istog prostora šipkaste hvataljke. Zaštićeni prostor ove hvataljke određen je graničnom plohom koja je na slici 3.5. označena s C.

Može se, naravno, dogoditi da nam je visina horizontalne hvataljke viša od posljednjega probojnog razmaka ($H > r$). To je vrlo često u praksi, a određivanje zaštićenog prostora za takav odnos veličina predloženo je na slici 3.6.

Prilikom ustanovljivanja položaja graničnih ploha A i B iz kojih glava groma može izazvati proboj prema hvataljci ili zemlji, poštovan je i ovdje princip da granična ploha A mora biti udaljena od osi hvataljke za veličinu posljednjega probojnog razmaka r , jednako toliko koliko i granična ploha B od zemlje. Na takav način, njihovim presjecištima su se odredili položaji kritičnih točaka T_K , iz kojih se onda utvrdila granična ploha C zaštićenog prostora. Iz slike 3.6. očito je da glava groma pri veoma visoko namještenoj hvataljci pokazuje tendenciju »uvlačenja« ispod te hvataljke. Zbog toga bi mogao nastupiti proboj prema tlu i na onim mjestima gdje se obično očekuje zaštićeni prostor. To se zasigurno i može dogoditi, i to već onda kad je visina hvataljke nad zemljom jednaka dvostrukome posljednjem probojnom razmaku ili je od njega veća ($H > 2r$). U tom slučaju, zapravo, prestaje njezin zaštitni učinak, ona više ne štiti. To će se lako provjeriti ako se pokuša odrediti u takvim odnosima očekivani zaštićeni prostor pomoću postupka prikazanog na slici 3.6.



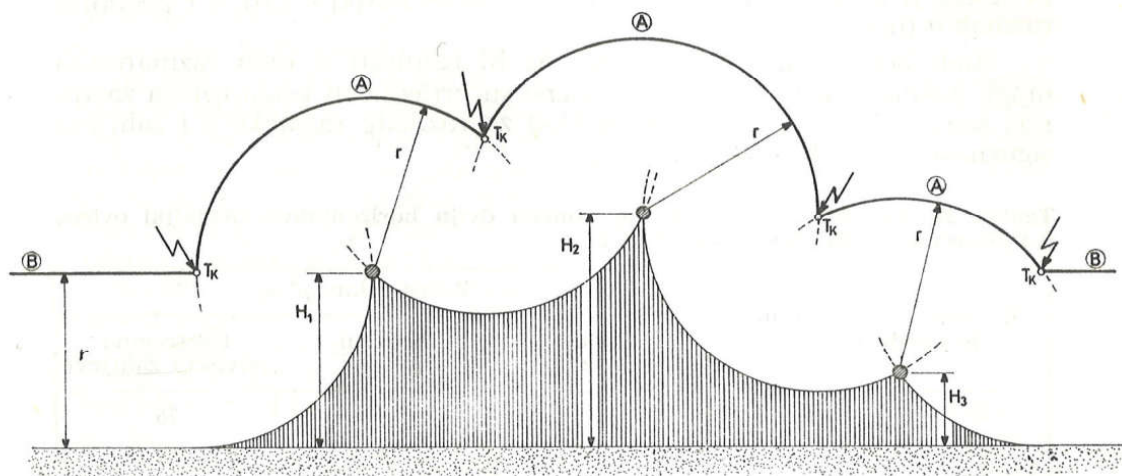
Sl. 3.6. Zaštićeni prostor horizontalne hvataljke koja je viša od posljednjega probojnog razmaka ($H > r$)

Naprotiv, to se neće dogoditi pri upotrebi šipkaste hvataljke iste visine jer ta hvataljka, koliko god bila visoka, ostaje aktivna barem onim dijelom svoje visine koji je jednak veličini posljednjega probojnog razmaka. Zato šipkasta hvataljka stvara oko sebe uvijek barem mali zaštićeni prostor. To postaje razumljivo kad se zna da su mogući udari groma u bokove šipkaste hvataljke, a kod horizontalne hvataljke se to ne može dogoditi. Naime, glava se groma ispod nje podvuče i nema se gdje zaustaviti.

3.4. Zaštićeni prostor više horizontalnih hvataljki

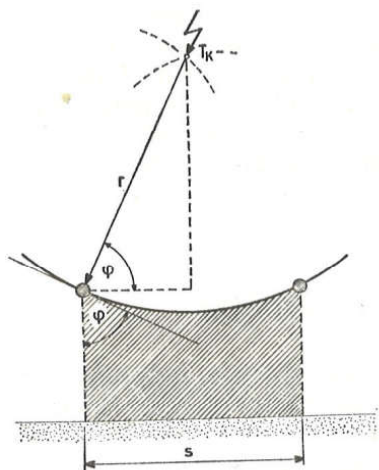
U praksi najčešće nije dovoljno štititi neke objekte jednom horizontalnom hvataljkom, pa se u tim okolnostima postavlja više horizontalnih hvataljki koje zajedno stvaraju veći zaštićeni prostor.

Na slici 3.7. zaštićeni prostor stvaraju tri horizontalne hvataljke postavljene na različitim visinama (H_1, H_2, H_3). Taj je prostor određen na jednak način kao i u prethodnim primjerima, samo što je u ovom slu-



Sl. 3.7. Prostor zaštićen s više horizontalnih hvataljki

čaju vidljiv međusobni utjecaj većeg broja horizontalnih hvataljki. Granične plohe A za svaku se hvataljku međusobno u ovom primjeru preklapaju, a njihova sjecišta stvaraju kritične točke T_K iz kojih može doći do proboja glave groma prema jednoj ili drugoj hvataljki, što znatno povećava zaštićeni prostor. Sjecišta graničnih ploha A s graničnim ploham B određuju, kao u prethodnim primjerima, kritične točke T_K iz kojih može nastupiti proboj glave groma ili u krajnje hvataljke ili u zemlju. Hvataljke su u ovom primjeru postavljene na različitim visinama i međusobnim udaljenostima da bismo na taj način pokazali kako se ova metoda određivanja zaštićenog prostora daje primjenjivati na različite rasporede hvataljki i u veoma širokim granicama. Međutim, treba



Sl. 3.8. Zaštićeni prostor i zaštitni kut koji stvaraju dvije horizontalne hvataljke jednake visine

napomenuti da će zaštita biti djelotvornija ako su hvataljke bliže jedna drugoj.

Da bi se to dokazalo, na slici 3.8. prikazan je način utvrđivanja zaštitnog kuta kod dviju horizontalnih hvataljki koje su razmaknute jedna od druge za dužinu s . Iz međusobnih odnosa veličina koje su na slici prikazane vidi se da se, ovisno o međusobnoj udaljenosti hvataljki, zaštitni kut date izračunati iz izraza:

$$\varphi = \arccos \frac{s}{2r}, \quad \text{za } s < r. \quad (3.4)$$

Pri tome je s razmak između horizontalnih hvataljki u (m), a r probojni razmak u (m).

Radi boljeg razumijevanja, te da bi rezultati iz ovih razmatranja mogli poslužiti, u tablici 3.3. navedene su vrijednosti prostornoga zaštitnog kuta φ izračunate po izrazu (3.4) za različite razmake s i zahtjeve sigurnosti ($r = 40, 20, 10$ m).

Tablica 3.3. Prostorni zaštitni kut φ između dviju horizontalnih hvataljki ovisno o njihovome međusobnom razmaku s

Razmak horizontalnih hvataljki u (m)	Zaštitni kut φ°		
	Normalni zahtjevi	Povišeni zahtjevi	Ekstremno povišeni zahtjevi
5	86	83	76
10	83	76	60
15	79	68	41
20	76	60	0
25	72	51	
30	68	41	
35	64	29	
40	60	0	

Iz brojčanih vrijednosti u tablici 3.3. dade se zaključiti da ima neka granica kad više ne možemo udaljavati hvataljke jednu od druge jer onda one postaju nedjelotvorne, kad je prostorni zaštitni kut $\varphi = 0$. Zato, ako se želimo zaštititi od onih gromova koji se, doduše rijetko, najviše približe zemlji i hvataljkama, tad moramo uzeti manje razmake između hvataljki. Ako nam, pak, takav stupanj sigurnosti nije potreban,

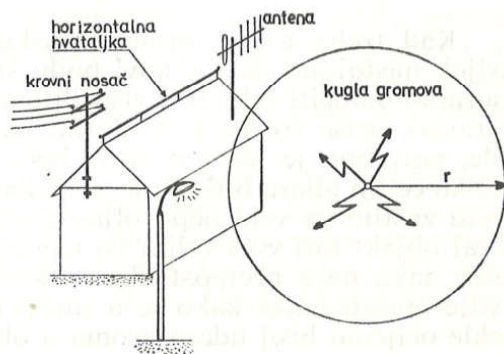
onda ćemo odabrati i veći razmak između njih. Kolići će se razmak uzeti, to ovisi o više okolnosti, npr. o vrsti objekta koji se štiti, zatim troškovima izvedbe i drugim činiocima. (Podaci u tablicama 3.1, 3.2. i 3.3. navedeni su prema priručniku Wiesinger-Hasse: *Zaštita od groma i uzemljenje*.)

3.5. Zaštićeni prostori bilo kakvih hvataljki koje su bilo kako raspoređene

Nakon prikaza zaštitnog djelovanja posebno šipkastih hvataljki i posebno horizontalnih hvataljki, ovdje će se razmotriti i zaštitno djelovanje drugih kombiniranih metalnih predmeta ili konstrukcija izloženih izravnim udarima groma. Tako, na slici 3.9. na krovu neke zgrade nalazi se krovni nosač s razapetim nadzemnim vodovima, krovna televizijska antena, a u blizini je zgrade ukopan metalni stup na koji je postavljena javna rasvjeta. Iako svim tim elementima, osim horizontalne hvataljke, nije osnovna namjena da štite neki objekt od izravnih udara, ipak se može postaviti pitanje štite li od udara svi takvi elementi, svojim položajem i međusobnim rasporedom, naš objekt. Naime, pitanje je stvaraju li takvi elementi skupa s hvataljkom oko sebe dovoljno velik zaštićeni prostor da bi objekt bio pošteđen od izravnih udara.

Da bismo na to odgovorili, moramo se prisjetiti još nekih detalja fizikalnih zbivanja — onih posljednjih nekoliko trenutaka kad se glava groma već približila zemlji i kad dolazi do kontakta između nje i tla ili bilo kojega drugog objekta na zemlji. Naime, prvo pretpostavimo da se vodilica groma može približavati zemlji pod bilo kojim kutom prema okomici i drugo, što je poznato, čim njegova glava stigne na posljednji probojni razmak r od nekog objekta, na tom će se objektu pojaviti uzlazna izbijanja, koja će se spojiti s nabojem u glavi groma. Na taj način je utvrđeno mjesto udara (sl. 3.2). Drugim riječima, iz glave groma koja se približila zemlji na posljednji probojni razmak r moglo bi doći do proboja u svim pravcima koji su na tom razmaku, ali pravo mjesto udara bit će ono koje je u tom trenutku najbliže glavi. To će se dogoditi zato što će se na tom najbližem objektu vjerojatno najprije i najjače pojaviti uzlazno tinjavo izbijanje. Dakle, odluka o mjestu udara nastaje tek na čvrsto određenoj udaljenosti od neke točke na zemlji.

Takav tok događaja možemo geometrijski prikazati tako što ćemo glavu groma zamisliti smještenu u središtu neke kugle iz koje tad može nastati proboj u svim pravcima od tog središta udaljenih za dužinu koja je jednaka posljednjemu probojnom



Sl. 3.9. Utvrđivanje zaštitnog djelovanja krovne hvataljke antene, krovnog nosača i metalnog stupa

razmaku. Tako zamišljena kugla nazvat će se »kugla gromova«, a njezin će polumjer tad, naravno, biti jednak posljednjemu probojnom razmaku r . Ta razmatranja i takve predodžbe omogućuju da i dalje rješavamo i određujemo zaštitne prostore bilo kakvih i bilo kako raspoređenih hvataljki groma, koristeći se pravilima geometrijsko-električnog modela, kao što smo to radili u dosadašnjim primjerima.

Poslije ovih tumačenja i geometrijske predodžbe fizikalnih zbivanja prići ćemo ocjeni i kontroli nalazi li se promatrani objekt na slici 3.9, s onako raspoređenim elementima i pravom hvataljkom groma, u zaštićenom prostoru tih hvataljki li, točnije, hoće li grom udariti u hvataljke ili u objekt.

Da bismo na to mogli odgovoriti, valja najprije napraviti model obrisa tog objekta sa svim njegovim hvataljkama. On može biti manji 100 do 500 puta od objekta koji želimo štititi. Kad se to završi, u istom mjerilu treba napraviti i model »kugle gromova«, s polumjerom jednaki duljini posljednje probojne staze r . Taj polumjer, kako smo vidjeli, uzimamo da je 10 m kod vrlo strogih zahtjeva sigurnosti, a za nešto blaže zahtjeve bit će 20 m, pa čak i 40 m.

Da bismo ocijenili nalazi li se naš objekt u zaštićenom prostoru hvataljki koje se na njemu nalaze, potrebno je najprije »kuglu gromova« kotrljati što je moguće bliže okolo objekta po nekoj ravnini, a zatim je dalje okretati u svim mogućim pravcima i preko objekta sa svim hvataljkama. Ako pri tom kotrljanju i okretanju »kugla gromova« ne dotakne nigdje sam objekt, nego dotiče samo hvataljke, onda je promatrani objekt u idealno zaštićenom prostoru svojih hvataljki. Ako »kugla gromova« ipak dodiruje negdje objekt koji štitimo, onda na tom mjestu zaštita nije dovoljna, pa je tu potrebno proširiti gromobransku zaštitu. Na takav se način, tražeći gotovo idealno rješenje, provjerava efikasnost zaštite gromobranskih instalacija u obliku Faradayeve krletke, a i zaštite provedene šipkastim gromobranima. Naravno da u praksi, gdje imamo relativno jednostavni raspored gromobranskih hvataljki, nije potrebno praviti modele nekih objekata, nego se o djelotvornosti bilo koje gromobranske instalacije sa svim drugim metalnim elementima zaključuje imajući u mislima kao osnovu zamišljenu »kuglu gromova« i sve njezine položaje.

3.6. Čestoća udara groma u neki objekt

Kad treba izvesti gromobransku instalaciju za neki objekt, onda uvijek nastojimo da troškovi budu što manji. Tom prilikom u početku moramo odlučiti želimo li višu ili manju sigurnost zaštite. O tome tada, naravno, ovise troškovi. Međutim, da bi se te dileme uspješnije uskladile, potrebno je uzeti u obzir hoće li gromovi udarati u taj objekt i koliko će tih udara biti. To je još jedan važan činilac jer često odabiremo vrstu zaštite uz vrlo nepovoljnu pretpostavku da će broj udara groma u taj objekt biti vrlo velik. To nas tad još više tjera u nepotrebne troškove, iako naša pretpostavka o tome nije ničim dokazana. Zato će se ovdje opisati način kako se u tim prilikama računa da bi se barem donekle ocijenio broj udara groma u objekt koji želimo štititi.

Znamo da se u svijetu bilježi broj grmljavinskih dana, a jednako tako, što je još važnije, specijalne stanice registriraju broj udara groma u zemlju. Prema dosada objavljenim podacima, daje se računati s tim kako prosječno u jednoj godini na kvadratni kilometar udara iz oblaka prema zemlji od 3 do 5 gromova. Ti podaci vrijede za Srednju Evropu. U Jugoslaviji je taj broj sigurno nešto veći jer se naša zemlja nalazi u pojasu s nešto većim brojem grmljavinskih dana. Zato se u našim prilikama preporučuje pretpostaviti da prosječno u jednoj godini na kvadratni kilometar udara i 6 do 7 gromova. Iz samo tog podatka još ne možemo ocijeniti koliko će gromova udariti u neki objekt koji treba štititi, jer u praksi najveći broj objekata nema površinu od 1 km². Osim toga, objekti na tlu imaju neku svoju visinu koja bitno utječe na površinu udara. Zato, kad treba procijeniti koliko će često neki objekt biti pogođen, valja približno odrediti onaj prostor udara prema samom objektu. Da bi se taj prostor ustanovio, koristit će se i dalje principima na kojima počiva geometrijsko-električni model. Po njima se taj prostor udara određuje tako da se jedna »kugla gromova« okreće, koliko je moguće bliže, oko modela onog objekta za koji želimo znati koliko će puta biti u godini udaren gromom. Površina A nastala dodirivanjem kugle u ravnini oko tog objekta označava prostor unutar kojeg će dolaziti do udara. Pri odabiru veličine kugle moramo voditi računa o tome da njezin polumjer r bude toliko velik da odgovara duljini posljednjega probojnog razmaka nekoga prosječno jakog groma. Za praktično računanje uzet će se da polumjer kugle koju okrećemo oko objekta iznosi približno 80 m i da je ta duljina jednaka posljednjemu probojnom razmaku groma što izaziva struju tjemene vrijednosti od 25 kA. Budući da i visina H nekog objekta utječe na veličinu prostora na kojem može udariti grom, tad se taj »prostor udara A« za neki šipkasti gromobran visine do 80 m, ili za neku zgradu približno iste visine, izračunava iz izraza:

$$A = H(160 - H)\pi \quad \text{u (m}^2\text{)}, \quad (3.5)$$

pri čemu je H visina objekta u (m).

Kad se jednom nađe prostor udara groma u neki objekt, očekivani se najveći godišnji broj udara groma u njega »n« izračunava množeći vrijednost prostora udara A najvećim brojem udara groma u zemlju na (km²) za to područje.

Za naše prilike, gdje očekujemo u godini najviše do 7 udara groma na (km²), taj broj udara groma n u neki objekt iznosi 7 · A, gdje i A treba uzeti u (km²). [Za visinu H = 2,5 m i A = 0,0012363 km² bit će n = 7 · A = 8,6 · 10⁻³, a za visinu H = 40 m i A = 0,015072 km² dobivamo n = 7 · A = 105 · 10⁻³ udara u godini.]

Objekti viši od 100 m koji su građeni od metala, zatim oni koji se nalaze na jako izloženim mjestima, mogu biti mnogo češće udareni gromom. Tako RTV-odašiljači viši od 150 m mogu biti udareni gromom i 10 puta godišnje. Kad se projektirala gromobranska zaštita za RTV-odašiljač »Sljeme« u Zagrebu, računalo se da bi 5—6 puta mogao biti pogođen gromom u toku jedne godine.

3.7. Zagrijavanje vodiča što odvode struju groma

Vrijednosti struje groma same po sebi ne omogućuju nam dimenzioniranje presjeka vodiča s obzirom na zagrijavanje. Veličina mjero-davna za dimenzioniranje presjeka vodiča s obzirom na zagrijavanje, kako smo vidjeli, poznata je pod nazivom vremenski integral kvadrata struje groma ili kvadratni impuls struje udara, a računa se po izrazu:

$$I = \int i_g^2 dt. \quad (3.6)$$

Tu je i_g momentalna vrijednost struje groma. Ta veličina pomnožena otporom R nekog vodiča daje električnu energiju:

$$W = R \int i_g^2 dt. \quad (3.7)$$

Ona se u vodiču kojim protječe struja pretvara u toplinu i zagrijava ga. Radi boljeg razumijevanja dajemo jedan numerički primjer.

Pretpostavimo da je vrijednost vremenskog integrala kvadrata struje groma $I = 10^6 \cdot 10 \text{ A}^2\text{s}$ i da struja groma prolazi kroz bakreni vodič kojemu je otpor $R = 10 \cdot 10^{-3} \Omega$. Koliko će se u tom vodiču nakupiti električne energije? Množeći se dobiva:

$$W = R \int i_g^2 dt = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^6 = 100\,000 \text{ Ws}.$$

To je otprilike energija koju daje jedna električna peć od $10\,000 \text{ W}$ u 10 s .

Iz primjera se daje zaključiti da je vrijednost vremenskog integrala kvadrata struje groma, označena s I , samo statističke veličine, a da tek onda kad je povezana s omskim otporom R u izrazu $I R$ označava električnu energiju. Ta se energija, prirodno prolazeći kroz neko tijelo pretvara u toplinsku energiju i to tijelo zagrijava. Izraz za električnu energiju (3.7) kod impulsne struje, kao što je to struja udara, može se formalno usporediti s izrazom $i^2 \cdot R \cdot h$ kod izmjenične struje.

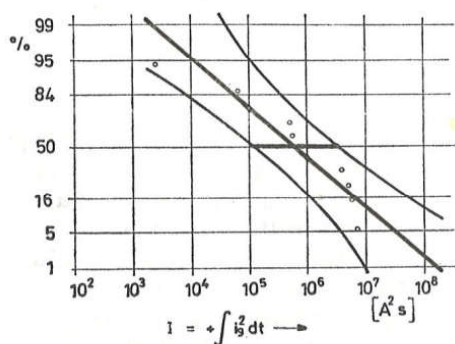
Vrijednosti vremenskog integrala kvadrata struje groma I nalazimo u tablicama gdje se navode i druge karakteristične veličine struje groma, kao što su to: tjemena vrijednost struje groma, strmina struje, vrijeme trajanja struje, veličina naboja struje groma itd. Posebno ih nalazimo sređene kad se te vrijednosti unesu u tzv. mrežu vjerojatnosti. Ta mreža vjerojatnosti sastoji se od koordinatnog sistema kojemu su na apscisi nanesene vrijednosti vremenskog integrala kvadrata struje groma I , a na ordinati je onaj broj koji pokazuje koliko se puta ta vrijednost pojavila prilikom svih udara groma. Dakle, na ordinati je nanesena učestalost u apsolutnim vrijednostima ili u postocima. Tako se zna koliko se puta neka vrijednost vremenskog integrala kvadrata struje groma pojavljuje pri udarima, odnosno tako se može znati njegova vjerojatnost pojavljivanja.

Međutim, još je bolje nanositi na ordinatu onaj broj vrijednosti vremenskog integrala kvadrata struje groma koji je veći od apcisne vrijednosti. To unosimo u apsolutnim vrijednostima ili u postocima. Takvu učestalost zovemo zbrojna učestalost, ili kumulativna učestalost. Kori-

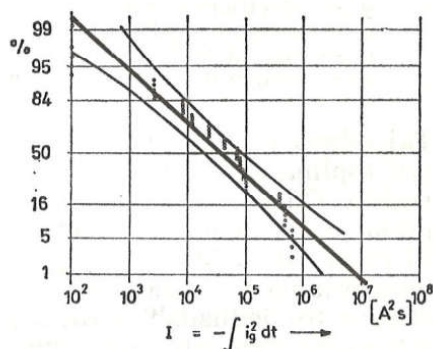
steći se tim dijagramima možemo znati koliko će neka vrijednost vremenskog integrala kvadrata struje groma biti »premašena«. Ili, koliko će gromova biti koji će kvadratom svoje struje dati vremenski integral veći od izabranoga. Taj broj gromova, dakle taj broj vremenskih integrala kvadrata struje groma, može biti izražen u postocima.

Na slikama 3.10. i 3.11. prikazane su srednje statističke raspodjele za vrijednosti vremenskih integrala kvadrata struje groma.

Slika 3.10. predočuje statističku raspodjelu vremenskog integrala kvadrata pozitivne struje, a na slici 3. 11. je statistička raspodjela vremenskog integrala kvadrata negativne struje groma.



Sl. 3.10. Statistička raspodjela vremenskog integrala kvadrata struje groma pozitivnog polariteta



Sl. 3.11. Statistička raspodjela vremenskog integrala kvadrata struje groma negativnog polariteta

Iz tih dijagrama vidimo da pozitivne vrijednosti struje groma daju nešto veći vremenski integral kvadrata struje od negativnih struja. To je razumljivo kad znamo da su pozitivne struje groma jače od negativnih. Međutim, valja uzeti u obzir da su negativne struje mnogo češće, pa se neće pogriješiti ako se u proračune zagrijavanja vodiča uđe s karakterističnim vrijednostima negativnih struja groma. Dakle, valja računati s podacima koje nam daje dijagram na slici 3.11, gdje su navedene vjerojatnosti koliko će neka vrijednost vremenskog integrala kvadrata negativne struje udara biti premašena. Iz tog prikaza uočavamo da će najveća vrijednost kvadrata negativne struje udara iznositi $10^7 \text{ A}^2 \text{ s}$, odnosno $10 \text{ kA}^2 \text{ s}$. Ta će vrijednost biti premašena u manje od 1% svih udara groma. Dakle, očito je da će se vrlo rijetko pojaviti neka veća vrijednost. Kako smo prije napomenuli, različite vrijednosti vremenskog integrala kvadrata struje groma zagrijevaju više ili manje vodič kojim te struje prolaze, pa će o tome u daljnjim izlaganjima biti više riječi.

Odmah ćemo na početku istaknuti da između zagrijavanja vodiča kojim prolazi struja udara i vremenskog integrala kvadrata te struje osim fizičke vlada i analitička veza, koju ćemo u ovom poglavlju pokušati razmotriti. Naime, kad struja groma prođe nekim vodičem, on će se zagrijati do neke temperature ϑ° , a njegov će se omski otpor zbog toga promijeniti. Uz pretpostavku da je to vodič jedinične duljine, dobivamo da se njegov otpor promijenio na vrijednost:

$$R\vartheta = \frac{\varrho}{q}(1 + \alpha\vartheta).$$

Toplina što ju je proizvela struja groma momentalne vrijednosti i_g u tome vrlo kratkom vremenu dt bit će:

$$i_g^2 \cdot \frac{\varrho}{q} (1 + \alpha\vartheta) dt = q \cdot \gamma \cdot c \cdot d\vartheta. \quad (3.8)$$

- c — specifična toplota u (Ws)
 γ — specifična masa u (kg mm³)
 ϱ — specifični otpor u ($\Omega \cdot \text{mm}$)
 α — temperaturni koeficijent u (1/°C)
 q — presjek vodiča u (mm²)
 ϑ — temperatura zagrijavanja u (°C)

Taj odnos vrijedi uz pretpostavku da za cijelo vrijeme prolaska struje sva toplota koju je proizvela električna energija nema vremena otići s vodiča. Odnosno, jednadžba (3.8) vrijedi uz pretpostavku da se sva toplota proizvedena energijom impulsne struje akumulira na vodiču. Radi postupka računanja u prije napisanoj jednadžbi je uzeto da djeluje momentalna vrijednost struje groma i_g , i to vrlo kratko vrijeme označeno u toj jednadžbi s dt , a jednako tako pretpostavljeno je da će se tad vodič zagrijati samo malo i imati temperaturni prirast $d\vartheta$. Dakle promatrali smo beskonačne malene promjene.

Međutim, struja groma zagrijava vodič za cijelo vrijeme svog prolaska od nekoliko desetaka ili stotina mikrosekundi, već prema tome koliko ona dugo traje, zato se onda jednadžba (3.8) mora poslije preuređenja integrirati, pa će biti:

$$\begin{aligned}
 i_g^2 \cdot \frac{\varrho}{q} (1 + \alpha\vartheta) dt &= q\gamma c d\vartheta \\
 \frac{i_g^2}{q^2} dt &= \frac{\gamma \cdot c}{\varrho} \cdot \frac{d\vartheta}{1 + \alpha\vartheta} \\
 \frac{1}{q^2} \int i_g^2 dt &= \frac{\gamma \cdot c}{\varrho} \int \frac{d\vartheta}{1 + \alpha\vartheta}.
 \end{aligned}$$

Odatle dobivamo da je vremenski integral kvadrata struja groma:

$$\int i_g^2 dt = q^2 \frac{\gamma \cdot c}{\varrho \alpha} \ln(1 + \alpha\vartheta) \dots (A^2s). \quad (3.9)$$

Upravo izvedena jednadžba može se upotrijebiti na dva načina:

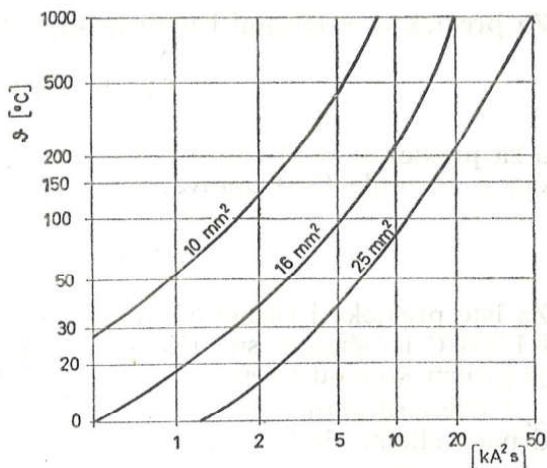
— Prvi način korištenja jednadžbom sastoji se u tome da se uz dopuštenu određenu temperaturu zagrijavanja vodiča izračuna vremenski integral kvadrata struje groma, pa da nakon toga vidimo s kolikom će on vjerojatnošću biti premašen. To ćemo naći u dijagramima na sli-

Sl. 3.12. Vremenski integral kvadrata struje groma za različite temperature i presjke vodiča

kama 3.10. i 3.11. Ako je mala vjerojatnost da će on biti premašen, onda se računa da se vodič neće rastaliti ni omekšati i da će izdržati i gotovo najveće struje groma.

— Drugi način upotrebe ove jednadžbe suprotan je prvome a sastoji se u tome što pomoću nje uz očekivanu jakost struje groma, odnosno, točnije, uz odabrani vremenski integral kvadrata te struje, kontroliramo kolika će se temperatura pojaviti u našem vodiču. Odnosno, kontroliramo zagrijavanje vodiča.

Radi lakšeg računanja bolje se prikloniti prvom načinu korištenja jednadžbom (3.9). Da bismo olakšali ove dileme, na slici 3.12. izračunat je i nacrtan dijagram kojemu su na ordinatu nanese temperature ϑ° vodiča različitih presjeka ovisno o vrijednosti vremenskog integrala kvadrata struje groma $\int i^2 dt$. Pomoću njega jednadžba (3.9) upotrebljiva je na oba izložena načina, već prema tome što je unaprijed poznato. Pa, znamo li vrijednost vremenskog integrala kvadrata struje groma, očitati ćemo na dijagramu temperaturu. Ako nam je određena i poznata unaprijed dopuštena temperatura materijala koji upotrebljavamo, onda će se u dijagramu na slici 3.12. otčitati vrijednosti vremenskog integrala kvadrata struje za neki presjek vodiča. Kad imamo vrijednost vremenskog integrala kvadrata struje groma, tada treba iz dijagrama na slici 3.11. vidjeti kolika je vjerojatnost da će on biti premašen. Kako bismo bili sigurni da smo dobro odabrali tu vjerojatnost, ona se mora kretati negdje oko 1%. Dijagram je izračunat za presjke bakrenih užeta od 10 mm^2 , 16 mm^2 i 25 mm^2 , i to tako da su za temperature $\vartheta = 10, 20, 100, 500$ i 1000°C itd. izračunate po formuli (3.9) vrijednosti vremenskog integrala kvadrata struje groma u (kA^2s) . Prethodno su za formulu (3.9) uzete konstantne karakteristične vrijednosti, pa je tako odabrano: za specifičnu toplinu $c = 388,4608 \text{ Ws/kg}$ stupanj za specifičnu masu $\gamma = 8900 \cdot 10^{-9} \text{ kg/mm}^3$, specifični otpor $\rho = 0,0172 \cdot 10^{-3} \Omega \text{ mm}$, temperaturni koeficijent $\alpha = 0,00393 \text{ } 1/^\circ\text{C}$ i presjeci su $10, 16$ i 25 mm^2 . Na primjer, kad se svi ti podaci uvrste u formulu (3.9), za $q = 10 \text{ mm}^2$ i temperaturu od 100° imamo:



$$\int i_g^2 dt = q \frac{2\gamma \cdot c}{\alpha \cdot \rho} \ln(1 + \alpha\vartheta) = \frac{8900 \cdot 10^{-9} \cdot 388,46}{0,0172 \cdot 10^{-3} \cdot 0,00393}$$

$$\ln(1 + 0,00393 \cdot 100) = 1,708 \text{ kA}^2\text{s}.$$

Za presjek $q = 16 \text{ mm}^2$ i temperaturu od 100°C bit će na jednak način:

$$\int i_g^2 dt = 4,37 \text{ kA}^2\text{s},$$

a za presjek $q = 25 \text{ mm}^2$ i temperaturu od 100°C opet se na jednak način iz formule (3.9) dobiva:

$$\int i_g^2 dt = 10,67 \text{ kA}^2\text{s}.$$

Za iste presjeke i različite temperature $\vartheta = 10, 30, 50, 100, 150, 200, 500$ i $1\,000^\circ\text{C}$ izračunate su vrijednosti vremenskog integrala kvadrata struje groma koje su unesene i u tablici 3.4.

U koordinatni sistem nanese su logaritamske vrijednosti i jedne i druge veličine da bi rezultati bili što pregledniji.

Tablica 3.4. Vremenski integral kvadrata struje groma za različite temperature i presjeke vodiča

Temperatura $^\circ\text{C}$	$\int i_g^2 dt$ (kA ² s)		
	10 mm ²	16 mm ²	25 mm ²
10	0,19	0,50	1,24
30	0,57	1,47	3,59
50	0,92	2,37	5,79
100	1,70	4,35	10,64
150	2,39	6,12	14,94
200	2,99	7,66	18,66
500	5,60	14,35	35,05
1 000	8,23	21,09	51,49

Vodiči koji se danas upotrebljavaju u izvedbi gromobranskih instalacija od pocinčane su čelične trake presjeka 100 mm^2 , pa se oni neće zagrijati. Način zagrijavanja bakrenih vodiča koji smo izložili upućuje nas općenito u ovu problematiku, a rezultati u tablici 3.4. i u dijagramu na slici 3.12. mogu nam poslužiti kad se bakreni vodiči upotrebljavaju na drugim mjestima u tehničkoj praksi. Tako bakreni vodiči koji služe za uzemljenje nadzemnih vodova pri izvođenju radova na njima, dovoljno je da imaju presjek od 25 mm^2 . Toliki je presjek dovoljan da izdrži i najveće struje groma s obzirom na zagrijavanje.

4. Uzemljenje

Uzemljenje je galvansko povezivanje sa zemljom bilo kakvih metalnih dijelova koji normalno nisu pod električnim naponom. Uzemljenje se izvodi sistemom vodiča (uzemljivača) koji moraju svojim dimenzijama i oblikom, skupa sa slojevima okolišnog tla, spriječiti sve štetne posljedice kad takvi metalni dijelovi dođu pod povišeni napon. Misleći u prvom redu na čovjekovu zaštitu, došlo se do pojmova kao što su to dopuštene veličine »napon dodira« i »napon koraka«, koje se ne smiju prekoračiti prilikom odvođenja struja kroz zemlju. Da bi se to postiglo, moraju uzemljivači s okolišnom zemljom pružati što manji otpor rasprostiranju struje. Obično, uzemljivači, sami po sebi, ne pružaju struji veliki otpor, tako da se on može zanemariti. Naprotiv, zemlja oko uzemljivača zna struji pružati veliki otpor prilikom rasprostiranja, a to se događa kad je tlo loše vodljivo, odnosno kad ima veliki specifični otpor ρ . Prema tome, za proračun otpora rasprostiranja R praktički ostaje onaj otpor koji pruža zemlja oko uzemljivača. Točnije rečeno, pod otporom rasprostiranja R razumijevamo otpor koji prolasku struje pruža onaj dio zemlje što se nalazi između nekog uzemljivača i one zone kuda se struja širi kroz toliki presjek tla, da njezina gustoća postaje vrlo malena. Slojevi zemlje izvan te granice nazivaju se u električnom smislu »neutralna zemlja« ili »daleka zemlja«. Ako želimo taj otpor rasprostiranja R izračunati, onda će se to učiniti tako što će se izmjeriti ukupni napon U između uzemljivača i »daleke zemlje« pa će se on podijeliti strujom i koja se raspršuje s obloga uzemljivača. Dakle, otpor rasprostiranja ili, kako ga praktički nazivamo, otpor uzemljenja R može se općenito izračunati iz izraza:

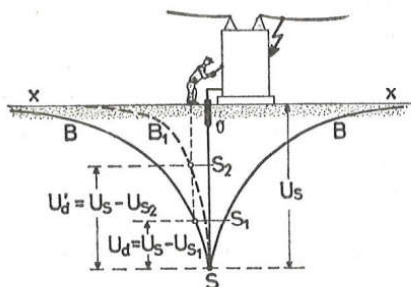
$$R = \frac{U}{i} . \quad (4.1)$$

Ukupni otpor rasprostiranja struji daje se zamisliti kao suma otpora pojedinih slojeva tla koje okružuje uzemljivač. Moramo tu odmah istaknuti da slojevi tla bliže uzemljivaču pružaju struji veći otpor od onih udaljenijih. Zbog toga, prvi slojevi troše veći dio ukupnog napona od onih koji su udaljeniji od uzemljivača. Tada, raspodjelu potencijala oko uzemljivača, na jednome praktičkom primjeru na slici 4.1. možemo prikazati krivuljom B ili još okomitijom krivuljom B_1 , koju bi stvarao ne-

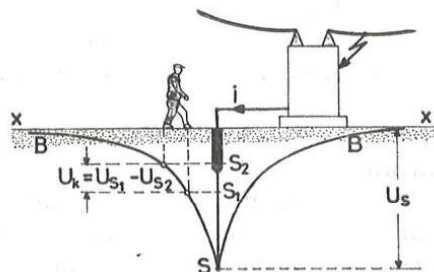
ki drugi uzemljivač. Ako raspodjela potencijala ide npr. po krivulji B, puni potencijal uzemljivača uzet ćemo da je jednak ordinati $SO = U_s = U$. Taj se potencijal smanjuje što se više udaljujemo od uzemljivača. Čovjek koji bi se npr. našao nogama na udaljenosti jedan metar od nekog objekta što ga štitimo i koji bi rukom dotaknuo uzemljeni objekt kroz čiji uzemljivač taj čas teče struja, bio bi zahvaćen razlikom potencijala:

$$U_d = U_s - U_{S1}. \quad (4.2)$$

Takvu razliku potencijala nazivamo naponom dodira, a ona može biti vrlo opasna za čovjeka. Ako se raspodjelom potencijala ide po okomitoj krivulji B_1 , što upućuje na to da se još veći dio ukupnog napona U troši sasvim blizu uzemljivača, tad će napon dodira biti još veći, odnosno iznositi će $U'_d = U_s - U_{S2}$.



Sl. 4.1. Raspodjela potencijala oko uzemljivača. Napon dodira



Sl. 4.2. Raspodjela potencijala oko uzemljivača. Napon koraka

Za što veću čovjekovu sigurnost u praksi se također uzemljivačima postavlja zahtjev da svojom konstrukcijom i oblikom smanjuju razliku napona koja bi se mogla pojaviti između njegovih nogu kada on hoda po površini tla u vrijeme raspršavanja struje. Tu razliku napona nazivamo »naponom koraka« (sl. 4.2). Ako se krivulja raspodjele potencijala oko uzemljivača kreće po krivulji B, onda će čovjekova lijeva noga imati potencijal U_{S1} i desna potencijal U_{S2} , a sam će se čovjek nalaziti pod naponom koraka:

$$U_k = U_{S1} - U_{S2}. \quad (4.3)$$

Iz slike se zapaža da će napon koraka biti veći što se čovjek kreće bliže uzemljivaču, a što je razumljivo kad se zna da će svojim korakom, koji praktički uzimamo da iznosi jedan metar premostiti veće razlike napona. Veličina napona koraka i dodira ovise općenito o veličini struje što teče kroz zemlju, zatim o otporu rasprostiranja R i obliku krivulje raspodjele potencijala.

Nakon opisa ovih opće poznatih pojmova o mogućim veličinama ukupnog napona uzemljivača U , napora dodira U_d i napona koraka U_k , postaje shvatljivo da se te, po čovjeka, opasne veličine napona najbolje svode na neopasnu vrijednost ako se smanji otpor rasprostiranja

R kroz zemlju. Međutim, to nije uvijek lako postići. Taj otpor ne ovisi samo o obliku, dimenzijama i broju uzemljivača nego jako i o prirodi zemlje, odnosno o specifičnom otporu zemljišta u kojem su uzemljivači ukopani. Zato će se o toj vrlo važnoj veličini dati poslije nekoliko podataka.

Preko uzemljivača protječe u zemlju izmjenična ili istosmjerna struja, i to obično u slučaju kvara, a katkada je to i obavezni dio strujnih krugova. To se događa npr. ako se uzemljuju neutralne točke transformatora, generatora itd. u elektroenergetskim sistemima.

No, uzemljivači služe i za odvođenje struje groma koja ima oblik jednoga relativno kratkog impulsa. Prilikom provođenja takvih struja uzemljivači s okolišnom zemljom nemaju jednaki otpor kao u provođenju izmjenične ili istosmjerne struje, nego on može biti manji ili veći od R . Otpor rasprostiranja struje groma nazivamo udarni otpor rasprostiranja ili udarni otpor uzemljenja R_u . Na tu vrstu otpora rasprostiranja posebno ćemo se osvrnuti na stranicama ovog teksta, jer je to posebno važna veličina koja se suprotstavlja nesmetanom odvođenju struje groma u zemlju.

Dobro je ovdje opet napomenuti kako uvijek valja nastojati da otpor rasprostiranja za izmjenične i istosmjerne struje i struje groma bude što manji jer se tako daje izbjeći više štetnih posljedica za čovjeka i za objekte u okolici. Ako smanjenje bilo koje vrste otpora rasprostiranja nije moguće postići, treba dimenzijom, oblikom i rasporedom uzemljivača nastojati da se barem na određenim mjestima ne stvaraju velike razlike napona, posebno ondje kuda se kreću ljudi.

Pojmovi napona koraka i dodira te njihove definicije vrijede u današnjoj praksi samo kad provodimo kroz zemlju izmjeničnu ili istosmjernu struju, zbog toga što su veličine tih struja pod čovjekovom kontrolom. Kad provodimo u zemlju struje groma, koje čovjek ne može kontrolirati, tad se nikad ne zna njihova jačina, te pojmovi napon dodira i koraka imaju samo orijentacijski karakter, a rezultate računanja treba prihvatiti uz stanoviti oprez. O tome će biti još riječi.

4.1. Karakteristike zemljišta

Kad se uzemljuje neki objekt, polazi se s idealnog gledišta da je zemlja vodič i da će se preko uzemljivača struja nesmetano dalje kroz nju provesti. Međutim, pri projektiranju nekog uzemljenja proračuni otpora rasprostiranja vrlo se često razlikuju od onih koji se pojavljuju u stvarnosti. To se događa zbog toga što zemlja nije homogena, već je veoma promjenljiva sastava od mjesta do mjesta, a i po dubini. Osim toga, tlo nije uvijek jednako vlažno, nego se ta vlažnost mijenja s vremenom i temperaturom, što sve bitno utječe na provodljivost.

U elektrotehničkom smislu, zemlja se kao vodič karakterizira otporom koji pruža prolasku struje jedna zamišljena kocka nekoga potpuno homogenog zemljišta stranica od 1 m. Taj se otpor naziva specifični otpor, a da bismo ga označili, upotrebljavamo simbol ρ . Jedinica kojom mjerimo taj otpor je ommetar (Ω m).

Općenito je specifični otpor zemlje vrlo visok prema otporima klasičnih vodiča, npr. prema otporima metala. On za različite vrste tla poprima vrijednosti od nekoliko ommetara do nekoliko tisuća ommetara. Vrijednost specifičnog otpora za jednu vrstu tla jednako je tako promjenljiva. To se događa zbog toga što je vodljivost struje u zemlji elektrolitske prirode te ovisi o količini disociranih iona, a ta količina opet o rastvorljivosti prisutnih soli i o stupnju vlažnosti tla. Zato se specifični otpor znatno mijenja s vlažnošću. On će biti manji što je vlažnost veća, i obrnuto. Utjecaj temperature na veličinu specifičnog otpora možemo zanemariti ukoliko ona nije ispod ništice. Međutim, kad temperatura padne znatnije ispod nule i zaleđi se zemljište, vodljivost se naglo smanjuje i specifični otpor zna poprimiti visoke vrijednosti. Moramo stoga računati da se vrijednost specifičnog otpora tla mijenja iz mjeseca u mjesec i da te promjene mogu varirati i do 60% između maksimalne i minimalne vrijednosti, ako se uzmu slojevi zemlje do dubine od 1,5 m. Na većoj dubini te su razlike manje i iznose negdje do 20%. Zato se preporučuje da se u projektiranju uzemljenja vodi računa o tim promjenama.

Da bi se saznalo koje vrijednosti specifičnog otpora imaju različite vrste tla, vode i drugih materijala u koje se najčešće ukopavaju uzemljivači, sastavljena je tablica 4.1.

Tablica 4.1. Podaci o specifičnom otporu

Vrste tla, vode i drugih materijala	Specifični otpor [Ω m]
Morska voda	0,5
Vode jezera i rijeka	10—100
Močvara — treset	90—150
Oranice	
Vlažni sitni pijesak	
Vlažni krupni pijesak (šljunak)	200—400
Suhi sitni pijesak	500
Suhi krupni pijesak	1 000—2 000
Kamenito tlo	100—3 000
Vapno	500—1 000
Beton	150—500

Računajući na promjenljive okolnosti prilikom izvođenja uzemljenja, najbolje je prihvatiti ova pravila:

- Kad se ukopava uzemljivač, treba paziti na to da on bude ispod površine zemlje najmanje 0,5 m, jer se pretpostavlja da od te dubine dalje tlo oko uzemljivača manje osjeća promjene vlage i temperature i ne zaleđuje se za vrijeme zime.
- Kad odabiremo mjesto za postavljanje uzemljivača, treba izbjegavati one slojeve koji su sastavljeni od šljunka i kamena, jer oni u tlu mogu smanjiti dodir površine uzemljivača s okolišnom zemljom na samo nekoliko točaka i time znatno povišiti prijelazne otpore, a time i ukupni otpor uzemljenja.

Da bismo barem donekle popravili te nepovoljne okolnosti, dobro je uzemljivač okružiti slojem zemlje koja nema ni šljunka ni kamena, kako bi se uspostavio što bolji dodir između uzemljivača i okolišnog zemljišta. Nakon ispunjavanja iskopa valja zbiti zemlju.

4.2. Horizontalno ukopani uzemljivači (trakasti uzemljivači)

Horizontalno ukopani uzemljivači su vodiči koji se obično ravno polažu u dubinu zemlje od 50 do 100 cm. U našoj se praksi za takve uzemljivače najviše upotrebljavaju trake od pocinčanog čelika pa se takvi uzemljivači zovu i trakasti uzemljivači. Presjek takvih traka je 100 mm^2 , a najmanja debljina im je 3,5 mm. Osim njih rjeđe se za uzemljivače upotrebljavaju bakrene trake, presjeka 50 mm^2 , a najmanje debljine 2 mm, ili bakreno uže najmanjeg presjeka od 35 mm^2 .

Struja koja se s površine tih uzemljivača raspršuje u zemlju nailazi na otpor tla koji se može izračunati iz izraza:

$$R = \frac{K \cdot \rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \ln \frac{l}{2h} \right). \quad (4.4)$$

Pri tome je l duljina uzemljivača, d je njegov promjer, a h je dubina. Kod trakastih uzemljivača uzima se otprilike ekvivalentni promjer d u iznosu $1/2$ širine trake. K je korekcijski faktor i iznosi od 1 do 1,5. Taj korekcijski faktor utječe na veličinu otpora rasprostiranja R , što je razumljivo kad se zna da se ljeti slojevi zemlje mogu osušiti, a zimi zamrznuti. Zbog tih se promjena otpor protjecanja struje kroz tlo mora računati većim nego u normalnim prilikama.

Iz izraza dalje možemo zaključiti da se s povećanjem duljine l otpor rasprostiranja bitno smanjuje, pa se zbog toga, već prema prilikama, odabire potrebna duljina trake. Dubina ukopavanja h , naprotiv, ne utječe bitno na smanjenje otpora rasprostiranja, posebno onda ako je uzemljivač dovoljno dug i ako je zemlja homogena. Doduše, za vrijeme velikih suša zemlja je u dubini od jednog metra vlažnija i ima manji specifični otpor što bi moglo utjecati na smanjenje otpora rasprostiranja, ali na tu okolnost u praksi ne bi trebalo mnogo računati. Osim toga, analizirajući raspodjelu napona oko nekog uzemljivača, lako je utvrditi da će se uz veću dubinu ukopavanja nekog uzemljivača povećati i napon dodira jer na većem sloju zemlje nastaje i veća razlika napona između uzemljivača i površine tla gdje su čovjekove noge. Da bi se to izbjeglo, valjalo bi onda, naprotiv, uzemljivače ukopati što manje u zemlju. Ali se zemlja uz površinu brzo i suši, što bi opet stvaralo teškoće. Zato, da bismo sve te složene i suprotne okolnosti najbolje uskladili, u praksi se kompromisno odlučujemo za dubinu ukopavanja između 0,5 i 1 m.

Kad uzmemo u obzir sva razmatranja možemo izraz (4.4) za praksu pojednostavniti tako da zanemarimo utjecaj dubine ukopavanja, jer se ona u izvedbi ne mijenja. Pretpostavljajući, pak, da se zemlja na dubini od 0,5 do 1 m može ljeti osušiti, a zimi smrznuti, uzet će se korekcijski faktor $K = 1,5$. Tako se otpor rasprostiranja po izrazu (4.4) približno izračunava iz izraza:

$$R \approx \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{2l}{d}. \quad (4.5)$$

ρ — specifični otpor zemlje u (Ω m)
 l — duljina uzemljivača u (m)
 d — promjer uzemljivača u (m)

Primjer 4.1.

Treba izračunati otpor uzemljenja trakastog uzemljivača kojemu je duljina trake $l = 20$ m, a širina joj je 28 mm. Uzemljivač je ukopan 0,8 m duboko, specifični je otpor tla $\rho = 100 \Omega$ m.

Rješenje:

$$R = \frac{K \cdot \rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \ln \frac{l}{2h} \right) = \frac{1,5 \cdot 100}{2 \cdot 3,14 \cdot 20} \left(\ln \frac{2 \cdot 20}{0,014} + \ln \frac{2 \cdot 20}{0,8 \cdot 2} \right) = 13,3 \Omega.$$

4.3. Okomito ukopani uzemljivači (štapni uzemljivači)

Okomito ukopani uzemljivači su vodiči duljine od 1 do 3 m koji se okomito ukopavaju u dubinu zemlje, ali tako da im zadnji kraj nije pod zemljom više od 20 do 30 cm. Zbog njihova štapastog oblika nazivamo ih štapnim uzemljivačima. Kao štapni uzemljivači upotrebljavaju se čelične cijevi kojih je vanjski promjer najmanje 38 mm, a debljina stijenke najmanje 2,5 mm. Osim cijevi upotrebljava se i profilirani pocinčani čelik, kao kutni čelik $L 65 \times 64 \times 7$ i profil U 6,5. Ako npr. pretpostavimo da smo kao uzemljivač ukopali u zemlju čeličnu cijev, tad će struja što se s površine tog uzemljivača rasprostire u zemlju naići na otpor koji se može izračunati iz izraza:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l}{r}. \quad (4.6)$$

ρ — specifični otpor zemlje u (Ω m)
 l — duljina uzemljivača u (m)
 r — polumjer cijevi u (m)

Računajući otpor rasprostiranja po tom izrazu zaključujemo da se taj otpor vrlo malo smanjuje ako povećavamo promjer cijevi. Zato nije korisno smanjivati otpor rasprostiranja ovog uzemljivača povećanjem promjera cijevi, nego bi bilo mnogo korisnije povećati njezinu duljinu. No, kod toga nailazimo na teškoće prilikom ukopavanja. Zbog toga je, kad prilike zahtijevaju da otpor rasprostiranja bude malen, najbolje ukopati više štapnih uzemljivača pa ih paralelno povezati. Osim izraza (4.6), za računanje otpora rasprostiranja za jedan štapni uzemljivač, možemo upotrijebiti i izraz:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{8l}{d} - 1 \right). \quad (4.7)$$

- l — duljina uzemljivača u (m)
 ϱ — specifični otpor tla u (Ω m)
 d — promjer cijevi u (m)

4.4. Temeljni uzemljivači

U novije se vrijeme u betonske temelje nekog objekta postavljaju metalni vodiči koji preko velike površine betona dolaze u kontakt s okolišnom zemljom, a nazivaju se temeljni uzemljivači. Takvi su uzemljivači po svojoj konstrukciji jednostavni, i vrlo djelotvorni. Oni mogu poslužiti i kao zaštitno i kao gromobransko uzemljenje. Velika prednost takvih uzemljivača sastoji se u tome što se nalaze u betonu, koji ih štiti od korozije, pa je njihovo vrijeme trajanja praktički neograničeno, a njihova upotreba ekonomična. Osim toga, budući da je beton pod zemljom uvijek vlažan, takav uzemljivač ima s tlom dobar dodir, i to na relativno velikoj površini. To sve skupa omogućuje postizavanje manjeg otpora rasprostiranja, osobito u teže vodljivoj zemlji. Otpor rasprostiranja takvih uzemljivača približno se izračunava pomoću izraza koji vrijedi za polukuglaste uzemljivače:

$$R = \frac{\varrho}{\pi d} \quad (4.8)$$

- ϱ — specifični otpor tla u (Ω m)
 d — promjer polukugle koju zamišljamo da je jednakog volumena kao i betonski temelj u kojemu je metalni vodič ukopan

Promjer d izračunat ćemo iz izraza:

$$d = 1,57 \sqrt[3]{V} \quad (\text{m}), \quad (4.9)$$

pri čemu je V volumen temelja u (m^3).

Otpor rasprostiranja takvih uzemljivača valja shvatiti kao otpor betona i slojeva zemlje koja obuhvaća betonski temelj nekog objekta. Daljnje prednosti tih uzemljivača osobito su izražene ako su oni kombinirani s prstenastim uzemljivačem jer se onda postizava bolje izjednačavanje potencijala u samoj blizini nekog objekta, što drugim riječima znači smanjenje opasnog napona dodira. Budući da su uzemljivači ugrađeni u betonske temelje, na njihov otpor rasprostiranja ne djeluje mnogo sušenje i zamrzavanje zemlje ili bilo kakve druge vanjske promjene.

Primjer 4.2.

Valja izračunati približni otpor uzemljenja čelične trake duljine $l = 20$ m koja se nalazi u betonskom temelju kvadratična presjeka stranice $a = 1$ m. Specifični je otpor zemlje u okolišu betonskog temelja $\varrho = 100 \Omega$.

Rješenje:

$$d = 1,57 \sqrt[3]{V} = 1,57 \sqrt[3]{1 \text{ a}^2} = 1,57 \sqrt[3]{20} = 4,26 \text{ m}$$

$$R = \frac{\rho}{\pi d} = \frac{100}{3,14 \cdot 4,26} = 7,5 \, \Omega.$$

4.5. Kombinirani uzemljivači

Kad smo prije naveli izraze za otpore rasprostiranja pojedinih vrsta uzemljivača, onda smo pretpostavljali da će se preko njih rasprostirati u zemlju istosmjerna struja ili izmjenična struja nižih frekvencija. Osim toga, računanje po tim izrazima vrijedi uz pretpostavku da se uzemljivači protežu samo do nekoliko stotina metara. Za trakaste uzemljivače, koji bi bili duži od toga, moralo bi se u račun njihova otpora rasprostiranja uzeti u obzir i veličina njihova induktiviteta.

Problem računanja otpora rasprostiranja tako dugih uzemljivača postaje još složeniji kad se preko takva uzemljivača raspršuje u zemlju struja groma. To se događa zbog toga jer se u tom slučaju uzemljivač opire prolasku putnog vala impulsnog oblika koji ima drukčije osobine od istosmjerne ili izmjenične struje nižih frekvencija. Ta nova okolnost nas prisiljava da u računanju otpora rasprostiranja nekog uzemljivača uzmemo u obzir njegov kapacitet, induktivitet i odvod, koje pri prolasku izmjenične ili istosmjerne struje nismo uzimali. Tako dolazimo do pojma »udarnog otpora uzemljenja«, o kojemu treba voditi računa, posebno onda kad su uzemljivači veće duljine i kad su ukopani u zemlji koja je loše vodljiva, odnosno ima veći specifični otpor. Iz svih tih razloga zgodnije je izvesti uzemljivače od kraćih metalnih dijelova. Dakle, bolje je napraviti paralelnu kombinaciju više kraćih trakastih uzemljivača ili paralelnu kombinaciju više štapnih uzemljivača. Međutim, valja upozoriti na to da se kod kombiniranih uzemljivača pojavljuje međusobni utjecaj pojedinih dijelova od kojih su oni sastavljeni (potiskivanje struje). Iz tih se razloga ukupni otpor rasprostiranja jednoga tako kombiniranog uzemljivača ne može računati kao obični spoj paralelno vezanih vodiča, jer je njihov ukupni otpor rasprostiranja, zbog međusobnog utjecaja, nešto veći, i to više što su oni bliži jedan drugome.

Naime, struja koja izlazi iz jednog ukrštava se s onom koja izlazi iz drugog uzemljivača. Dalje će se razmotriti najjednostavnije i vrlo česte kombinacije paralelno spojenih trakastih uzemljivača i paralelne kombinacije štapnih uzemljivača.

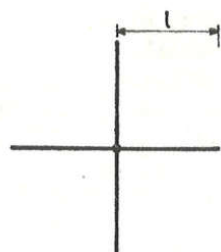
4.6. Paralelno spojeni trakasti uzemljivači

Vrlo se često događa da treba postići mali otpor uzemljenja u loše vodljivu tlu, pa se to ne da postići jednom trakom jer bi ona morala imati veliku duljinu, a što bi stvaralo druge teškoće. Zato se uzemljivač nekog objekta izvodi tako da se pod određenim kutom postavi više traka

na jednom mjestu priključenih na objekt koji želimo uzemljiti. Skica takva uzemljivača od četiri trake položene međusobno pod kutom od 90° prikazana je na slici 4.3.

Otpor rasprostiranja takvog uzemljivača kojemu su pojedine trake ukrštene pod kutom od 90° približno se izračunava na osnovi izraza:

$$R = \frac{\rho}{4\pi \cdot l} \ln \frac{25 \cdot l}{r} \quad (4.10)$$



Sl. 4.3. Kombinerani uzemljivači

ρ — specifični otpor tla u koje je uzemljivač ukopan u (Ω m)

l — duljina jedne trake u (m)

r — polumjer jedne trake u (m)

Ako je ukopana čelična traka, onda za r možemo uvrstiti vrijednost jednaku četvrtini širine trake.

Pri polaganju ovih uzemljivača moramo paziti na to da kut između pojedinih traka bude svakako veći barem od 60° .

Primjer 4.3.

Treba izračunati otpor uzemljenja uzemljivača u obliku križa koji je sastavljen od četiri trake duljine $l = 25$ m i širine od 0,036 m. Specifični otpor zemlje iznosi 200Ω m.

Rješenje:

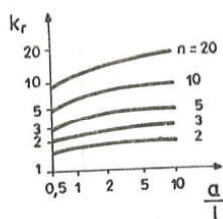
$$R = \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot l} \ln \frac{25 \cdot l}{r} = \frac{200}{4 \cdot 3,14 \cdot 25} \ln \frac{25 \cdot 25}{0,009} = 7,1 \Omega.$$

4.7. Paralelno spojeni štapni uzemljivači

Kad imamo samo dva paralelno vezana štapna uzemljivača i kad su oni udaljeni jedan od drugoga barem za dvostruku duljinu jednoga od njih, možemo približno uzeti da je ukupni otpor rasprostiranja tih dvaju paralelnih uzemljivača jednak otporu rasprostiranja jednoga od njih podijeljenoga brojem uzemljivača. To vrijedi sve dotle dok ih nije previše. Kad je mnogo uzemljivača povezanih paralelno, onda je njihov međusobni utjecaj mnogo veći, pa im se ukupni otpor uzemljenja ne može računati kao spoj običnih paralelnih otpora, nego se on dobiva prema izrazu:

$$R = \frac{R_1}{K_r} \quad (4.11)$$

R_1 je otpor rasprostiranja jednog štapnog uzemljivača, a K_r je redukcijski faktor koji očitavamo iz dijagrama na slici 4.4. ovisno o omjeru a/l .



Sl. 4.4. Redukcijski faktor »kr« za proračun

Na slici 4.4. oznake imaju ovo značenje:

- n — broj paralelno spojenih štapnih uzemljivača;
- a — srednja udaljenost između štapnih uzemljivača;
- l — srednja duljina upotrijebljenih uzemljivača.

Proračun ukupnog otpora rasprostiranja pomoću redukcijskog faktora vrijedi onda kad uzemljivača ima više i ako razmak između tih paralelno spojenih uzemljivača nije manji od njihove dubine ukopavanja. Osim toga, svi uzemljivači moraju biti približno kružno raspoređeni i moraju imati približno jednaku duljinu.

Primjer 4.4.

Valja izračunati otpor rasprostiranja R za dva paralelno povezana štapna uzemljivača u obliku čelične pocinčane cijevi promjera od 4 cm, a duljine od 2 m, koji su ukopani u zemlji specifičnog otpora od $100 \Omega \text{ m}$.

Osim toga treba izračunati ukupni otpor rasprostiranja 10 takvih paralelno u krugu povezanih uzemljivača udaljenih jedan od drugoga prosječno 3 m.

Rješenje:

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \ln \frac{l}{r} = \frac{100}{2 \cdot 3,14 \cdot 2} \ln \frac{2}{0,02} = 36,66 \Omega.$$

Za dva uzemljivača ($n = 2$) bit će:

$$\frac{a}{l} = \frac{3}{2} = 1,5, \quad K_r = 1,75$$

$$R_2 = \frac{R_1}{K_r} = \frac{36,66}{1,75} = 20,95 \Omega,$$

a za deset uzemljivača ($n = 10$) izlazi:

$$\frac{a}{l} = \frac{3}{2} = 1,5, \quad K_r = 4$$

$$R_{10} = \frac{R_1}{K_r} = \frac{36,66}{4} = 9,165 \Omega.$$

Vidimo da deset paralelno povezanih uzemljivača znatno smanjuje otpor uzemljenja.

4.8. Kombinacija štapnih i trakastih uzemljivača

U praksi se prema potrebi izvode razne kombinacije trakastih i štapnih uzemljivača. Tako se za zaštitu nekog objekta, bilo zgrade ili po-

strojenja, mogu izvesti trakasti uzemljivači u obliku četverokuta ili prstena. Ako se na takav način ne postigne mali otpor rasprostiranja, izvode se dva takva četverokuta ili dva takva koncentrična prstena, koje treba međusobno povezati. Ako se i takvim postupkom ne ostvaruju povoljni rezultati, tad se trakasti uzemljivači izvode tako da tvore jednu mrežu. Već prema prilikama i zahtjevima, trakasti se uzemljivači kombiniraju i sa štapnim uzemljivačima. To se izvodi tako da se npr. na obodu jednoga trakastog uzemljivača u obliku četverokuta postave još i štapni uzemljivači. Na taj se način postupa posebno onda kad nema dovoljno prostora gdje bi se ukopali samo trakasti uzemljivači, pa za smanjenje ukupnog otpora uzemljenja služi dubina zemlje.

4.9. Prstenasti uzemljivači

Kod prstenastih uzemljivača kružna oblika kojima je promjer D veći od 30 m, njihov se otpor rasprostiranja R izračunava po približnom izrazu (4.5), koji vrijedi za trakaste uzemljivače. Pri tome se za duljinu uzemljivača u taj izraz umjesto l uvrsti $\pi \cdot D$, pa će biti:

$$R = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot D} \ln \frac{2\pi \cdot D}{d}. \quad (4.12)$$

ρ — specifični otpor u (Ω m)

D — promjer prstenastog uzemljivača u (m)

d — promjer okruglog vodiča od kojega je zveden prstenasti uzemljivač u (m)

Za prstenaste uzemljivače koji nisu kružna oblika otpor rasprostiranja R može se izračunati tako da se nađe promjer D kruga koji ima istu površinu kao i promatrani prstenasti uzemljivač, i to po izrazu:

$$R = \frac{2 \cdot \rho}{3 \cdot D}. \quad (4.13)$$

D je pri tome:

$$\left(\frac{D}{2}\right)^2 \pi = A, \quad D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \text{ u (m).}$$

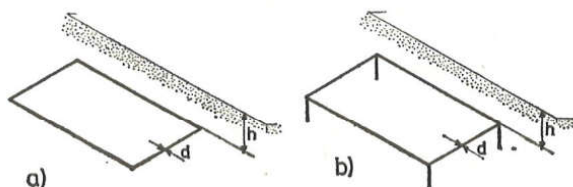
ρ — specifični otpor u (Ω m)

D — promjer prstenastog uzemljivača u (m)

A — površina koju zatvara uzemljivač bilo kakva oblika

Ta formula vrijedi za uzemljivače kojima je promjer $D > 30$ m.

Prstenasti uzemljivači četverokutna oblika sastavljeni od trakastih uzemljivača, koji se najviše upotrebljavaju za uzemljenje objekta na slobodnom zemljištu, i to tako da okružuju objekt ili skupinu uređaja, posebno su prikazani na slici 4.5.a.



Sl. 4.5. Prstenasti uzemljivači izvedeni u obliku četverokuta

Ako s L označimo opseg četverokuta, s d promjer vodiča i s h dubinu ukopa, otpor uzemljenja takva uzemljivača izračunava se prema izrazu:

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \ln \frac{1,27 L}{\sqrt{h \cdot d}}. \quad (4.14)$$

Uzemljivač može biti izveden od okruglog ili plosnatog željeza, te bakrenog užeta ili bakrene trake. Dubina ukopavanja obično je 0,50 m.

Kad je specifični otpor tla u većoj dubini manji, onda može biti od koristi da se uzemljivač ukopa i na veću dubinu od 0,50 m. Ako se to ne želi raditi, tad se uzduž oboda tog četverouglastog uzemljivača dodavaju još i štapni uzemljivači (sl. 4.5. b). Izraz za računanje otpora rasprostiranja za četverouglaste uzemljivače kojima su dodani i štapni uzemljivači složeniji je od izraza (4.14) i ovdje se neće navoditi.

Kad se postavlja četverouglasti uzemljivač, valja paziti na to da on unutar površine što je zatvara obuhvati sve metalne dijelove koje je potrebno uzemljiti. Pri tome još je bitno da on bude udaljen od tih svih dijelova barem 1 m. Osim toga prijeko je potrebno da sabirni zemljovod, koji prikuplja sva uzemljenja, bude povezan za četverouglasti uzemljivač barem na dva mjesta, i to na suprotnim stranama četverokuta.

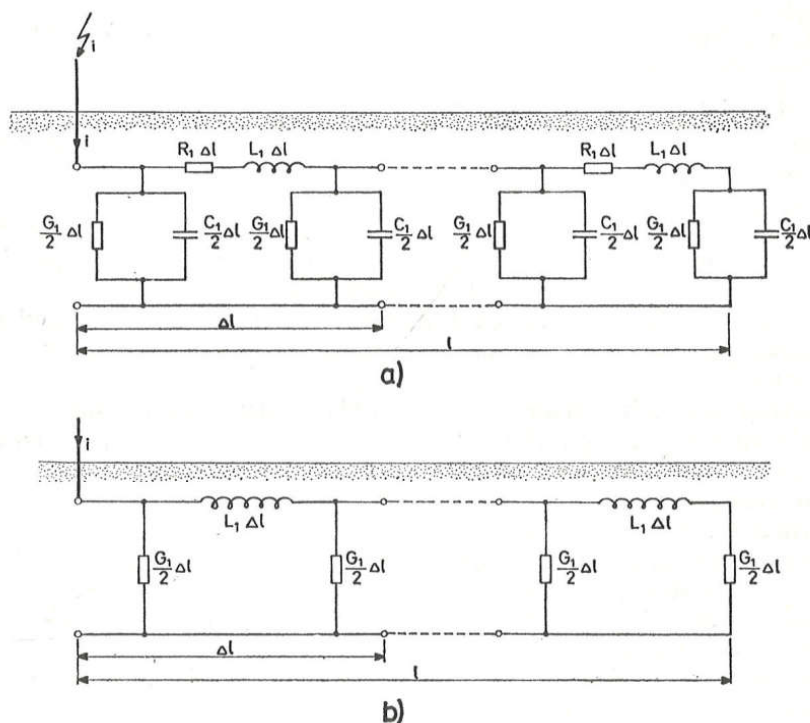
4.10. Udarni otpor rasprostiranja

U slabo vodljivim zemljištima, odnosno u tlima velikoga specifičnog otpora ρ , nećemo postići mali otpor rasprostiranja kratkim uzemljivačima, zato postavljamo duge trakaste uzemljivače. Jedan takav uzemljivač u loše vodljivom zemljištu možemo zamisliti kao nadzemni vod s ravnomjerno raspoređenim parametrima, odnosno kao vod kojemu je po duljini od jednog metra uzdužni otpor R_1 , induktivitet L_1 , kapacitet C_1 i odvod G_1 . Za vodu i zemlju u kojoj se nalazi uzemljivač možemo reći da ima, kao i svaki drugi medij, svoj specifični otpor ρ , dielektričku konstantu ϵ_r i magnetski permeabilitet μ . Specifični se otpor mijenja u širokim granicama od 0,3 Ωm kod morske vode do 1 000 Ωm i više kod suhoga kamenitog tla. Dielektrička konstanta ϵ_r jednako se tako mijenja prema sastavu tla i sadržaju vode, pa ta konstanta za jako suho tlo iznosi $\epsilon_r = 1$ (kao zrak), a za jako vlažno $\epsilon_r = 80$ (kao voda). Što se

tiče magnetske permeabilnosti μ , možemo uzeti da je ona konstantna i njezina je vrijednost 1.

U skladu s teorijom vodova svakom uzemljivaču protjecanome strujom odgovara »povratni vodič« koji predstavlja ekvivalentni utjecaj samog tla. Taj će se vodič postaviti na određenoj udaljenosti paralelno s uzemljivačem.

Ekvivalentna shema jednoga takvog uzemljivača duljine l dade se prema našim pretpostavkama predočiti u obliku lanca četveropola, kao što je to prikazano na slici 4.6.a.



Sl. 4.6. Lanac π četveropola

Iz slike se zapaža da je uzdužna grana jednog četveropola sastavljena od samo jednog dijela ukupnoga uzdužnog otpora uzemljivača, koji smo na slici označili s $R_1 \Delta l$, te od samo jednog dijela ukupnog induktiviteta, na slici označenoga s $L_1 \Delta l$. Jednako tako, paralelne grane tog četveropola sadrže samo dio $C_1 \Delta l$ ukupnog kapaciteta uzemljivača prema zemlji. Taj djelić kapaciteta podijelili smo u dvije jednake komponente $(C_1/2) \Delta l$. Na kraju, što je najvažnije, paralelne grane tog četveropola sadrže i dio $G_1 \Delta l$ ukupnog odvoda, pa je i taj djelić jednako tako podijeljen u dvije jednake komponente označene s $(G_1/2) \Delta l$.

Da bismo izračunali i sastavili konkretnu ekvivalentnu shemu nekoga štapnog ili trakastog uzemljivača, u tablici 4.2. zajedno su svrstane jedinične vrijednosti parametara G_1 , C_1 i L_1 za jedne i druge uzemljivače.

Tablica 4.2. Parametri štapnih i trakastih uzemljivača

Jedinični parametri	Štapni uzemljivači	Trakasti uzemljivači
Odvod: G_1 u (S/m)	$\frac{6,28}{e} \cdot \frac{1}{\ln \frac{1}{r}}$	$\frac{3,1}{e} \cdot \frac{1}{\ln \frac{1}{r}}$
Kapacitet: C_1 u (F/m)	$56 \cdot 10^{-21} \varepsilon_r \frac{1}{\ln \frac{1}{r}}$	$28 \cdot 10^{-22} (1 + \varepsilon_r) \ln \frac{1}{r}$
Induktivitet: L_1 u (H/m)	$0,20 \cdot 10^{-6} \ln \frac{1}{r}$	$0,20 \cdot 10^{-6} \ln \frac{1}{r}$

Izrazi u tablici omogućuju da izračunamo jedinične vrijednosti parametara za štapne i trakaste uzemljivače bilo kako velikih promjera i duljina. Međutim, u praksi, takvi su uzemljivači standardiziranih dimenzija, pa neki od tih parametara ne utječu na raspršivanje struje groma kad oni nju odvede. Tako uzdužni otpor R tih uzemljivača praktički možemo zanemariti jer on sam po sebi ne mijenja veličinu struje groma. Jednako tako, s obzirom na oblik i površinu uzemljivača koji dolaze u praksi, možemo reći da i njihov kapacitet C prema tlu ne dolazi praktički do izražaja. Zato je i utjecaj tog parametra dopušteno izostaviti iz razmatranja.

Zanemarenje tih parametara iz ekvivalentne sheme na slici 4.6.a, zbog njihova neznatnog utjecaja, dovodi do toga da pojednostavljena ekvivalentna shema izgleda kao na slici 4.6.b. Prema tome uzimamo da na raspršivanje struje groma pretežno utječu induktivitet L i odvod uzemljivača G . Za štapne i trakaste uzemljivače koji dolaze u praksi opravdano je računati da se njihov induktivitet, koji ima značajnu ulogu pri protoku struje groma, malo mijenja s promjenom vrste tla. Naprotiv, odvod se mijenja mnogo više s promjenom vodljivosti tla u kojem je ukopan, pa ga treba od slučaja do slučaja posebno računati.

Prije nego se priđe određivanju otpora rasprostiranja struje groma, uzimajući u obzir sad samo odvod i induktivitet uzemljivača prema ekvivalentnoj shemi na slici 4.6.b, potrebno je dati neka osnovna fizikalna tumačenja, jer su pojave prilikom prolaska jakih struja groma kroz i tako jednostavno zamišljanje uzemljivače i kroz tlo dosta složene. Opisat ćemo kako se to otprilike zbiva. Uzemljivači pri odvođenju jakih struja groma poprimaju visoke potencijale i oko njih se stvara električno polje. To se posebno pojavljuje u loše vodljivom tlu. To električno polje katkada je jače od probojnog napona zemljišta i u okolišu uzemljivača nastupa proboj. Zemlja postaje zbog toga u njegovu okolišu vodljiva. Ta pojava, sama po sebi, dobro bi došla jer tada to stanje možemo shvatiti kao povećanje presjeka našeg uzemljivača, što bi u krajnjem značilo smanjenje otpora rasprostiranja R . Međutim, s druge strane, induktivitet uzemljivača, što fizikalno označava magnetski tok oko uzemljivača, onemogućuje jednako otjecanje struje s metalnog vodiča po njegovoj cijeloj duljini. Zato je struja prisiljena da se više raspršuje u zemlju samo po duljini prvih nekoliko metara. Tu drugu pojavu, koja ne

dopušta da se aktivira cijela dužina uzemljivača, možemo sada obrnuto shvatiti, kao povećanje otpora rasprostiranja. O tome koja će od te dvije suprotne tendencije prevladati ovisi rezultirajući otpor rasprostiranja struje groma, koji nazivamo udarni otpor rasprostiranja R_u . Taj će udarni otpor biti manji ili veći od otpora rasprostiranja R koji nastaje pri rasprostiranju izmjenične ili istosmjerne struje u tlo.

Razlika između udarnog otpora rasprostiranja R_u i običnog otpora rasprostiranja R ne ovisi samo o jačini struje groma nego i mnogo o obliku struje. Posebno na nju mnogo utječe strmina struja groma (di/dt) koja može poprimiti vrlo različite vrijednosti, od 0,3 do 80 kA/ μ s. Struje groma takvih strmina sporije prodiru u uzemljivač jer im se suprotstavlja induktivni otpor uzemljivača koji tada dolazi do izražaja. Što je strmina struje veća, odnosno što je vrijeme trajanja čela vala T_g kraće, struja će prodrijeti po cijeloj duljini uzemljivača. To onemogućuje odvođenje struje groma po cijeloj duljini uzemljivača u isto vrijeme kad nailazi na njega naponski val.

Iz svih tih upravo izloženih činjenica daje se zaključiti da prilikom provođenja struje groma u zemlju ne sudjeluje uvijek cijela duljina uzemljivača, nego samo jedan njezin dio. Ta okolnost sigurno ima utjecaja na ukupni otpor koji se pojavljuje pri rasprostiranju struje u zemlji. Da bismo taj otpor izračunali, moramo prije odrediti aktivnu duljinu uzemljivača. Pri računanju aktivnog dijela duljine nekog štapnog ili traka-stog uzemljivača koji sudjeluje u vođenju struja groma moramo uzeti u obzir jediničnu odvodnu sposobnost uzemljivača, zatim njegov induktivitet i , na kraju, vrijeme trajanja čela strujnog vala. Tu aktivnu duljinu uzemljivača, uzimajući u obzir sve spomenute okolnosti, približno dobivamo iz izraza:

$$l_a = 1,1 \sqrt{\frac{T_g}{G_1 \cdot L_1}} \text{ (m)}. \quad (4.15)$$

G_1 — jedinični odvod u (S/m)

L_1 — jedinični induktivitet u (H/m)

T_g — vrijeme trajanja čela struje u (μ s)

Taj izraz za aktivnu duljinu uzemljivača osniva se na analitičkoj vezi između odvoda G_1 , induktiviteta L_1 i dužine trajanja čela struje groma T_g . To omogućuje da se pomoću njega procijeni hoće li neki uzemljivač određene duljine l odvoditi normalno struju groma u zemlju ili će to činiti samo jednim dijelom svoje duljine l_a , te će na takav način zapravo povećati otpor prilikom raspršivanja struje. Zato bismo ukratko mogli reći ovako: Ako je uzemljivač u zemlji duži od izračunate aktivne duljine ($l > l_a$), tad će on djelovati samo do duljine l_a . Obrnuto, ako je uzemljivač u zemlji kraći od aktivne duljine ($l < l_a$), on će djelovati cijelom svojom duljinom l te neće biti problema prilikom prolaska struje groma, odnosno ne treba očekivati promjenu otpora rasprostiranja R .

Račun udarnog otpora rasprostiranja olakšava činjenicu da je jedinični induktivitet L_1 za uzemljivače u svim vrstama tla prilično konstantan i da se njegova vrijednost praktički mijenja u uskim granicama, od 1 do 2 μ H/m. Stoga se udarni otpor rasprostiranja R_u računa samo u

funkciji odvoda uzemljivača G_1 , i u funkciji vremena trajanja čela vala T_δ .

Za približno računanje udarnog otpora rasprostiranja vrijedi izraz:

$$R_u = \frac{1}{K_u \sqrt{G_1 \cdot T_\delta}} \cdot \quad (4.16)$$

K_u — faktor ovisan o duljini uzemljivača l , odvodu uzemljivača G i o vremenu trajanja čela struje groma T_δ ; taj faktor može se pročitati iz dijagrama na slici 4.7, gdje je on naveden u funkciji od $(\sqrt{G_1/T_\delta} \cdot l)$

G_1 — jedinični odvod u (S/m)

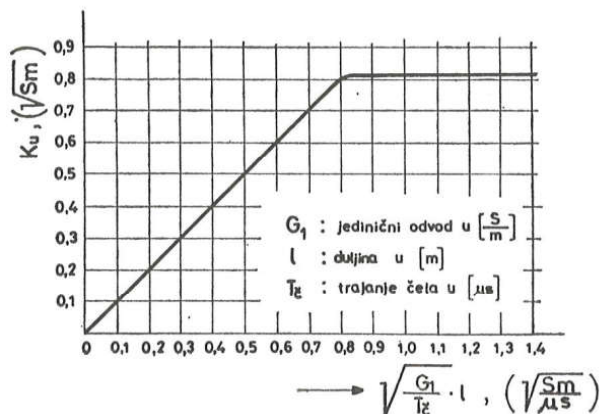
T_δ — trajanje čela struje groma u (μ s)

Ako želimo uzeti u obzir vrlo nepovoljne okolnosti, tad u račun otpora rasprostiranja uzimamo da čelo struje groma T_δ iznosi 1μ s.

Udarni otpor rasprostiranja računa se onda kad se sumnja da duži uzemljivači u lošem zemljištu neće prilikom prolaska struje groma djelovati cijelom svojom duljinom. Tad treba umjesto običnog otpora rasprostiranja R , kojem vrijednost utvrđujemo mjerenjem izmjeničnom strujom 50 Hz, uzeti u obzir udarni otpor uzemljenja R_u izračunana iz izraza (4.16). Ako je taj izračunati udarni otpor R_u veći od R , tad za računanje najvećeg potencijala $U_{\max}$, koji stvara na uzemljivaču tjemena vrijednost struje groma, treba množiti tjemenu vrijednost struje groma $\hat{i}_g$ izračunatim udarnim otporom rasprostiranja R_u ($U_{\max} = \hat{i}_g \cdot R_u$).

Obično u praksi nema mjesta za postavljanje dugih uzemljivača. U tom se slučaju povezuje paralelno više kraćih uzemljivača, kako bi se time postigao što manji otpor rasprostiranja. Za računanje udarnog otpora rasprostiranja takva kombiniranog uzemljivača izračunava se udarni otpor R_u jednog uzemljivača, pa se dobiveni rezultat dijeli brojem upotrijebljenih uzemljivača i koeficijentom međusobnog djelovanja η dakle:

$$R_u = \frac{(R_u)_1}{n \cdot \eta} \quad (4.17)$$



Sl. 4.7. Dijagram za približno računanje udarnog otpora uzemljenja (R_u)

Primjer 4.5.

Valja izračunati udarni otpor rasprostiranja trakastog uzemljivača duljine trake $l = 10$ m, a širine 20 m. Uzemljivač je ukopan u zemlju specifičnog otpora $\varrho = 100 \Omega\text{m}$. Pretpostavimo da njime protječe struja groma duljine trajanja čela $T_g = 1 \mu\text{s}$ i da mu je induktivitet $L_1 = 1,5 \mu\text{H/m}$. Jednako tako izračunati udarni otpor rasprostiranja tog uzemljivača uz pretpostavku da je drugi put njegova duljina 20 m. Izračunajte i usporedite u jednom i u drugom slučaju udarne otpore rasprostiranja s otporima rasprostiranja tih uzemljivača uz pretpostavku da njima protječe izmjenična struja.

Rješenje:

Za uzemljivač duljine $l = 10$ m:

$$G_1 \approx \frac{3,1}{\varrho} \cdot \frac{1}{\ln \frac{l}{r}} = \frac{3,1}{100} \cdot \frac{1}{\ln \frac{10}{0,005}} = 0,004078 \text{ S/m}$$

$$\sqrt{\frac{G_1}{T_g}} \cdot l = \sqrt{\frac{0,004078}{1}} \cdot 10 = 0,638, K_u = 0,638$$

$$R_u = \frac{1}{K_u \sqrt{G_1 T_g}} = \frac{1}{0,638 \sqrt{0,004078 \cdot 1}} = 24,54 \Omega.$$

Obični bi otpor uzemljenja prema izrazu (4.5) iznosio 24Ω . Za uzemljivač duljine $l = 20$ m:

$$G_1 \approx \frac{3,1}{\varrho} \cdot \frac{1}{\ln \frac{l}{r}} = \frac{3,1}{100} \cdot \frac{1}{\ln \frac{20}{0,005}} = 0,00374 \text{ S/m}$$

$$\sqrt{\frac{G_1}{T_g}} \cdot l = \sqrt{\frac{0,00374}{1}} \cdot 20 = 1,22, K_u = 0,82$$

$$R_u = \frac{1}{K_u \sqrt{G_1 T_g}} = \frac{1}{0,82 \sqrt{0,00374 \cdot 1}} = 20 \Omega.$$

Obični bi otpor uzemljenja prema izrazu (4.5) bio 2Ω .

Vidimo da je u drugom slučaju, kad je duljina uzemljivača $l = 20$ m, udarni otpor rasprostiranja znatno veći od običnog otpora rasprostiranja R . Zato, prilikom projektiranja, treba uzeti u obzir udarni otpor rasprostiranja, odnosno uzemljenja.

Primjer 4.6.

Jednome trakastom uzemljivaču stvarna je duljina $l = 5$, a drugome $l = 30$ m. Kolike su njihove aktivne duljine ako su ukopani u zemlji spe-

cifičnog otpora $\varrho = 100 \, \Omega \text{ m}$, ako im je jedinični induktivitet $L_1 = 1,5 \, \mu\text{H/m}$ i ako preko njih treba da se rasprši u zemlji struja trajanja čela $T_\delta = 1 \, \mu\text{s}$. Širina traka je 20 mm, kod jednog i drugog uzemljivača. Koji je otpor rasprostiranja mjerodavan za odvođenje struje groma, R ili R_u ?

Rješenje:

Za uzemljivač duljine $l = 5 \text{ m}$:

$$G_1 = \frac{3,1}{\varrho} \cdot \frac{1}{\ln \frac{l}{r}} = \frac{3,1}{100} \cdot \frac{1}{\ln \frac{5}{0,005}} = 0,00449 \text{ S/m}$$

$$l_a = 1,1 \sqrt{\frac{T_\delta}{G_1 \cdot L_1}} = 1,1 \sqrt{\frac{1}{0,00449 \cdot 1,5}} = 13,4 \text{ m}, \quad l < l_a$$

$$(R = 39,6 \, \Omega).$$

Za uzemljivač duljine $l = 30 \text{ m}$:

$$G_1 = \frac{3,1}{\varrho} \cdot \frac{1}{\ln \frac{l}{r}} = \frac{3,1}{100} \cdot \frac{1}{\ln \frac{30}{0,005}} = 0,00356 \text{ S/m}$$

$$l_a = 1,1 \sqrt{\frac{T_\delta}{G_1 \cdot L_1}} = 1,1 \sqrt{\frac{1}{0,00356 \cdot 1,5}} = 15 \text{ m}, \quad l > l_a$$

$$(R = 8,5 \, \Omega).$$

Kod prvog uzemljivača uzet ćemo da je za odvođenje struje groma mjerodavan obični omski otpor R , mjeran izmjeničnom strujom, a kod drugoga moramo izračunati udarni otpor uzemljenja R_u , jer je on u drugom slučaju veći zbog toga što je aktivna duljina l_a manja od stvarne duljine l .

Koristeći se već zadanim i izračunanim veličinama u ovom primjeru, te prema podacima iz dijagrama na slici 4.7, udarni otpor uzemljenja u drugom slučaju iznosi:

$$R_u = \frac{1}{K_u \sqrt{G_1 \cdot T_\delta}} = \frac{1}{0,82 \sqrt{0,00356 \cdot 1}} = 20,4 \, \Omega.$$

Kada bi taj uzemljivač odvodio struju groma tjemene vrijednosti od 25 kA, na njemu bi se pojavio potencijal prema dalekoj zemlji $U_{\max} = 25 \cdot 20,4 = 510 \text{ kV}$.

4.11. Neka razmatranja o uzemljenju gromobranskih instalacija

Obično se ponašanje uzemljivača i mjerenje njegova otpora provodi na klasičan način npr. metodom triju sondi. Bilo bi mnogo ispravnije da se ponašanje uzemljivača kontrolira prema struji groma koja se vremenski naglo mijenja. Međutim nailazimo na teškoće zbog toga što se u stvarnosti svi uzemljivači ne ponašaju jednako jer nisu jednako izvedeni, ali i zato što struje groma nisu jednake u svim prilikama.

Međutim, kako bilo da bilo postignemo li malu vrijednost omskog otpora uzemljenja, to je dobar znak o ponašanju uzemljivača u najvećem dijelu okolišne zemlje u kojoj se raspršuje struja groma. Iako pojava raspršivanja struje groma traje vrlo kratko, ipak ispravno djelovanje uzemljivača smatramo takvo djelovanje kad su postignute ograničene vrijednosti napona dodira i napona koraka. Budući da su te dvije vrijednosti ovisne o otporu uzemljenja gromobranske instalacije, potrebno je imati što niže vrijednosti tog otpora. Pitanje apsolutne vrijednosti otpora uzemljenja još je uvijek sporno i o tome u svijetu ima izvjesnih dilema. Vrijednosti koje preporučuju neki autori, koji npr. tvrde da je dovoljno radi sigurnosti postići otpor od 70 do 100 Ω , za druge su sasvim neprihvatljive i oni smatraju da je to previsoko. Danas u praksi nastojimo da taj otpor ne prekorači 20 Ω . Oslanjati se, pak, na postojeće propise o zaštitnim uzemljenjima koja vrijede u električnim postrojenjima nije dobro jer su ona projektirana za čvrsto određene veličine struje a ne struje groma. Dakle, neku fiksnu graničnu vrijednost nije moguće odrediti. Govorimo pri tom o zajedničkom gromobranskom i zaštitnom uzemljenju.

Odvajanje gromobranskog uzemljenja koje bi malim otporom rasprostriranja efikasno djelovalo prilikom odvođenja ekstremno visokih struja groma, zahtijevalo bi vrlo velike financijske izdatke, a često ga nije lako ni tehnički izvesti.

Izgleda zato najbolje da se možda ne inzistira na postizavanju malog otpora uzemljenja, nego da se oblikovanjem uzemljivača (izjednačivanjem potencijala) smanje samo gradijenti napona opasni za ljude. Takvo stanovište posebno vrijedi u područjima koja imaju visoku vrijednost specifičnog otpora tla, i gdje je malu vrijednost otpora uzemljenja teško postići. Ako se pojavljuju teškoće da se i oblikovanjem uzemljivača smanji gradijent napona, onda je gotovo uvijek moguće zabraniti pristup u taj dio prostora gdje ljudi mogu doći u dodir s instalacijama što služe za odvod struje groma.

U svim ovim dilemama pri projektiranju uzemljenja, koje su gotovo uvijek prisutne, potrebno je prije svega voditi računa o tome da opasnost za ljude od udara struje ovisi o njezinoj jačini i o vremenu trajanja. Budući da je vrijeme trajanja struje groma vrlo kratko, analogno je dosad utvrđenim principima moguće prilikom odvođenja struje groma dopustiti i veće gradijente napona nego što je to dopušteno u odvođenju struje npr. u postrojenjima. (Neki autori drže da je dopušten prolazak kroz tijelo i struje od 10 A za vrijeme od nekoliko milisekundi.)

U svakom slučaju, što se tiče napona dodira, ako se pristupi izjednačavanju potencijala oblikovanjem uzemljivača, na svim mjestima gdje to dolazi u obzir, neće biti problema ni opasnosti.

Što se tiče napona koraka koji se pojavljuje za vrijeme raspršivanja struje groma, mogli bismo reći, uvijek naravno ostajući pri tome vrlo oprezni, da granična vrijednost može iznositi i do 1 000 V, pa možda i nešto više. Tu graničnu vrijednost dopuštaju neki autori zbog toga što je vrijeme prolaska struje groma vrlo kratko, a i zato što je vrlo mala vjerojatnost da će se neka osoba u tako kratkom vremenu prolaska struje naći baš na tome mjestu i u tom periodu. Takvom stajalištu ide u prilog i činjenica da su jake struje groma statistički vrlo rijetke, pa se, prema tome, i najveći gradijenti napona ne moraju pojavljivati. Graničnu vrijednost za napon koraka oko 1 000 V uzeli su autori na osnovi vrlo oprezne procjene da čovjek između nogu može izdržati struju jakosti od 1 A u vremenu od jedne do dvije stotinke sekunde, te računajući na to da je prolazak struje kroz ljudski organizam između jedne i druge noge najmanje opasan.

Dakle, uzevši sasvim općenito ono što smo dosad iznijeli, možemo zaključiti da svaki napon dodira treba onemogućiti stvaranjem ekvipotencijalnih površina na opasnim mjestima, a napon koraka dopustiti uz stanoviti oprez i do 1 000 V.

Takav način razmatranja prilikom projektiranja uzemljenja odnosno se samo na one okolnosti gdje ne možemo zbog loše vodljivosti terena postići mali ukupni otpor uzemljenja.

Ovdje se mora ipak napomenuti da u svim drugim prilikama valja nastojati postići što manji ukupni otpor uzemljenja radi što bržeg smanjenja napona na vrhu nekoga štíćenog objekta, jer su pri malom otporu uzemljenja refleksije naponskih valova veće.

Mali ukupni otpor uzemljenja nastojat ćemo ostvariti i zbog toga da nam vodiči povezani s tim uzemljenjem, a u vezi su s dalekom zemljom (npr. plaštevii energetskih kabela ili vodovodne cijevi) ne bi prenosili opasne potencijale.

Ukoliko ne možemo ipak postići mali ukupni otpor uzemljenja, tad je prijeko potrebno da te vodiče koji su u vezi s dalekom zemljom na nekom mjestu dobro izoliramo, pogotovo ako je to vrlo loše vodljiv teren.

5. Izjednačavanje potencijala

Kad zaštićujemo neku zgradu ili bilo kakav drugi objekt od izravnih udara groma pomoću šipkastih gromobrana ili metalnih mreža, tad se odmah nameće pitanje u kakvom su električnom odnosu te postavljene gromobranske instalacije prema drugim metalnim dijelovima koji se mogu naći unutar tog objekta što ga želimo štititi. Na takve metalne dijelove nailazimo vrlo često u većim zgradama ili industrijskim pogonima, a postavljanjem gromobranske instalacije, zapravo u njihovoj neposrednoj blizini provodimo u zemlju veoma jake i po obliku promjenljive struje. Ovdje će se razmotriti kakve sve štetne i opasne posljedice mogu nastupiti zbog takva susjedstva.

U prvim trenucima udara, naponi od mnogo milijuna volta, koje pri me vodiči gromobranske instalacije, stvaraju oko tih vodiča jako električno polje jer struje groma ne mogu biti momentalno odvedene u zemlju. Tako jako električno polje vrlo je često jače od probojne čvrstoće zraka ili od drugih izolacijskih materijala kroz koje prolazi gromobranska instalacija. U tim prvim trenucima tako jako električno polje napreže zrak ili drugu izolaciju, pa može nastati proboj između vodiča gromobranske instalacije i drugih metalnih dijelova u blizini koji se taj trenutak nalaze na drugome, nižem potencijalu ili, kao što se to obično događa, na potencijalu zemlje. Proboja ne mora uvijek biti jer to ovisi o mnogim okolnostima. Tako će on lakše nastupiti ako su metalni dijelovi većih dimenzija i ako su na izoliranom postolju. Jednako tako do proboja će lakše doći ukoliko vodiči gromobranske instalacije na mjestima koja su blizu metalnih dijelova nisu ravno položeni, nego su eventualno zakrivljeni. Proboji se u takvim okolnostima lakše pojavljuju jer veće izolirane metalne mase, s jedne strane, i zakrivljenja na gromobranskoj instalaciji, s druge strane, povećavaju jakost električnog polja, pa se na tim mjestima i više napreže izolacija. Takvi proboji ili preskoci sadržavaju toplinsku energiju, pa se zna dogoditi da izbije požar ili eksplozija, osobito onda ako se tu nalaze lako zapaljivi plinovi ili drugi materijali takvih obilježja.

Iz ovih razmatranja izlazi da valja najprije pokušati ukloniti uzrok tim probojima. Budući da smo rekli da oni nastaju zbog vrlo visokih napona u prvim trenucima udara groma, treba konstrukcijom gromobranske instalacije izbjeći da nam tako visoki naponi ne nastanu, barem ne na kritičnim mjestima. Smanjenje preskočnih napona najbolje se po-

stiže tako da se postavi što više odvoda za struju groma jer se tad ona grana po svim odvodima. Osim toga, moramo smanjiti i otpor uzemljenja. Na takav način smanjuje se induktivitet i omski otpor cijele instalacije, što bitno utječe na veličinu preskočnih napona i na vrijeme trajanja te opasnosti. No, to nije uvijek lako izvesti zbog financijskih, estetskih ili drugih razloga.

Ukoliko, iz bilo kojih uzroka, ne želimo ili ne možemo ukloniti proboje povećavajući broj odvoda i smanjujući otpor uzemljenja, tad ćemo proboje na druge metalne dijelove spriječiti na dva načina koji se u osnovi jedan od drugoga razlikuju.

Prvi način sastoji se u tome da sve veće metalne dijelove udaljimo od vodiča gromobranske instalacije; toliko daleko da prema tim metalnim dijelovima ne bude proboja. Udaljavanjem metalnih dijelova od vodiča gromobranske instalacije zapravo pojačavamo izolaciju između njih, pa je tad postojeće razlike napona ne mogu probiti.

Taj postupak sprečavanja proboja s električnog je gledišta sasvim ispravan. Taj način, zapravo drži cijelu gromobransku instalaciju nezavisnom od drugih metalnih dijelova koji se nalaze unutar zgrade. Tako struja groma može biti odvedena u zemlju samo vodičima gromobranske instalacije, što se ponekad iz različitih razloga u praksi izuzetno i zahtijeva. Međutim, takav način zaštite zahtijeva velike prostore, što nije ostvarivo kod mnogih objekata, bili oni industrijske ili druge namjene. To često izaziva funkcionalne, estetske, a posebno novčane teškoće. Doduše, taj princip sprečavanja proboja s instalacije na druge metalne dijelove izoliranjem mogao bi se provesti i tako da ne udaljujemo metalne dijelove od instalacije, nego da instalaciju odvojimo izolacijama koje će izdržati vrlo visoke napone. I to se izuzetno i u specijalnim okolnostima radi, ali je to veoma skupo i neekonomično. Osim toga, izolacija je osjetljiva i lako će se oštetiti, pa to sve skupa smanjuje sigurnost u ovom načinu sprečavanja proboja na druge metalne dijelove. Zato se češće odabire jedan drugi način zaštite.

Taj način je u principu suprotan prvome, a sastoji se u tome da sve veće metalne dijelove u blizini gromobranske instalacije galvanski povežemo najkraćim putem za jedan ili više gromobranskih odvoda i za sistem uzemljenja. Na takav način, zapravo, ne dopuštamo da se stvaraju na tim mjestima veće razlike napona, pa zato neće biti proboja između njih kroz zrak ili drugu izolaciju. Takvo sprečavanje proboja smanjenjem razlike napona na minimum obično se naziva izjednačavanje potencijala.

Možemo reći da je opisana zaštita vrlo djelotvorna i ne stvara obično veće teškoće, pa se zato, gotovo uvijek susreće u praksi. Međutim, ništa nije savršeno, pa zato i u takvoj zaštiti moramo uzeti u obzir neke popratne pojave što tom prilikom mogu iskrsnuti. Tako, povezujući sve metalne dijelove za gromobransku instalaciju moramo paziti na to kako će se cijeli objekt koji štitimo električki odnositi prema svojoj okolini. Jer tada, cijeli objekt, sa svim metalnim dijelovima koji se u njemu nalaze, prema svojoj okolini ima vrlo visoki potencijal. To može stvoriti više teškoća, a osobito onda ako u taj objekt ulaze dugački vodiči kao što su to plinske ili vodovodne cijevi, kabelski metalni plaševi itd. Tad će takvi vodiči svojom dužinom prenositi taj visoki potencijal na mje-

sta gdje mi to baš ne želimo, odnosno tamo gdje taj potencijal može biti opasan. Dakle, pri povezivanju moramo biti oprezni i paziti na to koje metalne dijelove povezujemo, kada ih možemo povezati, a kad to ne smijemo činiti.

Ovdje bi bilo dobro pripomenuti da kad primjenjujemo sve iznesene mogućnosti sprečavanja proboja na metalne dijelove, treba dobro proučiti objekt koji štitimo, pa tek onda upotrijebiti ili prvi (izoliranjem) ili drugi način zaštite (izjednačavanjem potencijala). Da bi sve što smo dosad razmatrali bilo jasnije, ova će se problematika analizirati na konkretnom primjeru. To će nam omogućiti da se bolje snalazimo u različitim okolnostima svakidašnje prakse. Principi zaštite su, kako vidimo, jednostavni, ali zato brojne i složene situacije u realizaciji stvaraju teškoće kad jedan od tih principa zaštite želimo primijeniti.

5.1. Praktička razmatranja

Na slici 5.1. predočena je zgrada u kojoj su svi metalni dijelovi, na svim katovima, galvanski povezani s gromobranskom instalacijom i sve je skupa zajednički uzemljeno.

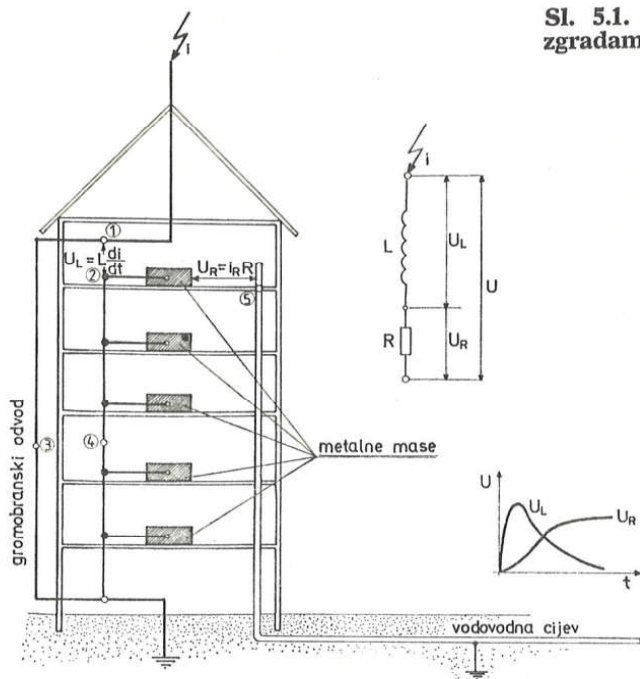
Iz slike dalje vidimo da u tu zgradu ulazi vodovodna cijev koju možemo smatrati vodičem što bi mogao spojiti potencijal koji poprima zgrada u slučaju udara groma s potencijalom daleke zemlje. Da bismo obrazložili djelovanje tako postavljene zaštite i radi razumijevanja međusobnih odnosa koji se pojavljuju pri udaru u tako izvedenoj gromobranskoj instalaciji, nismo povezali vodovodnu cijev za sistem zaštite. Dakle, u našem primjeru imamo gromobransku instalaciju na koju su povezani metalni dijelovi, s jedne strane, i vodovodnu cijev koja je od njih odvojena, s druge strane.

Kad grom udari u gromobransku instalaciju, prolasku se struje suprotstavlja induktivitet odvoda L i otpor uzemljenja R , pa pojednostavljena električna shema naše instalacije izgleda onako kao na slici 5.1. Obično se gromobranskom instalacijom ne uspijeva provesti ukupna struja groma i_g , nego samo njezin veći dio, koji ćemo označiti s i . Prolazak struje i kroz jedan odvod gromobranske instalacije na slici 5.1. podiže potencijal cijelog objekta prema dalekoj zemlji na vrijednost koja se računa iz jednadžbe:

$$U = L \frac{di}{dt} + iR. \quad (5.1)$$

Taj se ukupni napon neće razmatrati jer njegova veličina ne daje uvid u zbivanja unutar zgrade. Taj je napon sastavljen, kako vidimo iz jednadžbe, od dvije komponente pada napona pa će se one, svaka posebno, razmotriti. Odmah nakon udara groma dolazi do izražaja pad napona $U_L = L (di/dt)$, jer za struju koja je na čelu jako strma i mali induktivitet odvoda znači veliki otpor. Struja polako prodire prema zemlji. U tim je prvim trenucima zato razlika napona prema zemlji manja što se po odvodu više približavamo uzemljivaču. (Npr. u tim prvim trenucima ra-

Sl. 5.1. Izjednačavanje potencijala u zgradama



zlika napona između točaka 3 i 4 nije tako velika kao između točaka 1 i 2, a pogotovo je nema između točaka 2 i 5, odnosno između gromobranske instalacije s metalnim dijelovima prema vodovodnoj cijevi.) Poslije nakon više mikrosekundi, kad je čelo strujnog vala prošlo i kad nailazi hrbat strujnog vala, tek onda nastupa značajniji pad napona na otporu uzemljenja, a pad napona na induktivitetu naglo se smanjuje. To se događa zato što se hrbat strujnog vala relativno malo mijenja, pa mu induktivitet L ne pruža veći otpor, a, naprotiv, otpor uzemljenja R za hrbat vala znači veći otpor. Zbog toga se, u tim kasnijim trenucima, pojavljuje razlika napona $U_R = i_g \cdot R$ između točaka 2 i 5, odnosno između cijelog sistema gromobranske instalacije i vodovodne cijevi što nije na nju spojena, a koja se zbog svoje dužine nalazi na potencijalu daleke zemlje. Ta razlika napona U_R može biti velika i opasna, već prema tome koliki je otpor uzemljenja. No, redovito je ona ipak manja od one razlike napona u prvim trenucima nakon udara groma između vrha gromobrana i zemlje, a koju smo označili s $U_L = L (di/dt)$.

Tako, pretpostavimo li da induktivitet jednog odvoda iznosi $L = 20 \mu\text{H}$, a otpor je uzemljenja $R = 10 \Omega$, struja će groma strmine $50 \text{ kA}/\mu\text{s}$ i momentalne vrijednosti na svome hrptu od 30 kA izazvati u prvim trenucima pad napona:

$$U_L = L \cdot \frac{di}{dt} = 20 \cdot 10^{-3} \frac{50 \cdot 10^{-3}}{10^{-6}} = 1000 \text{ kV},$$

a poslije će na otporu uzemljenja uzrokovati pad napona $U_R = i_g \cdot R = 30 \cdot 10 = 300 \text{ kV}$.

Dosadašnja razmatranja i ovo kratko računanje pokazali su da se za vrijeme čela vala, i nakon toga za vrijeme trajanja hrpta vala, pojavljuju velike razlike napona između dijelova gromobranske instalacije i metalnih dijelova. A zatim, i između cijelog sistema zaštite i vodiča (npr. vodovodne cijevi) koji nisu s tom zaštitom povezani.

Te razlike napona, kako vidimo iz primjera, osjetno su velike. Pa iako je povoljna okolnost da ne nastupaju istodobno, kao što je to kvalitativno na slici 5.1. dijagramom prikazano, ipak ih valja uzimati u obzir prilikom izvedbe gromobranskih instalacija.

Te visoke vrijednosti napona, što nastaju na gromobranskoj instalaciji, po svojoj nas apsolutnoj vrijednosti ne moraju uplašiti, jer one same po sebi nisu neka opasnost. Međutim, kad se one pojavljuju između blizih točaka gromobranske instalacije, s jedne, i metalnih dijelova, s druge strane, tad one mogu izazvati preskoke ili proboje, ili druge neželjene posljedice. To treba spriječiti. Ako se ne da konstrukcijom gromobranske instalacije ukloniti uzrok nastajanja tako velikih razlika napona, logično se nameće zaključak da je najbolje galvanski povezati sve metalne dijelove na gromobransku instalaciju. Posebno je to važno učiniti tamo gdje su metalni predmeti blizu gromobranskih vodova kojima je osnovna namjena da odvede struje groma. Kad jedanput povežemo sve skupa, tad se prilikom odvođenja struje neće dogoditi da u jednom trenutku neki dijelovi instalacije imaju jedan potencijal, a metalni dijelovi drugi, niži potencijal. Tako će u svim trenucima i instalacija i metalni dijelovi imati isti potencijal, pa neće biti proboja među njima. Polazeći od toga u našem primjeru na slici 5.1. trebalo bi galvanski povezati točke 1 i 2 te točke 2 i 5.

Od tog principa zaštite odustaje se samo ako su metalni dijelovi dovoljno daleko od gromobranskih odvoda pa ih shvaćamo kao dobro izolirane slojem zraka ili drugim izolacijama. Ipak, to povezivanje svih metalnih dijelova za gromobransku instalaciju ne smijemo doslovno shvatiti. Neki metalni dijelovi unutar objekta koji štitimo većih su ili manjih dimenzija ili, točnije, neki imaju veći, a neki manji kapacitet prema zemlji. Osim toga, nije lako ni procijeniti koliko je neki metalni dio udaljen od gromobranske instalacije. Dakle, nije lako procijeniti hoće li na toj udaljenosti nastupiti proboj s gromobranske instalacije prema njemu ili ne. Za orijentaciju, treba li povezati neki metalni dio s gromobranskom instalacijom ili ne, može se točnije ocijeniti iz izraza za napon U koji se pojavljuje između gromobranske instalacije i izoliranih metalnih dijelova prema zemlji, a glasi:

$$U = U_L \frac{C_z}{C_i + C_z} \quad (5.2)$$

Pri tome je U_L induktivni pad napona, C_i kapacitet metalnog predmeta prema sistemu zaštite, a C_z je kapacitet tog predmeta prema zemlji.

Iz izraza se može zaključiti da će napon gromobranske instalacije prema metalnom dijelu biti viši što je njegov kapacitet veći prema zemlji nego prema gromobranskoj instalaciji. Kapacitete C_i i C_z nije lako točno u svim okolnostima odrediti jer su metalni dijelovi različitih oblika i dimenzija. No, kako smo rekli, za procjene i orijentaciju spomenuti izraz dobro služi.

(Npr. uz induktivitet odvoda gromobranske instalacije od $20 \mu\text{H}$ i strmine struje groma od $50 \text{ kA}/\mu\text{s}$, potencijal gromobranske instalacije prema zemlji u prvim trenucima je:

$$U_L = L \cdot \frac{di}{dt} = 1\,000 \text{ kV.}$$

Pri tome napon U gromobranske instalacije prema metalnom dijelu kojemu su kapaciteti $C_i = 20 \mu\text{F}$ i $C_z = 100 \mu\text{F}$, iznosi:

$$U = U_L \frac{C_z}{C_i + C_z} = 840 \text{ kV.}$$

Posebno za $C_z \gg C_i$ bit će $U = U_L = 1\,000 \text{ kV.}$)

To računanje pokazuje da se mogu pojaviti vrlo visoke razlike napona. Tako, nalazi li se metalni dio na udaljenosti koja ne bi mogla izdržati tu razliku napona, logično je da na tom mjestu treba galvanski povezati metalne dijelove s gromobranskom instalacijom, kako bi se ta razlika napona smanjila na neznatnu vrijednost.

Provedba zaštite od proboja povezivanjem svih metalnih dijelova za gromobransku instalaciju ima više prednosti, zato je ona danas najviše u upotrebi. No ipak, treba svaku pojedinu praktičku situaciju posebno proučiti i sistem zaštite oprezno provoditi.

Glavna prednost koja se ostvaruje ovom zaštitom sastoji se u tome što nam time međusobnim povezivanjem ni jedna točka unutar objekta neće biti na potencijalu daleke zemlje. Pa zato, ako uspješno obavimo to povezivanje, nije potrebno zahtijevati da ni otpor uzemljenja R bude male vrijednosti jer nju uvijek nije lako postići.

No, ovdje je potrebno obavezno napomenuti da se ovako slobodnije može razmišljati o veličini otpora R samo onda kad objekt koji štitimo, sa svim metalnim masama i vodovodnom cijevi, smatramo izoliranim od bilo kakvih drugih objekata.

U svakom slučaju, ako se jedanput odlučimo na zaštitu izjednačavanjem potencijala, tad prilikom njezine izvedbe moramo nastojati da međusobnim vezama smanjimo ukupni induktivitet gromobranskih odvođa i da tih međusobnih galvanskih veza bude što više, osobito onda kad ne možemo postići mali otpor uzemljenja.

Smanjujući ukupni induktivitet gromobranske instalacije postizavamo to da nam potencijal štićenog objekta $L(di/dt)$ bude manji, a time će biti manji i napon prema ostalim metalnim dijelovima koji su slučajno ostali nepovezani ili nisu pažljivo povezani.

Osim toga, postavljanjem velikog broja međusobnih veza, osobito u prostorijama kuda se ljudi kreću, postizavamo i to da se unutar štićenog objekta ne mogu pojaviti opasni naponi dodira i koraka, o kojima se uvijek mora voditi računa. Toj činjenici treba pridavati veliku pažnju, posebno kad se ne da ostvariti propisani otpor uzemljenja gromobranske instalacije, jer bi se, zbog nedovoljno postavljenih međusobnih veza, tad mogli pojavljivati preveliki naponi dodira ili koraka.

Ako, pak, objekt sa svim metalnim predmetima u njemu i svim dugačkim vodičima koji ulaze u njega, ne možemo smatrati izoliranim od ostalih objekata u njegovoj okolini i ako je zbog loše vodljivog tla veliki otpor uzemljenja, tada moramo te dugačke vodiče (npr. vodovodnu cijev itd.) negdje izvan tog objekta dobro izolirati. To valja učiniti zato što

takvi vodiči mogu prenositi visoke potencijale $i \cdot R$ na druge objekte. Takvo prenošenje naime, treba pažljivo proučiti jer oni mogu imati štetne posljedice. Međutim, to ne mora uvijek sigurno biti, dapače se to rijetko događa. Jer, tok događaja ovisi o mnoštvu drugih složenih okolnosti, kao što je specifični otpor zemljišta kuda dugački vodiči prolaze, udaljenost drugog objekta itd.

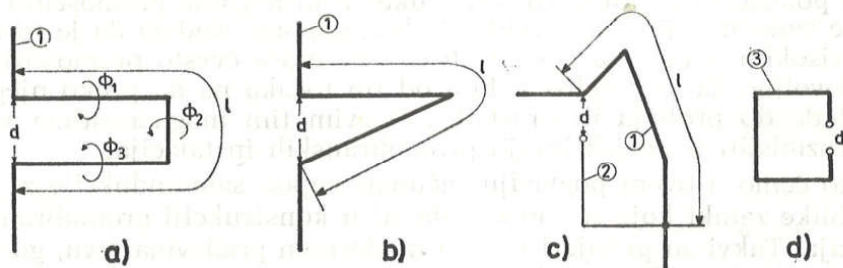
Ako je otpor uzemljenja R malen, takvo izoliranje nije potrebno jer će tad potencijal prema dalekoj zemlji biti malen, pa nema opasnosti.

Sve u svemu, moramo uzimati u obzir više okolnosti, koje se pojavljuju od prilike do prilike i obično se razlikuju jedna od druge. Mnogo se dade postići ako se o zaštiti od udara groma počne razmišljati odmah kod projektiranja nekog objekta. Tad se mogu unaprijed predvidjeti neki zahvati koji mogu pridonijeti sigurnosti takve zaštite, a njezina izvedba učiniti jeftinijom.

5.2. Napon samoindukcije u zamkama kuda prolazi struja groma

Trase odvoda gromobranskih instalacija ne idu uvijek ravno i vertikalno. To nije moguće uvijek postići jer takvu izvedbu obično ne dopušta oblik objekta koji štitimo.

Trase su odvoda različite; one mogu na nekim mjestima, na svom putu prema zemlji, oblikovati potpuno ili nepotpuno zatvorene zamke različitih oblika, kako je to na slici 5.2. nacrtano. Odvodi koji stvaraju takve potpuno ili nepotpuno zatvorene zamke nemaju jednak induktivitet po jedinici duljine, kao što bi to imao neki vertikalno smješteni vodič koji se spušta po ravnom pravcu prema zemlji. To izlazi iz činjenice što je magnetski tok u dijelovima odvoda koji oblikuju takve zamke mnogo jači. Kao posljedica ukupno jačega magnetskog toka, pojavljuje se i veći inducirani napon između pojedinih točaka u toj zamci. Zbog toga se može dogoditi da između tih točaka nastane proboj. Zato je tako potrebno kontrolirati sigurnosne razmake, koje smo na slici 5.2. označili s d . Veći ukupni magnetski tok unutar takvih zamki, a prema tome i veći induktivitet tog dijela odvoda, zato što se tokovi pojedinih vo-



- 1 - gromobranski odvod, l - djelomična duljina odvoda koji se promatra,
 2 - vodič koji ne pripada gromobranskoj instalaciji a vezan je za nju na jednom mjestu,
 d - sigurnosni razmak 3 - zamka u blizini odvoda koja nije nigdje povezana

Sl. 5.2. Neke zamke gromobranskih instalacija

diča djelomično zbrajaju. Osim toga, tu je i utjecaj toka jednog vodiča na drugi njemu blizak vodič. To sve skupa uzrokuje da je ukupni magnetski tok mnogo jači nego što bi bio kad bismo imali samo jedan ravni vodič. Tako na slici 5.2. vidimo da je ukupni magnetski tok unutar zamke jednak zbroju magnetskih tokova φ_1 , φ_2 i φ_3 pojedinih vodiča. Naravno da će tad unutar te zamke vladati veći napon samoindukcije od onoga što bi se pojavio kad bismo imali samo jedan ravno položeni vodič duljine svih triju vodiča zajedno. Budući da se krajevi tih zamki približavaju jedan drugome, a između njih može vladati velika razlika napona, potrebno je te krajeve na tim mjestima razmaknuti, a njihov razmak učiniti tako velikim da između njih ne bi dolazilo do proboja.

Međutim, sigurnosne razmake valja uzimati u obzir ne samo kad dijelovi odvoda stvaraju nepotpuno zatvorene zamke nego i u drugim okolnostima, kako je to predočeno na slici 5.2.c. Tamo je npr. jedan vodič koji ne odvodi struju groma i nije sastavni dio gromobranske instalacije, ali je jednim krajem o nju povezan. Drugi njegov kraj opasno se približava početku zamke koju stvaraju zajedno. U tom slučaju moramo također kontrolirati sigurnosni razmak d jer i na tom mjestu vlada velika razlika napona.

Jednako tako na lici 5.2. zapažamo da nam se u blizini odvoda (sl. 5.2.c) nalazi smještena jedna metalna zamka koja uopće nema galvanske veze s odvodom gromobranske instalacije. Međutim, znamo da će se i u toj zamci inducirati neki napon jer je ona sasvim sigurno obuhvaćena jednim dijelom magnetskog toka koji proizvodi struja groma što prolazi odvodom na slici 5.2.c. I u takvoj zamci potrebno je kontrolirati sigurnosni razmak d jer i u njoj može nastupiti proboj između njezinih krajeva i pojaviti se strujanja jakih struja. Jake struje u takvoj zamci mogle bi izazvati neželjene posljedice.

Dakle, iz ovih nekoliko primjera vidjeli smo da je zaista važno saznati veličine induciranih napona, ili u zamkama koje stvaraju same gromobranske instalacije ili u zamkama u njihovoj blizini. Proboji između dijelova gromobranske instalacije koja nije dobro izvedena svojom toplinskom energijom u stanovitim okolnostima mogu izazvati požar ili eksploziju. No, ni to možda ne bi bilo najgore kada inducirani napon ne bi bio i izravno opasan za život ljudi. Posebno je to izraženo kad su oni u takvom položaju da svojim tijelom, rukama ili nogama premošćuju takve točke između kojih vlada velika razlika napona. Budući da je tu riječ o vrlo visokim naponima, čovjek ih čak ne mora čvrsto premostiti, nego je dovoljno da se približi jednoj od tih točaka pa da preko njegova tijela dođe do proboja ili preskoka. O svim tim mogućnostima treba dobro razmisliti u projektiranju gromobranskih instalacija.

Zato ćemo u ovom poglavlju računati napon samoindukcije za različite oblike zamki koje se mogu pojaviti u konstrukciji gromobranskih instalacija. Takvi su primjeri česti u modernom građevinarstvu, gdje su zgrade posebnih oblika i građene su s mnogo armiranog betonskog željeza. Upravo to željezo povezano, ili nepovezano dobro i smišljeno, s gromobranskom instalacijom, može oblikovati opasne zamke. One mogu nastati i pri izvedbi elektroenergetskih postrojenja i svugdje ondje gdje ima dugačkih vodiča kroz koje može proći struja groma na svom putu

prema zemlji, ili su takvi vodiči u blizini drugih vodiča kojima teče struja groma.

Napon samoindukcije, koji ćemo ovdje približno točno izračunati za pojedine oblike zamki, ovisi, kako smo rekli, o induktivitetu zamke L i o strmini struje groma (di/dt).

Budući da uvijek uzimamo za strminu struje groma onu vrijednost koja je gotovo najveća, i od koje će se vrlo teško veća pojaviti, račun napona samoindukcije ovisi samo o induktivitetu L promatrane zamke. A kako je poznato, taj induktivitet ovisi isključivo o geometrijskim veličinama neke zamke kroz koju prolazi struja, pa će se i njegova vrijednost mijenjati za različite vrste zamki. Taj je induktivitet karakteriziran oblikom zamke, njezinom dužinom i širinom, dužinom vodiča, te nagibom zamke. Dakle, ovisan je o geometrijskim veličinama. Zato će se u određivanju vrijednosti induktiviteta neke zamke primijeniti metoda računanja pomoću »geometrijske karakteristike« kojom dobivamo dosta dobre rezultate. Na takav će način poslije toga, biti moguće izračunati napone samoindukcije i sigurnosne razmake u nekim oblicima zamki. Računanje induktiviteta i induciranih napona preko geometrijske karakteristike pojedinih zamki ovdje ćemo opisati na osnovi koju je u literaturi izložio J. Wiesinger.

5.3. Proračun induciranih napona i sigurnosnih razmaka

Vidjeli smo da inducirani naponi u zamkama nastaju kao posljedica promjena magnetskih tokova zbog promjenljivih struja koje teku pojedinim vodičima što stvaraju zamku. Zato će se proračun početi tako što ćemo najprije izračunati inducirani napon na jednom vodiču.

Na slici 5.3. prikazan je dio gromobranskog odvoda dužine l kojim protječe struja i i što oko tog vodiča stvara magnetsko polje jakosti H .

Prema Biot-Savartovu zakonu napišemo da diferencijal jakosti magnetskog polja u točki T iznosi:

$$dH_T = \frac{1}{4\pi} \frac{i \sin \alpha d\xi}{\varrho^2}$$

i ako je:

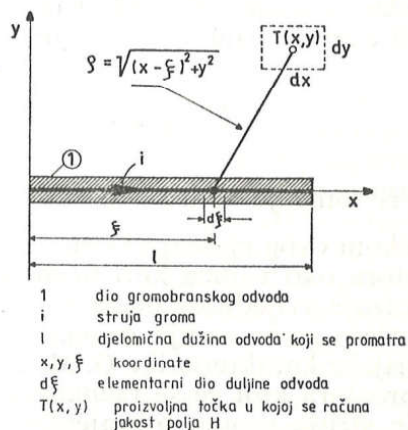
$$\sin \alpha = \frac{y}{\varrho},$$

tad će biti:

$$dH_T = \frac{i}{4\pi} \frac{y d\xi}{\varrho^3}$$

gdje je:

$$\varrho = \sqrt{(x - \xi)^2 + y^2}.$$



Sl. 5.3. Računanje magnetskog toka oko vodiča

Jakost je magnetskog polja u točki T pri tome:

$$H_T = \frac{i}{4\pi} \int_{\xi=0}^{\xi=\ell} \frac{i}{4\pi} \frac{y d\xi}{[(x-\xi)^2 + y^2]^{3/2}}$$

Rješenjem tog izraza, koji vrijedi za jačinu magnetskog polja i u bilo kojoj drugoj točki oko vodiča s koordinatama x i y , dobivamo da je:

$$H_T = \frac{i}{4\pi} \int_{\xi=0}^{\xi=\ell} \frac{y d\xi}{[(x-\xi)^2 + y^2]^{3/2}} = \frac{i}{4\pi} \cdot g.$$

Tu smo, radi našega specifičnog načina razmatranja, označili s g sve međusobno povezane geometrijske veličine u tom rješenju. Vrijednost g možemo, prema tome, dobiti iz izraza:

$$g = \int_{\xi=0}^{\xi=\ell} \frac{y d\xi}{[(x-\xi)^2 + y^2]^{3/2}} = \frac{1}{y} \left[\frac{\ell - x}{\sqrt{(\ell - x)^2 + y^2}} + \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right]. \quad (5.3)$$

Iz izraza (5.3) zaključujemo da će nam jakost magnetskog polja H mijenjati vrijednost od točke do točke, već prema tome gdje se ta točka nalazi u okolišu vodiča i ovisno o tome kolika je duljina ℓ tog vodiča. Dakle, jakost magnetskog polja H ovisi, uz konstantnu vrijednost struje i samo o veličinama ℓ , x i y .

Međutim, za izračunavanje induciranog napona mjerodavan je magnetski tok Φ , pa je potrebno izračunati i njegovu veličinu. To će se postići na osnovi poznatog zakona da je magnetska indukcija $B = \mu H$, pa za elementarni tok kroz diferencijalnu površinu $dS = dx dy$ napišemo da iznosi:

$$d\Phi = \mu H dS = \mu H dx dy.$$

Ukupni magnetski tok u nekom prostoru oko vodiča bit će tada zbroj til elementarnih tokova i može se izračunati iz izraza:

$$\Phi = \mu \int_S \int H dS = \mu \frac{i}{4\pi} \int \int g dx dy = \mu \frac{i}{4\pi} \cdot G. \quad (5.4)$$

Pri tome je veličina $G = \int_S \int g dx dy$ nazvana geometrijskom karakteristikom ovog rješenja i ovisna je samo o geometrijskim dimenzijama prostora oko vodiča koji uzimamo u razmatranje. Iz izraza (5.4), koji pokazuje vrijednost magnetskog toga, očito je da na njegovu veličinu ne utječe samo struja groma koja ga proizvodi nego i vrijednost geometrijske karakteristike G . Međutim, kad se jedanput odlučimo za veličinu prostora koji će se razmatrati, moramo uzeti u obzir još i činjenicu da je struja groma promjenljive naravi. Zbog toga će dolaziti do naglih promjena magnetskog toka, pa će tek promjene toka inducirati napon koji se izračunava prema zakonu:

$$V = - \frac{d\Phi}{dt} = - \mu \frac{1}{4\pi} G \frac{di}{dt}.$$

Kod gromobranskih odvoda magnetski se tok prostire u zraku oko vodiča, zato ćemo za koeficijent permeabiliteta uzeti iznos $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$. Dalje, izraz za inducirani napon na promatranom vodiču bit će:

$$V = - \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{4\pi} G \cdot \frac{di}{dt} \quad \text{ili} \quad V = -10^{-7} G s,$$

pri čemu smo sa s označili strminu struje groma (di/dt). Za praktičko razmatranje dobro je izraz za inducirani napon još pojednostavniti i učiniti ga neovisnim o strminama struje groma koje pri udarima mogu poprimiti različite vrijednosti. Zato će se taj izraz svesti na jedinicu strmine struje groma pa dobivamo:

$$V_s = - \frac{10^{-7} G \cdot s}{s} = -10^{-7} G \text{ u } \left[\frac{V}{A/s} \right] \quad \text{ili} \quad V_s = -0,1 G \text{ u } \frac{kV}{kA/\mu s}. \quad (5.5)$$

Posljednji je izraz i tražena vrijednost koeficijenta samoindukcije L ili koeficijenta međuinukcije M jer se veličine L i M mogu odrediti naponom što se inducira samoindukcijom ili međuinukcijom kad se struja mijenja za jedinicu svoje jakosti u jedinici vremena ($di/dt = 1$). Da li će se izraz (5.5) shvatiti kao koeficijent samoindukcije L ili koeficijent međuinukcije M , ovisi o tome stvara li se inducirana elektromotorna sila promjenom vlastite struje nekog vodiča ili je ona posljedica struje na nekome drugom vodiču.

Izraz (5.5) može lako poslužiti za računanje induciranih napona V jer se oni izračunavaju množeći taj izraz odabranom strminom struje groma s pa će biti:

$$V = V_s \cdot s = 0,1 G \cdot s. \quad (5.6)$$

U prethodnim poglavljima bilo je riječi o mjerenjima koja su pokazala da gotovo 80% gromova ima negativni polaritet i da su oni većinom sastavljeni od dva stupnja pražnjenja. Prema tome se može logično očekivati da će i gromobranskim odvodima teći pretežno struje groma negativnog polariteta, pa će se zato i inducirani naponi računati sa strminama struje groma takva polariteta. Te strmine mogu imati razne vrijednosti. Želimo li za neki objekt ustanoviti inducirane napone, preporučuje se da ih pri normalnim zahtjevima sigurnosti računamo sa strminama struje do maksimalno $60 \text{ kA}/\mu s$. Ako želimo još veću sigurnost, tad je dobro uzeti strmine do maksimalno $80 \text{ kA}/\mu s$. Neki objekti, specijalne namjene, zahtijevaju visoku sigurnost zaštite od udara groma, pa se u tim okolnostima mora računati s još većom strminom struje groma negativnog polariteta, koja se, prema podacima dobivenima istraživanjem, pojavljuje samo u 0,1% udara groma i iznosi čak $100 \text{ kA}/\mu s$.

Da bismo dobili uvid u to koliku najveću vrijednost može poprimiti napon samoindukcije na nekom vodiču, računat ćemo da njime prolazi struja groma kojoj je strmina s baš $100 \text{ kA}/\mu\text{s}$. Za računanje vrijednosti tog napona poslužit će se izrazom (5.6) pa dobivamo:

$$V = V_s \cdot s = 0,1 \cdot G \cdot 100 = 10 \cdot G \text{ (kV)}.$$

Geometrijsku karakteristiku G , ovdje, a i svugdje, treba računati u (m). Budući da su vodiči gromobranske instalacije u zraku, tad se, naravno, može dogoditi da zbog toga induciranog napona na vodiču dođe negdje do proboja prema drugim metalnim dijelovima što se mogu naći u njegovoj blizini.

Ako uzmemo da probojna čvrstoća zraka iznosi $F_p = 500 \text{ kV/m}$, sigurnosni razmak između našeg vodiča i metalnog predmeta u blizini mora biti:

$$d = \frac{V}{F_p} \text{ (m)},$$

što u našem primjeru, za $V = 10 \text{ G (kV)}$ i $F_p = 500 \text{ kV/m}$, iznosi $0,02 \text{ G (m)}$. Naravno da u praktičkoj primjeni stvarno izvedena udaljenost mora biti veća, odnosno razmak d mora biti veći ili jednak $0,02 \text{ G (m)}$. Gromobranske instalacije u praksi imaju obično više od jednog odvoda, pa struja groma ima mogućnost da se grana po tim vodičima. Svaki odvod gromobranske instalacije uzet će na sebe jedan dio ukupne struje, a strmina će struje groma tad u pojedinim vodičima biti manja. To će uzrokovati pojavu da će i inducirani naponi u pojedinim odvodima biti manji nego kada bismo imali samo jedan odvod. Zato se kad ima više gromobranskih odvoda i potrebni sigurnosni razmak jednog odvoda smanjuje. Na primjer, ako je »n« odvoda, sigurnosni će se razmak jednog odvoda izračunati iz izraza:

$$d \geq \frac{V}{F_p \cdot n} \text{ (m)}.$$

Posebno u našem primjeru, gdje smo inducirani napon izrazili geometrijskom karakteristikom G i odabrali vrijednost za probojnu čvrstoću zraka $F_p = 500 \text{ kV/m}$, te uz pretpostavku da je strmina struje groma $100 \text{ kA}/\mu\text{s}$, može se dalje napisati da je probojni razmak:

$$d \geq \frac{10 \text{ G}}{500 \cdot n} \text{ (m)}. \quad (5.7)$$

Taj kriterij za određivanje sigurnog razmaka kod više odvoda vrijedi kad su svi odvodi daleko jedan od drugoga i kad ne dolazi do međusobne elektromagnetske veze.

Omski pad napona na odvodima takvih instalacija nije potrebno računati jer je on, zbog velikih presjeka vodiča, redovito malen i ne stvara

velike razlike napona između pojedinih točaka odvoda. Naprotiv, omski pad napona na otporima uzemljenja zna biti mnogo veći pa o njemu treba voditi računa u projektiranju gromobranskih instalacija. O tome smo već raspravljali, a bit će još riječi i poslije.

5.4. Geometrijske karakteristike osnovnih zamki

U dosadašnjim izlaganjima nismo mogli dokraja izračunati ni induktivitet ni inducirani napon, ni bilo što drugo, jer nam je u svim izrazima od (5.4) do (5.7) bila nepoznata geometrijska karakteristika G . Takav smo način namjerno odabrali kako bismo upozorili na to da nam se veličina induciranih napona na vodičima jako mijenja s promjenom te karakteristike uz pretpostavljenu jednaku strminu struje groma.

U daljim razmatranjima nastojat će se odrediti geometrijske karakteristike onih zamki koje su relativno jednostavna i pravilna oblika i koje su u praksi česte. Poslije toga će nam biti moguće dokraja izračunati veličinu inducirano napona, a moći ćemo i kontrolirati sigurnosne razmake na onim mjestima gdje u zamkama može nastati preskok između vodiča koji oblikuju takve zamke.

Svaka se zamka sastoji od više ravnih vodiča raznih dimenzija međusobno tako sastavljenih da mogu stvoriti zamku različitih oblika. Dakle, ako znamo geometrijske karakteristike tih vodiča, možemo superpozicijom geometrijskih karakteristika pojedinih vodiča doći do ukupne geometrijske karakteristike zamke. Počet ćemo, prema tome, ovo razmatranje s jednim vodičem.

Magnetsko polje, a prema tome i magnetski tok oko jednog vodiča ograničene duljine nije svugdje jednake jakosti. Magnetski se tok mijenja kad se udaljujemo od njegove osi, a na njegovu samom početku i na samom kraju nije jednake jakosti kao u točkama uzduž njega.

Zato, tražeći geometrijsku karakteristiku jednog vodiča, možemo zamisliti dvije geometrijske karakteristike. Jedna će geometrijska karakteristika zamke obuhvatiti dio površine kojom prolazi magnetski tok uzduž vodiča, a druga će se odnositi na dio površine na krajevima vodiča. Dakle, magnetski ćemo tok oko vodiča obuhvatiti dvjema osnovnim zamkama.

5.5. Geometrijska karakteristika prve osnovne zamke

Slika 5.4. sadrži dio odvoda gromobranske instalacije duljine ℓ i polumjera r , kojim protječe struja groma i . Oko tog vodiča zamišljena je zamka pravokutna oblika dimenzija x_0 i y_0 — r . Kroz površinu koju obuhvaća ta zamka prolazi magnetski tok Φ oko vodiča, što ga izaziva struja i .

Geometrijska karakteristika G , koja nam treba za račun inducirano napona V , dobit će se pomoću jednadžbi (5.3) i (5.4), pa izlazi:

$$G = \iint g dx dy = \int_{x=l}^{x=x_0} \int_{y=l}^{y=y_0} g dx dy = 2 \left\{ \sqrt{x_0^2 + y_0^2} - \sqrt{x_0^2 + r^2} + r - y_0 + \right. \\ \left. + x_0 \ln \frac{y_0 \left[1 - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{x_0} \right)^2} \right]}{r \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{y_0}{x_0} \right)^2} \right]} \right\}. \quad (5.8)$$

Ako je $r \ll x_0, y_0$, što se u praksi obično događa, jednadžba se pojednostavljuje i poprima oblik:

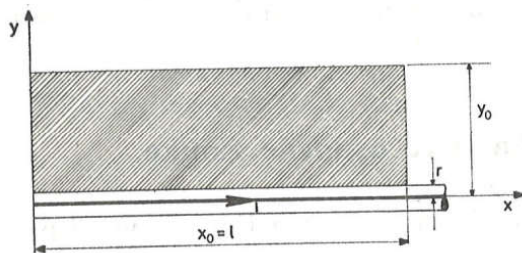
$$G = 2x_0 \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{y_0}{x_0} \right)^2} - 1 - \frac{y_0}{x_0} + \ln \frac{2y_0}{r \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{y_0}{x_0} \right)^2} \right]} \right\}. \quad (5.9)$$

[Tako, za površinu zamke dimenzija $x_0 = y_0 = 1$ m, kod polumjera gromobranskog odvoda $r = 0,004$ m, po izrazu (5.9) za geometrijsku se karakteristiku G dobiva vrijednost od 9,48 m. A zbog promjene magnetskog toka Φ kroz površinu $x_0 = 1$ i $y_0 = 1$ na vodiču će se inducirati napon $V = 10 \cdot 9,48 = 94,8$ kV uz pretpostavku da je strmina iznosila 100 kA/ μ s.]

Kad bi se povećavala dimenzija y_0 sve do beskonačnosti ($y \rightarrow \infty$), dobili bismo, uvrštavanjem u jednadžbu (5.9), izraza za geometrijsku karakteristiku koja bi ovisila samo o dužini vodiča x_0 , pa je:

$$G = 2x_0 \left[\ln \frac{2x_0}{r} - 1 \right]. \quad (5.10)$$

Ta ovisnost geometrijske karakteristike (i induciranog napona) o samo uzdužnoj dimenziji zamke daje se protumačiti činjenicom da su u blizini samog vodiča mnogo jači magnetsko polje i magnetski tok nego na nekoj udaljenosti od njega. Zato, uzdužna dimenzija zamišljene zamke postaje pretežno mjerodavna za veličinu geometrijske karakteristike i induciranog napona. Ako bismo, na protiv, uzeli samo jednu usku površinu oko vodiča, tad bi za $y \approx 0$ i geometrijska karakteristika G poprimila vrlo male



- i struja groma
- r polumjer gromobranskog odvoda
- x, y koordinate
- x_0, y_0 dimenzije zamke koje određuju površinu kroz koju prolazi magnetski tok
- l djelomična dužina odvoda gromobranske instalacije

Sl. 5.4. Prva osnovna zamka

ne vrijednosti. To znači da smo uzeli u obzir samo malu ili nikakvu vrijednost magnetskog toka oko vodiča, pa će prema tome i inducirani napon imati vrlo male vrijednosti. Kad bismo u izraz (5.5) uvrstili jednadžbu broj (5.10) i to izračunali, dobili bismo približni izraz za računanje induktiviteta jednoga gromobranskog odvoda.

Primjer 5.1.

Valja izračunati geometrijske karakteristike za zamke raznih površina kojima uzdužna dimenzija x_0 iznosi 1 m, a y_0 poprima redom vrijednosti 1, 2, 6, ∞ . Jednako tako treba izračunati i inducirane napone uz pretpostavku da strmina struje groma koja protječe vodičem iznosi 100 kA/ μ s, a da je polumjer vodiča 0,004 m.

Rješenje:

$$\begin{array}{llll} G_1 = 9,48 \text{ m}, & G_2 = 9,90 \text{ m}, & G_3 = 10 \text{ m}, & G_\infty = 10,4 \text{ m}, \\ V_1 = 94,8 \text{ W}, & V_2 = 99 \text{ kV}, & V_3 = 100 \text{ kV}, & V_\infty = 104 \text{ kV}. \end{array}$$

Primjer 5.2.

Treba odrediti geometrijske karakteristike G i inducirane napone V u zamkama raznih površina oko vodiča polumjera $r = 0,004$ m, koji je protjecan strujom groma strmine od 100 kA/ μ s. U računu treba pretpostaviti da dimenzija y_0 iznosi 6 m, a da je x_0 najprije 1 m, a drugi put 3 m.

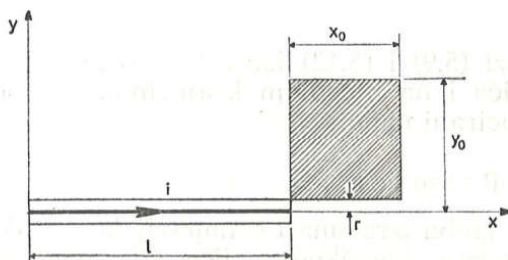
Rješenje:

$$G_1 = 9,6 \text{ m}, \quad G_2 = 38 \text{ m}, \quad V_1 = 96 \text{ kV}, \quad V_2 = 380 \text{ kV}.$$

5.6. Geometrijska karakteristika druge osnovne zamke

Malo smo prije ustanovili da magnetsko polje i magnetski tok oko vodiča nisu svugdje jednake jakosti, odnosno njihove se jakosti mijenjaju udaljavanjem od osi vodiča, ali, jednako tako, još i više im se jakost mijenja na kraju i na početku vodiča. Prvom osnovnom zamkom obuhvaćena je površina kojom se kreće magnetski tok uzduž vodiča, a sad će se drugom osnovnom zamkom zahvatiti površina kroz koju prolazi magnetski tok na početku i na kraju vodiča.

Na slici 5.5. predložena zamka obuhvaća površinu na kraju vodiča duljine ℓ .



- i struja groma
- r polumjer jednog dijela gromobranskog odvoda
- x, y koordinate
- x_0, y_0 dimenzije zamke kroz koju prolazi magnetski tok na kraju vodiča
- l djelomična dužina odvoda

Sl. 5.5. Druga osnovna zamka

Pravokutna crtkana površina zamke koje geometrijsku karakteristiku tražimo ima dimenzije x_0 i y_0 — r . Njezinu karakteristiku izračunat ćemo koristeći se jednadžbama (5.3) i (5.4), što karakteriziraju jakost magnetskog toka općenito, pa će u ovom konkretnom primjeru biti:

$$\begin{aligned}
 G = \iint g dx dy &= \int_{x=\ell}^{x=\ell+x_0} \int_{y=r}^{y=y_0} g dx dy = \sqrt{x_0^2+r^2} + \sqrt{\ell^2+r^2} + \sqrt{(x_0+\ell)^2+y_0^2} + \\
 &+ y_0 - \sqrt{x_0^2+y_0^2} - \sqrt{y_0^2+\ell^2} - \sqrt{(x_0+\ell)^2+r^2} - r + \\
 &+ (x_0+\ell) \ln \frac{y_0 \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{x_0+\ell} \right)^2} \right]}{r \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{y_0}{x_0+\ell} \right)^2} \right]} - x_0 \ln \frac{y_0 \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{x_0} \right)^2} \right]}{r \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{y_0}{x_0} \right)^2} \right]} - \\
 &- \ell \cdot \ln \frac{y_0 \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{\ell} \right)^2} \right]}{r \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{y_0}{\ell} \right)^2} \right]}. \quad (5.11)
 \end{aligned}$$

U praksi se obično događa da je gromobranski odvod velike duljine, čak, matematički uzeto, i neizmjerne duljine ℓ , prema dimenzijama zamke x_0 i y_0 , pa u jednadžbi (5.11) možemo pretpostaviti da $\ell \rightarrow \infty$. Suprotno tome, polumjer r gromobranskog odvoda veoma je malen prema dimenzijama zamišljene zamke. Zato možemo prilikom približavanja te veličine u jednadžbi (5.11) smatrati da $r \rightarrow 0$. Kad taj izraz sredimo uvrštavajući $\ell = \infty$ i $r = 0$, dobivamo jednostavniji izraz za geometrijsku karakteristiku druge osnovne zamke:

$$G = x_0 + y_0 - \sqrt{x_0^2 + y_0^2} + x_0 \ln \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{y_0}{x_0} \right)^2}}{2}. \quad (5.12)$$

Izrazi (5.9) i (5.12) karakteriziraju jakost magnetskog toka oko jednog vodiča i na njegovim krajevima. Pomoću njih izračunavaju se dalje i inducirani naponi.

Primjer 5.3.

Treba izračunati geometrijsku karakteristiku za zamku na kraju neizmjerne dugačkog vodiča ($\ell = \infty$) koja zatvara površinu dimenzija $x_0 = 1$ m i $y_0 = 1$ m.

Rješenje:

$$G = 0,20 \text{ m.}$$

5.7. Metoda superpozicije geometrijskih karakteristika

Pomoću geometrijskih karakteristika osnovnih zamki koje smo upravo izračunali moguće je odrediti i geometrijske karakteristike onih nešto složenijih zamki što se u praksi pojavljuju. Da bismo to proveli, takve složenije zamke moraju ipak biti sastavljene od osnovnih zamki kojih smo karakteristike odredili. Poznato nam je da se magnetski tokovi dadu zbrajati, pa se stoga mogu zbrajati i geometrijske karakteristike zamki kojima oni prolaze.

Dakle, budući da je moguće primijeniti metodu superpozicije za izračunavanje ukupnoga magnetskog toka, onda ona vrijedi i za određivanje ukupne geometrijske karakteristike neke zamke kroz koju ti elementarni tokovi prolaze.

Od brojnih mogućnosti koje se pojavljuju u praksi, gdje više vodiča složenih na različite načine stvara oko sebe magnetske tokove zbog protjecanja struje groma, razmotrit ćemo tri glavna, česta i jednostavna primjera. To radimo zato kako bi nam metoda superpozicije kojom se želimo služiti bila što jasnija. Osim toga, preko tri primjera doći ćemo do nekih rezultata koji će nam poslije pomoći u rješavanju drugih nešto složenijih primjera.

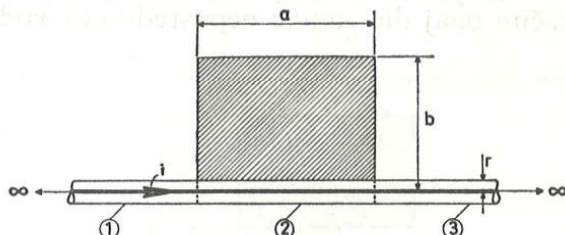
Prvi primjer

Na slici je 5.6. prikazan neizmjereno dugački odvod gromobranske instalacije, polumjera r , kojim teče struja groma i . Ona oko tog vodiča stvara magnetsko polje, odnosno magnetski tok Φ . U ovom primjeru moramo izračunati vrijednost induciranog napona nastalog prolaskom magnetskog toka Φ kroz crtkanu površinu u ravnini x,y , kojoj su dimenzije a i b — r . Da bismo došli do vrijednosti induciranog napona V , moramo najprije naći geometrijsku karakteristiku te zamke. Za određivanje geometrijske karakteristike primijenit će se metoda superpozicije.

Kako vidimo iz slike 5.6, ovaj se primjer sastoji od više geometrijskih karakteristika osnovnih zamki, od kojih su brojkama 1 i 3 označene geometrijske karakteristike druge osnovne zamke, a brojkom 2 geometrijska karakteristika prve osnovne zamke. Ako želimo odrediti ukupnu geometrijsku karakteristiku, zbrojit ćemo te geometrijske karakteristike osnovnih zamki od kojih se ovaj primjer sastoji. Izlazi da je ukupna geometrijska karakteristika:

$$G = G_1 + G_2 + G_3.$$

Budući da su G_1 i G_3 geometrijske karakteristike druge osnovne zamke, bit će $G_1 = G_3$, pa jednadžba poprima oblik:



1, 2, 3 dijelovi gromobranskog odvoda
 i struja groma

a, b, r dimenzije crtkane površine kroz koju prolazi magnetski tok Φ

Sl. 5.6. Superpozicija geometrijskih karakteristika

$$G = 2G_1 + G_2 \quad \text{ili} \quad G = 2G_3 + G_2 \quad (5.13)$$

Karakteristike G_1 i G_2 izračunate su u prethodnim razmatranjima kad smo ustanovili geometrijske karakteristike osnovnih zamki. Zato će se za G_1 , odnosno G_3 , uzeti izraz (5.12), kojim se određuje geometrijska karakteristika druge osnovne zamke, a za G_2 izraz (5.9) upotrijebljen za karakteristiku prve osnovne zamke.

Kad izraze za te dvije osnovne karakteristike zbrojimo, na što nas upućuje izraz (5.13), dobit ćemo da ukupna geometrijska karakteristika zamišljene zamke prema slici 5.6. glasi:

$$G = 2 a \ln \frac{b}{r}. \quad (5.14)$$

Taj nam izraz omogućuje da izračunavamo inducirani napon u ovoj zamci koji nastaje djelovanjem magnetskog toka kroz površinu dimenzija a i b .

(Naime, ako je $a = b = 1$ m, a $r = 0,004$ m, dobiva se vrijednost za $G = 11$ m, a prema tome inducirani napon prema izrazu (5.6) iznosi $V = 110$ kV. Sigurnosni razmak d , prema izrazu (5.7), iznosio bi 0,22 m. Naravno, sve to uz pretpostavku da je vodičem protjecala struja groma strmine 100 kA/ μ s.)

Razmatrajući dalje izraz (5.14) možemo zaključiti da će se inducirani napon mnogo više povećati ako zamci povećamo dimenziju a nego kad bismo to učinili s dimenzijom b . To je razumljivo iz već spomenutih činjenica, koje govore o tome da je jakost magnetskog polja mnogo veća uz sam vodič nego kad se od njega udaljujemo.

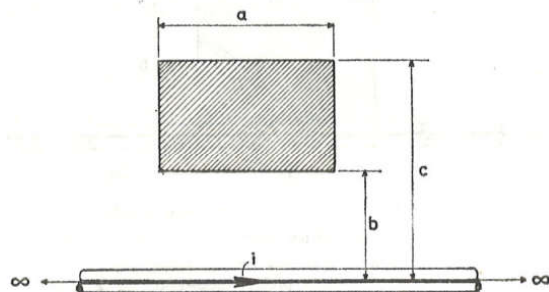
Drugi primjer

Katkad treba doznati vrijednost induiranog napona u nekoj zamci zbog djelovanja magnetskog toka koji se stvara oko nekoga gromobranskog odvoda. Ali ne zbog djelovanja onog dijela magnetskog toka koji prolazi sasvim blizu tog odvoda, nego samo onog dijela što prolazi kroz tu zamku koja je na nekoj udaljenosti od tog odvoda (sl. 5.7).

Da bismo to izračunali, valja naći geometrijsku karakteristiku te zamke ili, drugim riječima, geometrijsku karakteristiku takve kombinacije.

Ta je kombinacija slična prvom primjeru, samo što se ne uzima u račun onaj dio zamke neposredno uz vodič, kroz površinu kojeg prolazi

jednako tako jedan dio magnetskog toka. Zato ćemo za određivanje geometrijske karakteristike u ovom primjeru primijeniti metodu superpozicije,



Sl. 5.7. Superpozicija geometrijskih karakteristika

ali tako da ćemo od ukupne geometrijske karakteristike prvog primjera, zadane izrazom (5.14), odbiti geometrijsku karakteristiku one površine zamke kojom teče dio magnetskog toka tik uz vodič, što ga ne uzimamo u obzir u ovom primjeru. Zato je, sasvim općenito, geometrijska karakteristika u ovom slučaju:

$$G = G_1 - G_2.$$

G_1 — geometrijska karakteristika ukupne površine zamke

G_2 — geometrijska karakteristika onog dijela površine zamke koju ne moramo uzeti u obzir

Rješavajući ovaj primjer možemo dalje napisati da je:

$$G = 2a \ln \frac{c}{r} - 2a \ln \frac{b}{r} = 2a \ln \frac{c}{b}. \quad (5.15)$$

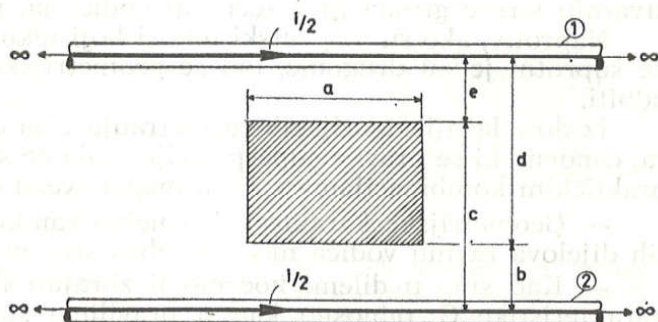
Tako se za $a = b = 1$ m i $c = 2$ m dobiva $G = 1,39$ m, a inducirani je napon $V = 13,9$ kV, pretpostavljajući, svakako, kao i u svim primjerima, da je strmina struje groma iznosila 100 kA/ μ s.

Vrijednost izračunate geometrijske karakteristike u ovom drugom primjeru znatno je manja od vrijednosti geometrijske karakteristike zamke jednakih dimenzija određene izrazom (5.14) u prvom primjeru. To je razumljivo zbog toga što smo u ovom primjeru izostavili djelovanje magnetskog toka koji kruži uz vodič, gdje je tok imao najveću vrijednost. Zbog toga je onda i inducirani napon u ovoj zamci znatno slabiji. Kad bi ona bila još udaljenija od vodiča gromobranske instalacije, bio bi napon još manji.

Treći primjer

U ovom primjeru će se razmotriti kombinacija u kojoj se neka pravokutna zamka nalazi između dva paralelna odvoda, kako je to prikazano na slici 5.8. Pretpostavimo da je svaki odvod neizmjereno dugačak, da mu je polumjer r i da njime teče polovica struje groma $\frac{i}{2}$. Neka se struja i jednim i drugim odvodom kreće u istom smjeru. Geometrijska karakteristika G promatrane kombinacije u kojoj zamišljena zamka ima prema slici 5.8. dimenzije a i $c-b$, odnosno a i $d-e$, može se izračunati, metodom superpozicije, koristeći se jednadžbom (5.15).

Budući da je u spomenutoj zamci magnetski tok proizveden strujom vodiča 2 suprotan magnetskom toku vodiča 1, ukupnu ćemo geometrijsku ka-



Sl. 5.8. Superpozicija geometrijskih karakteristika

rakteristiku kombinacije dobiti tako da se od geometrijske karakteristike zamke na koju djeluje vodič 2 dobije geometrijska karakteristika zamke na koju istodobno djeluje vodič 1. Dakle, bit će:

$$G = G_2 - G_1.$$

Ili, ako se koristimo izrazom iz jednadžbe (5.15), za ukupnu geometrijsku karakteristiku zadane kombinacije dobivamo:

$$G = 2a \left(\ln \frac{c}{b} - \ln \frac{d}{e} \right) = 2a \ln \frac{c \cdot e}{d \cdot b}. \quad (5.16)$$

Pri tome treba pripomenuti, kao specijalni slučaj, da ako je $e = b$ i $c = d$, tad će za bilo koju vrijednost a geometrijska karakteristika ove kombinacije biti jednaka nuli. To znači da zamkom prolaze magnetski tokovi jednakih vrijednosti, a suprotnog predznaka.

Kad bismo imali takve okolnosti da vodičima teku struje suprotnim smjerovima, geometrijska bi karakteristika bila:

$$G = 2a \ln \frac{c \cdot d}{e \cdot b} \quad (5.17)$$

Taj je posljednji slučaj dosta čest kod praktičkih izvedbi gromobranskih instalacija.

5.8. Pravila superpozicije

Pravila superpozicije što smo ih dosad u ovim jednostavnim primjerima upotrebljavali, omogućuju brže snalaženje u rješavanju praktičkih kombinacija zamki. Iz izraza (5.4) možemo shvatiti da geometrijska karakteristika neke zamke predoduje zapravo, preko geometrijskih veličina, vrijednost magnetskog toka. Prema tome, zbrajajući ili odbijajući geometrijske karakteristike nekih kombinacija zamki, mi zbrajamo ili odbijamo vrijednosti magnetskih tokova koji prolaze kroz površine što ih te zamke zatvaraju.

Dalje smo rješavajući ove primjere zaključili da se geometrijske karakteristike mogu zbrajati samo onda ako se magnetski tokovi koje stvaraju struje groma prolazeći tim vodičima, potpomažu.

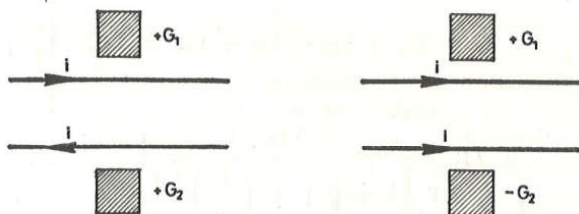
Naprotiv, ako su magnetski tokovi koji teku nekom površinom zamke suprotni jedan drugome, tad se geometrijske karakteristike moraju odbiti.

Iz dosadašnjih teorijskih razmatranja i na osnovi iznesenih primjera, osnovna bi se pravila superpozicije, koja će se primjenjivati u nekim praktičkim kombinacijama zamki, mogla svesti na ovo:

— Geometrijske karakteristike nekih zamki sastavljenih od različitih dijelova ravnih vodiča mogu se zbrajati i odbijati.

— Kad smo u dilemi hoćemo li zbrajati ili odbijati geometrijske karakteristike G , odnosno kad u pravilima superpozicije određujemo

Sl. 5.9. Superpozicija geometrijskih karakteristika — određivanje njihova predznaka



predznak toj karakteristici, dobro je prihvatiti ovu orijentaciju: »Ako čovjek gleda uzduž dijela vodiča u smjeru struje i ako zamkom određena površina leži lijevo od dijela vodiča ili njegova produženja, G će se računati pozitivno, a u suprotnome ćemo je računati kao negativnu veličinu« (sl. 5.9).

Nepoznata ukupna geometrijska karakteristika neke zamke izračunava se tad superpozicijom pojedinačnih geometrijskih karakteristika G poznatih zamki.

5.9. Geometrijske karakteristike praktičkih kombinacija zamki

Pri izvedbi gromobranskih instalacija u praksi nastaju različiti oblici zamki. One su veoma složenih oblika, osobito kod instalacija u modernom građevinarstvu, gdje se i armirano betonsko željezo pojavljuje kao integralni dio gromobranske zaštite. U ovom će se odjeljku razmotriti način računanja geometrijskih karakteristika takvih zamki.

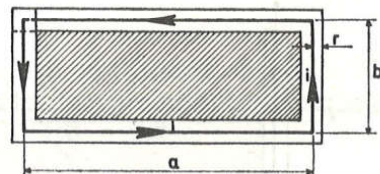
Prvi primjer

Na slici 5.10. prikazan je dio odvoda gromobranske instalacije koji oblikuje pravokutnu zamku. Neka vodiči tog dijela zamkastog odvoda imaju polumjer r , stranice a i b i neka tim vodičima teče struja i .

Uz dosad prihvaćenu pretpostavku da je polumjer r mnogo manji od duljine stranica a i b , može se ukupna geometrijska karakteristika prikazane kombinacije izračunati superpozicijom, odnosno zbrajanjem geometrijskih karakteristika prve osnovne zamke pojedinih vodiča od kojih je ona sastavljena. Zato ćemo općenito napisati da je geometrijska karakteristika prikazane zamke od četiri vodiča:

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4$$

Pri tome će se za računanje G_1 , G_2 , G_3 i G_4 koristiti izrazom (5.9), i to tako da u njemu zamijenimo vrijednosti x_0 i y_0 pripadajućim konkretnim vrijednostima a i b , već prema tome kakav je položaj vodiča u ovom primjeru. Konačno izlazi da je geometrijska karakteristika promatrane zamke:



Sl. 5.10. Pravokutna zamka sastavljena od vodiča konačne duljine

$$\begin{aligned}
 G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 = 2 \cdot 2a & \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} - 1 - \frac{b}{a} + \right. \\
 + \ell n \frac{2b}{r \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2} \right]} & \left. + 2 \cdot 2b \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2} - 1 - \frac{a}{b} + \right. \right. \\
 + \ell n \frac{2a}{r \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2} \right]} & \left. \left. \right\} \right\}. \quad (5.18)
 \end{aligned}$$

Za zamku koja bi imala kvadratični oblik, dakle gdje bi bilo $a = b$, jednadžba (5.18) se pojednostavnjuje pa se geometrijska karakteristika takve zamke izračunava iz izraza:

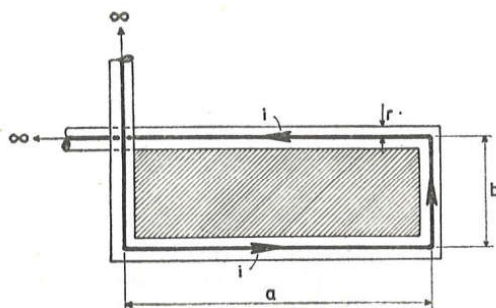
$$G = 8a \left(\ell n \frac{a}{r} - 0,77 \right).$$

Iz napisanih izraza uočljiva je već spomenuta činjenica da bismo povećanjem površine zamke dobili veću vrijednost geometrijske karakteristike, što povlači za sobom i veći inducirani napon u toj zamci uz istu strminu struje groma.

Ovaj smo primjer radi jednostavnosti odabrali tako da su vodiči kojima teče struja groma konačne duljine a i konačne duljine b . Međutim, u praksi se to obično ne mora dogoditi. Naime, vodiči mogu oblikovati pravokutnu ili kvadratičnu zamku, a da im duljine budu veoma velike, odnosno, matematički uzeto, oni mogu biti beskonačne duljine i da kroz njih protječe struja groma. Takva veoma česta pojava nacrtana je na slici 5.11, gdje takvi vodiči oblikuju pravokutnu zamku.

Razlika između prvog i drugog odabranog slučaja je u tome što smo u prvome računali geometrijske karakteristike i inducirani napon samo zbog djelovanja struje groma u vodičima konačnih dimenzija a i b (po prvoj osnovnoj zamci), a u drugome moramo računati geometrijske karakteristike zbog tog djelovanja, ali i još zbog učinka struje groma koja prolazi i onim dijelovima odvoda što teže beskonačnosti, a na svojem jednom kraju imaju zamke (to će se računati po drugoj osnovnoj zamci).

Zato za drugi slučaj možemo općenito napisati da je geometrijska karakteristika zamke oblikovane vodičima beskonačne duljine:



Sl. 5.11. Pravokutna zamka oblikovana vodičima beskonačne duljine

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 + G_6.$$

Pri tome se za G_1, G_2, G_3 i G_4 koristi za računanje izrazom (5.9), odnosno za njihov zbroj izrazom (5.18). Međutim, za računanje vrijednosti G_5 i G_6 poslužit će izraz (5.12), naravno uz zamjenu veličina x_0 i y_0 konkretnim vrijednostima a i b koje njima u ovom sklopu pripadaju. Primjenjujući ovdje dosljedno metodu superpozicije dalje ćemo napisati da je geometrijska karakteristika promatrane zamke:

$$\begin{aligned} G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 + G_6 = & 2 \cdot 2a \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2} - 1 - \frac{b}{a} + \right. \\ & \left. + \ln \frac{2b}{r \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2} \right]} \right\} + 2 \cdot 2b \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2} - 1 - \frac{a}{b} + \right. \\ & \left. + \ln \frac{2a}{r \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2} \right]} \right\} + b + a - \sqrt{b^2 + a^2} + b \ln 1 + \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2}}{2} \\ & + a + b - \sqrt{a^2 + b^2} + a \ln \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2}}{2}. \end{aligned}$$

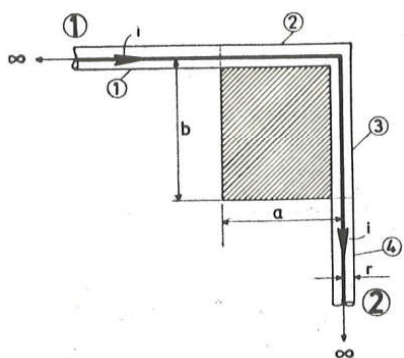
Kad taj izraz sredimo, konačna će vrijednost geometrijske karakteristike zamke na slici 5.11. biti:

$$\begin{aligned} G = & 6\sqrt{a^2 + b^2} - 6(a + b) + 4a \ln \frac{2b}{r \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2} \right]} + \\ & + 4b \ln \frac{2a}{r \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2} \right]} + \ln \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2}}{2} + \\ & + b \ln \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2}}{2}. \end{aligned} \quad (5.19)$$

I za ovaj slučaj vrijede ista razmatranja kao za prethodni, iz kojih bismo mogli zaključiti: kad bi zamke bile veće, bio bi inducirani napon veći, pa bismo i sigurnosni razmak morali učiniti većim.

Drugi primjer

Razmatrat će se drugi praktički primjer, nacrtan na slici 5.12. Jedan odvod gromobranske instalacije, koji zamišljamo da je velike od-



Sl. 5.12. Zamka oblikovana vodičima beskonačne duljine

nosno beskonačne duljine, oblikuje na nekom objektu pravi kut. Neka taj vodič ima polumjer r i neka njime protječe struja groma i .

U ovom primjeru će se izračunati geometrijska karakteristika kombinacije vodiča što djelomično oblikuju zamku koje površina ima dimenzije $a-r$ i $b-r$.

Zadatak će se riješiti tako da ćemo se i ovdje poslužiti pravilima superpozicije. Ako raščlanimo primjer na slici 5.12. doći ćemo do toga da se ukupna geometrijska karakteristika kombinacije može dobiti zbrajanjem geometrijskih karakteristika ravnih dijelova vodiča što tu zamku određuju, odnosno vodiča kojih struja

određuju, odnosno vodiča kojih struja djeluje. To su vodiči 1 i 2, pa će ukupna geometrijska karakteristika biti zbroj geometrijskih karakteristika tih dvaju vodiča. A budući da se geometrijska karakteristika svakoga od tih dvaju vodiča može naći koristeći se geometrijskom karakteristikom prve i druge osnovne zamke, općenito ćemo napisati da ukupna geometrijska karakteristika u prikazanom slučaju iznosi:

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4.$$

Tu se G_2 i G_3 izračunavaju po izrazu (5.9), a G_1 i G_4 po izrazu (5.12) uz odgovarajuću zamjenu varijabli x_0 i y_0 konkretnim veličinama a i b u primjeru. Kad primijenimo pravila superpozicije, odnosno kad zbrojimo te geometrijske karakteristike i sredimo rješenje za praktičko računanje, izlazi da se ukupna geometrijska karakteristika naše kombinacije na slici 5.12. može izračunati iz jednadžbe:

$$G = 2\sqrt{a^2 + b^2} - 2(a + b) + a \ln \frac{2b^2}{r^2 \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2} \right]} + b \ln \frac{2a^2}{r^2 \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2} \right]} \quad (5.20)$$

Kad bi specijalno bilo $a = b$, rješenje bi glasilo:

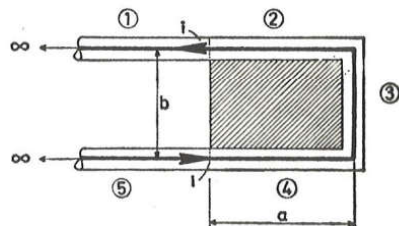
$$G = 4a \left(\ln \frac{a}{r} - 0,39 \right).$$

Treći primjer

Treba naći geometrijsku karakteristiku zamke što je oblikuje odvod gromobranske instalacije beskonačne duljine, zatvarajući površinu dimenzija $a-r$ i $b-2r$, kako je to na slici 5.13. nacrtano.

Vodiču odvoda polumjer je r i njime protječe struja groma i , u označenom smjeru.

Ako pogledamo crtkano označenu zamku, vidjet ćemo da na nju djeluju magnetski tokovi pet ravni dijelova vodiča, kako je to na slici brojkama označeno. Zato će geometrijske karakteristike ove kombinacije biti zbroj geometrijskih karakteristika pojedinih ravni dijelova vodiča, pa napišemo općenito da je:



Sl. 5.13. Zamka oblikovana vodičima beskonačne duljine

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5.$$

Tu se G_2 , G_3 i G_4 izračunavaju koristeći se izrazom (5.9), a G_1 i G_5 prema izrazu (5.12). Kad primijenimo pravila superpozicije, geometrijska karakteristika ove kombinacije konačno će iznositi:

$$G = 4\sqrt{a^2 + b^2} - 4(a + b) + 2b \ln \frac{2a}{r \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right]} + 2a \ln \frac{2b^2}{r^2 \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2} \right]}. \quad (5.21)$$

Općenito, izrazi od (5.9) do (5.21) služe nam za računanje induktiviteta i induciranih napona u zamkama što ih stvaraju zaštitni vodiči gromobranskih instalacija.

6. Vrste i izvedbe gromobranskih instalacija

6.1. Šipkasti gromobrani

Najjednostavniju zaštitu od groma predstavlja šipkasti gromobran. On se sastoji, od jedne hvataljke u obliku kraćeg štapa vezane s uzemljivačem preko jednoga ili više odvoda. Sistem odvoda mora biti tako napravljen da najkraćim i najlakšim putem odvede struju groma u zemlju. Budući da je i bez odvoda struja groma sebi pronašla put do tla, odvodi moraju za struju biti najlakši put. Iz tih se razloga ne može ništa unaprijed govoriti o sposobnosti odvođenja pomoću klasičnoga šipkastog gromobrana sve dotle dok se ili pažljivom analizom objekta ili dugim praktičkim promatranjima, ne utvrde drugi putovi kojima može krenuti struja groma. Takvi drugi putovi mogu biti drugi vodiči ili poluvodiči što se obično nalaze u nekome šticienom objektu i mogu pružiti bolji put struji do zemlje. Osim toga, kad se zaštićujemo na takav način, tad se ništa sigurno ne može utvrditi o pojavama što nastaju kao posljedica elektromagnetske indukcije na drugim vodičima u blizini tih odvoda. Te pojave znaju poprimiti neočekivanu veličinu, koju je unaprijed, s obzirom na više okolnosti, teško predvidjeti.

Međutim, sve u svemu, Franklinov šipkasti gromobran ipak obavlja funkciju mjesta udara groma i funkciju dobrog i lakog odvođenja struje kad je već grom u njega udario. Ta je činjenica više ili manje utvrđena već dulji niz godina, pa je opravdano smatrati je provjerenom i, u tom smislu, od velike koristi.

O zaštićenom prostoru, odnosno površini objekta koju šipkasti gromobran štiti, bilo je riječi u trećem poglavlju, ali još danas ima dilema o tome.

Promatramo li otvoreno zemljište na nekoj ravnici gdje obično ne počinju uzlazna izbijanja, vidjet ćemo da će glava groma udariti u tlo bilo gdje. Na mjesto udara neće pri tome utjecati nekakvi manji objekti i kad bi oni imali šipkaste, ne duge gromobrane na zgradama normalne veličine. Samo ako glava dođe slučajno u blizinu takva objekta, tad će grom udariti u taj objekt ili šipkasti gromobran na njemu postavljen. Međutim, u tim uvjetima, tako postavljeni gromobran neće utjecati na smjer kretanja i mjesto udara onih gromova kojima su glave udaljene.

Nekad se, međutim, pogrešno mislilo da se postavljenim šipkastim gromobranom mogu spriječiti, odnosno učiniti rjeđima udari groma u

zemlju. Jer da se pomoću njega, navodno, uspostavlja prema oblaku nabo koji zemlja pokrivena (ili prirodno ili influencijom). Naknadno se utvrdilo da se šipkastim gromobranom ne da mnogo naboja prenijeti prema oblaku (i tako na neki način neutralizirati polje) jer oblak ima mnogo više naboja nego ih neki metalni šiljak može prenijeti sa zemlje. Ali, zbog same činjenice da ipak one glave groma koje se nađu u blizini tog šiljka, udaraju ponajviše u njega, jer je on na vrhu zgrade, možemo govoriti i o nekome zaštićenom prostoru što ga stvara šipkasti gromobran na površini zemlje, odnosno u svome okolišu.

Kad se uspoređi zaštitno djelovanje šipkastog gromobrana s odvodnim djelovanjem, može se reći da je šipkasti gromobran korisniji sa stajališta odvodnog djelovanja, odnosno da je korisniji za odvođenje struje groma kad je već grom u njega udario, nego što će on spriječiti uopće udar groma u neki objekt. Prema tome na djelotvornost gromobranske instalacije u obliku šipkastog gromobrana ima sigurno utjecaja njegova konstrukcija, te oblici i dimenzije drugih vodljivih elemenata u njegovoj blizini. Ograničenost zaštitnog djelovanja šipkastog gromobrana ne može se povećati ni postavljanjem više šiljaka na njegovu hvataljku ni pozlaćivanjem tih šiljaka kako bi im se sačuvala oština i zaštitili od korozije, kao što se to nekad mislilo i radilo. Mogli bismo reći, prema iskustvu, da se zaštitni učinak šipkastog gromobrana sastoji u tome što je stvoren određeni prostor unutar kojega je mala vjerojatnost udara. Ali ta vjerojatnost ipak, iako je mala, prisutna je i ne smije se sasvim isključiti.

Ako se dalje prihvati i pojednostavnjena pretpostavka da glava groma uvijek napada vertikalno, dakle ima okomiti put, te kad smo se već jedanput odlučili za veličinu kritične struje groma, onda se problem opće zaštite svodi na određivanje visine gromobrana. Uz to ide i zahtjev da se štićeni objekt mora nalaziti ispod kružnog luka kojemu je polumjer jednak duljini kritičnoga probojnog razmaka, kako smo to u trećem poglavlju opširnije opisali. Na takav će način, bilo koja točka na luku i pravcu do kojih mogu stići gromovi što smo ih proglasili opasnim za štićeni objekt, biti bliža vrhu gromobrana i zemlji nego štićenom objektu, pa će udariti ili u tlo ili u vrh gromobrana.

Ovaj način određivanja zaštitnog prostora daje uvid u opasnosti koje izazivaju gromovi malih jakosti struja kad se nađu u prostoru gdje ih gromobran ne može »uhvatiti« i kad krenu u drugome pravcu opasnome za štićeni objekt. Osim toga, u ovoj metodi određivanja zaštitne zone gromobrana i njegove visine nad zemljom polazi se od pretpostavke da je štićeni objekt relativno malen. Tako on neće svojom visinom mijenjati sliku električnog polja i time utjecati da grom bude privučen baš prema njemu, odnosno on neće povećavati vjerojatnost da glava groma krene prema njemu.

Razmišljanja koja smo dosad iznijeli mogu se primijeniti i na sistem zaštitnih užeta na određenim mjestima uzemljenih i horizontalno postavljenih, tako da se štićeni objekt nalazi sasvim zatvoren u njihovu zaštitnom prostoru. Taj sistem horizontalno postavljenih vodiča iznad štićenog objekta daje se usporediti s Faradayevom krletkom što se tiče djelotvornosti zaštite, a, osim toga, tako postavljeni vodiči imaju prednost u tome što im se uzemljenja mogu postaviti daleko od štićenog

objekta, pa ni potencijali koji se pojavljuju i uz slabije uzemljenje ne moraju biti opasni za ljude. Dakle, takav sistem zaštite ne mora imati baš sasvim dobro uzemljenje, odnosno mali otpor uzemljenja.

Osim ovih načina zaštite, koji su više-manje klasični postupci zaštite, pojavio se odnedavno i radioaktivni gromobran. On pomoću radioaktivnog šiljka, prema mišljenju njegovih izumitelja, povećava zaštićeni prostor u usporedbi s klasičnim gromobranom. Radioaktivni šiljak stvara veći broj iona u blizini vrha gromobrana i tako otvara prema glavi groma vodljivi kanal, pa time utječe na smjer udara groma.

Međutim, tu konstrukciju i koncepciju gromobrana velika većina stručnjaka ne prihvaća, sumnjajući da se tako slabim radioaktivnim izvorom, koji emitira samo nekoliko desetaka μA , može jače utjecati na smjer kretanja glave groma. Većina je čak mišljenja da se time ne postizava nikakva prednost pred klasičnim gromobranima bez radioaktivnog šiljka.

Slažu se jedino u tome da bi se eventualno moglo utjecati na smjer kretanja glave groma pomoću radioaktivnog gromobrana, ali da bi za to trebalo imati 100 000 puta jači radioaktivni izvor nego se sada upotrebljava, pa i onda je veliko pitanje bi li se postigao sigurniji stupanj zaštite.

6.2. Gromobranska instalacija na principu Faradayeve krletke

Poznata je osobina električnih polja da ona počinju i završavaju na površinama vodiča, zato jer se i naboji nalaze na površini vodiča. Prema tome, ako se želi zaštititi neko tijelo od djelovanja električnog polja, onda se to djelotvorno postiže zastorima od metalnih limova ili metalnih mreža.

Kad bi i u te metalne zastore ili mreže udarale izvana električne iskre, tijelo koje je unutar toga zatvorenog prostora ne bi osjetilo da se bilo što izvana događa.

Koristeći se tim zakonitostima, s vremenom se na tom principu razvila tehnika gradnje gromobranskih instalacija.

Osnovna ideja u izvedbi tih instalacija mora, prema tome, polaziti sa stajališta da je zaštita djelotvornija što je metalna mreža gušća, dakle što je sastavljena od što više malih zamki. Tako, kad bismo neku zgradu obuhvatili vrlo gustom mrežom, bili bismo najsigurniji da neće biti direktnog udara u nju, nego da će udar prihvatiti postavljena i uzemljena mreža, koje će vodiči vrlo visoke valove napona i struje odvesti u zemlju.

Spomenimo da bi zaštita bila još uspješnija kad se mreža ne bi doticala zgrade. Ljudi i predmeti u zgradi bili bi tad još sigurniji jer s takve metalne mreže ne mogu uslijediti opasni preskoci. Naravno, današnji način gradnje gromobranskih instalacija ne ispunjava tako stroge zahtjeve zaštite, nego je prilagođen ekonomskim i estetskim mogućnostima nekog objekta.

Danas se takva gromobranska instalacija sastoji od sistema prihvatnih vodova, odvoda i uzemljivača, koji zajedno, međusobno povezani,

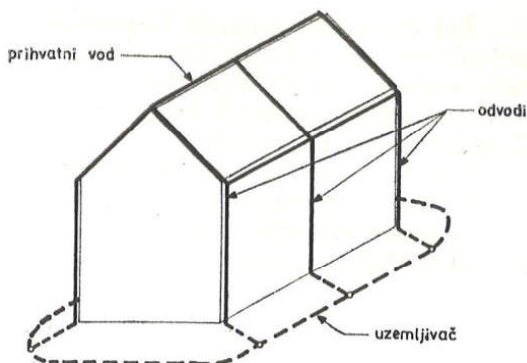
Sl. 6.1. Sistem prihvatnih vodova, odvoda i uzemljivača

čine više ili manje cjelovitu metalnu mrežu unutar koje se nalazi štićeni objekt (sl. 6.1).

Iskustvo je pokazalo da grom udara obično u istaknute dijelove zgrada, npr. u sljeme, ivicu, krov, dimnjak itd. Zato sva ta mjesta moraju imati prihvatne vodove, kojima je zadatak da prime izravni udar groma. Prihvatni vod izveden je obično od pocinčane čelične trake presjeka $60\text{--}100\text{ mm}^2$, ali ne tanje od 2,5 do 3 mm. Taj vod može biti i od čelične žice promjera 8—10 mm. Rjeđe se upotrebljavaju bakreni ili aluminijski vodiči.

Kad jednom prihvatni vodovi prime udar groma, struja se mora najkraćim putem odvesti u zemlju. Zato se na određenim mjestima po obodu zgrade postavljaju odvodi ili spustovi. Odvodi su poprijeko postavljeni vodiči koji se spuštaju vertikalno zidom i spajaju prihvatne vodove s uzemljivačem. Oni su izvedeni od istog materijala kao i prihvatni vodovi.

Uzemljivačima je svrha da stvore dobar vodljivi dodir između odvodnih vodiča i vodljive zemlje. Tako se npr. trakasti uzemljivači postavljaju oko zgrade u obliku prstena na 2 m udaljenosti, a ukopavaju se u zemlju 0,8 m duboko. Djelovanje gromobranskog uzemljenja karakterizira udarni otpor uzemljenja R_u , a ne obični otpor uzemljenja R .



6.3. Osnovni kriterij za dimenzioniranje gromobranskih instalacija u obliku zamki

Prilikom udara munje u prihvatni vod ili bilo koji dio zgrade galvanski vezan za gromobransku instalaciju, proteći će struja kroz svaku granu postavljenih metalnih zamki. Tako razgranata struja groma u svakoj će grani zamke izazvati padove napona (razlike potencijala), koji mogu biti uzrok preskocima prema metalnim predmetima ili dijelovima zgrade koji nisu galvanski vezani za instalaciju. Zato te razlike potencijala treba kontrolirati, da ne premaše određenu vrijednost. Za dimenzioniranje instalacije od velike je važnosti posebno znati koliku će razliku potencijala poprimiti najviši vrh zgrade u odnosu prema zemlji, odnosno koliki će pad napona izazvati struja u jednom odvodu.

Budući da je struja groma impulsnog oblika i vremenski se zato brzo mijenja, za pad će napona u odvodu kojim ona prolazi biti mjero-davna brzina kojom se struja mijenja i induktivitet odvoda L . Prema tome, možemo pisati da taj pad napona iznosi, kako smo već vidjeli, $U_L = L(di/dt)$.

Taj izraz pokazuje da je razlika napona između vrha zgrade i zemlje to veća što je induktivitet odvoda veći i što je brzina promjene struje veća (dakle što je veća strmina struje groma). Da bismo smanjili tu razliku napona, morala bi se smanjiti ili strmina struje groma (di/dt) ili induktivitet odvoda L .

Budući da se ne može bitno utjecati na oblik struje groma, odnosno na njezinu strminu, nastoji se djelovati na induktivitet odvoda. Induktivitet odvoda za koji se pretpostavlja da je vodič u vertikalnom položaju prema zemlji i da nigdje ne pravi veći luk, računa se iz izraza:

$$L = 0,21 \left(\ln \frac{2l}{r} - \frac{3}{4} \right) (\mu\text{H}). \quad (6.1)$$

Pri tome je l ukupna duljina odvodnog vodiča, a r je njegov polumjer. Jednim brojčanim primjerom bolje će se pokazati kako se računa razlika napona nastala između krova štíčene zgrade i zemlje i koliko vrijednost poprima.

Primjer 6.1.

Neka kuća bude visoka 20 m i neka prihvatni vod na krovu kuće bude povezan s uzemljivačem odvodnim vodičem kojem promjer iznosi 10 mm. Neka je, dalje, pretpostavljena strmina struje groma $45\,000\text{ A}/\mu\text{s}$.

Uvrštavajući zadane vrijednosti u izraz (6.1) dobiva se da je induktivitet odvodnog vodiča:

$$L = 0,2 \cdot 20 \left(\ln \frac{2 \cdot 20}{0,005} - \frac{3}{4} \right) \approx 33 \mu\text{H},$$

a razlika napona između krova i zemlje bit će:

$$U = L \frac{di}{dt} = \frac{33 \cdot 10^{-6} \cdot 45 \cdot 10^3}{10^{-6}} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ V}.$$

Rezultat ovoga brojčanog primjera upućuje na to da razlika napona može biti vrlo velika i da tako velika može izazvati preskoke na metalne dijelove kuće i u kući koji ne bi bili galvanski povezani s gromobranskom instalacijom.

U nastojanju da ta razlika napona bude manja, potrebno je smanjiti induktivitet odvodnog vodiča. Smanjenje induktiviteta odvodnog vodiča bi se prema izrazu (6.1) postiglo uz manju duljinu ili povećani promjer. Međutim, i jedno i drugo je u izvjesnom smislu određeno visinom zgrade, električkim i mehaničkim razlozima. Zato se u praksi smanjenje ukupnog induktiviteta instalacije postizava postavljanjem više paralelnih vodiča, kao što je to na slici 6.1. prikazano. Time, ne samo što se ukupni induktivitet odvodnih vodiča smanjuje nego se u isto vrijeme pojačava »zaklonsko« djelovanje cijele instalacije. Jer, mreža tako postavljenih zamki sve više stvara Faradayevu krletku, za koju se reklo da ima dobro »zaklonsko« djelovanje, odnosno da, primajući na sebe izravni udar gro-

ma, štiti unutar sebe neki objekt. Dobro je, dalje, napomenuti još i to da se smanjenjem induktiviteta omogućuje i brže sniženje razlike napona između vrha zgrade i površine zemlje, pa se općenito odvođenje struje u zemlju odvija brže. Naravno, broj odvoda ovisi o veličini i visini zgrade, pa ćemo radi grube orijentacije navesti neke podatke iz talijanske literature o gradnji gromobranskih instalacija.

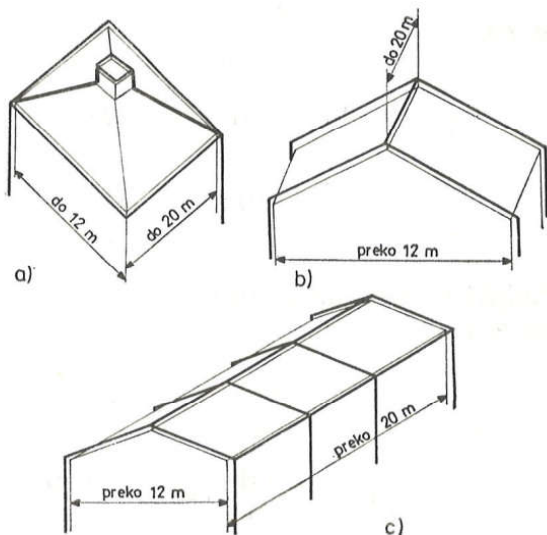
- Za zgrade kojih tlocrtna površina nije veća od 50 m² dovoljan je samo jedan odvod.
- Zgrade tlocrtna površine veće od 50 m² moraju imati najmanje dva odvoda (sl. 6.2.a), a ako takva zgrada ima duljinu do 20 m i širinu veću od 12 m, onda već mora imati četiri odvoda (sl. 6.2.b).
- Zgradi duljoj od 20 m treba na svakih započetih 20 m duljine dodati još po jedan odvod, i to s obje strane ako je ona šira od 12 m (sl. 6.2.c), a ako to nije, odvodi se stavljaju s obje strane, ali naizmjenice.
- Ako je zgrada šira od 20 m, onda i za svakih 20 m širine treba dodati po jedan odvod.

Grubo uzevši uvijek vrijedi da se za svakih 20 m duljine opsega bilo koje zgrade stavlja po jedan odvod. Ako su to zgrade ili objekti u kojima se čuvaju zapaljivi materijali ili posebno dragocjeni predmeti, onda se gromobranska instalacija izvodi tako da se još više smanjuju površine pojedinih zamki postavljene mreže.

U modernim zgradama, koje imaju nosivu konstrukciju isključivo od armiranog betona, uputno je stvoriti galvansku vezu između gromobranske instalacije i armiranobetonskog željeza, jer se time stvara jedinstvena metalna struktura. Jednako tako, moderne lagane fasade od aluminija pružaju izvrsnu zaštitu i omogućuju dobro odvođenje struje groma.

Da bismo ovo što smo rekli što bolje razumjeli, uzet ćemo dva primjera kojima ćemo pokazati kako nastaju padovi napona na odvodima neke gromobranske instalacije. Jednako tako ćemo vidjeti u kakvu su odnosu induktivni padovi napona na odvodima neke instalacije prema padovima napona koji se pojavljuju na otporu uzemljenja.

Ovi nam primjeri objašnjavaju, i na njima možemo uočiti, zahtjeve o kojima se mora voditi računa u projektiranju neke gromobranske instalacije.



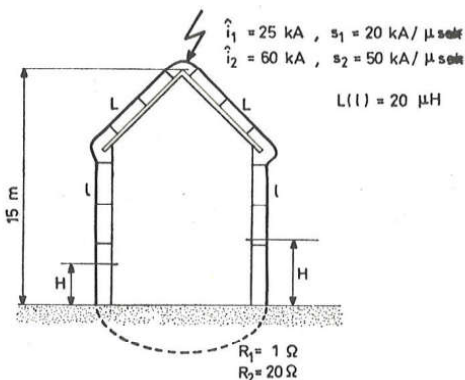
Sl. 6.2. Raspored zamki za razne veličine zgrada

Primjer 6.2.

- a) Valja izračunati padove napona na različitim visinama zgrade koja je visoka 15 m. Induktivitet jednog odvoda neka iznosi $20 \mu\text{H}$. U zgradu neka udara munja koje je tjemena vrijednost struje $\hat{i}_1 = 25 \text{ kA}$, a strmina $s_1 \approx 20 \text{ kA}/\mu\text{s}$. Pretpostavimo da zgrada jedanput ima otpor uzemljenja $R_1 = 1 \Omega$, a drugi put da je toj istoj zgradi otpor uzemljenja $R_2 = 20 \Omega$. Neka se izračunaju padovi napona kad djeluje jedan odvod i kad djeluju na zgradi oba odvoda (sl. 6.3).
- b) Treba izračunati padove napona za istu zgradu, iste vrijednosti induktiviteta odvoda, istih otpora uzemljenja, kad djeluje najprije jedan, a zatim drugi odvod. Međutim, sada uzmimo da u nju udara munja tjemene vrijednosti struje $\hat{i}_2 = 60 \text{ kA}$ i strmine $s_2 = 50 \text{ kA}/\mu\text{s}$ (sl. 6.3).

Rješenje:

Padovi napona na otporima uzemljenja prilikom udara struje $\hat{i}_1 = 25 \text{ kA}$:



Sl. 6.3.

$$U_{R1} = \hat{i}_1 \cdot R_1 = 25 \cdot 1 = 25 \text{ kV}$$

$$U_{R2} = \hat{i}_1 \cdot R_2 = 25 \cdot 20 = 500 \text{ kV.}$$

Padovi napona na otporima uzemljenja pri udaru struje $\hat{i}_2 = 60 \text{ kA}$:

$$U_{R1} = \hat{i}_2 \cdot R_1 = 60 \cdot 1 = 60 \text{ kV}$$

$$U_{R2} = \hat{i}_2 \cdot R_2 = 60 \cdot 20 = 1200 \text{ kV.}$$

Padovi napona na induktivitetu kad na jedan odvod djeluju struje strmina s_1 i s_2 :

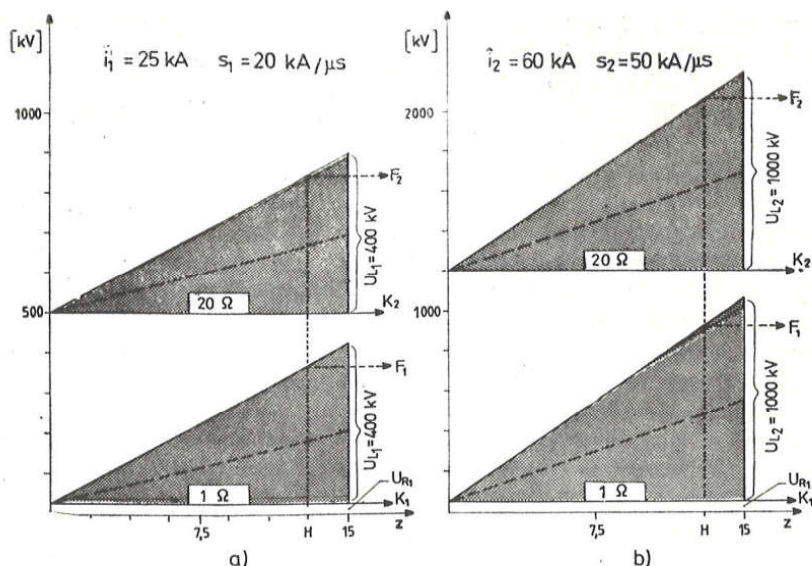
$$U_{L1} = L(l) \cdot s_1 = 20 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{20 \cdot 10^3}{10^{-6}} = 400 \text{ kV}$$

$$U_{L2} = L(l) \cdot s_2 = 20 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{50 \cdot 10^3}{10^{-6}} = 1000 \text{ kV.}$$

Padovi napona na induktivitetu kad na dva odvoda djeluju struje strmina s_1 i s_2 :

$$U'_{L1} = \frac{L(l)}{2} \cdot s_1 = \frac{20 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot \frac{20 \cdot 10^3}{10^{-6}} = 200 \text{ kV}$$

$$U'_{L2} = \frac{L(l)}{2} \cdot s_2 = \frac{20 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot \frac{50 \cdot 10^3}{10^{-6}} = 500 \text{ kV.}$$



Sl. 6.4. Raspodjela induktivnih i omskih padova napona po visini zgrade

Rezultati računanja prikazani su grafički na slici 6.4. Na apscisu dijagrama nanosena je visina zgrade u metrima, a na ordinatama su vrijednosti napona u kilovoltima.

Tolike će vrijednosti poprimiti zgrada na različitim visinama od površine tla. Gromobranski odvod nešto je dulji od visine zgrade zbog njezina oblika i iznosi više od 15 m. Prema zahtjevima u našem primjeru, nas zanima napon na nekoj visini zgrade, a ne napon po duljini odvoda. Zato smo na apscisu dijagrama nanijeli visinu zgrade, a ne duljinu odvoda.

Iz dijagrama na slici 6.4.a vidimo da nam prilikom djelovanja tjemene vrijednosti struje od 25 kA napon na otporu uzemljenja od 1Ω iznosi 25 kV, a na otporu uzemljenja od 20Ω čak 500 kV. Iznosi tih napona na dijagramu su označeni pravcima K_1 i K_2 . Te su vrijednosti konstantne i ne ovise o visini zgrade ni o broju priključenih odvoda. Na istoj slici također su nanosene i vrijednosti induktivnih padova napona koje nastaju na odvodima zbog djelovanja strmine struje od $20 \text{ kA}/\mu\text{s}$. Induktivni pad napona na visini zgrade od 15 m iznosi 400 kV kad djeluje samo jedan odvod, a uz dva odvoda napon na istoj visini bit će 200 kV, što je na dijagramu označeno crtkanim pravcem. Okomito crtkani pravac pokazuje omski i induktivni pad napona zajedno, na bilo kojoj visini H zgrade, kojih je vrijednost označena pravcima F_1 i F_2 .

Dijagram na slici 6.4.b predložuje naponske prilike u istoj zgradi, uz iste otpore uzemljenja, ali uz novu pretpostavku, da na zgradu djeluje jača struja udara, i to tjemene vrijednosti od 60 kA i strmine od $50 \text{ kA}/\mu\text{s}$.

Ne upuštajući se u detaljno opisivanje razloga, možemo opaziti da je induktivni pad napona uzduž odvoda zgrade vrlo velik već prema tome koliko odvoda imamo i koliko je strminu imala struja groma pri

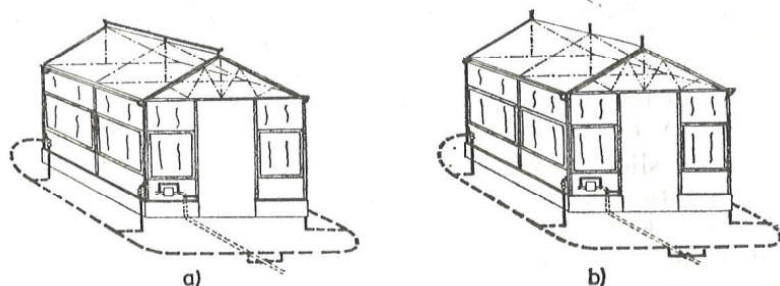
udaru u zgradu. Ta je činjenica vrlo važna jer se ljudi i stvari u zgradi nalaze izloženi tim induktivnim razlikama napona, pa može doći do nesreće ili do oštećenja predmeta zbog preskoka. One osobe koje su u podrumu zgrade ili su izvan nje, ali u njezinoj blizini, izložene su više padu napona i $\cdot R$ koji se pojavljuje na uzemljivaču gromobranske instalacije. Zato je važno uočiti i to da se taj pad napona prostire po svim metalnim dijelovima koji izlaze iz zgrade prema udaljenim mjestima (npr. na vodovodnim cijevima, plaštevima kabela itd.).

Činjenica da induktivni padovi napona na odvodima mogu biti veći od omskih padova napona na uzemljenju, nameće zahtjev prilikom projektiranja zaštite da ih što više smanjimo, neovisno o tome koliko je veliki otpor uzemljenja. To postizavamo postavljanjem što više odvoda, odnosno povezivanjem svih metalnih dijelova zgrade, približavajući takvu konstrukciju idealnoj Faradayevoj krletki. Na takav način štitimo zgradu da se u njoj ne pojave razlike napona koje mogu biti opasne za ljude neovisno o tome koliki je otpor uzemljenja. Takvu zaštitu moramo uvijek provoditi, posebno na objektima s lošim uzemljenjem, odnosno koji se nalaze na zemljištu velikoga specifičnog otpora tla. Naravno da pri tome ostaje i dalje opasnost da vodiči koji povezuju zgradu s dalekom zemljom ne prenose opasne potencijale.

6.4. Gromobranske instalacije nekih tipičnih objekata

Da bismo stekli uvid u praktičke izvedbe, na slikama od 6.5. do 6.8. prikazane su u osnovi gromobranske instalacije nekih građevnih objekata koji se po obliku, veličini, namjeni i materijalu od kojeg su izvedeni razlikuju jedan od drugoga.

Na slici je 6.5.a prikazana gromobranska instalacija građevine s čeličnim kosturom. Kod tako izvedenih zgrada treba se koristiti njihovom posebnom konstrukcijom kao dijelom gromobranske zaštite. Zato je potrebno da hvataljka na više mjesta bude povezana s čeličnim kosturom i da zajedno stvaraju jedinstvenu galvansku cjelinu. Hvataljku valja povezati s krovnom konstrukcijom najmanje svakih 20 m. Kao odvodi poslužiti će vertikalni elementi čelične konstrukcije koji moraju biti povezani preko sabirnih vodova s uzemljivačem. Ako u zgradu ulazi vodovodna cijev, potrebno je premostiti brojilo za vodu, a vodovodnu cijev povezati s čeličnom konstrukcijom i uzemljivačem. Katkad se, umjesto



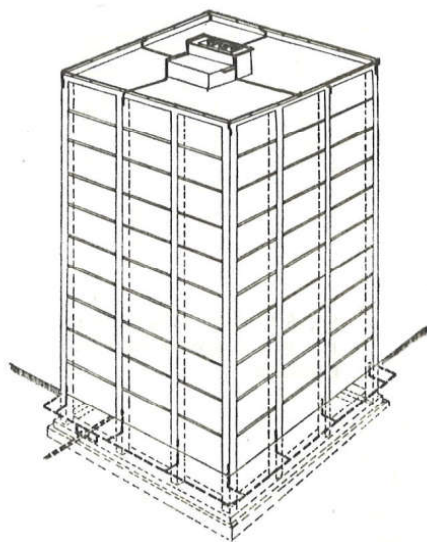
Sl. 6.5. Gromobranska instalacija zgrada s čeličnim kosturom

posebne hvataljke na krovu u obliku užeta, može postaviti na čeličnu konstrukciju više štapnih hvataljki visine od 0,2 m, kao što je to na slici 6.5.b.

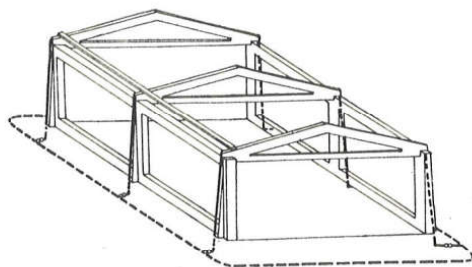
Na slici 6.6. vidimo gromobransku zaštitu nebodera izgrađenoga od armiranog betona s izoliranim krovom. I u ovom slučaju treba se koristiti vodljivim dijelovima zgrade kao sastavnim dijelom gromobranske instalacije. Na slici zapažamo da zgrada ima ogradu, pa ako je ona metalna, tad ćemo je upotrijebiti kao prstenastu hvataljku. Također će kao hvataljka poslužiti i drugi metalni vodiči na krovu. Vrlo je povoljno ako je cijeli pokrov od lima. Važno je pri tome povezati takve hvataljke s armiranobetonskom konstrukcijom zgrade, i to na više mjesta, jer će armiranobetonsko željezo poslužiti kao odvod gromobranske instalacije. Ako ne vezujemo hvataljku s armiranobetonskim željezom, onda je potrebno ugraditi u betonsku konstrukciju zgrade posebne vodiče kao gromobranske odvode. Ako zgrada ima dimnjak, mora se i metalni prsten na njemu također povezati za odvode. Obično tako visoke zgrade imaju na krovu strojarnicu za dizalo, pa se moraju uređaji u strojarnici, skupa s cijelom konstrukcijom dizala, povezati za gromobransku zaštitu. Tako svi metalni dijelovi izvan zgrade i u zgradi stvaraju jednu vodljivu cjelinu. Sve zajedno, mora na kraju biti, preko rastavnih mjesta, povezano sa sabirnim vodom na uzemljivač zgrade. Rastavna se mjesta postavljaju na visini od 1,80 m iznad zemlje, a izvedena su rastavnim spojnica. Na tim mjestima odvajamo hvataljke i odvode od uzemljivača kad je potrebno obaviti ispitivanja, mjerenja i druge kontrole.

Na visini od 1,5 m odvodni se vodiči postavljaju u metalne cijevi koje ih štite da se slučajno mehanički ne oštete ili prekinu. Prekinuti vodiči gromobranske instalacije bili bi povišena opasnost za ljude koji bi ih dodirivali. Vodovodne i plinske cijevi moraju u svakom slučaju biti povezane s gromobranskom instalacijom.

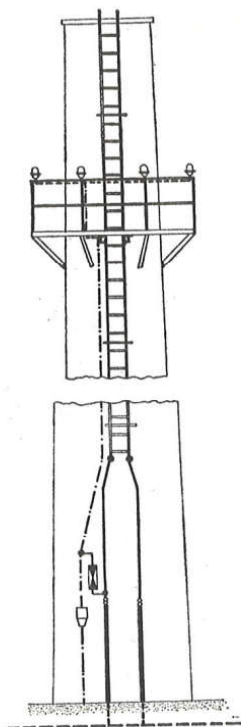
Na slici 6.7. prikazan je kostur zgrade izveden od gotovih armiranobetonskih elemenata. Dakle, njezin kostur ne stvara dobro galvanski povezanu cjelinu. Za zaštitu takvih građevina potrebno je izvana izvesti potpunu gromobransku instalaciju. Tako na krovu treba postaviti hvataljke, po nosivim stupovima odvode, a uz temelje zgrade uzemljivače. Kod tako izvedenih objekata ima mogućnosti da mjesta gdje se rastavlja vanjska instalacija od uzemljivača budu premoštena metalnim dijelovima konstrukcije zgrade. Zato je u takvim okolnostima dobro izvesti rastavna mjesta pod zemljom izvan zgrade. Tom se prilikom mora paziti da su ona izvana dostupna i da vodiči na rastavnom mjestu ne budu



Sl. 6.6. Gromobranska instalacija nebodera



Sl. 6.7. Gromobranska instalacija zgrada od gotovih armiranobetonskih elemenata



Sl. 6.8. Gromobranska instalacija tvorničkog dimnjaka

premošteni bilo kakvim metalnim dijelom kostura same zgrade. Da se to ne dogodi, dobro ih je u okolišu tog mjesta izolirati.

Na slici 6.8. gromobranska je instalacija nekoga tvorničkog dimnjaka. Takve građevine moraju i zbog svoje visine biti posebno pažljivo zaštićene od atmosferskih izbijanja. Ako im je visina do 20 metara, one mogu imati samo jedan odvod, a za one više od 20 metara mora se i gromobranska instalacija izvesti s dva odvoda. Obično takvi objekti imaju po visini metalne ljestve koje služe za njihovo održavanje, pa su one u ulozi i gromobranskih odvoda. U tom slučaju ljestve moraju biti propisno povezane preko rastavnih mjesta za uzemljivač. Ako dimnjaci imaju na sebi konstrukciju na kojoj su svjetla za označavanje njihove visine ili neke druge uređaje, kao što su to spremnici za vodu, tada se svi takvi metalni dijelovi povezuju za gromobranske odvode. Izolirane vodiče koji se iz bilo kojih razloga pružaju po visini dimnjaka poželjno je također povezati za gromobransku instalaciju, ali preko odvodnika prenapona, osobito kad otpor uzemljenja nije u propisanim granicama. Takvi vodiči obično služe za napajanje električnom energijom onih uređaja koji se nalaze na nekoj visini od zemlje, ne samo na tvorničkim dimnjacima nego i na drugim izrazito visokim objektima, kao što su to zvonici, visoke kule itd. Hvataljke groma kod tako visokih objekata mogu biti izvedene u obliku prstena, a i u obliku šiljaka, već prema konstrukciji objekta.

7. Opasnost za ljude od udara groma

Kad čovjek pogine od udara groma, onda, sasvim prirodno, smatramo to velikom i teškom nesrećom. Na žalost, usprkos brojnim istraživanjima o zakonima kretanja groma i smrtonosnom djelovanju njegove struje, s jedne strane, te zaštitnih mjera koje se poduzimaju, s druge strane, ipak je taj broj nesreća danas još uvijek velik. Taj se broj, doduše, smanjio u zatvorenim prostorima jer se danas npr. u zgradama nalazi velika količina metalnih dijelova, kao što su to: armirano betonsko željezo, vodovodne i plinske cijevi, metalizirane fasade. To sve skupa omogućuje da se struje groma kreću i drugim, neopasnim putovima.

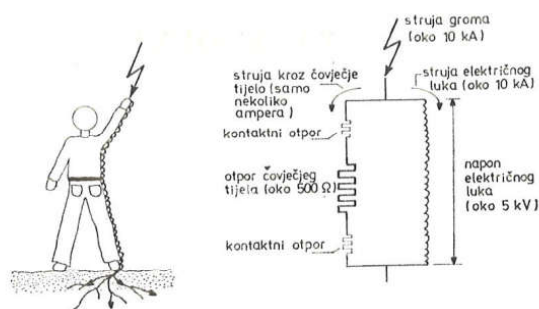
Međutim, broj ljudskih žrtava na otvorenom polju, prometnicama ili općenito u prirodi praktički se dosad nije ništa smanjio nego se, naprotiv, možda i povećao zbog toga što danas osim poljoprivrednika i ljudi iz turističkih razloga borave dulje u prirodi. Službenih i sređenih podataka o tome još nema, pa se neki čvrsti zaključci ne bi mogli izvesti.

Najlošije je u tim nesrećama to što pri izravnom ili posrednom udaru groma više od 60% ljudi odmah pogine. Oni koji prežive udare često imaju teška oštećenja sluha i vida te središnjega živčanog sustava. Nekima su za neko vrijeme paralizirane ruke i noge, ili zadobivaju opekotine od prvog do trećeg stupnja. Obično se na unesrećenima vide mjesta gdje je struja groma izišla iz njihova tijela. Općenito se može reći da preživljavaju one osobe koje su udaljenije od mjesta udara. Mjere hitne pomoći što ih treba pružiti osobama koje su unesrećene udarom groma jednake su onima, što se poduzimaju kod unesrećenja izmjeničnom strujom industrijske frekvencije. Dalje će se detaljnije razmatrati izravni i posredni udari groma u čovjeka.

7.1. Izravni udari groma u čovjeka

Najveći broj nesreća zbog udara groma događa se kad se ljudi nalaze izvan zgrada i ako je čovjek izvan zaštitnog prostora u okolini nekog objekta jer tad može biti izravno pogođen.

Svugdje se udar groma iz oblaka prema tlu pojavljuje na zemlji kao jako polje udarnih struja. Ako je pogođen čovjek kojemu je otpor tijela $500\ \Omega$, na njemu će se pojaviti neki napon, koji se postupno povišuje, jednako tako kao što se postupno povišuje čelo strujnog vala.



Sl. 7.1. Izravni udar groma u čovjeka

Čim taj napon prekorači vrijednost od otprilike 100 kV, nastat će preskok površinom čovječjeg tijela u obliku električnog luka. Ekvivalentnu shemu o tom trenutku možemo

zamisliti tako kao da se otporu čovječjeg tijela ukopčao još jedan paralelni otpor, i to otpor električnog luka, kao što je to na slici 7.1. prikazano. Budući da je otpor električnog luka mnogo manji od otpora čovječjeg tijela, od tog će trenutka najveći dio struje groma teći tim otporom, a mnogo manji kroz čovjeka. Prema podacima iz literature, napon od 100 kV na čovječjem tijelu postignut je kad je struja na čelu strujnog vala dosegla nešto više od 1 000 A, dakle mnogo prije nego je nastupila tjemena vrijednost struje od 10 kA kojom se je vjerojatno pokus izvršio. Zato je u ekvivalentnoj shemi označeno da struja od 10 kA prelazi po površini čovječjeg tijela, a da njezin manji dio, od samo nekoliko ampera, prolazi tad kroz čovjeka. Međutim, taj manji dio struje dovoljno je jak da čovjeka usmrti. Tek u izuzetnim okolnostima on može preživjeti izravni udar groma. Obično onaj jači dio struje koji prelazi površinom čovječjeg tijela izaziva na njemu opekotine i oštećenja odjeće, osobito ako je ona bila mokra.

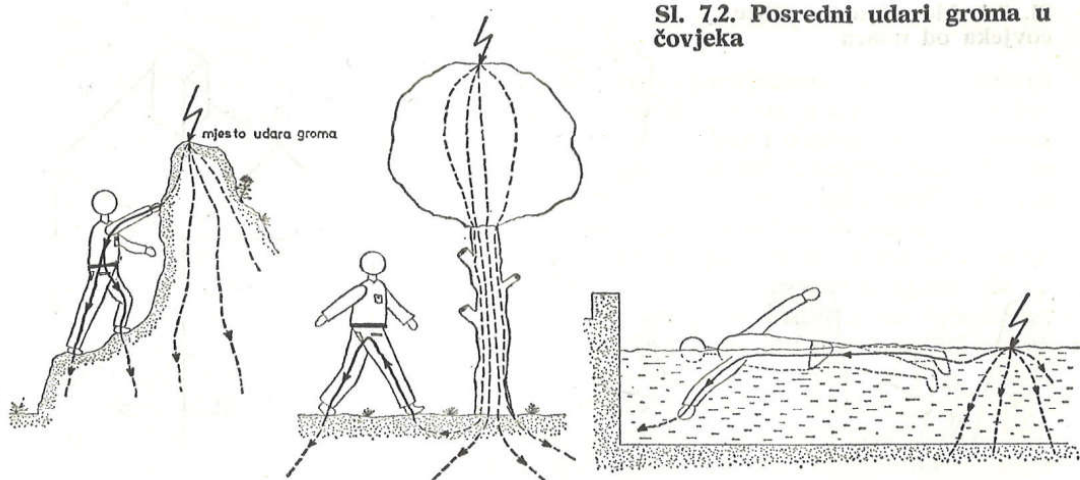
7.2. Posredni udari groma u čovjeka

Posrednim udarom groma smatramo onu okolnost kad čovjek nije pogođen ukupnom strujom groma, nego samo jednim njezinim dijelom. To se zna dogoditi kad se čovjek penje uz neko brdo ili se nalazi u blizini nekog stabla, ili ako pliva u moru ili u nekom bazenu. Udar groma opasan je tad čak i na udaljenosti od 100 m. Te su mogućnosti posrednog udara prikazane na slici 7.2.

U okolišnoj zemlji oko mjesta udara groma, naime, struja se raspršuje pa se može dogoditi da jedna strujnica prođe i kroz čovječje tijelo. Ako je ta strujnica imala jakost veću od 100 A, lako će se dogoditi da čovjek pogine, bez obzira na to koliko je jakost imala ukupna struja groma u njegovu kanalu. Električnu ekvivalentnu shemu u tim prilikama nije lako točnije odrediti zbog toga što čovjek nije uvijek u istoj situaciji i nema isti položaj tijela prema tome jakom strujnom polju koje se pojavljuje. No, sasvim je sigurno da će tu imati važnu ulogu otpor tijela i kontaktni otpori onih mjesta (ruku ili nogu itd.) gdje struja ulazi i izlazi iz čovjeka, pa osnovnu ekvivalentnu shemu indirektnog udara groma možemo zamisliti onako kako je predložena na slici 7.3.

Mogli bismo općenito reći da će opasnost za čovjeka biti to veća što je specifični otpor tla veći i što je veći razmak između ruku i nogu

Sl. 7.2. Posredni udari groma u čovjeka



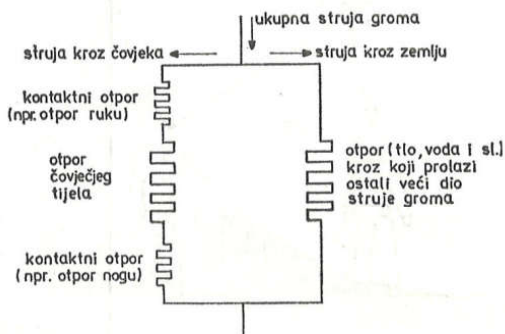
kojim čovjek taj djelić prostora premošćuje, bilo hodanjem ili plivanjem, ležanjem itd.

Tad se može dogoditi i da na većoj udaljenosti od mjesta udara čovjek nastrada.

7.3. Zaštitne mjere

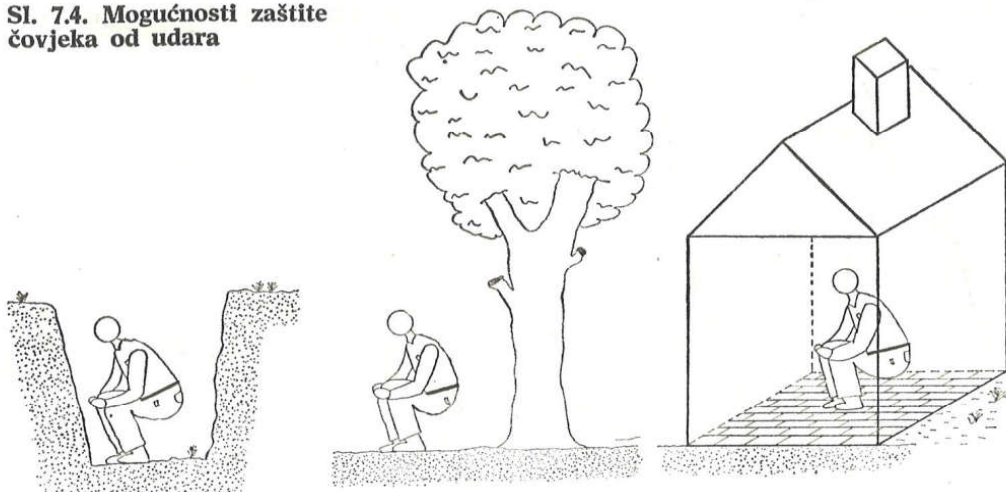
Teško je pronaći i propisati neke pouzdane zaštitne mjere koje mora čovjek poduzeti u svim okolnostima kad je izvan tehnički dobro izvedenih gromobranskih instalacija ili izvan drugih zaštićenih prostora. Međutim, na osnovi dosadašnjih izlaganja, mogli bismo reći da se u takvim prilikama treba držati pravila po kojemu čovjek visinom svoga tijela ili veličinom svog koraka ne smije premostiti veće razmake na površini tla. Zato se preporučuje da se za vrijeme oluje ne ostaje na otvorenim ravnim površinama, kako čovjek svojom visinom ne bi postao mjesto udara. Dobro se u toj situaciji skloniti u neki jarak ili bilo koju zatvorenu prostoriju, pa čak i pod neko stablo koje nije osamljeno (sl. 7.4).

Najbolje se skloniti u automobil ili željeznički vagon, ako su oni negdje pri ruci. Da bi se izbjeglo u tim okolnostima djelovanje strujnog polja koje na površinama u okolišu mjesta udara stvara opasne razlike napona, preporučuje se čučati, a ne stajati, ležati ili plivati. Ako se čovjek nalazi u kući koja nema gromobransku instalaciju, najbolje je držati se dale-



Sl. 7.3. Ekvivalentne sheme posrednog udara u čovjeka

Sl. 7.4. Mogućnosti zaštite čovjeka od udara

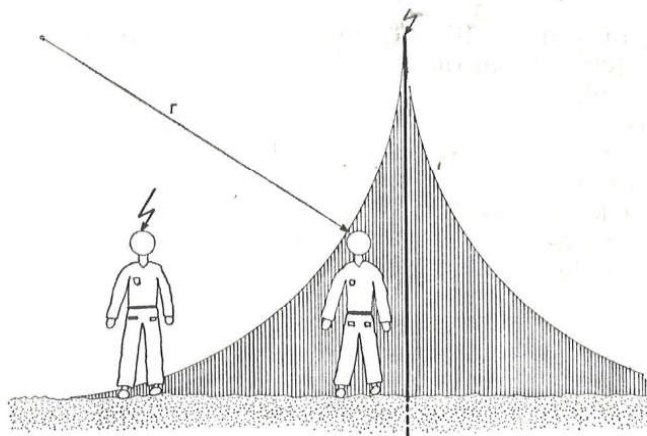


ko od zidova takve zgrade. Prema nekim autorima, napon dodira do 1 000 V i napon koraka do 3 000 V pri udaru groma nisu još opasni za čovječji život. No pri uzimanju u obzir tih veličina u računanju i procjenama mora se biti veoma oprezan.

Općenito bi se moglo preporučiti da se moramo zakloniti od udara groma kad čujemo prvi put i slabašnu grmljavinu jer nam vremena za traženje zaklona, s obzirom na brzinu kretanja olujne jezgre, ostaje otprilike 5–10 minuta.

7.4. Opasnost za čovjeka kad se zaštićuje loše izvedenim gromobranskim instalacijama

Dosadašnjim razmatranjima nije se moglo upozoriti na sve opasnosti koje vrebaju čovjeka kad u njega ili u njegovoj blizini nastupi izbijanje. Da bi te opasnosti bile što uočljivije, ovdje će se još razmotriti odnos čovjeka koji se pokušava zaštititi od izravnog udara groma jednom uzemljenom metalnom šipkom (sl. 7.5).



Vidjeli smo da metalna šipka stvara u svojoj okolini zaštićeni prostor, pa bi se dalo zaključiti da za čovjeka onda više nema nikakve opasnosti. To je u načelu točno, ali svejedno valja upozoriti na neke okolnosti

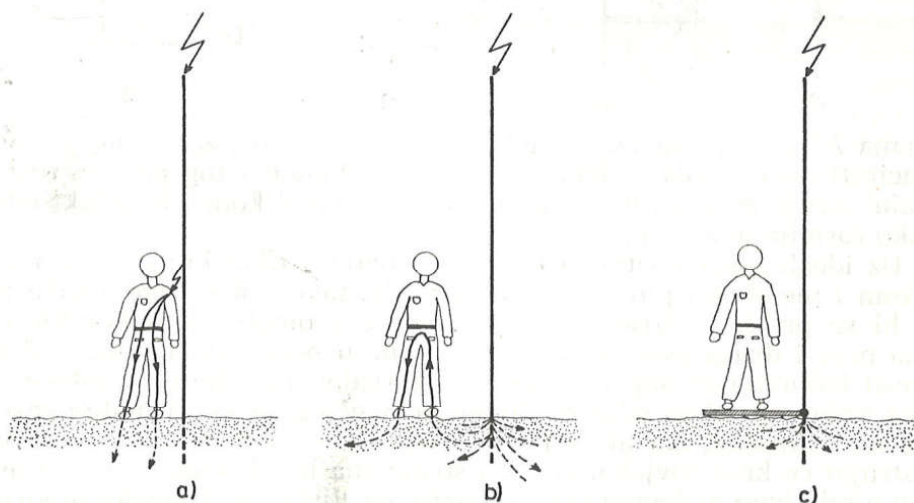
Sl. 7.5. Zaštita čovjeka metalnom šipkom

koje se prilikom upotrebe takve zaštite mogu pojaviti i koje čovjeku ne pružaju siguran zaklon od svih opasnosti.

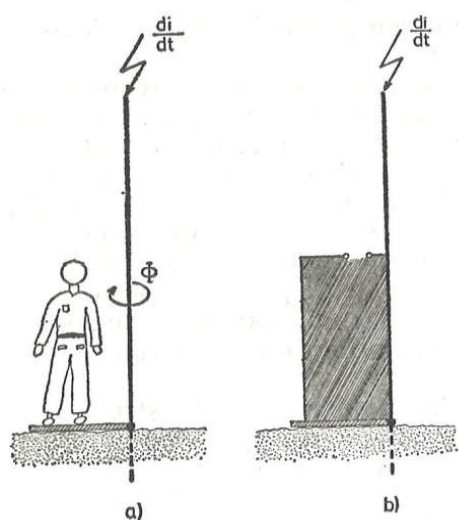
Metalnom smo šipkom, doduše, smanjili vjerojatnost izravnog udara groma u čovjeka, jer će on udariti u hvataljku, a ne u njega. Ali za čovjeka koji se nalazi u blizini te hvataljke, pa makar i u njezinu zaštitnom prostoru, i dalje je prisutna izvjesna opasnost od unesrećenja. Ta se opasnost pojavljuje kad je otpor uzemljenja metalne šipke velik. U tim okolnostima nastaju u blizini hvataljke velike razlike napona $i \cdot R$, pa može nastupiti preskok struje groma s hvataljke na čovjeka (sl. 7.6.a). No ne samo to, jer u tom slučaju može i dio struje groma umjesto da se kreće zemljom prostrujati kroz njegove noge; u takvim se prilikama struja lakše kreće čovječjim tijelom nego zemljom koja ima veliki otpor (sl. 7.6.b).

I u jednoj i u drugoj prilici strujanje jednog dijela struje kroz tijelo sprečava se postavljanjem neke metalne ploče pod noge (sl. 7.6.c). Ona mora pri tome biti povezana galvaniski s metalnom šipkom. Ako tad kombinacija metalne hvataljke i metalne ploče postane dobro vodljiva, struja će se kretati samo hvataljkom i metalnom pločom i neće tražiti druge putove. Zato valja nastojati da otpor hvataljke i metalne ploče zajedno budu što manji, čak i milijun puta manji od otpora čovječjeg tijela. Tu se zapravo čovjekova zaštita provodi sistemom izjednačavanja potencijala u okolišu neke metalne hvataljke kroz koju će u jednom trenutku proći struja.

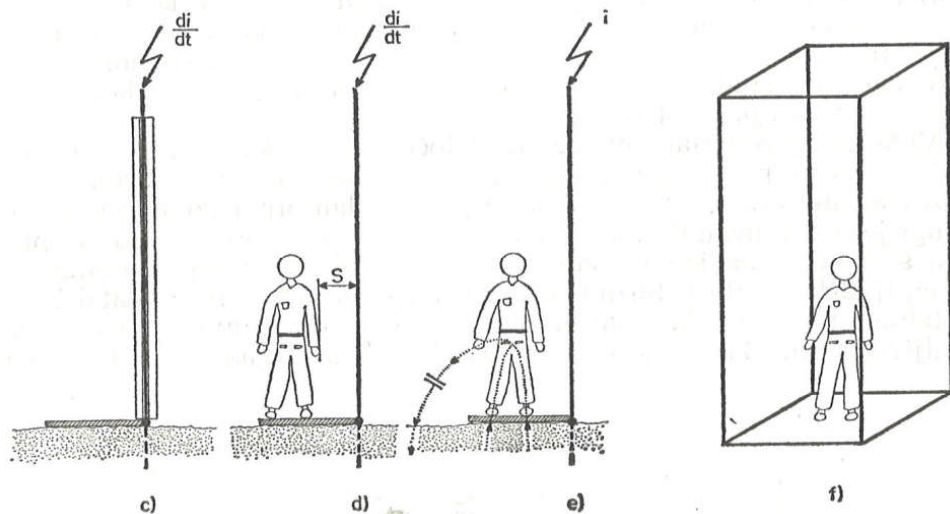
Međutim, postavljanjem metalne ploče pod čovječe noge opasnost za njega još potpuno ne mora prestati. Mi smo time samo promijenili odnos između paralelnih otpora od kojih je jedan otpor čovječjeg tijela, a drugi je otpor hvataljke s metalnom pločom. Opasnost je i dalje prisutna s obzirom na jednu manje uočljivu okolnost u toj kombinaciji. Naime, ljudsko tijelo u blizini neke hvataljke stvara s tom hvataljkom i metalnom pločom neku poluzatvorenu zamku kroz koju se zatvara promjenljivi magnetski tok što ga proizvodi struja groma, kako je to na



Sl. 7.6. Sprečavanje preskoka i napona koraka



Sl. 7.7. Sprečavanje opasnosti koje mogu nastati zbog induciranih napona i kapacitivnog nabijanja



slikama 7.7.a i b prikazano. U tako formiranoj zamci zbog toga se može inducirati napon reda veličine i do 100 kV. Veličina tog napona ovisi o strmini struje groma (di/dt) koja protječe hvataljkom i o induktivitetu L tako formirane zamke.

Uz idealnu pretpostavku da će se struja groma kretati samo hvataljkom i metalnom pločom, induktivitet L tako oblikovane zamke mogao bi se približno izračunati koristeći se geometrijskim karakteristikama prve i druge osnovne zamke opisane u petom poglavlju. Kad vrijednost induciranih napona prekorači vrijednost probojne čvrstoće zraka na onim mjestima gdje su dijelovi čovječjeg tijela na malim razmacima od hvataljke, nastat će proboj tog sloja zraka i dio struje groma prostrujat će kroz čovjeka. Taj dio struje zna biti i dosta velik jer ovisi samo o relativno malenom otporu čovječjeg tijela i prijelaznim otporima onih mjesta gdje struja ulazi i izlazi.

To se strujanje, izazvano na opisani način, dade izbjegnuti samo tako da se spriječi proboj između hvataljke i čovjeka. A proboj se sprečava ili jakim izoliranjem hvataljke (sl. 7.7.c) ili povećanjem razmaka između hvataljke i čovječjeg tijela (sl. 7.7.d). Ako bismo se odlučili izolirati hvataljku, tad izolacija mora imati probojnu čvrstoću veću od iznosa induciranog napona. Ako to nije moguće postići, čovjek se mora udaljiti od hvataljke i na udaljenost čak od 1 m.

Lako će se dogoditi da su troškovi za dobro izoliranje hvataljke veliki i da nam prostor oko hvataljke nije dovoljno velik kako bi se čovjek od nje odmaknuo 1 m daleko. U takvoj situaciji potrebno je umjesto jedne hvataljke upotrijebiti dvije ili više njih i međusobno ih povezati, pa ih sve skupa dobro uzemljiti. Tad se struja groma dijeli na sve hvataljke, a njezina se strmina smanjuje, pa su i inducirani naponi na jednu hvataljku manji. Takav postupak zaštite čovjeka zapravo je zaštita pomoću Faradayeve krletke. Naime, najbolju zaštitu bismo postigli kad bismo upotrijebili više hvataljki i međusobno ih povezali, i kad bi se čovjek našao u tako kombiniranom kavezu, o čemu smo dosad već mnogo pisali (sl. 7.7.f).

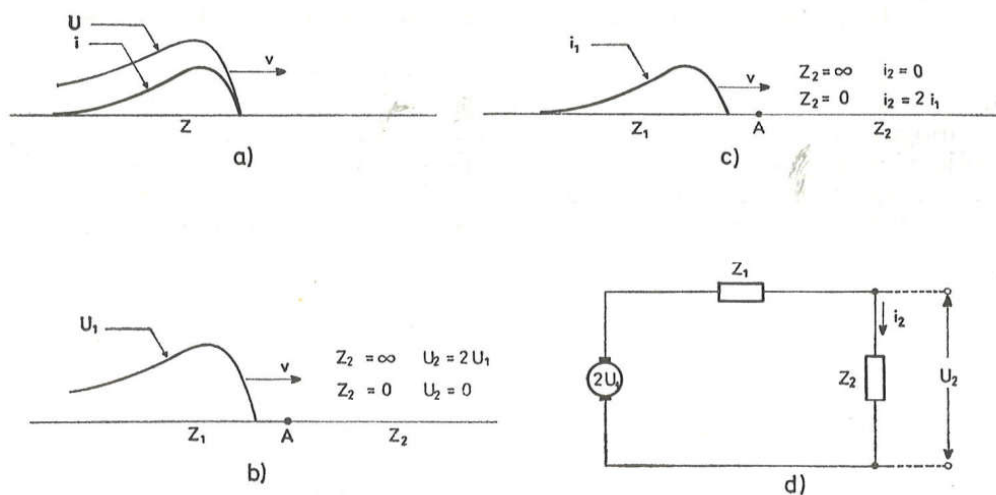
Na osnovi ovih razmatranja dobro je pripomenuti da se u praktičkom životu valja čuvati loše uzemljenih i usamljenih gromobranskih odvoda ili drugih metalnih vodiča kojima može proći struja groma.

Kad se još detaljnije razmotri odnos između čovjeka i jedne slabo uzemljene hvataljke, uočit ćemo još jednu opasnost o kojoj treba voditi računa. Naime, pri udaru groma u hvataljku pokraj koje se nalazi čovjek, često se događa i to da hvataljka s uzemljivačem i okolišnom zemljom poprimi prema dalekoj zemlji vrlo visoki napon. Kako je poznato, taj napon nastaje zbog prolaska struje groma kroz njezin otpor uzemljenja. Budući da čovječje tijelo ima kapacitet od nekoliko desetaka pF (cca 60—90 pF), to povišenje potencijala hvataljke, okolišne zemlje i čovjeka prema dalekoj zemlji uzrokuje da i kroz čovjeka protekne kapacitivna struja nabijanja ili struja pomaka (sl. 7.7.e). Strujanje kroz čovjeka raste dok potencijal raste, a zatim se smanjuje kad potencijal opada. To pomicanje naboja kroz čovječje tijelo može biti opasno pa ga treba spriječiti. Kada bi čovjek imao barem i vrlo tanko metalno odijelo, naboji bi se kretali samo metalnom površinom i ne bi strujali njegovim tijelom. Međutim, takvo je rješenje prilično nepraktično i nije ga moguće u svim prilikama ostvariti. Zato je i zbog ove opasnosti najbolje rješenje smjestiti čovjeka u metalni kavez, unutar gromobranske instalacije u obliku Faradayeve krletke. Tad do nabijanja neće doći jer u zatvorenim metalnim prostorima ne može biti električnog polja.

8. Putni valovi

Kad udari grom u nadzemne vodove nekoga elektroenergetskog sustava, struja se groma dijeli na lijevu i desnu stranu od mjesta udara, stvarajući putne valove (sl. 8.1.a) kojih se napon $U = U(t)$ i struja $i = i(t)$ s vremenom mijenjaju.

Jedan takav putni val kad se kreće vodom nailazi na omski otpor, induktivni otpor, kapacitivni otpor i odvod voda. Ali da bismo mogli što jednostavnije računati tu pojavu, pretpostavit će se da se val kreće idealnim vodom, tj. vodom koji nema omskog otpora i odvoda, nego samo induktivni i kapacitivni otpor. Tako će se putnom valu pri njegovu kretanju suprotstavljati samo valni otpor voda $Z = \sqrt{L/C}$. Ta pretpostavka dopušta da neki putni val promatramo kao kretanje energija električnih polja i magnetskih polja, pa se može govoriti o valu napona i valu struje. Energija električnog polja može preći u energiju magnetskog polja, i obrnuto. Pretvorba energije počinje u točkama diskontinuiteta, kao što su to npr. krajevi otvorenog ili kratko spojenog voda ili na prijelazu nadzemnog voda u kabel, ili obrnuto. Dakle, u nekim čvorovima točkama. Radi jednostavnijeg uvida u te pretvorbe, promjene će se stanja promatrati kroz promjenu napona U i promjenu struje i .



Sl. 8.1. Putni valovi

Najbolje će se te promjene uočiti zamislimo li da se elektromagnetski val kreće vodom koji ima valni otpor Z_1 i na svom putu naiđe na drugi vod kojemu je valni otpor Z_2 ili bilo koji drugi potrošač valnog otpora Z_2 . U tom slučaju energije električnog i magnetskog polja mijenjaju svoju vrijednost. Prema onome što smo prije rekli, u točki diskontinuiteta A energija električnog polja (naponski val) može se pretvoriti u energiju magnetskog polja (strujni val), a jednako tako energija magnetskog polja (strujni val) može preći u energiju električnog polja (naponski val). Međutim, ovdje treba reći da njihov zbroj u jednom i drugom vodu ostaje konstantan, zato što se i u jednom i u drugom vodu pretvara energija. Koliki će se dio jedne energije pretvoriti u drugu, ovisi o tome kolike su vrijednosti valnih otpora Z_1 i Z_2 . Počnimo razmatranja s naponskim valom U . Naponski val koji se kreće po prvom vodu (sl. 8.1.b) prema drugom vodu u tehničkoj terminologiji nazivamo »nailazeći val« ili »upadni val« U_1 . Dio upadnog vala što je prešao u drugi vod nazivamo »prolazni val« U_2 , a dio nailazećeg vala koji nije prešao u drugi vod zovemo »odbijeni val« (reflektirani val) U_r . Za strujni val koji se kreće vodom i nailazi na čvornu točku vrijede isti nazivi kao i za naponski val (sl. 8.1.c). Treba zapamtiti da podjela naponskog vala i strujnog vala na nailazeći val i odbijeni val služi zgodno samo za računanje, a fizičku veličinu npr. u drugom vodu čini njihov zbroj:

$$\begin{aligned} U_2 &= U_1 + U_r \\ i_2 &= i_1 + i_r. \end{aligned} \quad (8.1)$$

Radi zaštite izolacije električnih postrojenja praksa obično zahtijeva da se zna kakvu veličinu i oblik imaju prolazni naponski val U_2 i strujni val i_2 , koji se pojavljuju na valnom otporu Z_2 . Ovdje će se pokazati kako se općenito do tih veličina dolazi. Koristeći se osnovama teorijske elektrotehnike možemo navesti da će veličina prolaznog naponskog vala U_2 ovisiti o faktoru prolaska:

$$a = \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2}. \quad (8.2)$$

Što je taj faktor veći, to će veći dio naponskog vala U_1 preći na valni otpor Z_2 , a što je taj faktor manji, manji će dio naponskog vala U_1 preći na valni otpor Z_2 . Tako za ovaj konkretni slučaj napišemo da se prolazni napon može izračunati iz izraza:

$$U_2 = a U_1 = U_1 \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad (8.3)$$

a odbijeni će val U_r iznositi:

$$U_r = U_2 - U_1 = U_1 \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = \beta U_1, \quad (8.4)$$

pri čemu β nazivamo faktorom refleksije. Računajući došli bismo do zaključka da je uvijek $\alpha - \beta = 1$. Veličina struje i_2 vrlo je zanimljiva veličina u projektiranju zaštite, a iznosi:

$$i_2 = \frac{U_2}{Z_2} = \frac{2 U_1}{Z_1 + Z_2}. \quad (8.5)$$

Obratimo posebnu pažnju posljednjem izrazu. Ako ga malo pažljivije analiziramo, opazit ćemo da je veličina strujnog vala jednaka kvocijentu dvostrukog napona upadnog vala U_1 i zbroja valnih otpora ($Z_1 + Z_2$). Iz te činjenice izlazi, da se sistem valnih otpora Z_1 i Z_2 može zamijeniti ekvivalentnom shemom prema Petersenovu pravilu. Po tom se pravilu sklop valnih otpora Z_1 i Z_2 na slikama 8.1.b i 8.1.c zamjenjuje shemom na slici 8.1.d, gdje su valni otpori zamijenjeni radnim otporima koji su po vrijednosti jednaki valnim otporima Z_1 i Z_2 . Tako zamišljeni strujni krug stavlja se pod dvostruki napon vala što nailazi ($2 U_1$), pa nam se tako omogućuje brzo računanje veličine prolaznog strujnog vala prema izrazu (8.5) i prolaznog napona po pravilu da je $U_2 = (i_2 \cdot Z_2)$.

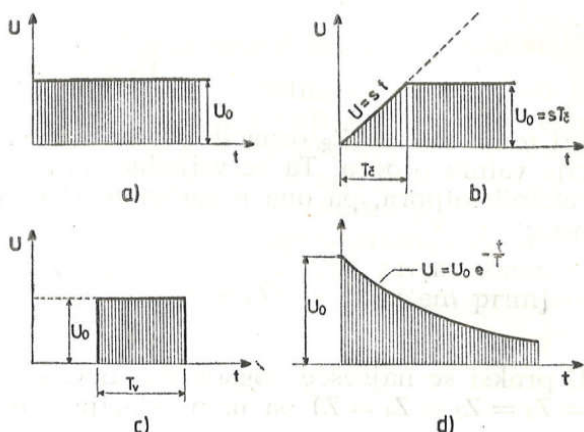
Iz dosadašnjih izlaganja dalje ćemo zaključiti da udar groma u neki nadzemni vod možemo električki zamisliti kao da je na tom mjestu generator kojemu je EMS jednaka dvostrukoj veličini naponskog vala $2U_1$, a unutrašnji mu je otpor jednak valnom otporu Z_1 . Valni otpor Z_2 u shemi treba shvatiti kao potrošač. Razlažući dalje ekvivalentnu shemu vidimo da ona zadovoljava ne samo naš odabrani slučaj nego da vrijedi i sasvim općenito. Tako, je $Z_2 = \infty$ (otvoreni vod ili krajnja stanica), onda se na kraju prvog voda pojavljuje dvostruki napon upadnog vala $2U_1$. Jednako tako, ako nam je $Z_2 = 0$ (kratko spojeni vod), tad se na kraju prvog voda pojavljuje struja $2i_1$, što izlazi prema relaciji da je $(2U_1/Z_1) = 2i_1$. Ta razmatranja su u skladu sa zakonima o pretvorbi energije magnetskoga u energiju električnog polja, i obrnuto, koja nastupa u točkama diskontinuiteta. Možemo prema tome zaključiti da nam shema na slici 8.1. uvijek omogućuje računanje veličine i oblika struje te napona iza čvorne točke u nekom sklopu valnih otpora.

8.1. Oblici valova kojima se služimo prilikom računanja

Pri tumačenju ekvivalentne sheme za početak smo pretpostavili da upadni naponski val ima bilo kakav oblik $U_1 = U_1(t)$. Međutim, kad grom udari u vod, vodom se kreće naponski val koji ima strmo čelo i položeni hrbat, otprilike onako kako je to na slici 8.1. grubo nacrtano. Taj val vrlo kratko traje i krećući se vodom može biti više ili manje izobličen djelovanjem omskog otpora voda, zatim zbog pojave korone i skin-efekta. No, pustimo na ovom mjestu deformacije iz tih razloga, jer smo ionako pretpostavili da se val kreće idealnim vodom, i pokušajmo u daljnjim izlaganjima razmotriti samo one promjene koje nastaju s naponskim valom kad on prelazi iz prvoga u drugi vod ili s nadzemnog voda u kabel, zatim kad on nailazi na koncentrirani induktivitet ili kapacitet itd. Međutim, i razmatranje tih promjena njegovih karakterističnih ve-

Sl. 8.2. Proračunski valovi

ličina, kao što je to promjena njegove amplitude, zatim strmine itd., bilo bi s valom takva oblika složeno i ne tako uočljivo. Zato se za tumačenje promjena i računanje karakterističnih veličina uzimaju valovi geometrijski jednostavnijih oblika, pokazani na slici 8.2. Takve valove nazivamo »proračunski valovi«. Kad će se u računanju upotrijebiti ovaj ili onaj oblik vala, ovisi o tome kakve promjene njegovih karakterističnih veličina želimo uočiti i unaprijed doznati. Tako, želimo li utvrditi promjenu njegove amplitude, to će se dobro uočiti računajući s valom na slici 8.2.a. Ako želimo doznati što je s promjenom njegove strmine, upotrijebit će se za računanje val na slici 8.2.b. Katkad je zanimljivo vidjeti kako utječe duljina trajanja vala na napon u nekom postrojenju, pa će se upotrijebiti val oblika kao na slici 8.2.c, itd. Val na slici 8.2. ima oblik koji najviše odgovara stvarnom valu pri udaru groma pa je u proračunima on vrlo čest.

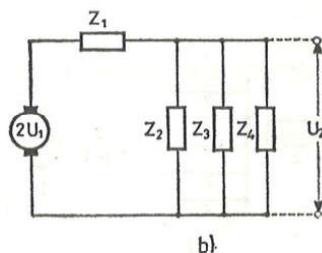
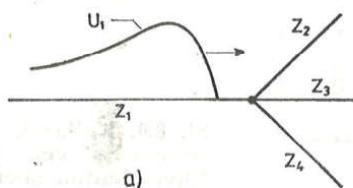


8.2. Vodovi koji se računaju

Potrebno je imati i dalje u vidu da se Petersenovo pravilo daje primijeniti za svaku čvornu točku nekog sklopa valnih otpora pa i onda kad se iza čvorne točke granaju vodovi. To je npr. kad val nailazi na neku transformatorsku stanicu od koje odlazi više vodova (sl. 8.3.a). Ekvivalentnu shemu pomoću koje ćemo odrediti veličinu struje i napona iza čvorne točke sadrži slika 8.3.b.

Pretpostavimo najprije sasvim općenito da su valni otpori različiti ($Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3 \neq Z_4$). U tom slučaju ćemo struju i_2 i napon U_2 iza čvorne točke (ovdje na sabirnicama i na vodovima što odlaze) izračunati iz jednadžbi:

$$i_2 = \frac{2 U_1}{Z_1 + Z_k} \quad (8.6)$$



Sl. 8.3. Vodovi koji se računaju. Ekvivalentna shema

i:

$$U_2 = i_2 \cdot Z_k \quad (8.7)$$

Pri tome smo sa Z_k označili ekvivalentnu vrijednost paralelne kombinacije valnih otpora. Ta se vrijednost računa po pravilu o zbrajanju paralelnih otpora, pa ona u zadanom sistemu na slikama 8.3.a i 8.3.b iznosi:

$$Z_k = \frac{Z_2 \cdot Z_3 \cdot Z_4}{Z_3 Z_4 + Z_2 Z_4 + Z_2 Z_3}.$$

U praksi se najčešće događa da su valni otpori jednake vrijednosti ($Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4 = Z$) pa nam relacije (8.6) i (8.7) poprimaju oblik:

$$i_2 = \frac{2 U_1}{Z \left(1 + \frac{1}{n-1} \right)} \quad (8.8)$$

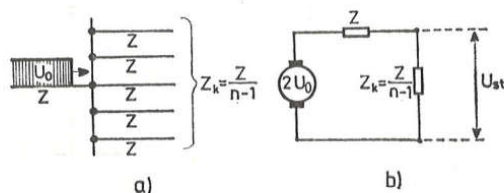
$$U_2 = i_2 \cdot Z_k = i_2 \cdot \frac{Z}{n-1} = \frac{2 U_1}{n}. \quad (8.9)$$

Tu smo s n označili ukupni broj vodova, odnosno sve vodove koji dolaze i odlaze iz stanice (u našem primjeru na slici 8.3. je $n = 4$).

8.3. Primjeri korištenja Petersenovim pravilom za računanje napona i struja u transformatorskim stanicama

Pretpostavimo da nekim vodom kojemu je valni otpor Z nailazi na stanicu beskonačno dugački val s okomitim čelom i ravnim hrptom amplitude. U_0 . Neka transformatorska stanica bude manjih dimenzija s više vodova što od nje odlaze. Neka, dalje, svaki od tih vodova ima isti valni otpor Z , kako je to označeno na slici 8.4. Vrijednost napona U_2 ovdje ćemo radi boljeg razlikovanja pojmova označiti s U_{st} . Tu veličinu naponskih valova koji će se prostirati od sabirnica stanice preko vodova što odlaze, izračunat ćemo tako što će se u izraz (8.9) umjesto U_1 uvrstiti U_0 , pa je napon u stanici i na vodovima:

$$U_{st} = \frac{2 U_0}{n} = a U_0. \quad (8.10)$$



Sl. 8.4. Nailazak pravokutnog vala na stanicu s više priključenih vodova. Ekvivalentna shema

Pri tome je $\alpha = \frac{2}{n}$ faktor prolaska. Taj je napon ovisan o broju vodova koji od stanice odlaze. Radi poduzimanja zaštitnih mjera dobro je napomenuti da će napon u stanici biti utoliko manji ukoliko više vodova iz nje odlazi. To je razumljivo kad se zna da više vodova paralelno povezanih smanjuje ukupni valni otpor Z_k . Tako bi kod $n = 4$ napon na stanici bio jednak polovici napona upadnog vala. Također je dobro spomenuti da čelo vala u stanici u ovom slučaju ostaje nepromijenjeno, dakle ostaje okomito kao što ga je imao i upadni val. Val, prema tome, ne mijenja svoj oblik. Odbijeni val od stanice može se u našem primjeru izračunati iz izraza:

$$U_r = \beta U_0 = U_0 (\alpha - 1) = U_0 \frac{2 - n}{n}.$$

Tu vidimo da je faktor refleksije $\beta = [(2 - n) / n]$ i da on također ovisi o broju vodova priključenih u stanici. Ako je broj vodova veći od 2, faktor je refleksije β manji od jedinice i negativan je. To znači da je ukupni valni otpor Z_k iza stanice manji od onoga ispred nje. To je dobro jer će onda reflektirani val smanjivati napon upadnog vala zbog toga što oni stvaraju jednu fizičku veličinu. Ne bi bilo dobro kada ne bi bilo vodova na sabirnici jer bi tad faktor refleksije bio jednak jedinici i pozitivan, što znači da bi se reflektirani val pribrojio upadnom valu. To je vrlo nepovoljna okolnost koja se pojavljuje u završnim stanicama.

Primjer 8.1.

Beskonačno dugački val s okomitim čelom i ravnim hrptom amplitude $U_0 = 1\,550$ kV nailazi vodom valnog otpora $Z = 400 \, \Omega$ na prolaznu stanicu iz koje izlaze tri takva voda. Treba izračunati napon u stanici i na vodovima što odlaze te reflektirani napon.

Rješenje:

$$\text{Napon u stanici: } U_{st} = \frac{2 U_0}{n} = \frac{2 \cdot 1\,550}{4} = 775 \text{ kV}$$

$$\text{Reflektirani napon: } U_r = U_0 \frac{2 - n}{n} = 1\,550 \cdot \frac{2 - 4}{4} = -775 \text{ kV}$$

Primjer 8.2.

Koliki će se napon pojaviti na sabirnicama jedne prolazne stanice od koje odlazi jedan vod i koliki bi napon bio na sabirnicama završne stanice. Neka napon upadnog vala bude 1 550 kV.

Rješenje:

Napon na sabirnicama prolazne stanice gdje uzimamo da je $n = 2$ iznosi:

$$U_{st} = \frac{2 U_0}{n} = \frac{2 \cdot 1\,550}{2} = 1\,550 \text{ kV.}$$

Napon na sabirnicama završne stanice gdje uzimamo da je $n = 1$ bit će:

$$U_{st} = \frac{2 U_0}{n} = \frac{2 \cdot 1\,550}{1} = 3\,100 \text{ kV.}$$

Osvrnimo se još i na situaciju kad na stanicu iz koje odlazi više vodova nailazi val sa strmim čelom i beskonačno dugačkim hrptom, amplitude U_0 , kao što je to prikazano na slici 8.5. Budući da se upadni val na čelu mijenja linearno pod nekim kutom, tad se ovaj dio vala u intervalu $0 < t < T_g$ analitički izražava ovako:

$$U_1 = \frac{U_0}{T_g} \cdot t = st.$$

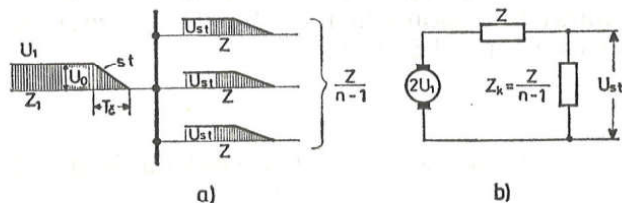
Pri tome smo sa $s = (U_0/T_g)$ označili promjenu napona po vremenu, odnosno strminu upadnog vala. Prolazni napon ili napon u stanici toga prvog dijela vala dobit će se tako da se kao u prethodnom primjeru u izrazu (8.9) umjesto U_1 uvrsti $(U_0/T_g) \cdot t$, pa izlazi:

$$U_{st} = \frac{2 U_1}{n} = \frac{2 U_0 t}{T_g n} = U_0 \cdot a'. \quad (8.11)$$

Tu smo sa $a' = \frac{2t}{T_g \cdot n}$ označili faktor prolaska koji se kod vala sa strmim čelom vremenski mijenja, što nije bilo tako kad smo razmatrali nailazak vala s okomitim čelom na stanicu. Iz jednadžbe dobivene na ovaj način izlazi dalje još i zaključak da će se pri dolasku vala u stanicu s više vodova što odlaze pojaviti osim smanjenja napona još i promjena strmine upadnog vala. Ta strmina s' prolaznog vala, shvaćena općenito kao promjena napona u jedinici vremena, u ovom se slučaju može izračunati iz izraza:

$$s' = \frac{dU_{st}}{dt} = \frac{2 U_0}{T_g n}. \quad (8.12)$$

Očito je da će strmina uz veliki broj vodova što odlaze biti manja od one koju je imao upadni val. Naprotiv, kad je to završna stanica, gdje je



Sl. 8.5. Nailazak strmog vala na stanicu s više priključenih vodova. Ekvivalentna shema

$n = 1$, onda će nam strmina vala na sabirnicama takve stanice poprimiti dva puta veću vrijednost od one upadnog vala. Zato je dolazak strmog vala na završnu stanicu i s ovog gledišta vrlo nepovoljan događaj.

Drugi dio upadnog vala, za $t > T_{\xi}$ ima ravan hrbat i njegov napon dalje ima konstantnu vrijednost U_0 . Faktor prolaska u trenutku $t = T_{\xi}$ postiže svoju graničnu vrijednost $\alpha = 2/n$ i više se vremenski ne mijenja. Zato prolazni napon drugog dijela vala sa strmim čelom možemo dobiti iz izraza $U_{st} = (2U_0/n)$.

Primjer 8.3.

Na stanicu nailazi strmi val amplitude $U_0 = 1\,550$ kV. On ima strmo čelo koje traje $T_{\xi} = 60\ \mu\text{s}$. Iz stanice odlaze tri nadzemna voda i svi imaju jednak valni otpor, i to $400\ \Omega$. U ovom primjeru treba izračunati: a) koliki će biti napon U_{st} na sabirnicama i vodovima koji odlaze nakon $20\ \mu\text{s}$ od nailaska vala; b) kolika je strmina vala s prije ulaska u stanicu i kolika je strmina vala s' nakon ulaska vala u stanicu; c) koliki će biti napon vala na sabirnicama nakon $60\ \mu\text{s}$ od njegova ulaska u stanicu.

Rješenje:

a) Napon u stanici nakon $20\ \mu\text{s}$:

$$U_{st} = \frac{2 U_0 t}{T_{\xi} \cdot n} = \frac{2 \cdot 1\,550 \cdot 20}{60 \cdot 4} = 258,3\ \text{kV}.$$

b) Strmina vala prije ulaska u stanicu:

$$s = \frac{U_0}{T_{\xi}} = \frac{1\,550}{60} = 25,83\ \text{kV}/\mu\text{s},$$

a strmina vala poslije ulaska u stanicu:

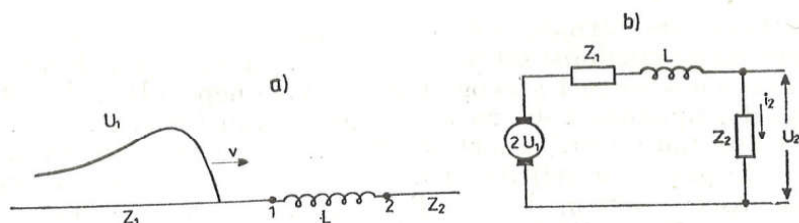
$$s' = \frac{2 U_0}{T_{\xi} n} = \frac{2 \cdot 1\,550}{60 \cdot 4} = 12,91\ \text{kV}/\mu\text{s}$$

c) Napon u stanici nakon $60\ \mu\text{s}$:

$$U_{st} = \frac{2 U_0}{n} = \frac{2 \cdot 1\,550}{4} = 775\ \text{kV}.$$

8.4. Prolazak vala kroz induktivitet uključen između dva voda

U elektroenergetskim sistemima nailazimo na pojavu da su u raznim spojevima priključeni induktiviteti. Koncentrirani induktiviteti priključeni u seriji između dva voda valnog otpora Z_1 i Z_2 sadrži slika 8.6.a.



Sl. 8.6. Prolazak vala kroz induktivitet. Ekvivalentna shema

Analogna shema općenito vrijedi kad je u stanicama priključena prigušnica. Istom se shemom daje obuhvatiti i situacija kad grom udari u vrh gromobrana ili dalekovodni stup. Tad se Z_1 može shvatiti kao vrijednost valnog otpora kanala groma, L induktivitet gromobrana ili stupa, a Z_2 kao valni otpor uzemljivača. Dakle više praktičnih okolnosti može se pojednostavnjeno prikazati ovom shemom. Pri razmatranju prolaska vala kroz induktivitet treba induktivitet elemenata nekog postrojenja uzeti kao čisti induktivitet, kojemu se zanemaruje kapacitet između zavoja i kapacitet tih zavoja prema zemlji. Za razliku od induktiviteta kod vodova, koji je jednoliko raspoređen po duljini voda, induktivitet tih elemenata valja shvatiti u ovoj shemi kao da je koncentriran u jednoj točki. A kad su elementi strujnog kruga koncentrirani, onda se i pojave donekle pojednostavnjuju i jasnije se uočavaju fizikalna zbivanja na svakom elementu. Kao i u prethodnim izlaganjima posebno nas zanima kolika je veličina i kakav je oblik naponskog vala U_2 i kolika je njegova strmina s kad naponski val U_1 prođe kroz induktivitet i dođe do valnog otpora Z_2 , koji, prema našim shvaćanjima, najopćenitije označava nekog potrošača. To, uzimajući grubo, mogu biti vodovi koji odlaze iz stanice, zatim svici generatora, transformatora, uzemljivači ili drugi elementi postrojenja. Zato će se najprije izračunati napon U_2 na valnom otporu Z_2 , prema ekvivalentnoj shemi na slici 8.6.b. Primjenjujući i dalje Peterseovo pravilo pišemo da u svakom trenutku u ekvivalentnoj shemi vrijedi jednadžba:

$$2 U_1 = i_2 (Z_1 + Z_2) + L \frac{di_2}{dt}. \quad (8.13)$$

Uzimajući u obzir činjenicu da je $i_2 = (U_2/Z_2)$ i koristeći se Laplaceovim transformacijama možemo jednadžbu u donjem području drukčije napisati:

$$2 U_1(p) = \frac{U_2(p)}{Z_2} (Z_1 + Z_2) + Lp \frac{U_2(p)}{Z_2}.$$

Rješavajući taj izraz po $U_2(p)$ dobivamo da je napon na valnom otporu Z_2 :

$$U_2(p) = U_1(p) \frac{2Z_2}{L} \cdot \frac{1}{\frac{Z_1 + Z_2}{L} + p} \quad (8.14)$$

$$U_2(p) = U_1(p) \frac{a_{1,2}}{T} \frac{1}{\frac{1}{T} + p}$$

Pri tome smo s $a_{1,2} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$ označili faktor prolaska između prvog i drugog voda koji bi vrijedio da nemamo uključeni induktivitet, a s $T = [L/(Z_1 + Z_2)]$ označili smo konstantu ekvivalentnog kruga. Raspravljat ćemo o ovoj jednadžbi na konkretnim primjerima.

Pretpostavimo da nam prvim vodom nailazi val beskonačne duljine, konstantne amplitude U_0 i okomita čela, kao što je to na slici 8.7.

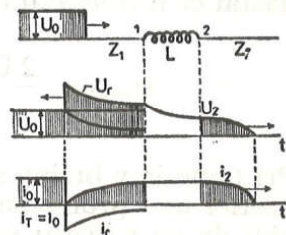
Analitički izraz za vrijednost prolaznog napona U_2 izračunat će se tako što će se u opći izraz (8.14) umjesto $U_1(p)$ uvrstiti zadana vrijednost (U_0/p). Nakon sređivanja i transformiranja izraza u gornje vremensko područje dobiva se da je napon U_2 na valnom otporu Z_2 :

$$U_2 = \frac{2Z_2 U_0}{Z_1 + Z_2} (1 - e^{-t/T}). \quad (8.15)$$

Taj napon prolaznog vala U_2 sastoji se od dvije komponente, što se vidi kad izraz (8.15) napišemo u obliku:

$$U_2 = \frac{2U_0 Z_2}{Z_1 + Z_2} - \frac{2U_0 Z_2}{Z_1 + Z_2} e^{-t/T}. \quad (8.16)$$

Prva je komponenta konstantna i ovisi samo o veličini upadnog vala U_0 , te o omjeru valnih otpora Z_1 i Z_2 . Druga je komponenta prolaznog vala promjenljiva i superponira se tokom vremena prvoj komponenti sa suprotnim predznakom. Slijedeći ukupni tok ove pojave iz izraza možemo zaključiti da će napon prolaznog vala biti u trenutku $t = 0$ jednak nuli ($U_2 = 0$). To je shvatljivo kad se zna da struja ne može odmah prodrijeti u svitak, nego se to događa tek trenutak poslije. Ona se postepeno pojačava, što dovodi do toga da i napon vala U_2 na otporu Z_2 počinje polako rasti (sl. 8.7). To kašnjenje daje se rastumačiti i činjenicom da nije moguće trenutno promijeniti svu vrijednost električne energije upadnog vala u magnetsku energiju. Za takvu trenutnu



Sl. 8.7. Promjene napona i struje tokom vremena, kad je priključen induktivitet

promjenu morali bismo imati nadasve jaki izvor električne energije. Trenutak $t = 0$ možemo, dalje, zamisliti kao trenutak prekida strujanja zbog velikog otpora induktivnog svitka, pa nam se zato može lako dogoditi da i napon upadnog vala pred svitkom poprimi dvostruku vrijednost. (Vod valnog otpora Z_1 djeluje kao otvoreni vod.)

Poslije toga, nakon nekog vremena, promjenljiva komponenta prolaznog napona polako opada, što znači da struja sve više prodire u svitak, a prolazni napon na valnom otporu Z_2 poprima sve višu i višu vrijednost. Tako će za $t = \infty$ napon na valnom otporu Z_2 poprimiti graničnu vrijednost:

$$U_2(t = \infty) = \frac{2 U_0 Z_2}{Z_1 + Z_2} = \alpha U_0. \quad (8.17)$$

Iz posljednjeg izraza očito je promjenljiva komponenta prolaznog napona potpuno iščezla i napon će na valnom otporu Z_2 poprimiti takvu konstantnu vrijednost koja će biti ovisna samo o veličini upadnog vala U_0 i omjeru valnih otpora Z_1 i Z_2 . Dakle, induktivni svitak, kad nastupa ravni hrbat vala, nema više nikakvo djelovanje. Što se tiče čela naponskog vala na valnom otporu Z_2 , ono nije više okomito kao što je bilo prije prolaska kroz induktivitet, nego se eksponencijalno penje do svoje granične vrijednosti. Na izobličenje čela tog vala najviše utječe vremenska konstanta strujnog kruga T . S povećanjem te konstante slobodna se komponenta mijenja sporije, a zbog toga će i čelo vala biti položnije. Obrnuto, smanjuje li se vremenska konstanta T , čelo vala na otporu Z_2 bit će strmije pa možemo reći da se korist od priključivanja induktivnog svitka između valnih otpora Z_1 i Z_2 sastoji u tome što brzinu podizanja napona U_2 na otporu Z_2 možemo podesiti tako da ne prekorači određenu vrijednost. To se provodi kad je potrebno osigurati da strmina napona prolaznog vala ostane u granicama koje nisu opasne za izolaciju nekog stroja ili aparata. Budući da je strmina s općenito promjena napona u jedinici vremena, tu ćemo veličinu izračunati deriviranjem izraza (8.15), pa izlazi:

$$s = \frac{d U_2}{dt} = \frac{2 U_0 Z_2}{L} e^{-(t/T)}.$$

Izraz nam pokazuje da i strmina u svakom trenutku nema jednaku vrijednost, nego se i ona s vremenom mijenja. Najveća vrijednost ili najopasnija veličina koja za praktičke proračune najviše privlači pažnju, nastat će u trenutku $t = 0$, pa za maksimalnu vrijednost strmine pišemo:

$$s_{(\max)} = \frac{2 U_0 Z_2}{L} \text{ (V/s) ili } s_{(\max)} = \frac{2 U_0 Z_2}{L v} \text{ (V/m).} \quad (8.18)$$

Pri tome je v brzina svjetlosti, zato se strmina vala koji se i kreće može uzeti i kao promjena napona po jedinici prijeđenog puta. Iz izraza se vidi da na najveću vrijednost strmine vala U_2 osim vrijednosti indukti-

viteta L utječe još i vrijednost valnog otpora Z_2 . Odnosno, tu djeluje i priroda drugog voda ili, općenito uzevši, utječe svojstvo potrošača do kojeg je val došao. Zato tamo gdje valni otpor Z_2 ima veliku vrijednost nije lako ostvariti zaštitu s nekim svitkom male induktivne vrijednosti, nego valja uzeti svitak velike induktivne vrijednosti. To uzrokuje u praksi velike teškoće. Da bismo došli do približne ocjene o odnosima veličina u ovim razmatranjima, riješimo jedan praktički primjer.

Primjer 8.4.

Neka nam, idealno uzevši, valni otpor $Z_2 = 800 \Omega$ bude neki generator. Pretpostavimo da na taj generator nailazi beskonačno dugački val okomita čela i amplitude $U_0 = 100 \text{ kV}$. U primjeru treba odrediti koliki bi induktivitet trebalo uključiti između generatora i voda preko kojeg nailazi putni val. Prilikom računanja veličine induktiviteta valja nastojati da napon između prvih zavoja generatora ne bi premašio 600 V . Duljina jednog zavoja generatorskog namota iznosi $\ell = 3 \text{ m}$, a val koji se kreće tim namotom ima brzinu od $6 \cdot 10^7 \text{ m/s}$.

Rješenje:

Maksimalno dopuštena strmina vala je:

$$S_{(\max)} = \frac{dU_2}{d\ell}_{\max} = \frac{600}{3} = 200 \text{ V/m}.$$

Vrijednost induktiviteta svitka koji bi trebalo uključiti iznosi prema izrazu (8.18):

$$L = \frac{2 U_0 Z_2}{S_{(\max)} \cdot v} = \frac{2 \cdot 100 \cdot 800}{0,2 \cdot 6 \cdot 10^7} = 13,3 \cdot 10^{-3} \text{ H}.$$

U ovom smo primjeru generator nadomjestili valnim otporom Z_2 , što u praksi ne smijemo učiniti jer će se val na njegovim svicima izobličiti. No radi ilustracije i približne ocjene neka nam to bude dopušteno.

Praksa često zahtijeva da se osim oblika i veličine napona U_2 na otporu Z_2 poznaje veličina i oblik struje i_2 koja ga prati. Ta se veličina daje brzo izračunati podijelimo li izraz (8.15) valnim otporom Z_2 pa izlazi:

$$i_2 = \frac{2 U_0}{Z_1 + Z_2} (1 - e^{-(t/T)}). \quad (8.19)$$

Strmina je struje također zanimljiva za praktičke proračune, a možemo je izraziti kao promjenu struje u jedinici vremena:

$$s = \frac{di_2}{dt} = \frac{2 U_0}{L} e^{-(t/T)}$$

$$S_{(\max)} = \left(\frac{di_2}{dt} \right)_{(\max)} = \frac{2 U_0}{L}. \quad (8.20)$$

Pri dimenzioniranju zaštite struja i strmina unaprijed su određene pa u proračunima valja paziti na to da ne budu prekoračene.

Osim vala U_2 , koji je prošao kroz induktivitet, i struje i_2 , što ga prati, pojavit će se na ulazu u svitak i odbijeni val U_r , kojega veličinu i oblik pronalazimo prema jednadžbi:

$$U_0 + U_r = U_2 + L \frac{di_2}{dt}.$$

Ako u tu jednadžbu uvrstimo prije izračunate vrijednosti za U_2 i (di_2/dt) , dobit ćemo da odbijeni val iznosi:

$$U_r = U_0 \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} + \frac{2 U_0 Z_2}{Z_1 + Z_2} e^{-(t/T)}. \quad (8.21)$$

Iz izraza je očito da se i faktor refleksije β također mijenja s vremenom. Tako u trenutku $t = 0$, kad val stigne do svitka, faktor će refleksije biti $\beta = 1$, a poslije, za $t = \infty$, on će težiti graničnoj vrijednosti:

$$\beta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}.$$

Kao što se veličina prolaznog vala mijenja eksponencijalno, tako će se eksponencijalno mijenjati i veličina odbijenog vala U_r . U trenutku $t = 0$ ta će vrijednost u točki na ulazu u svitak poprimiti vrijednost jednaku onoj upadnog vala U_0 , a poslije će se ta vrijednost u toj točki smanjivati do svoje granične razine koja ovisi samo o veličini valnih otpora Z_1 i Z_2 . Uzimajući u obzir činjenicu da je svako stvarno stanje na prvomvodu zbir upadnog i odbijenog vala, takav tok pojave može uzrokovati da u toj točki u prvom trenutku dobijemo dvostruki napon upadnog vala. Fizikalno tumačenje za takav tok zbivanja već smo dali. Tako visoki napon naprezat će izolaciju induktivnog svitka pa o toj nepovoljnoj okolnosti treba voditi računa. Prije se na početak priključenog svitka postavljao odvodnik prenapona koji bi zbog tako visokog napona proradio i već prije ulaska u svitak odveo dio struje groma u zemlju.

Primjer 8.5.

Naponski val okomita čela i ravna hrpta, beskonačne duljine i amplitude $U_0 = 625$ kV, kreće se vodom valnog otpora $Z_1 = 425 \Omega$. Prije nailaska na vod valnog otpora $Z_2 = 200 \Omega$ prolazi on kroz priključeni induktivitet $L = 12,5 \cdot 10^{-3}$ H. U ovom zadatku treba izračunati: konstantu kruga T , vrijednosti vala U_2 koji je prošao i vrijednosti odbijenog vala U_r , zatim vrijednosti prolazne struje i_2 i strmine s u trenucima $t = 0 \mu s$, $t = 20 \mu s$ i $t = \infty \mu s$. Jednako tako valja utvrditi u tim trenucima stanje napona u prvomvodu i pad napona na induktivitetu.

Rješenje:

Vremenska je konstanta kruga:

$$T = \frac{L}{Z_1 + Z_2} = \frac{12,5 \cdot 10^{-3}}{425 + 200} = 20 \mu s.$$

Napon je prolaznog vala u trenutku $t = 20 \mu s$:

$$U_2 = \frac{2 U_0 Z_2}{Z_1 + Z_2} (1 - e^{-(t/T)}) = \frac{2 \cdot 625 \cdot 200}{425 + 200} (1 - e^{-(20/20)}) = 252,8 \text{ kV}.$$

Napon odbijenog vala u trenutku $t = 20 \mu s$ bit će:

$$U_r = U_0 \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} + \frac{2 U_0 Z_1}{Z_2 + Z_1} e^{-(t/T)} = 625 \cdot \frac{200 - 425}{200 + 425} + \frac{2 \cdot 625 \cdot 425}{200 + 425} \cdot e^{-(20/20)} = 87,7 \text{ kV}.$$

Prolazna je struja u trenutku $t = 20 \mu s$:

$$i_2 = \frac{2 U_0}{Z_1 + Z_2} (1 - e^{-(t/T)}) = \frac{2 \cdot 625}{425 + 200} (1 - e^{-(20/20)}) = 1,264 \text{ kA}.$$

Strmina u trenutku $t = 20 \mu s$ iznosi:

$$s = \frac{dU_2}{dt} = \frac{2 U_0 Z_2}{L v} e^{-(t/T)} = \frac{2 \cdot 625 \cdot 200}{12,5 \cdot 10^{-3} \cdot 300} e^{-(20/20)} = 24,53 \cdot 10^{-3} \text{ kV/m}.$$

Pad napona na induktivitetu bit će:

$$\Delta U_L = L \frac{di_2}{dt} = 2 U_0 \cdot e^{-(t/T)} = 2 \cdot 625 \cdot e^{-(20/20)} = 459,8 \text{ kV}.$$

Stanje je napona u prvomvodu u trenutku $t = 20 \mu s$:

$$U_0 + U_r = U_2 + L \frac{di_2}{dt} = 625 + 87,69 = 252,8 + 459,8 = 712,6 \text{ kV}.$$

U trenutku $t = 0 \mu s$ $U_2 = 0$ $U_r = 625 \text{ kV}$ $i_2 = 0$ $s = 66,67 \cdot 10^{-3} \text{ kV/m}$ $\Delta U_L = 1250 \text{ kV}$ $U_0 + U_r = U_2 + L \frac{di_2}{dt} = 1250 \text{ kV}$	U trenutku $t = \infty \mu s$ $U_2 = 400 \text{ kV}$ $U_r = -225 \text{ kV}$ $i_2 = 2 \text{ kA}$ $s = 0$ $\Delta U_L = 0$ $U_0 + U_r = U_2 + U_L = 400 \text{ kV}$
---	---

8.5. Prolazak vala pokraj kapaciteta

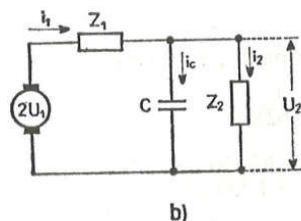
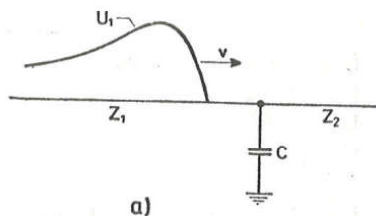
U električnim postrojenjima osim koncentriranih induktiviteta prisutni su i koncentrirani kapaciteti. Tako sabirnice većih stanica imaju kapacitet prema zemlji, zatim kapacitet imaju uvodi i ulazni svici transformatora itd. Za zaštitu rotacionih strojeva, kojima je slaba izolacija, upotrebljavaju se kondenzatorski odvodnici pa i njihov kapacitet prema zemlji treba uzimati u obzir u razmatranju prolaska naponskog i strujnog vala pokraj njega. Sasvim općenito i pojednostavnjeno, svi takvi slučajevi mogu biti predloženi električnom shemom na slici 8.8.a. U shemi je taj kapacitet uključen između vodova i zemlje na mjestu gdje se vod valnog otpora Z_1 spaja s vodom valnog otpora Z_2 . Čim naponski val stigne u čvornu točku u kojoj je priključen kondenzator, počinje odmah pretvorba energije, kao što se to događalo i kad smo imali uključen induktivni svitak. Prije nailaska vala nema napona na kondenzatoru. On se na njemu i ne može trenutno pojaviti jer se kondenzator mora prije toga napuniti nabojima. Za vrijeme ovog strujanja, u prvim trenucima, kondenzator se zapravo vlada kao beskonačno mali otpor i stvara kratki spoj između vodova i zemlje. Električna energija predložena naponskim valom prelazi u magnetsku energiju, a struja koja teče u zemlju može dosegnuti i dvostruku vrijednost, $2i_1$. Napon i struja na valnom otporu Z_2 zbog toga su u početku jednaki nuli. Kako se kondenzator postupno puni, njegov napon počinje rasti. Na valnom otporu Z_2 će se tek tad pojaviti struja i_2 i prolazni napon U_2 . Napon toga prolaznog vala može se računati iz ekvivalentne sheme na slici 8.8.b, jer je poznato da unutar tih zamki vrijede ove jednadžbe:

$$2U_1 = i_1 Z_1 + i_2 Z_2 = (i_c + i_2) Z_1 + i_2 Z_2 \quad (8.22)$$

$$\frac{1}{C} \int i_c dt = i_2 Z_2. \quad (8.23)$$

Uvrstimo li vrijednost za i_c iz izraza (8.23) u jednadžbu (8.22), ona će glasiti:

$$2U_1 = i_2 (Z_1 + Z_2) + Z_1 Z_2 \cdot \frac{di_2}{dt} \cdot C.$$



Sl. 8.8. Prolazak vala pokraj kapaciteta. Ekvivalentna shema

Ako zamijenimo još i_2 s (U_2/Z_2) i koristeći se Laplaceovim transformacijama, možemo jednadžbu (8.22) pisati u ovom obliku:

$$2U_1(p) = \frac{U_2(p)}{Z_2} \cdot Z_1 + U_2(p) + Z_1 Z_2 C p \cdot \frac{U_2(p)}{Z_2}.$$

Izraz za veličinu i oblik naponskog vala U_2 dobit ćemo ako posljednju jednadžbu riješimo po $U_2(p)$, pa imamo:

$$U_2(p) = U_1(p) \frac{2Z_2}{Z_1 Z_2 C} \cdot \frac{1}{\frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 Z_2 C} + p}$$

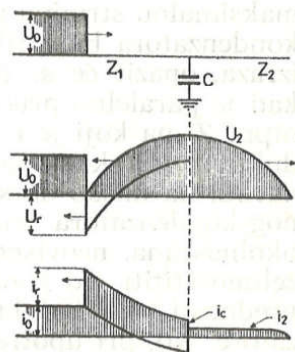
$$U_2(p) = U_1(p) \cdot \frac{a_{1,2}}{T} \cdot \frac{1}{\frac{1}{T} + p}. \quad (8.24)$$

Tu smo s $a_{1,2} = [2Z_2/(Z_1 + Z_2)]$ označili faktor prolaska između prvog i drugog voda, koji bi vrijedio da nemamo priključenog kondenzatora, a s $T = [Z_1 Z_2 C/(Z_1 + Z_2)]$ konstantu ekvivalentnog kruga. Pri tome valja uočiti da je jednadžba za napon prolaznog vala na otporu Z_2 kad imamo priključeni kondenzator, jednaka jednadžbi (8.14), koja vrijedi za naponske valove što su prolazili kroz induktivitet. Razlikuju se samo vremenske konstante T njihovih ekvivalentnih krugova. Ta mogućnost da u izvjesnim uvjetima možemo dobivati i jednake rezultate za veličinu i oblik vala koji je prošao čvornu točku, razmotrit će se dalje na konkretnim primjerima.

Počnimo s pretpostavkom da nam se prvim vodom kreće val beskonačne duljine, konstantne amplitude U_0 i okomita čela, kao što je to prikazano na slici 8.9. Analitički izraz za prolazni napon U_2 dobit će se zamjenom $U_1(p)$ u jednadžbi (8.24) s (U_0/p) , pa poslije računanja da je napon na valnom otporu Z_2 izlazi:

$$U_2 = \frac{2U_0 Z_2}{Z_1 + Z_2} (1 - e^{-(t/T)}). \quad (8.25)$$

Iz jednadžbe se vidi da je za $t = 0$ prolazni napon $U_2 = 0$, a da je za $t \gg T$ napon $U_2 = [2U_0 Z_2/(Z_1 + Z_2)]$, odnosno da napon nakon duljeg vremena na otporu Z_2 ovisi samo o vrijednostima valnih otpora Z_1 i Z_2 i amplitude U_0 . Kao da nema kondenzatora. Drugim riječima, kondenzator



Sl. 8.9. Oblik prolaznih i odbijenih valova napona i struje kad je paralelno priključen kondenzator

ne smanjuje amplitudu upadnog napona ako je val beskonačno dugačak. Dapače, može se dogoditi u specijalnim okolnostima, kad je Z_2 mnogo veće od Z_1 , da se na kondenzatoru pojavi i dvostruki napon, napon $2U_0$. To se susreće kad je kondenzator u pogonima priključen na kraju nekoga nadzemnog voda ili služi kao zaštita u nekoj završnoj stanici. U tim specijalnim prilikama treba uzeti kod proračuna da je konstanta tog kruga $T = Z_1 C$. Ta mogućnost da napon poprimi i dvostruku vrijednost pri upotrebi kondenzatora kao zaštite stvara u izvjesnom smislu i stanovite teškoće. No, te teškoće se pojavljuju samo onda ako se očekuju visoke amplitude putnih valova i ako oni dugo traju. No, srećom, putni valovi izazvani strujom groma ne traju dugo.

Na osnovi dosadašnjih razmatranja, a iz dijagrama na slici 8.9, vidi se da se ipak čelo naponskog vala, koje je bilo okomito, prolaskom pokraj kapaciteta, promijenilo. Za zaštitu je ta promjena i te kako zanimljiva. Da vidimo kako se to čelo vala vremenski mijenja, odnosno da vidimo kako se mijenja njegova strmina. Posebno nas, kao i u prethodnim izlaganjima zanima, kolika je najveća brzina te promjene, kolika je njegova maksimalna strmina.

To ćemo doznati ako izračunamo općenito promjenu napona U_2 po jedinici vremena, pa derivirajući izraz (8.25) možemo napisati da se strmina prolaznog napona mijenja prema izrazu:

$$s = \frac{dU_2}{dt} = \frac{2U_0}{Z_1 \cdot C} \cdot e^{-(t/T)}$$

i da će u trenutku $t = 0$ ona poprimiti najveću vrijednost:

$$s_{(\max)} = \frac{2U_0}{Z_1 C}. \quad (8.26)$$

Taj trenutak nastupa kad val naiđe na kondenzator, a poslije se ona smanjuje. Iz izraza se dalje izvodi važan zaključak da se na strminu prolaznog napona U_2 može bitno utjecati veličinom kapaciteta priključenog kondenzatora. Što je on veći, strmina će biti manja, i obrnuto. Dobro je ovdje odmah uočiti da izraz (8.26) za maksimalnu strminu vala U_2 kad imamo priključeni kondenzator nije jednak onom izrazu za maksimalnu strminu prolaznog vala u prošlom primjeru, kad je umjesto kondenzatora bio priključen induktivni svitak. Ako usporedimo ta dva izraza, opazit će se da maksimalna vrijednost strmine prolaznog vala kad je paralelno priključen kondenzator ne ovisi o tome koliki je valni otpor Z_2 na koji je došao val. Suprotno tome, kad je bio priključen induktivni svitak, strmina je ovisila o veličini toga valnog otpora. To nas navodi na misao da se zbog povećanja vrijednosti kapaciteta priključenog kondenzatora smanjuje maksimalna strmina prolaznog vala u svim okolnostima, neovisno o tome koliki valni otpor ima neki objekt koji želimo štititi. To kondenzatorima kao zaštitnom sredstvu daje izvjesne prednosti pred induktivnim svcima. Dakle, bolje se odlučiti za kondenzatore. No, pri upotrebi kondenzatora i određivanju njegova kapaciteta

mora se voditi računa o tome da iako strmina prolaznog vala ne ovisi o veličini valnog otpora štićenog objekta Z_2 , na nju utječe veličina valnog otpora Z_1 preko kojeg je naišao val. Još jedna prednost upotrebe kondenzatora za smanjenje strmine prolaznog vala U_2 sastoji se u tome što val koji nailazi na paralelno priključeni kondenzator, u prvim trenucima ne udvostručuje svoju vrijednost napona, kao što je to bilo za serijski priključeni induktivni svitak. Mogli bismo ukratko reći da za okomito čelo vala kondenzator znači kratki spoj, a induktivni svitak beskonačno veliki otpor. Vrlo često praktički razlozi nalažu da se osim poznavanja veličine napona na otporu Z_2 i njegove maksimalne strmine znaju i vrijednosti strujnog vala i_2 . Te se vrijednosti lako računaju tako da vrijednosti napona prolaznog vala iz jednadžbe (8.25) podijelimo sa Z_2 .

Slika o ovim zbivanjima ne bi bila potpuna kad ne bismo barem nekoliko riječi rekli o kretanju odbijenog vala U_r od kondenzatora, jer kao što se pri nailasku vala na serijski priključen induktivni svitak pojavljivao odbijeni val, tako će jednako i sad pri nailasku vala na paralelno priključeni kondenzator nastati takav val. Za računanje vrijednosti napona odbijenog vala U_r koji se pojavljuje zbog priključenog kondenzatora, pođimo od utvrđene činjenice da se svako stanje napona, u svakom trenutku, na tom sklopu otpora, može prikazati izrazom:

$$U_0 + U_r = U_2.$$

Pri tome je U_0 napon vala koji nailazi, U_2 je vrijednost napona vala koji je prošao čvornu točku, a U_r je napon odbijenog vala. Uvrštavajući u tu opću jednadžbu prije izračunati izraz (8.25) za napon polaznog vala U_2 i rješavajući jednadžbu po U_r , imamo da je napon odbijenog vala:

$$U_r = U_2 - U_0 = U_0 \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} - \frac{2U_0 Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot e^{-(t/T)}, \quad (8.27)$$

pri čemu je $T = [Z_1 Z_2 C / (Z_1 + Z_2)]$ konstanta kruga.

Taj se izraz razlikuje od onoga kojim se računaju vrijednosti odbijenog vala za serijski priključeni svitak. To je razumljivo zbog toga što induktivni svitak pruža veliki otpor i val se reflektira s pozitivnim predznakom. Naprotiv, kad imamo priključen kondenzator, val se reflektira s negativnim predznakom.

Primjer 8.6.

Naponski val okomitog čela i ravnog hrpta, beskonačne duljine i amplitude $U_0 = 625$ kV, kreće se vodom valnog otpora $Z_1 = 425 \Omega$, te prije nailaska na vod valnog otpora $Z_2 = 200 \Omega$ prolazi mimo paralelno priključenog kondenzatora kojem je kapacitet $C = 0,0406 \mu\text{F}$. U ovom zadatku treba izračunati kolike su vrijednosti prolaznog vala U_2 , prolazne struje i_2 i odbijenog vala U_r , te strmine s . Te se vrijednosti izračunavaju u trenucima $t = 0 \mu\text{s}$, $t = 20 \mu\text{s}$. Jednako tako valja utvrditi u tim trenucima stanje napona na prvomvodu nakon refleksije.

Rješenje:

Vremenska je konstanta kruga:

$$T = \frac{Z_1 Z_2 C}{Z_1 + Z_2} = \frac{425 \cdot 200 \cdot 0,0406}{425 + 200} = 5,52 \mu\text{s}.$$

U trenutku $t = 0 \mu\text{s}$:

napon je prolaznog vala:

$$U_2 = \frac{2U_0 Z_2}{Z_1 + Z_2} (1 - e^{-(t/T)}) = \frac{2 \cdot 625 \cdot 200}{425 + 200} (1 - e^{-0/5,52}) = 0, U_2 = 0;$$

struja prolaznog vala bit će:

$$i_2 = \frac{U_2}{Z_2} = \frac{0}{200} = 0;$$

napon odbijenog vala iznosi:

$$U_r = U_0 \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} - \frac{2U_0 Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot e^{-t/T} = 625 \cdot \frac{200 - 425}{200 + 425} - \frac{2 \cdot 625 \cdot 200}{425 + 200} \cdot e^{-0/5,52} = -625 \text{ kV};$$

Strmina je prolaznog vala:

$$s_{(\max)} = \left(\frac{dU_2}{dt} \right) = \frac{2U_0}{Z_1 C} \cdot e^{-t/T} = \frac{2 \cdot 625}{425 \cdot 0,0406} \cdot e^{-0/5,25} = 72,44 \text{ kV}/\mu\text{s}$$

0,25 kV/m;

Stanje napona u prvomvodu i drugomvodu bit će:

$$U_0 + U_r = 625 - 625 = 0.$$

U trenutku $t = 20 \mu\text{s}$:

$$U_2 = \frac{2U_0 Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot (1 - e^{-t/T}) = \frac{2 \cdot 625 \cdot 200}{425 + 200} (1 - e^{-20/5,52}) = 400 \cdot (1 - 0,0267) = 389 \text{ kV};$$

$$i_2 = \frac{U_2}{Z_2} = \frac{389}{200} = 1,94 \text{ kA};$$

$$U_r = U_0 \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} - \frac{2U_0 Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot e^{-t/T} = 625 \cdot \frac{200 - 425}{200 + 425} - \frac{2 \cdot 625 \cdot 200}{425 + 200} \cdot 0,0267 = -225 - 10,68 = -235,68 \text{ kV};$$

$$s = \frac{2U_0}{Z_1 C} \cdot e^{-t/T} = \frac{2 \cdot 625}{425 \cdot 0,0406} \cdot 0,0267 = \frac{1\,250 \cdot 0,027}{17,25} = 1,93 \text{ kV}/\mu\text{s}.$$

Kad smo opisivali mogućnost zaštite od putnih valova pomoću svitaka, utvrdili smo da maksimalna strmina prolaznog vala osim o amplitudi upadnog vala ovisi još i o veličini induktiviteta priključenog svitka i o valnom otporu Z_2 . Zato je zaštita strojeva i aparata koji imaju veći valni otpor Z_2 vrlo teška jer za zaštitu moramo uzeti svitak velike vrijednosti induktiviteta. Međutim, sretna je okolnost u tome što se jednak oblik prolaznog vala dade postići ako se umjesto serijski priključenog svitka paralelno doda kondenzator, ali uz uvjet da vremenske konstante takvih sklopova budu po vrijednosti jednake ($T_C = T_L$). Na tu smo mogućnost već upozorili uspoređujući izraz za napon prolaznog vala U_2 kad je serijski priključen induktivni svitak s izrazom prolaznog napona U_2 uz paralelno priključen kondenzator. To je jedan od razloga što se radije odlučujemo za zaštitu strojeva i aparata pomoću kondenzatora. Pokazat ćemo na primjeru ovo o čemu je bila riječ.

Primjer 8.7.

Na generator (motor) valnog otpora $Z_2 = 600 \, \Omega$ nailazi preko voda valnog otpora $Z_1 = 400 \, \Omega$ val okomita čela, beskonačne duljine i amplitude $U_0 = 150 \text{ kV}$. U ovom zadatku treba odrediti koliki induktivitet mora imati serijski priključni svitak da ne bi napon između prvih zavoja generatora premašio 800 V . Pretpostavimo da je duljina jednog zavoja $2,5 \text{ m}$, a da se val u generatoru kreće brzinom od $6 \cdot 10^7 \text{ m/s}$. Zatim još valja ustanoviti koliku bi vrijednost kapaciteta morao imati paralelno priključeni kondenzator umjesto svitka da bi se postiglo jednako djelovanje zaštite, odnosno jednake dopuštene strmine.

Rješenje:

Dopuštena strmina bit će:

$$s_{(\text{doz})} = \frac{800}{2,5} = 0,320 \text{ kV/m}.$$

Prema izrazu (8.18) za najveću strminu potrebna veličina induktiviteta priključenog svitka mora biti:

$$\left(\frac{dU_2}{dt} \right)_{\max} = s_{(\max)} = \frac{2U_0 Z_2}{L \cdot v}$$

$$L = \frac{2U_0 Z_2}{v \cdot s_{(\max)}} = \frac{2 \cdot 150 \cdot 600}{6 \cdot 10^7 \cdot 0,320} = 9,37 \cdot 10^{-3} \text{ H}.$$

Budući da pri priključivanju kondenzatora umjesto induktivnog svitka vremenska konstanta tog kruga ne smije izmijeniti vrijednost ($T_L = T_C$), izjednačavajući ta dva izraza za vremenske konstante dobivamo vrijednost kapaciteta:

$$T_L = T_C = \frac{L}{Z_1 + Z_2} = \frac{Z_1 Z_2 C}{Z_1 + Z_2}$$

$$C = \frac{L}{Z_1 \cdot Z_2} = \frac{9,37 \cdot 10^{-3}}{400 \cdot 600} = 0,039 \mu\text{F}.$$

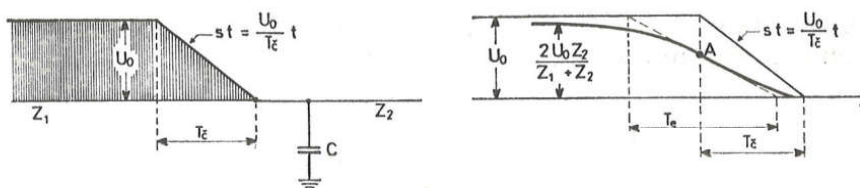
Maksimalna se strmina uz priključeni kondenzator dobiva iz izraza (8.26) pa će biti:

$$s_{(\max)} = \frac{2U_0}{Z_1 C v} = \frac{2 \cdot 150}{400 \cdot 0,039 \cdot 10^{-6} \cdot 6 \cdot 10^7} = 0,3205 \text{ kV/m}.$$

Iz rezultata očito je da je maksimalna strmina i kod priključenog kondenzatora jednaka dopuštenoj strmini $s_{(\text{dop})}$.

8.6. Prolazak beskonačno dugačkog vala s položenim čelom pokraj kondenzatora

Dosad smo opisivali što se događa s beskonačno dugačkim valom okomita čela kad on prolazi kroz induktivitet ili pokraj kapaciteta. U daljnjem će se tekstu razmotriti i valovi drugih oblika. Jedan oblik drugih valova kojemu je čelo vrlo slično čelu vala što se pojavljuje na vodovima pri udaru groma je val beskonačne duljine i položena čela prikazan na slici 8.10. Ovdje će se razmotriti val takva oblika kojemu se položeno čelo linearno mijenja i koji tek nakon vremena T_c poprima svoju konstantnu vrijednost U_0 . Pretpostavimo da takav val prolazi pokraj kapaciteta C i da nailazi na valni otpor Z_2 . Kao i dosad, posebno nas zanima kakav će oblik i veličinu poprimiti takav val kad stigne na valni otpor Z_2 , odnosno zanima nas analitički izraz za prolazni napon U_2 i njegova strmina s .



Sl. 8.10. Prolazak beskonačno dugačkog vala strma čela pokraj kapaciteta i njegov oblik na valnom otporu Z_2

Da bismo odredili taj napon i strminu, podijelit ćemo upadni val na dva dijela. Prvi neka bude njegov strmi dio sve do $t = T_{\delta}$, a drugi njegov dio, za $t > T_{\delta}$, neka bude konstantni dio.

Prolazni napon U_2 prvog dijela vala naći ćemo tako što će se u jednadžbu (8.24) uvrstiti za $U_1(p)$ vrijednost $(U_0/T_{\delta}p^2)$. Nakon sređivanja te jednadžbe i transformacije u gornje područje dobiva se da se prolazni napon U_2 prvog dijela vala na otporu Z_2 ravna po izrazu:

$$U_2 = \frac{2U_0Z_2}{(Z_1 + Z_2)T_{\delta}} [t - T_{\delta}(1 - e^{-t/T})]. \quad (8.28)$$

Ta jednadžba vrijedi samo u intervalu $0 < t < T_{\delta}$, dakle dok prolazi položeno čelo vala, a zatim više ne vrijedi jer nastupa drugi dio upadnog napona, koji ima ravni hrbat, amplitude U_0 .

Što je sa strminom prvog dijela upadnog vala U_0/T_{δ} ? Je li se i ona promijenila prolaskom tog dijela vala pokraj kondenzatora? To se može doznati deriviramo li jednadžbu (8.28), pa dobivamo da je strmina prolaznog napona:

$$s = \frac{dU_2}{dt} = \frac{2U_0Z_2}{(Z_1 + Z_2)T_{\delta}} \cdot (1 - e^{-t/T}). \quad (8.29)$$

Iz posljednjeg izraza očito je da se strmina upadnog napona promijenila i da se ona u svom toku kao i prolazni napon U_2 mijenja eksponencijalno. Prikaz prilika i odnosa između prvog dijela upadnog vala i prvog dijela prolaznog vala U_2 dan je grafički također na slici 8.10. Tu se vidi da je čelo prolaznog vala položnije nego je bilo prije prolaska pokraj kapaciteta. Iz jednadžbe (8.29) izlazi da je za $t = 0$ i $s = 0$, što je shvatljivo kad se zna da je u tom trenutku napon $U_2 = 0$. Zatim se brzina porasta prolaznog napona sve više povećava i u trenutku $t = T_{\delta}$ postiže maksimalu. Drugim riječima možemo reći da u točki A strmina prolaznog vala ima najveću vrijednost, a zatim se ona smanjuje jer nakon trenutka T_{δ} nastupa drugi dio vala kojemu je ravan hrbat i na koji priključeni kondenzator više ne djeluje. Prema tome, prolazni napon za trenutke $t > T_{\delta}$ ovisi samo o omjeru valnih otpora Z_1 i Z_2 i teži za $t = \infty$ svojoj graničnoj vrijednosti $[2U_0Z_2/(Z_1 + Z_2)]$. Analitički izraz za prolazni napon drugog dijela vala mogao bi se za svaki trenutak točno izračunati kad bismo zamislili da se on sastoji od dva strma vala beskonačne duljine i suprotna predznaka, koji su međusobno vremenski udaljeni za vrijeme T_{δ} . No, za naša daljnja razmatranja taj proračun nije od interesa.

Bitno je u ovim tumačenjima uočiti prije spomenutu činjenicu da valu strmog čela pri prolasku pokraj kapaciteta njegovo čelo postaje još položnije i da dulje traje. Ako duljinu čela prolaznog napona U_2 određujemo prema nagibu tangente u točki A, gdje strmina ima maksimalnu vrijednost, kao što je to prikazano na slici 8.10, možemo napisati da je trajanje ekvivalentnog čela:

$$T_e = \frac{T_{\delta}}{1 - e^{-(T_{\delta}/T)}}. \quad (8.30)$$

Pomoću tog izraza izračunavamo da se znatnije povećanje trajanja čela vala može očekivati kad vremenska konstanta električnog kruga $T = [Z_1 Z_2 C / (Z_1 + Z_2)]$ ima jednak red veličine kao i trajanje čela upadnog vala ili viši od toga. Pri odnosima $T = (T_v/3)$ čelo se vala u prolasku pokraj kapaciteta praktički ne mijenja.

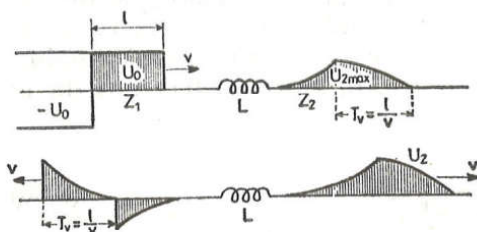
8.7. Kratki valovi

Dosad smo promatrali prolazak putnih valova kroz svitak induktiviteta L ili pokraj kondenzatora kapaciteta C , koji su bili okomitog ili položenog čela, a beskonačno su dugo trajali. Tu smo pretpostavku učinili da bismo mogli utvrditi kako općenito djeluju koncentrirani induktiviteti ili kapaciteti na valove koji na njih nailaze. Osim toga smo pretpostavili da nam djelovanje valova dulje traje, kako bismo uočili promjene njihovih amplituda i kako se mijenjaju njihove strmine, odnosno kako se općenito mijenja njihov oblik. To nam je omogućilo da dođemo do važnih analitičkih izraza za vrijednosti prolaznog napona U_2 i za vrijednosti strmina što ih oni poprimaju na valnom otporu Z_2 ili, općenitije rečeno, na nekom potrošaču. Tako izvedeni izrazi i dalje vrijede, pa će se njima i dalje koristiti.

Međutim, u praksi su tako dugački valovi rijetki. Mnogo češće se pojavljuju kratki valovi, koji se obično stvaraju na električnim vodovima zbog različitih poremećaja u mreži, a i prilikom atmosferskih izbijanja u elektroenergetska postrojenja ili u njihovoj blizini.

Kao i u prethodnim razmatranjima i u ovom ćemo slučaju, kad pretpostavljamo da su kroz induktivitet ili pokraj kapaciteta prošli kratki pravokutni valovi, izračunati napon U_2 koji nastaje na otporu Z_2 , a jednako tako i njihovu strminu s . Da bismo to proveli, zamislimo da je duljina kratkog vala što nailazi na čvornu točku ℓ te da je on sastavljen od dva beskonačno dugačka vala, okomita čela i amplitude U_0 , od kojih je jedan pozitivan, a drugi negativan. Taj negativan val neka je od prvog vala pomaknut za duljinu ℓ , kao što je to na slici 8.11. prikazano. Analitički izrazi za ta dva beskonačno dugačka prolazna vala na otporu Z_2 poznati su jer smo ih u prošlim izlaganjima već izveli. Kad pozitivni beskonačno dugački val prolazi kroz svitak ili potkraj kapaciteta, napon se vala koji je prošao čvornom točkom mijenja po izrazu:

$$+U_2 = + \frac{2U_0 Z_2}{Z_1 + Z_2} (1 - e^{-t/T}). \quad (8.31)$$



Sl. 8.11. Nailazak kratkog vala na induktivitet. Oblik prolaznog i odbijenog vala

Kad pak malo poslije toga, nakon vremena $T_v = (\ell/v)$, naiđe pomaknuti negativni beskonačno dugački val, onda se napon prolaznog vala mijenja po izrazu:

$$-U_2 = -\frac{2U_0Z_2}{Z_1 + Z_2} (1 - e^{-(t-T_v)/T}). \quad (8.32)$$

Ukupni napon kratkoga prolaznog vala U_2 tad će biti zbroj tih dvaju zamišljenih prolaznih valova, zadanih jednadžbama (8.31) i (8.32), pa je:

$$U_2 = +U_2 + (-U_2) = \frac{2U_0Z_2}{Z_1 + Z_2} (e^{-(t-T_v)/T} - e^{-(t/T)}). \quad (8.33)$$

Potrebno se ovdje podsjetiti na to da izraz za napon kratkog vala U_2 vrijedi nakon trenutka $t = T_v$ jer do tog trenutka je djelovao potpuno nesmetano beskonačno dugački pozitivni val. Tek poslije tog trenutka ukupni napon U_2 jednak je zbroju već spomenutih valova, odnosno na ukupni napon U_2 djeluje i negativni beskonačno dugački val. Dakle, za trenutke $t \gg T_v$ ukupni se napon U_2 smanjuje i teži prema nuli (sl. 8.11). Naravno, kratki val je prošao.

Iz jednadžbe (8.33) vidimo još i to da će nam u trenutku $t = T_v$ napon vala U_2 koji je prošao čvornu točku poprimiti maksimalnu vrijednost:

$$(U_2)_{\max} = \frac{2U_0Z_2}{Z_1 + Z_2} (1 - e^{-(T_v/T)}). \quad (8.34)$$

U posebnim okolnostima, kad je $Z_2 = \infty$, bit će najveći napon:

$$(U_2)_{\max} = 2U_0 (1 - e^{-(T_v/T)}).$$

Nas obično zanima maksimalna vrijednost napona $(U_2)_{\max}$ jer ona najviše opterećuje izolaciju potrošača, zato će se izraz za najveću vrijednost ovdje malo raspraviti. U tom smislu najprije moramo reći da će ta vrijednost napona U_2 biti manja što je omjer (T_v/T) u izrazu (8.34) manji. To, drugim riječima, znači da će nam maksimalna vrijednost napona U_2 biti manja što je vrijeme trajanja kratkog vala kraće, dakle što je T_v manje.

Ako je to serijski priključen induktivitet ili paralelno priključen kapacitet, tad se to veće smanjenje napona U_2 kod prolaska kratkih valova može tumačiti na razne načine. Poznato nam je, naime, da su beskonačno dugački i ravni valovi napona podvrgnuti promjeni samo na svom čelu kad prolaze kroz induktivitete ili pored kapaciteta. Drugim riječima, i induktivitet i kapacitet ne djeluju više na ravan hrbat vala jer na hrptu nema promjena napona. Kod kratkih valova je obrnuto. Njih treba shvatiti kao nagle promjene napona ne samo na čelu nego i na hrptu vala. A kad se pojavljuju nagle promjene napona, onda serijski spojeni induktivitet pruža valu veliki otpor i tu dolazi do pada napona,

koji sigurno utječe na smanjenje napona U_2 na valnom otporu Z_2 . Kad kratki val prolazi pokraj paralelno priključenog kapaciteta, onda kapacitet, obrnuto, za te nagle promjene napona znači mali otpor. U prvim trenucima možemo govoriti i o kratkom spoju. I to, naravno, onda djeluje na smanjenje maksimalne vrijednosti napona $(U_2)_{\max}$ na otporu Z_2 .

Energetski gledano, to djelovanje induktiviteta ili kapaciteta na kratki val može se tumačiti kao kratkotrajno i naglo pretvaranje električne u magnetsku energiju, a kad val potpuno prođe, onda opet pretvorbu magnetske u električnu energiju.

Našu pažnju dalje privlači zahtjev da ti valovi maksimalnom veličinom napona ne oštete nekog potrošača. Ta dopuštena vrijednost najvećeg napona $(U_2)_{\max}$ može biti veća ili manja. Pa već prema tome za koliku smo se dopuštenu vrijednost maksimalnog napona odlučili, takav ćemo sklop odabrati, odnosno takvu ćemo uzeti konstantu kruga T . Ona će se izračunati iz izraza (8.34) nakon što se unaprijed odluči koliku najveću vrijednost naponom $(U_2)_{\max}$ dopuštamo i poslije kako smo pretpostavili duljinu trajanja T_v upadnog vala. Konačno će konstanta takva kruga biti:

$$T = - \frac{T_v}{\ln \left[1 - \frac{Z_1 + Z_2}{2Z_2} \cdot \frac{(U_2)_{\max}}{U_0} \right]}. \quad (8.35)$$

Konstanta kruga T sadrži parametre kruga, pa tako za krug sa serijski priključenim induktivitetom ona iznosi $T = [L/(Z_1 + Z_2)]$, a s paralelno priključenim kapacitetom bit će $T = [Z_1 Z_2 C / (Z_1 + Z_2)]$.

Kad tu konstantu kruga izračunamo iz izraza (8.35), onda smo u stanju za neki određeni sklop valnih otpora Z_1 i Z_2 naći potrebnu vrijednost induktiviteta ili kapaciteta koje ćemo priključiti ispred valnog otpora Z_2 , odnosno ispred nekog potrošača koji štitimo.

Izraz (8.35) pojednostavnit ćemo ako je veličina

$$[Z_1 + Z_2] \cdot (U_2)_{\max} / 2Z_2 U_0]$$

malena u odnosu prema jedinici. Tako se može nazivnik tog izraza približno izračunati koristeći se formulom $\ln(1 - x) \approx -x$. Takva se mogućnost praktički pojavljuje u nekom sklopu kad želimo da je $(U_2)_{\max}$ mnogo mnogo manji od U_0 .

Pojednostavnjeni izraz (8.35) tad poprima oblik:

$$T = \frac{2U_0 Z_2 T_v}{(Z_1 + Z_2) (U_2)_{\max}}, \quad (8.36)$$

a odatle se traženi induktiviteti ili kapaciteti računaju iz izraza:

$$L = \frac{2U_0 Z_2 T_v}{(U_2)_{\max}} \quad \text{i} \quad C = \frac{2U_0 T_v}{Z_1 \cdot (U_2)_{\max}}. \quad (8.37)$$

Da bismo dobili mali maksimalni napon $(U_2)_{\max}$ na velikom valnom otporu Z_2 , moramo uključiti veliki induktivitet, a jednako tako i kapacitet mora biti velik za mali napon $(U_2)_{\max}$. Dva primjera će još bolje utvrditi naša dosadašnja razmišljanja.

Primjer 8.8.

Koliku bi vrijednost morala imati vremenska konstanta T jednog sklopa u seriji spojenih valnih otpora $Z_1 = 425 \Omega$ i $Z_2 = 200 \Omega$ koji u čvornoj točki imaju paralelno priključeni kondenzator? Pretpostavimo da valnim otporom Z_1 nailazi kratki pravokutni val amplitude $U_0 = 625 \text{ kV}$, duljine 6000 m . Maksimalna vrijednost napona $(U_2)_{\max}$ na otporu Z_2 ne smije prekoračiti 25 kV . U ovom zadatku treba osim konstante kruga izračunati i veličinu kapaciteta priključenog kondenzatora. Poslužit ćemo se i izrazima za približno računanje.

Rješenje:

Vrijeme je trajanja vala:

$$T_v = \frac{\ell}{v} = \frac{6000}{300} = 20 \mu\text{s}.$$

Konstanta kruga bit će:

$$T = - \frac{T_v}{\ln \left[1 - \frac{Z_1 + Z_2}{2Z_2} \cdot \frac{(U_2)_{\max}}{U_0} \right]} = - \frac{20}{\ln \left[1 - \frac{425 + 200}{2 \cdot 200} \cdot \frac{25}{625} \right]} = 310 \mu\text{s}.$$

Kapacitet je kondenzatora:

$$T = \frac{Z_1 Z_2 C}{Z_1 + Z_2} \Rightarrow C = \frac{T(Z_1 + Z_2)}{Z_1 \cdot Z_2} = \frac{310 \cdot (425 + 200)}{(425 \cdot 200)} = 2,27 \mu\text{F}.$$

Po formulama za približno računanje izlazi:

konstanta je kruga:

$$T = \frac{2U_0 Z_2 T_v}{(Z_1 + Z_2) \cdot (U_2)_{\max}} = \frac{2 \cdot 625 \cdot 200 \cdot 20}{(425 + 200) \cdot 25} = 320 \mu\text{s};$$

kapacitet kondenzatora bit će:

$$C = \frac{2U_0 T_v}{Z_1 \cdot (U_2)_{\max}} = \frac{2 \cdot 625 \cdot 20}{425 \cdot 25} = 2,35 \mu\text{F}.$$

Primjer 8.9.

Kolike najveće vrijednosti prolaznog napona $(U_2)_{\max}$ imaju kratki i pravokutni valovi amplitude $U_0 = 625$ kV koji dolaze preko voda valnog otpora $Z_1 = 425 \Omega$ na vod valnog otpora $Z_2 = 200 \Omega$, ako su im duljine trajanja $T_v = 10 \mu s$, $20 \mu s$ i $40 \mu s$? Neka u čvornoj točki bude paralelno priključeni kondenzator kapaciteta $C = 0,15 \mu F$. Koliku bi vrijednost induktiviteta morao imati svitak koji bi se umjesto kondenzatora serijski priključio između ta dva valna otpora kako bi se postigle jednake maksimalne vrijednosti napona prolaznih valova? Kolika bi bila maksimalna vrijednost napona na kraju otvorenog voda ($Z_2 = \infty$) pri nailasku valova trajanja $T_v = 40 \mu s$ i $T_v = 400 \mu s$?

Rješenje:

Vremenska je konstanta kruga:

$$T = \frac{Z_1 Z_2 C}{Z_1 + Z_2} = \frac{425 \cdot 200 \cdot 0,15 \cdot 10^{-6}}{425 + 200} = 20,4 \mu s.$$

Za val koji traje $T_v = 10 \mu s$ maksimalna će vrijednost napona na valnom otporu Z_2 biti:

$$(U_2)_{\max} = \frac{2U_0 Z_2}{Z_1 + Z_2} (1 - e^{-(T_v/T)}) = \frac{2 \cdot 625 \cdot 200}{425 + 200} (1 - e^{-(10/20,4)}) = 155 \text{ kV}.$$

Za valove kojima je vrijeme trajanja $T_v = 20 \mu s$ i $T_v = 40 \mu s$ najveće vrijednosti napona na otporu Z_2 izračunate su po istim izrazima i iznose: $(U_2)_{\max} = 250$ kV i $(U_2)_{\max} = 343,7$ kV.

Posebno za $Z_2 = \infty$ (otvoreni vod valnog otpora Z_1) vremenska konstanta iznosi:

$$T = \frac{Z_1 Z_2 C}{Z_1 + Z_2} = Z_1 C \cdot 10^{-6} = 425 \cdot 0,15 \cdot 10^{-6} = 63,75 \mu s,$$

a maksimalna vrijednost napona na kraju otvorenog voda za $T_v = 40 \mu s$ bit će:

$$(U_2)_{\max} = 2U_0(1 - e^{-(T_v/T)}) = 2 \cdot 625 \cdot (1 - e^{-(40/63,7)}) = 583 \text{ kV},$$

a maksimalna bi vrijednost napona na kraju voda za $T_v = 400 \mu s$ bila $(U_2)_{\max} = 1247$ kV (što je T_v veće, maksimalni napon teži $2U_0$). Induktivitet svitka koji bi zamijenio kondenzator iznosio bi:

$$\frac{Z_1 Z_2 C}{Z_1 + Z_2} = \frac{L}{Z_1 + Z_2}$$

$$L = Z_1 Z_2 C = 425 \cdot 200 \cdot 0,15 \cdot 10^{-6} = 12,7 \cdot 10^3 \mu H.$$

8.8. Valovi eksponencijalnog oblika

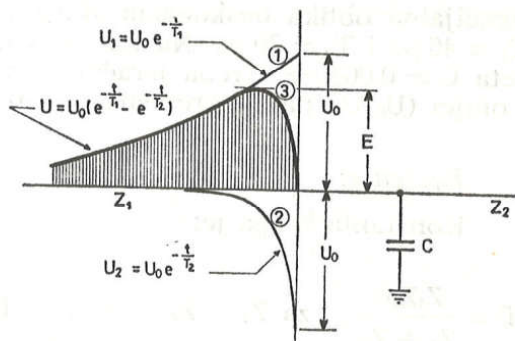
Da bismo predvidjeli učinak putnih valova koji nastaju pri udaru groma u elektroenergetska postrojenja, koristimo se naponskim valovima eksponencijalnog oblika. Pomoću njih se približno najvjernije oponašaju prilike koje tad nastaju na vodovima, u aparatima ili bilo gdje drugdje. Oni se daju izraziti relativno dosta jednostavnim analitičkim izrazima, pa će se onda i izračunati unaprijed sve one veličine i promjene koje se mogu očekivati prilikom njihova kretanja, poslije udara groma. Za putne valove eksponencijalnog oblika možemo reći da se njima najbolje daje prilagoditi funkcija prikazana krivuljom 3 na slici 8.12, koje je analitički izraz:

$$U = U_0 (e^{-(t/T_1)} - e^{-(t/T_2)}). \quad (8.38)$$

Nije teško opaziti da se taj val može zamisliti kao razlika drugih dvaju valova ravna čela i eksponencijalna hrpta, a koji se svaki posebno analitički prikazuju kao funkcije $U_1 = (U_0 e^{-t/T_1})$ i $U_2 = (U_0 e^{-t/T_2})$, što je na slici 8.12. predloženo krivuljama 1 i 2. Ta dva vala nisu vremenski pomaknuta jedan od drugoga, što je bilo prije zamišljeno pri opisu kratkoga pravokutnog vala, ali su oni različiti po obliku i po površinama koje njihove krivulje određuju. Zato je moguće da se praveći njihovu razliku dobije željeni oblik eksponencijalnog vala prikazan izrazom (8.38). Prema tome, mijenja li se oblik krivulje 1 i 2, odnosno mijenjajući vremenske konstante T_1 i T_2 tih funkcija, mijenjat će se i oblik željenog vala. Ako želimo imati val sasvim strmog čela i blago položenog hrpta, onda će vremenska konstanta T_2 biti malena, a T_1 će biti velika. Obrnuto, želimo li val blago strmog čela i jače položenog hrpta, vremenska će konstanta T_2 biti velika, a T_1 će biti malen. Ukratko rečeno, o njihovu odnosu ovisi željeni oblik eksponencijalnog vala U , što se vidi i iz slike 8.12. Osim toga, za sasvim maleno T_2 tjemena vrijednost eksponencijalnog vala E približno je jednaka U_0 .

Kad takav val eksponencijalnog oblika naiđe u čvornoj točki na paralelno priključeni kondenzator, on će zbog toga promijeniti oblik, kao što se to prije događalo s ravnim dugim i ravnim kratkim valovima koji su imali okomito čelo. Dakle, prolazni val U_2 koji stigne do Z_2 drukčije će izgledati. A zato što se val U koji nailazi izračunao pomoću valova U_1 i U_2 , i vrijednosti će se prolaznog napona U_2 na otporu Z_2 izračunati tako što će se prije toga posebno ustanoviti vrijednosti prolaznih napona na otporu Z_2 od valova U_1 i U_2 od kojih zamišljamo da se upadni val U sastoji. Zatim će se na kraju izračunati njihova razlika.

Za pronalaženje vrijednosti prolaznog napona U_{12} na otporu Z_2 od prvog vala U_1 može se upotrijebiti izraz:



Sl. 8.12. Putni val eksponencijalnog oblika

$$U_{12} = \frac{2U_0}{Z_1 + Z_2} \cdot \frac{T_1}{T_1 - T} (e^{-(t/T_1)} - e^{-(t/T)}),$$

a za računanje vrijednosti prolaznog napona U_2 na otporu Z_2 od drugog vala U_2 poslužit će izraz:

$$U_2 = \frac{2U_0}{Z_1 + Z_2} \cdot \frac{T_2}{T_2 - T} (e^{-(t/T_2)} - e^{-(t/T)}).$$

Pri tome su T_1 i T_2 vremenske konstante zamišljenih valova U_1 i U_2 , a T je konstanta kruga.

Pripomenimo da nismo naveli matematički izvod za napisane izraze jer bi, možda, oni bili malo preopširni, no dobro se ipak podsjetiti na to da je postupak za dobivanje tih izraza sličan onome što smo ga već proveli pri upotrebi pravokutnih valova. Samo ovdje, upotrebljavajući isti matematički model, moramo voditi računa o tome da ulazni napon nije konstantan U_0 , nego su ulazni naponi funkcije vremena $U_1 = U_0 e^{-(t/T_1)}$ i $U_2 = U_0 e^{-(t/T_2)}$.

Znajući sad jednadžbe prolaznih napona U_{12} i U_2 na otporu Z_2 svakoga zamišljenog vala posebno, možemo izračunati vrijednost prolaznog napona U_2 vala koji je njihova razlika ($U_{12} - U_2$). Izlazi da je:

$$U_2 = \frac{2U_0 Z_2}{Z_1 + Z_2} \left[\frac{T_1}{T_1 - T} (e^{-(t/T_1)} - e^{-(t/T)}) - \frac{T_2}{T_2 - T} (e^{-(t/T_2)} - e^{-(t/T)}) \right]. \quad (8.39)$$

Iz jednadžbe se vidi da su oblik i vrijednost prolaznog napona U_2 ovisni o veličinama T_1 i T_2 , kao što je o tim veličinama ovisio i oblik vala U koji je nailazio. Osim toga, na oblik vala U_2 utječe i veličina konstante kruga T , odnosno veličina kapaciteta kondenzatora i veličine valnih otpora Z_1 i Z_2 .

Primjer 8.10.

Nadzemnim vodom valnog otpora $Z = 500 \, \Omega$ nailazi putni val eksponencijalna oblika beskonačne duljine kojemu su vremenske konstante $T_1 = 40 \, \mu s$ i $T_2 = 20 \, \mu s$. Na tom je vodu priključen kondenzator kapaciteta $C = 0,004 \, \mu F$. Treba izračunati vremensku konstantu tog kruga T i omjer (U_0/U_2) nakon vremena $t = 50 \, \mu s$.

Rješenje:

Konstanta kruga je:

$$T = \frac{Z_1 Z_2 C}{Z_1 + Z_2}; \quad \text{za } Z_1 = Z_2 = 500 \, \Omega, \quad T = \frac{Z \cdot C}{2} = \frac{500 \cdot 0,004 \cdot 10^{-6}}{2} = 1 \, \mu s.$$

Omjer (U_0/U_2) nakon $t = 50 \mu\text{s}$ iznosi:

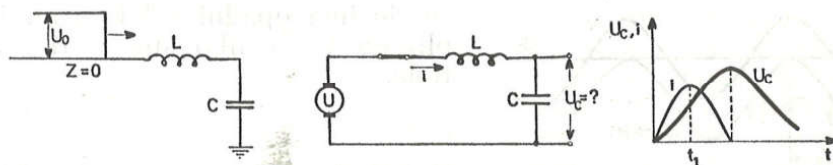
$$\frac{U_2}{U_0} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \left[\frac{T_1}{T_1 - T} (e^{-(t/T_1)} - e^{-(t/T)}) - \frac{T_2}{T_2 - T} (e^{-(t/T_2)} - e^{-(t/T)}) \right]$$

$$\frac{U_2}{U_0} = \frac{2 \cdot 500}{500 + 500} \left[\frac{40}{40 - 1} (e^{-(50/40)} - e^{-(50/1)}) - \frac{20}{20 - 1} (e^{-(50/20)} - e^{-(50/1)}) \right] = 0,2074$$

$$\frac{U_0}{U_2} = 4,82.$$

8.9. Titrajni krug

Osvrnimo se na situaciju kad na titrajni krug nailazi val okomitim čelom i ravnim hrptom kao što je to prikazano na slici 8.13. Čim čelo vala dođe u dodir s prvim zavojima svitka, struja postaje jednaka nuli jer u tim prvim trenucima svitak pruža vrlo veliki otpor. Ali zato što je struja prestala teći, napon na tom mjestu, u prvim trenucima, poprima dvostruku vrijednost. Nešto malo nakon toga struja ipak počinje malo-pomalo prolaziti kroz induktivni svitak i tako puniti kondenzator. Ona nakon vremena t_1 poprima tjemenu vrijednost kao na slici 8.13. Za to se vrijeme punio kondenzator i na njemu raste napon sve više i više. Kad se kondenzator napuni, struja prestaje ponovno prolaziti. U tom trenutku iz svitaka se oslobađa dotad nakupljena magnetska energija koja prelazi u električnu i još više povećava napon na kondenzatoru U_c do njegove najviše razine. Taj porast napona na kondenzatoru i akumulacija električne energije uzrokuju da se on počinje prazniti i na njemu opada napon i električna energija, ali zato svitkom teče struja koja ponovno stvara u svitku magnetsku energiju. I tako se stalno u tom krugu odvija pretvorba magnetske energije u električnu i obrnuto. U tom se krugu zato pojavljuju titraji napona izazvani energijom koja se čas prikuplja u svitku, a čas u kondenzatoru. Budući da smo pretpostavili kako je ovaj zatvoreni električni krug bez omskog otpora, te će oscilacije biti nepriгуšene. Da bismo odredili napon na kondenzatoru U_c , poslužimo se shemom na slici 8.13. Za ravnotežu narinutom naponu u svakom trenutku vrijedi jednadžba:



Sl. 8.13. Nailazak vala na titrajni krug

$$U = L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = L \frac{di}{dt} + U_c, \quad (8.40)$$

u kojoj je $U_c = \frac{1}{C} \int i dt$, a odatle je: $i = C \frac{dU_c}{dt}$, $\frac{di}{dt} = C \frac{d^2U_c}{dt^2}$.

Tako izraz (8.40) poprima oblik:

$$\frac{U}{LC} = \frac{d^2U_c}{dt^2} + \frac{U_c}{LC}$$

ili, napisan u Laplaceovu području uz uvjete da je za $t = 0$, napon $U_c = 0$ i $\frac{dU_c}{dt} = 0$, bit će:

$$\frac{U(p)}{LC} = p^2 U_c(p) + \frac{U_c(p)}{LC}.$$

Riješivši tu jednadžbu po $U_c(p)$ i imajući u vidu da je $\frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega$, dobivamo:

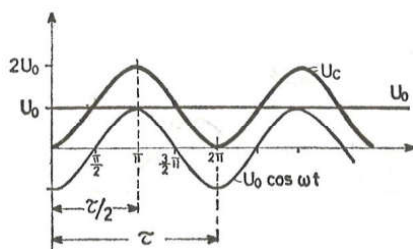
$$U_c(p) = U(p) \frac{1}{LC \left(p^2 + \frac{1}{LC} \right)} = \frac{U(p)}{1 + p^2 LC} = \frac{U(p) \omega^2}{\omega^2 + p^2}. \quad (8.41)$$

Budući je riječ o pravokutnom valu amplitude U_0 , kao što smo u početku izlaganja pretpostavili, bit će $U(p) = (U_0/p)$, pa nam promjena napona po vremenu na kondenzatoru iznosi:

$$U_c = U_0 (1 - \cos \omega t) = U_0 - U_0 \cos \omega t. \quad (8.42)$$

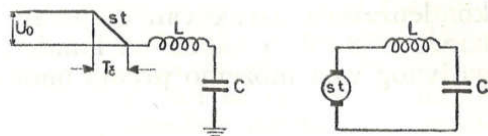
Po jednadžbi (8.42) vidimo da nam se napon na kondenzatoru sastoji od dviju komponenata, od kojih je jedna stalni napon U_0 , a druga se mijenja po zakonu kosinusa.

Međutim, dijagram nam na slici 8.14. pokazuje, a računom se može to dokazati, da poslije vremena koje je jednako poluperiodi vlastitih oscilacija $t = (\tau/2)$ napon na kapacitetu postiže dvostruku vrijednost od one što je ima upadni val kojemu je amplituda U_0 . Toliko što se tiče amplitude.



Sl. 8.14. Promjena napona na kondenzatoru ovisno o vremenu

Sl. 8.15. Nailazak vala strma čela na titrajni krug. Ekvivalentna shema



Maksimalna strmina napona na kondenzatoru nastala poslije vremenskog intervala $t = (\tau/4)$ iznosi:

$$s_{\max} = \left(\frac{dU_c}{dt} \right)_{\max} = U_0 \omega = U_0 \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Iz izraza je očito, da će nam napon na kondenzatoru U_c biti strmiji što su kapacitet i induktivitet titrajnog kruga manji i što je amplituda vala koji nailazi veća.

No, u realnim mrežama valovi su okomita čela rijetki, a češći su oni strma čela duljine T_ϵ , strmine s i amplitude U_0 , kako je to na slici 8.15. prikazano.

Za račun napona U_c na kondenzatoru koristit ćemo se dosad izvedenim jednadžbama kruga s induktivitetom i kapacitetom, samo što ćemo u tim općim izrazima zamijeniti napon vala s okomitim čelom amplitude U_0 naponom vala koji ima položeno čelo strmine $s = (U_0/T_\epsilon)$ i amplitudu U_0 . Dalje ćemo u izraz (8. 41), koji pokazuje napon na kondenzatoru općenito, uvrstiti $U(p) = (U_0/T_\epsilon p^2)$, pa izlazi da je:

$$U_c(p) = \frac{U(p)}{LCp^2 + 1} = \frac{U_0}{T_\epsilon} \cdot \frac{1}{p^2} \cdot \frac{1}{LC(p^2 + \omega^2)} = \frac{U_0}{T_\epsilon} \cdot \frac{1}{p^2} \cdot \frac{\omega^2}{(p^2 + \omega^2)}.$$

Kad nakon računanja vratimo taj izraz u gornje područje, dobit ćemo da se napon na kondenzatoru za vrijednosti $t < T_\epsilon$ ravna prema jednadžbi:

$$U_c = s \left(t - \frac{\sin \omega t}{\omega} \right). \quad (8.43)$$

Iz dobivenog rezultata vidi se da je napon na kondenzatoru i u ovom primjeru sastavljen od dvije komponente. Jedna se od njih mijenja linearno ovisno o vremenu t , a druga po zakonu sinusa. Analizirajući izraz možemo zaključiti da će napon na kondenzatoru biti viši što su strmina vala i titrajno vrijeme τ veći jer je $\omega = 2\pi/\tau$. Ponovimo još jedanput da jednadžba (8.43) vrijedi samo u vremenskom intervalu $0 < t < T_\epsilon$.

Poslije toga vremenskog intervala, odnosno za sve vrijednosti $t > T_\epsilon$, napon se na kondenzatoru ravna po drugom zakonu, koji ćemo sad izložiti. Za određivanje toga zakona koristit ćemo se principom superpozicije. Tako ćemo zamisliti da se napon što nailazi sastoji od dva strma vala, od kojih je jedan pozitivan, a drugi negativan, ali su vremenski pomaknuti jedan od drugoga za vrijeme T_ϵ . Naravno da će i napon na kondenzatoru U_c tad biti rezultanta djelovanja tih dvaju valova. Napon na

kondenzatoru uzrokovan djelovanjem prvoga pozitivnog vala zadan je izrazom (8.43), a napon na kondenzatoru izazvan učinkom drugoga, negativnog vala možemo prema onome što smo rekli napisati da glasi:

$$U_c = -s \left[(t - T_\delta) - \frac{\sin \omega (t - T_\delta)}{\omega} \right] \quad (8.44)$$

Kad ta dva napona zbrojimo, dakle zbrojimo li izraze (8.43) i (8.44), dobit će se da napon na kondenzatoru za sve vrijednosti $t > T_\delta$ iznosi:

$$U_c = U_0 \left[1 - \frac{\sin \frac{\omega T_\delta}{2}}{\frac{\omega T_\delta}{2}} \cos \left(\omega t - \frac{\omega T_\delta}{2} \right) \right] \quad (8.45)$$

ili, uzimajući u obzir da je $\tau = 2\pi/\omega$, odnosno $\omega = 2\pi/\tau$, izraz poprima oblik:

$$U_c = U_0 \left[1 - \frac{\sin \frac{\pi T_\delta}{\tau}}{\frac{\pi T_\delta}{\tau}} \cos \left(2\pi \frac{t}{\tau} - \pi \frac{T_\delta}{\tau} \right) \right]. \quad (8.46)$$

Najviši napon na kondenzatoru nastat će kad bude:

$$\cos \left(2\pi \frac{t}{\tau} - \pi \frac{T_\delta}{\tau} \right) = -1$$

ili u trenutku:

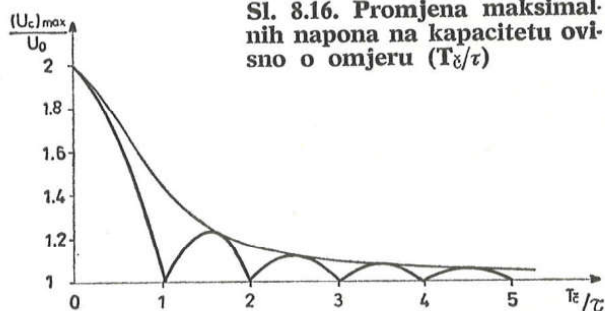
$$t = \frac{\tau + T_\delta}{2}. \quad (8.47)$$

To, drugim riječima znači da će najviši napon na kondenzatoru $(U_c)_{\max}$ biti poslije vremena koje je jednako poluzbroju perioda vlastitih titraja τ i duljine trajanja čela vala T_δ . Ako želimo konačno doznati koliki je taj najviši napon na kondenzatoru, potrebno je u jednadžbu (8.46) uvrstiti upravo izračunati uvjet iz izraza (8.47). Nakon uvrštavanja nalazimo da nam najviši napon na kondenzatoru iznosi:

$$(U_c)_{\max} = U_0 \left(1 + \left[\frac{\sin \frac{\pi T_\delta}{\tau}}{\frac{\pi T_\delta}{\tau}} \right] \right) \quad (8.48)$$

Raščlanjivši taj rezultat zapažamo, dalje, da on ovisi o duljini trajanja čela vala T_δ i perioda vlastitih titraja τ ili, kako se vidi iz same jednadžbe, od odnosa (T_δ/τ) . Dakle, on nije neka konstantna veličina, nego ovisi o tom odnosu. Pretpostavimo npr. da je $T_\delta \ll \tau$. Tad se vrijednost najvišeg napona na kondenzatoru približava dovostrukoj vrijednosti amplitude naponskog vala koji je nailazio i iznosi $2U_0$. Na osnovi toga možemo reći da što je veći period vlastitih titraja $\tau = (2\pi \sqrt{LC})$ s obzirom na duljinu čela vala T_δ to će nam napon na kondenzatoru poprimiti veću vrijednost, jer se tad u titrajnom krugu lakše odvijaju slobodni titraji. Ako bi se dogodilo obrnuto, da je čelo jako položeno, odnosno da je trajanje čela vala $T_\delta \gg \tau$, slobodnih titraja napona ne bi bilo, pa iz izraza (8.48) možemo zaključiti da bi najviši napon na kondenzatoru tokom vremena poprimio čvrstu vrijednost U_0 koju ima val što nailazi. Dakle, ukratko ćemo reći da u različitim okolnostima, odnosno za različite odnose (T_δ/τ) , najviši napon na kondenzatoru može poprimiti sve vrijednosti od U_0 do $2U_0$. Ako različite vrijednosti najvišeg napona na kondenzatoru $(U_c)_{\max}$ s obzirom na tjemenu vrijednost upadnog napona U_0 prikažemo ovisno o omjeru (T_δ/τ) , dobit će se krivulja prikazana na slici 8.16.

Titraji koji se pojavljuju u nekome titrajnom krugu često će dovesti do toga da bude premašen napon koji izolacija može izdržati pa ih zato treba smanjiti. Iz dijagrama se vidi da je poželjno imati što veći omjer odnosa (T_δ/τ) jer su tamo vrijednosti najviših napona na kondenzatoru manje. Zato, ako imamo unaprijed zadanu duljinu trajanja čela vala T_δ , onda se može postići niski napon na kondenzatoru samo smanjimo li kapacitet ili induktivitet toga titrajnog kruga. Ako to nije moguće treba nastojati da se ipak poveća duljina trajanja čela T_δ ili da se smanji strmina vala koji nailazi.



Sl. 8.16. Promjena maksimalnih napona na kapacitetu ovisno o omjeru (T_δ/τ)

Primjer 8.11.

Na titrajni krug sastavljen od induktiviteta $L = 13,3 \cdot 10^{-6} \text{ H}$ i kapaciteta $C = 3,0 \cdot 10^{-9} \text{ F}$ nailazi strmi val amplitude $U_0 = 300 \text{ kV}$. Treba izračunati maksimalni napon na kapacitetu $(U_c)_{\max}$ kad je strmina vala $s = 600 \text{ kV}/\mu\text{s}$.

Rješenje:

Trajanje čela vala je:

$$T_{\delta} = \frac{U_0}{s} = \frac{300}{600} = 0,5 \mu s.$$

Period vlastitih titraja iznosi:

$$\tau = 2\pi\sqrt{LC} = 2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{13 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^{-9}} = 1,241 \mu s.$$

Najviši napon na kondenzatoru bit će:

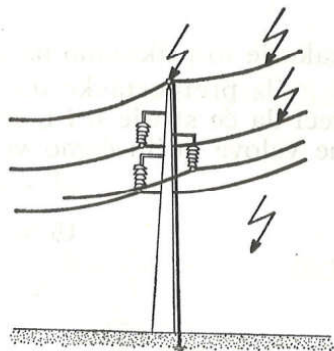
$$(U_c)_{\max} = U_0 \left(1 + \left[\frac{\sin \frac{\pi T_{\delta}}{\tau}}{\frac{\pi T_{\delta}}{\tau}} \right] \right) = 300 \cdot \left(1 + \frac{\sin \frac{3,14 \cdot 0,5}{1 \cdot 24}}{\frac{3,14 \cdot 0,5}{1 \cdot 24}} \right) = 526 \text{ kV}.$$

9. Zaštita nadzemnih vodova

U prvo vrijeme kad su se nadzemni vodovi počeli raditi, projektanti ih nisu ni pokušali zaštititi od direktnih udara groma. Oni su smatrali malo vjerojatnim da grom uopće izravno udari u vod. Budući da je tad poznavanje te pojave bilo ograničeno, držali su da se nemoguće djelotvorno zaštititi od izravnog udara groma ako do toga i dođe. U tim počecima razvoja izolacija se nadzemnih vodova dimenzionirala samo na tzv. inducirane prenapone (tj. na prenapone koji se pojavljuju na vodu približavanjem elektriziranih oblaka i pri udaru groma negdje u blizini voda). Međutim, praksa je pokazala da su inducirani prenaponi za većinu dalekovoda neopasni i da zbog njih ne nastaju posebno veća oštećenja. Pri udaru groma u blizini dalekovoda prenaponi inducirani u vodičima, u pravilu ne prelaze 300—400 kV, pa su dakle neopasni za izolaciju vodova 110 kV i viših napona.

S vremenom se na osnovi stečenog iskustva ipak prihvatilo realno stajalište, da su direktni udari groma u vod mogući. Vodovi su se tad počeli graditi vodeći računa o toj opasnoj mogućnosti, pa se tako razvila i tehnika zaštite vodova od izravnog udara groma.

Jedan od načina takve zaštite je postavljanje neke vrste »zaklona«, koji treba da spriječi izravni udar groma u vod. Taj zaklon, sam za sebe, mora imati dobru mogućnost odvoda struje groma, a i dobru izolaciju prema faznim vodičima, tako da kad grom udari, fazni vodiči budu potpuno zaštićeni. Kad se na vodovima, iznad faznih vodiča, postavilo uže, na svakom stupu uzemljeno, kako je to prikazano na slici 9.1, onda je ono pružilo željeni zaklon. Prirodno da je postavljanje zaštitnih užadi zahtijevalo posebnu konstrukciju vodova, s obzirom na visinu stupova i raspon između njih. Prije nego prijedemo na konstrukcijsku problematiku povezanu s upotrebom zaštitnih užadi, razmotrimo i utvrdimo gdje sve može udariti grom kad imamo neki dalekovod i, općenito, što sve smatramo udarom groma koji može izazvati na njemu veća ili manja oštećenja.



Sl. 9.1. Mjesta gdje sve može udariti grom i izazvati oštećenja na nadzemnim vodovima

Na slici 9.1. nalazimo te mogućnosti udara groma. Uočavamo da grom može pogoditi fazne vodiče, stup ili zaštitno uže te neposrednu blizinu nadzemnog voda.

Poznavanje broja udara groma u zemlju ne omogućuje da se jednostavno sazna i broj udara u neki dalekovod. Taj se broj ne da izračunati ako bi se i odredila površina zemljišta po kojoj se nadzemni vod prostire. Dalekovod je objekt koji je izdignut iznad površine tla, a i njegova konstrukcija je specifična, tako da broj udara u dalekovod nije lako ustanoviti.

Ali, iako je taj broj udara groma nestalan i promjenljiv, ipak se može uzeti da se njegova prosječna vrijednost u roku od pet do deset godina malo mijenja. Zato, kao osnovu za neku orijentaciju uzimamo tu srednju vrijednost. Ona ovisi o području gdje se dalekovod prostire i izokerauničkoj razini tog kraja, a zatim i o visini stupova koji nose vodiče dalekovoda. Tako ćemo za računanje srednje vrijednosti broja udara u neki dalekovod upotrijebiti empirički izraz:

$$N_L = \frac{N_i}{H} H^{0,35}$$

N_L — srednja vrijednost broja udara u dalekovod na 100 km duljine i po godini

N_i — izokeraunička razina — uzduž dalekovoda

H — visina stupova u (m)

9.1. Udar groma u dalekovod bez zaštitnog užeta

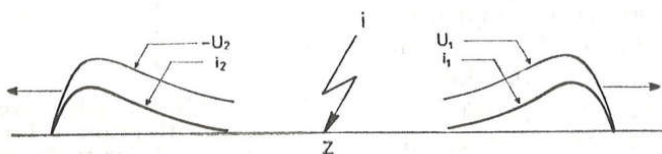
Pretpostavimo da grom direktno udari u nadzemni električni vod koji nema zaštitnog užeta. Jedan dio ukupne struje munje »i« podijelit će se u dva dijela i krenuti od mjesta udara nalijevo i nadesno, kao struje:

$$i_1 = \frac{1}{2} i \quad i \quad i_2 = \frac{1}{2} i,$$

kako je to prikazano na slici 9.2.

Uz pretpostavke da na vodu nema preskoka ili refleksija, možemo reći da će struje i_1 i i_2 stvarati na valnom otporu voda Z naponske putne valove kojih ćemo vrijednost općenito računati pomoću izraza:

$$U_1 = \frac{1}{2} i \cdot Z \quad U_2 = -\frac{1}{2} i \cdot Z.$$



Sl. 9.2. Izravni udar groma u fazni vodič

Vrijednosti tih naponskih valova međusobno su jednake, $U_1 = -U_2$, a U_2 ima negativni predznak da bi se označio njegov suprotni smjer kretanja.

Budući da imaju jednak oblik, bit će valovima i njihove promjene, odnosno strmine jednake:

$$\frac{dU_1}{dt} = \frac{dU_2}{dt}.$$

Iz prije napisanih izraza za vrijednosti naponskih valova koji se kreću nekim nadzemnim vodom može se opaziti da veličina tih putnih valova ovisi o veličini valnog otpora Z koji je za sve nadzemne vodove približno jednak, i iznosi od 300 do 500 Ω , te o struji groma i . Međutim, veličinu struje groma koja se kreće po vodu najteže je odrediti. Koliko će struje groma »i« biti »narinuto« nekome nadzemnom vodu, ovisi o mnogo faktora. Jedno je sasvim sigurno: dio naboja ili dio struje groma bit će na pogođenom objektu najveći kad otpor na tome pogođenom objektu bude imao najmanju vrijednost, pa čak i vrijednost nula u odnosu prema okolišnoj zemlji. Ako se ta situacija ne ostvaruje, struja groma neće pogođenim objektom teći svojom veličinom i_g , nego će to činiti samo jedan njezin dio i , a drugi će dio teći drugim pravcima. Pri svim udarima groma na mjestu se udara izjednačavaju potencijali, pa tako i pri udaru u vod. Zato se dio struje groma koja će taj čas proteći vodom može izračunati iz izraza:

$$i = i_g \frac{Z_0}{Z_0 + Z_k}. \quad (9.1)$$

Tu je i_g ukupna struja groma, Z_0 je valni otpor kanala groma, a Z_k ukupni otpor pogođenog vodiča. U našem primjeru uzet će se da je $Z_k = (Z/2)$ jer se struja groma i dijeli po paralelnim granama pogođenog vodiča, a svaka grana ima valni otpor Z .

Ako tu konkretnu vrijednost za Z_k uvrstimo u izraz (9.1), za vrijednost struje groma pišemo da iznosi:

$$i = i_g \frac{2Z_0}{2Z_0 + Z}, \quad (9.2)$$

a iz toga se izvodi vrijednost napona putujućeg vala:

$$U_1 = U_2 = \frac{i}{2} \cdot Z = i_g \frac{Z_0 Z}{2Z_0 + Z} = \frac{i_g}{\frac{2}{Z} + \frac{1}{Z_0}} \quad (9.3)$$

Kad grom udari u nadzemni vod, računamo da nam je valni otpor voda konačan i da iznosi $Z = 400 \Omega$. Valni otpor kanala groma Z_0 vrlo je teško utvrditi jer je on vrlo promjenljiv, ali se za njegovu prosječnu vri-

jednost uzima da iznosi od 200 do 300 Ω . Ako pretpostavimo, prema najnovijim istraživanjima, da su ponekad njegove pojedine vrijednosti kanala groma Z_0 i veće od 1 000 Ω , onda nam je u konkretnom slučaju $i \sim i_g$. To znači da se cijela struja groma i_g kreće nadzemnim vodom. (Tako za $Z_0 = 200 \Omega$, $Z = 400 \Omega$ i $i_g = 50$ kA bit će i s 25 kA, a za $Z_0 = 1\,500 \Omega$, $Z = 400 \Omega$ i $i_g = 50$ kA i 44,17 kA). Kad bi se veći dio ukupne struje groma kretao nadzemnim vodom, tad bi naponski valovi prema izrazu (9.3) poprimili vrlo visoke vrijednosti. Međutim, ako se to dogodi, odmah nastaje preskok, struja se smanjuje, a vodom se dalje kreću naponski valovi kojih amplitude ne mogu biti veće od napona što ih nadzemni vodovi mogu izdržati, odnosno ne mogu biti veće od izolacijske otpornosti voda.

Analizirajući izraz (9.3) za veličinu putujućih naponskih valova možemo zaključiti da ona najviše ovisi o veličini struje groma i_g , jer se ostale veličine u tom izrazu praktički malo mijenjaju. Tako, uvrstimo li u taj izraz za $Z_0 = 200 \Omega$, za $Z = 400 \Omega$ i za $i_g = 50$ kA, napon nam naponskog vala iznosi 5 000 kV. Uz iste vrijednosti za Z_0 i Z , ako u taj izraz uvrstimo za struju groma $i_g = 100$ kA, napon će naponskog vala iznositi čak 10 000 kV.

Kad tako visoki napon stigne npr. do izolatorskih lanaca, onda, kako smo već istaknuli, dolazi do preskoka, pa čak i do proboja. Ako je jedanput oštećena izolacija voda, struja ima mogućnost, osobito kod metalnih stupova, da struji prema zemlji, stvarajući na stupu, a posebno na uzemljivačima, velike razlike naponâ opasnih za ljude. Takvi preskoci znaju izazvati i proboje izolacije prema drugim nepogođenim vodičima, što prirodno malo zatim može odmah uzrokovati nezgode na vodu i njihovo isključenje iz pogona.

Brojne su posljedice izravnog udara groma u fazne vodiče i proboja izolacije voda. Što će se dogoditi, to ovisi o okolnostima, ali realno je očekivati pojavu zemljospoja, jednopolnog ili tropolnog kratkog spoja na nadzemnim vodovima za prijenos električne energije.

Iz izloženoga izlazi da je potrebno radi sigurnosti pogona, a i ljudi, zaštititi vod od izravnih udara groma u fazni vodič, što se u praksi postizava postavljanjem zaštitnog užeta. Zato svi nadzemni vodovi iznad 30 kV redovito imaju zaštitno uže. No, ipak se događaju, doduše vrlo rijetko, izravni udari u fazne vodiče, koji su onda velika opasnost za izolaciju nadzemnih vodova. Vjerojatnost takvih udara u gornji fazni vodič unatoč tome što vod ima zaštitno uže izračunava se po izrazu:

$$\log \psi = \frac{\varphi^0 \sqrt{H}}{90} - 4. \quad (9.4)$$

Pri tome je ψ vjerojatnost udara groma u fazni vodič, φ^0 je zaštitni kut na nekom dalekovodu, a H visina stupa od zemlje do točke gdje je smješteno zaštitno uže. Ako pretpostavimo da zaštitni kut na dalekovodima iznosi u prosjeku $\varphi = 30^\circ$, a da je prosječna visina stupova $H = 20$ m, prema izrazu (9.4) vjerojatnost će izravnog udara u fazni vodič biti:

$$\log \psi = \frac{30 \cdot \sqrt{20}}{90} - 4, \quad \psi = 0,0031 \quad \text{ili} \quad \psi = 0,31\%.$$

Taj izraz je empirijski. Iz rezultata dobivenih po njemu vidimo da je vjerojatnost udara vrlo malena i da na 100 udara groma dolazi ni jedan direktni udar u fazni vodič. Po tom bi računu moralo biti čak do 300 udara groma da bi jedan pogodio fazni vodič, i to gornji, jer su ostali zaklonjeni. Neki autori drže još rjeđim da grom udari u gornji fazni vodič kad ima zaštitno uže (taj omjer je 1 : 1 000), zato tako malo vjerojatni slučajevi za praksu nisu zanimljivi i ne treba ih promatrati. Ako dalekovod nema zaštitno uže, pa udari grom u gornji fazni vodič, postavljen na metalnim i armiranobetonskim stupovima, preko izolatorskih će lanaca nastati preskok prema metalnom ili armiranobetonskom stupu. Taj preskok je opasan jer otvara put izmjeničnoj struji od 50 Hz i ona će se tim putem dalje kretati i kad struja groma, koja je kratkog trajanja, ode u zemlju. Tad nastaje električni luk koji oštećuje izolaciju. Kad su fazni vodiči na drvenim stupovima, a dalekovod nema zaštitno uže, tad se pri izravnim udarima groma u fazne vodiče može, zbog visokih napona, pojaviti i preskok između faznih vodiča. To dovodi do kratkog spoja jer i tuda teče poslije izmjenična struja od 50 Hz (popratna struja). O tim preskocima i kratkim spojevima bit će poslije više riječi. Ovdje ćemo još jedanput napomenuti da dobro postavljeno i dobro uzemljeno zaštitno uže ne dopušta direktne udare u fazne vodiče pa nema ni preskoka. Zato tu opasnost ne treba posebno razmatrati. Osvrnimo se dalje na udare groma u zaštitnu užad.

9.2. Udar groma u stup ili u zaštitno uže

Kad grom udari u zaštitno uže, može se smatrati kao da je udario i u sam vrh stupa. To nije sasvim prihvatljivo u detaljnijim proračunima, ali za praktička razmatranja mogu se ta dva različita mjesta udara smatrati ravnopravnima (sl. 9.1) (na sredini raspona rijetko se kad pojavljuju preskoci). Prema onome što smo malo prije napomenuli može se zaključiti da ukoliko nadzemni vodovi imaju nad sobom zaštitno uže, ispravno postavljeno i dobro uzemljeno, onda ne bi trebalo biti opasnosti da će se kroz tu gromobransku instalaciju probiti prema vodovima neke jače struje groma. Naime, oni su zaštitnim užetom dobro zaklonjeni, bili takvi vodovi na metalnim, armiranobetonskim ili drvenim stupovima. Međutim, funkcija zaštitnog užeta nije samo u tome da zakloni fazne vodiče od izravnog udara groma nego da prihvaćene udare groma, točnije struje groma, odvede što sigurnije u zemlju, preko za to određenih uzemljivača koji se za mreže 30 (35) kV i višeg napona nalaze u temeljima svakog stupa. Vrlo je važno da za vrijeme odvođenja struje ne bude preskoka na fazne vodiče. Zato zaštitno uže mora na svakom stupu biti dobro uzemljeno, tako da otpor uzemljenja, grubo uzevši, nigdje ne premašuje $R = 15 \, \Omega$ (izmjereno izmjeničnom strujom). Ovoliko je dobro pripomenuti odmah u početku razmatranja, jer ako slučajno nema drugih potanjih proračuna i podataka i ako uzemljivači nisu suviše dugački, treba svugdje nastojati da otpor uzemljenja stupa ne preko-

rači 15 Ω . Naravno da je to neka prosječna veličina, ali dobro dođe da se mnogo ne pogriješi. Dakle, ako zaštitno uže, kao prvo, dobro zaklanja fazne vodiče i, kao drugo, dobro odvodi struju groma, onda ne bi smjelo biti drugih problema. Razmotrimo zato najprije gdje zaštitna užad mora biti smještena iznad vodiča kako bi ih ona dobro zaklonila od izravnih udara.

9.3. Zaštita dalekovoda zaštitnim vodičima i određivanje zaštitnog kuta pomoću elektrogeometrijskog modela. Osnove modela

Vidjeli smo, u prethodnim izlaganjima, da se struja »i« prilikom udara groma u vodič nekog dalekovoda dijeli na dva dijela i da se kreće na dvije suprotne strane od mjesta udara, uzduž vodiča. Dalje smo rekli da te dvije struje, $i_1 = (i/2)$ i $i_2 = (i/2)$, stvaraju svaka za sebe s valnim otporom vodiča Z naponske valove koji se vremenski mijenjaju i kreću, kao i struje, uzduž vodiča na obje strane od pogođenog mjesta.

Vrijednosti tih naponskih valova mogu biti manje ili veće, već prema tome kolika je struja groma. Ako je struja malena, onda i vrijednosti napona nisu velike i neće biti preskoka, nego će se taj val dalje kretati vodom. Na njemu, idealno uzevši, neće dolaziti ni do kakvih promjena. Takav val kojem su vrijednosti manje od preskočne vrijednosti izolatorskog lanca U_{pr} nazivamo puni val. Za njega drukčije kažemo da je: $[(i/2) \cdot Z < U_{pr}]$.

Naprotiv, ako struja groma »i«, koja je protekla vodičem dalekovoda, ima veliku vrijednost, tad će ona izazvati valove napona velikih vrijednosti, pa će dolaziti do preskoka. Takav val vrijednosti većih od preskočne vrijednosti napona izolatorskog lanca nazivamo odrezani val. Za njega drukčije kažemo da je: $[(i/2) \cdot Z > U_{pr}]$. Od tog vala samo će jedan njegov dio produžiti dalje vodom. Iz ovih izlaganja izlazi da neke struje groma ne stvaraju takve putne valove koji bi mogli izazivati preskoke sa svim neugodnim posljedicama, a neke veličine struja to izazivaju. Ima, dakle, za svaki dalekovod, odnosno za svaku izolacijsku razinu, određena vrijednost struje groma iznad koje će nastati preskok na izolatorima dalekovoda. Tu vrijednost struje groma nazivamo kritičnom vrijednošću i_k . U tablici 9.1. svrstane su te kritične vrijednosti struja groma i_k za različite nazivne napone koji se danas susreću u praksi. Kad se te kritične vrijednosti struje premaše, obično nastupa preskok izolatorskog lanca. Zato su u istoj tablici i vjerojatnosti koliko puta može doći do većih struja groma od kritične vrijednosti i_k , koje će onda izazvati preskoke. Podaci u tablici dalje pokazuju da dalekovodi slabije izolacije podnose samo slabije struje i da je vjerojatnost preskoka kod takvih dalekovoda mnogo veća nego kod onih koji imaju jaču izolaciju.

Na žalost, može se opaziti da će čak kod dalekovoda nazivnog napona od 750 kV dolaziti relativno vrlo često do preskoka pri izravnim udarima groma, a da će tek nešto otporniji biti dalekovodi od 1 000 kV ili 1 300 kV jer će samo polovica, odnosno trećina neposrednih udara izazvati preskoke i oštećenja, a ostale će udare takvi dalekovodi izdržati.

Tablica 9.1. Kritične struje i vjerojatnost preskoka prilikom udara u dalekovode različitih nazivnih napona

Nazivni naponi (kV)	Kritična struja i_k (kA)	Vjerojatnost preskoka %
225	5 ili 6	95
400	8 ili 9	87
750	18 ili 20	62
1 000	25 ili 30	48
1 300	35 ili 40	35

Da bi se spriječile ili barem djelomično otklonile ove opasnosti, koje vrlo često mogu nastupiti, postavlja se, kako smo vidjeli, iznad faznih vodiča zaštitna užad. Međutim, koliko će uspješno zaštitna užad štititi fazne vodiče, koliko će ih dobro zakloniti, to uvelike ovisi o tome koliko je zaštitnih vodiča, a posebno kako je ta zaštitna užad postavljena prema faznim vodičima. Njihov položaj i broj ovisi o mnogo faktora, kao što su to: dimenzije stupa i njegova konstrukcija, razina napona za koji je dalekovog građen itd. Ovdje će se opisati jedan način kako se u novije vrijeme određuje položaj zaštitne užadi prema faznim vodičima. Osnove tog načina postavili su E. R. Whitehead i R. H. Golde. Pri tome se uzimaju u obzir sve geometrijske i električne veličine na dalekovodu i omogućuje se da se izračuna tzv. kut zaštite. No, treba u početku napomenuti da zaštitno uže, postavljeno prema ovom proračunu, ne sprečava sve izravne udare groma u fazni vodič, nego samo one koji bi svojom jačinom struje izazvali proboje izolacije i štetne posljedice na dalekovodu. Dakle, sprečava samo one udare groma u fazni vodič što izazivaju jaču struju od kritične struje proboja izolacije i_k koju smo u izlaganjima definirali, a u tablici 9.1. naveli za dalekovode raznih nazivnih napona.

Taj način ustanovljivanja zaštitnog kuta, koji se osniva u izvjesnom smislu na tome da se neki udari groma smatraju opasnim za izolaciju nadzemnih vodova, a drugi ne, koristi se rezultatima dosadašnjih modernih istraživanja.

Da bi se pobliže moglo opisati na kakav se način proračunava zaštitni kut, potrebno je ponoviti da je »posljednja probojna udaljenost« između glave groma i bilo kojeg objekta na zemlji veća što je struja groma jača. Ali, radi lakšeg prikazivanja, valja još pretpostaviti da se ta udaljenost neće promijeniti bilo kakav oblik imao objekt na tlu prema kojem je usmjeren udar groma. Drugim riječima, pretpostavljamo da su svi objekti na tlu, npr.: visoki dalekovodni stupovi, fazni vodiči, stabla itd., pred udarom groma ravnopravni. Neka zato ta posljednja probojna udaljenost ima određenu vrijednost i označimo je kao r i dosad s r .

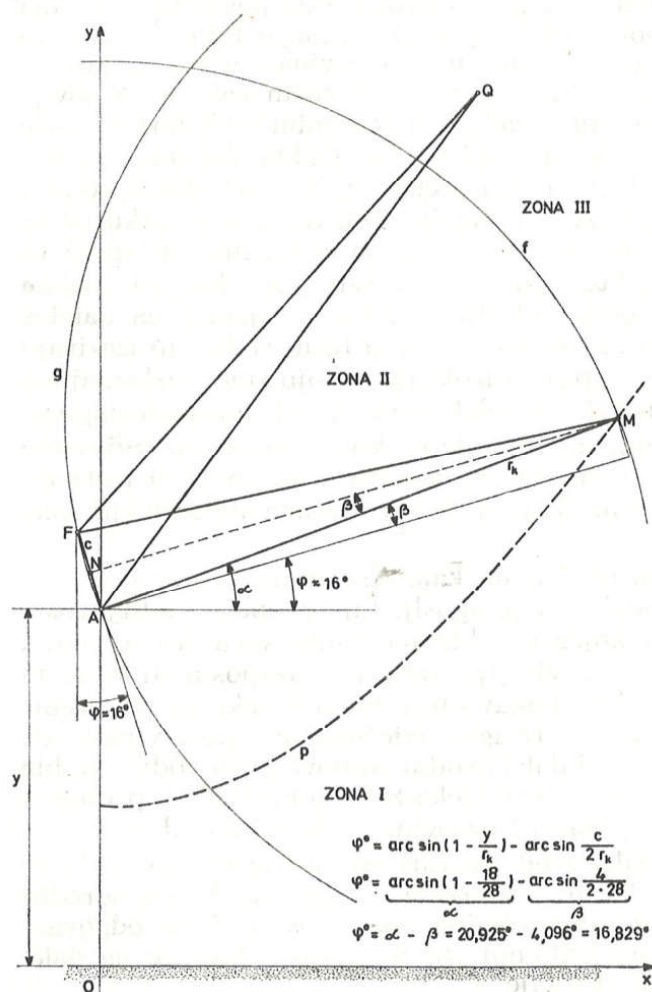
Međutim, neće svaki dalekovod izdržati sve struje groma; neki će izdržati jaču struju, a neki slabiju. Zato će se za svaki dalekovod odrediti posebno još kritična posljednja probojna udaljenost r_k koja odgovara jačini udara groma (odnosno kritičnoj struji i_k) iznad koje se na dalekovodima pojavljuje proboj izolacije.

9.4. Grafička konstrukcija modela

Kad uzmemo u obzir dvije učinjene pretpostavke, tj. da su svi objekti na zemlji pred udarom groma ravnopravni i da će svaki dalekovod izdržati samo struje do određene jakosti koje su na njemu izazvane udarom groma iz posljednje kritične probojne udaljenosti r_k , onda možemo pristupiti geometrijskoj konstrukciji koja će nam omogućiti da izračunamo zaštitni kut (sl. 9.3).

Položimo koordinatni sistem sa osima x i y kroz točku O koja se nalazi na zemlji točno ispod faznog vodiča označenoga na slici s A . Drugi fazni vodiči mogu biti smješteni pored tog vodiča u jednoj ravnini ili su smješteni čak ispod ili povrh njega, što ovisi o konstrukciji dalekovoda. Međutim, za naša razmatranja, ovaj čas, položaj drugih vodiča nije važan. Promatra se samo obrana od udara groma jednog vodiča, i to vodiča A . Da bismo primijenili princip ravnopravnosti svih objekata na zemlji pred udarom groma, princip koji smo malo prije prihvatili, nacrtajmo

parabolu »p« koja neka bude geometrijsko mjesto svih točaka jednako udaljenih od faznog vodiča A i od zemlje. Ako se tad dogodi da se probojna staza groma kreće prostorom označenim kao zona I, na desnoj strani parabole, tad će taj grom udariti u tlo koje mu je bliže od faznog vodiča smještenog u točki A . Prema tome, zona I na desnoj strani parabole je prostor iz kojega neće ni jedan grom udariti u fazni vodič. Taj bismo prostor mogli nazvati prostor iz kojeg vodič neće biti ugrožen bilo kako da je jak udar groma. Što je s prostorom na lijevoj strani parabole? Tu se mogu do-



Sl. 9.3. Geometrijska konstrukcija modela zaštite dalekovoda pomoću zaštitnog užeta

goditi udari groma različitih jakosti? Svi udari groma iz tog prostora nužno su usmjereni prema faznom vodiču ako on nema zaštitno uže jer su mu od zemlje mnogo bliži. To vrijedi općenito. Međutim, neki od tih gromova neće, na sreću, izazvati kritičnu jakost struje, pa takvi udari jakosti struje $i < i_k$, a $r < r_k$, nisu opasni. Tu granicu treba na slici 9.3. označiti. To će se postići tako što će se kritični probojni razmak r_k prema faznom vodiču lako izračunati iz izraza $r_k = 6,7 i_k^{0,8}$, a neopasni prostor iz kojega oni djeluju, označen kao zona II, odredit će se kružnicom f , opisanom oko točke A polumjerom r_k , koja siječe parabolu u točki M.

Udari groma jačeg intenziteta, sa strujama jačim od kritične ($i > i_k$) imaju veće posljednje probojne razmake r od kritičnog razmaka r_k ($r > r_k$) pa će oni djelovati iz prostora na slici označenoga kao zona III. Oni izazivaju pri udaru jake struje, pa ćemo samo od njih štititi fazni vodič zaštitnim užetom. Prostor iz kojega oni djeluju omeđen je lukom povučene kružnice f i lukom parabole p , a nalazi se iznad točke M. Da bismo odredili moguće položaje za zaštitno uže koje će na sebe preuzeti te udare groma, opišimo iz točke M polumjerom r_k kružnicu g kroz točku A. Na toj je kružnici mnogo točaka, ali odaberemo li bilo koju točku F, tad će ta točka s točkama A i M određivati istokračan trokut ($\triangle AFM$) kojemu je osnovica jednaka duljini $AF = c$. To, drugim riječima znači da je zaštitno uže postavljeno u točki F jednako udaljeno od točke M kao i fazni vodič A ($AM = FM$). Zato se već fazni vodič smješten u točki A može smatrati zaštićenim od postavljenoga zaštitnog užeta u točki F. A ako zadržimo isti položaj zaštitnog užeta, a to zapravo znači istu duljinu AF , i konstruiramo trokut s vrhom u točki Q, koja se nalazi u prostoru opasne zone III, odmah ćemo opaziti da je $QF < QA$. To više nije istostraničan trokut, pa zato, pogotovo tada, možemo reći da je zaštitno uže postavljeno bliže onim udarima groma jačeg intenziteta nego je to fazni vodič i da će svi gromovi koji vrše proboj iz bilo koje točke u zoni III radije udariti u zaštitno uže nego u fazni vodič. To onda navodi na zaključak da je zaštitno uže dobro smješteno i da su sve točke na kružnici g mjesto gdje se ono može postaviti te da se tako postizava najdjelotvornija zaštita faznog vodiča.

Iz slike 9.3. izlazi da se za kut φ° , što zatvara pravac povučen kroz fazni vodič A i zaštitno uže F s okomicom spuštenom iz točke F na zemlju, daje postaviti jednadžba:

$$\varphi^\circ = \arcsin \left(1 - \frac{y}{r_k} \right) - \arcsin \frac{c}{2r_k}. \quad (9.5)$$

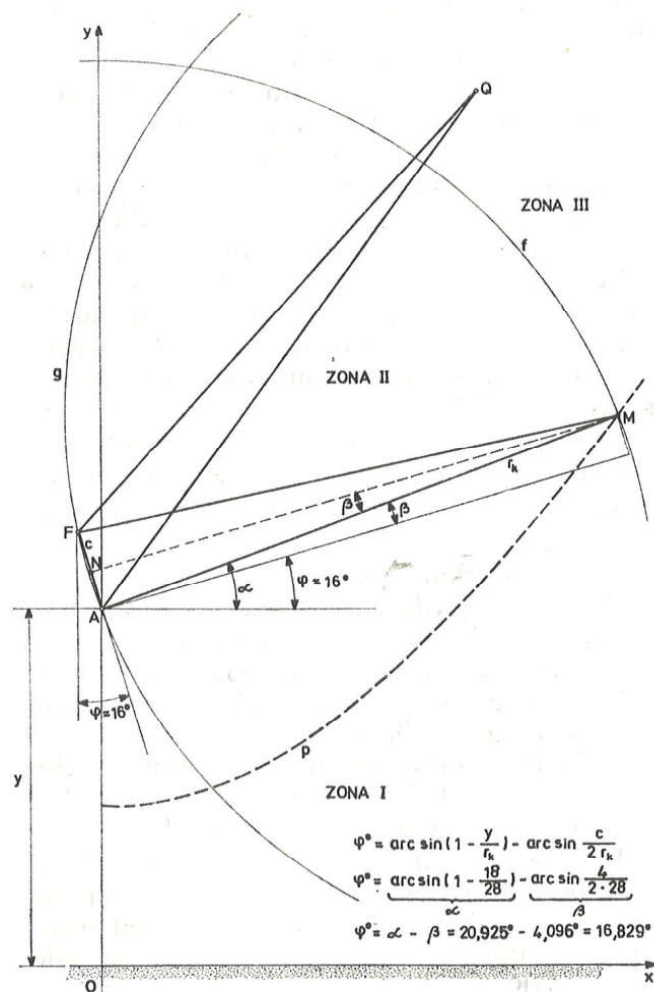
Pri tome je φ° kut zaštite ako se dalekovod nalazi na ravnoj površini tla, a c je duljina razmaka između faznog vodiča koji štitimo i zaštitnog užeta, dok je y visina vodiča nad zemljom (QA), a r_k je kritična probojna udaljenost. (Za $y = 18$ m, $c = 4$ m, $i_k = 6$ kA i $r_k = 28$ m možemo po izrazu (9.5) izračunati da je zaštitni kut φ° približno 17° , što je i grafički prikazano na sl. 9.3.)

9.4. Grafička konstrukcija modela

Kad uzmemo u obzir dvije učinjene pretpostavke, tj. da su svi objekti na zemlji pred udarom groma ravnopravni i da će svaki dalekovod izdržati samo struje do određene jakosti koje su na njemu izazvane udarom groma iz posljednje kritične probojne udaljenosti r_k , onda možemo pristupiti geometrijskoj konstrukciji koja će nam omogućiti da izračunamo zaštitni kut (sl. 9.3).

Položimo koordinatni sistem sa osima x i y kroz točku O koja se nalazi na zemlji točno ispod faznog vodiča označenoga na slici s A . Drugi fazni vodiči mogu biti smješteni pored tog vodiča u jednoj ravlini ili su smješteni čak ispod ili povrhu njega, što ovisi o konstrukciji dalekovoda. Međutim, za naša razmatranja, ovaj čas, položaj drugih vodiča nije važan. Promatra se samo obrana od udara groma jednog vodiča, i to vodiča A . Da bismo primijenili princip ravnopravnosti svih objekata na zemlji pred udarom groma, princip koji smo malo prije prihvatili, nacrtajmo

parabolu »p« koja neka bude geometrijsko mjesto svih točaka jednako udaljenih od faznog vodiča A i od zemlje. Ako se tad dogodi da se probojna staza groma kreće prostorom označenim kao zona I, na desnoj strani parabole, tad će taj grom udariti u tlo koje mu je bliže od faznog vodiča smještenog u točki A . Prema tome, zona I na desnoj strani parabole je prostor iz kojega neće ni jedan grom udariti u fazni vodič. Taj bismo prostor mogli nazvati prostor iz kojeg vodič neće biti ugrožen bilo kako da je jak udar groma. Što je s prostorom na lijevoj strani parabole? Tu se mogu do-



Sl. 9.3. Geometrijska konstrukcija modela zaštite dalekovoda pomoću zaštitnog užeta

goditi udari groma različitih jakosti? Svi udari groma iz tog prostora nužno su usmjereni prema faznom vodiču ako on nema zaštitno uže jer su mu od zemlje mnogo bliži. To vrijedi općenito. Međutim, neki od tih gromova neće, na sreću, izazvati kritičnu jakost struje, pa takvi udari jakosti struje $i < i_k$, a $r < r_k$, nisu opasni. Tu granicu treba na slici 9.3. označiti. To će se postići tako što će se kritični probojni razmak r_k prema faznom vodiču lako izračunati iz izraza $r_k = 6,7 i_k^{0,8}$, a neopasni prostor iz kojega oni djeluju, označen kao zona II, odredit će se kružnicom f , opisanom oko točke A polumjerom r_k , koja siječe parabolu u točki M.

Udari groma jačeg intenziteta, sa strujama jačim od kritične ($i > i_k$) imaju veće posljednje probojne razmake r od kritičnog razmaka r_k ($r > r_k$) pa će oni djelovati iz prostora na slici označenoga kao zona III. Oni izazivaju pri udaru jake struje, pa ćemo samo od njih štititi fazni vodič zaštitnim užetom. Prostor iz kojega oni djeluju omeđen je lukom povučene kružnice f i lukom parabole p , a nalazi se iznad točke M. Da bismo odredili moguće položaje za zaštitno uže koje će na sebe preuzeti te udare groma, opišimo iz točke M polumjerom r_k kružnicu g kroz točku A. Na toj je kružnici mnogo točaka, ali odaberemo li bilo koju točku F, tad će ta točka s točkama A i M određivati istokračan trokut ($\triangle AFM$) kojemu je osnovica jednaka duljini $AF = c$. To, drugim riječima znači da je zaštitno uže postavljeno u točki F jednako udaljeno od točke M kao i fazni vodič A ($AM = FM$). Zato se već fazni vodič smješten u točki A može smatrati zaštićenim od postavljenoga zaštitnog užeta u točki F. A ako zadržimo isti položaj zaštitnog užeta, a to zapravo znači istu duljinu AF , i konstruiramo trokut s vrhom u točki Q, koja se nalazi u prostoru opasne zone III, odmah ćemo opaziti da je $QF < QA$. To više nije istostraničan trokut, pa zato, pogotovo tada, možemo reći da je zaštitno uže postavljeno bliže onim udarima groma jačeg intenziteta nego je to fazni vodič i da će svi gromovi koji vrše proboj iz bilo koje točke u zoni III radije udariti u zaštitno uže nego u fazni vodič. To onda navodi na zaključak da je zaštitno uže dobro smješteno i da su sve točke na kružnici g mjesto gdje se ono može postaviti te da se tako postizava najdjelotvornija zaštita faznog vodiča.

Iz slike 9.3. izlazi da se za kut φ° , što zatvara pravac povučen kroz fazni vodič A i zaštitno uže F s okomicom spuštenu iz točke F na zemlju, daje postaviti jednadžba:

$$\varphi^\circ = \arcsin \left(1 - \frac{y}{r_k} \right) - \arcsin \frac{c}{2r_k}. \quad (9.5)$$

Pri tome je φ° kut zaštite ako se dalekovod nalazi na ravnoj površini tla, a c je duljina razmaka između faznog vodiča koji štitimo i zaštitnog užeta, dok je y visina vodiča nad zemljom (QA), a r_k je kritična probojna udaljenost. (Za $y = 18$ m, $c = 4$ m, $i_k = 6$ kA i $r_k = 28$ m možemo po izrazu (9.5) izračunati da je zaštitni kut φ° približno 17° , što je i grafički prikazano na sl. 9.3.)

9.5. Dijagram za praktičku upotrebu

Ovaj način računanja »kuta zaštite« teorijski je ispravan jer se osniva na više-manje poznatim fizikalnim pojmovima o probojnosti zra-ka. Zatim se on pokušao jednostavno opisati koristeći se relativno jednostavnim zakonitostima iz elementarne geometrije. Zbog toga je, na-ravno, trebalo neke pojave malo idealizirati, iako su one u praksi nešto složenije, a neke su se činjenice morale i potpuno zanemariti. Tako pri računanju probojne udaljenosti nije uzeto u obzir da se ona mijenja s tlakom i temperaturom i da se te promjene ne mogu zanemariti. Osim toga, idealizirana je činjenica da se iz neke veće udaljenosti može točno znati kojim će se putom kretati glava groma, pa je zbog toga teško i sa sigurnošću očekivati da će do udara radije doći u zaštitno uže nego u fazni vodič, koji su zapravo vrlo blizu jedan drugome. Ti nedostaci od-nose se osobito na gromove jakog intenziteta, npr. na one od 50 kA i više. Oni bi morali odabrati gdje će udariti već na udaljenosti većoj od 150 m i više. Međutim, te zakonitosti u prirodi mogu biti složenije nego se teorijski mogu zamisliti.

Još treba napomenuti da je pri ovom načinu računanja kuta zaštite φ° zanemaren utjecaj pogonskog napona faznog vodiča koji štitimo. Ne može se, naime, zanemariti kakvu momentalnu vrijednost i činjenica koji polaritet ima fazni vodič u trenutku kad prema njemu nastaje izbijanje. Nije, dalje, uzeta u obzir ni pojava korone, koja se posebno kod nad-zemnih vodova pojavljuje kad je povišen napon pri udaru groma.

Sve što smo ovdje spomenuli nije uzeto u obzir kod ovog načina računanja kuta zaštite. Rezultati ovakvoga idealiziranog načina bili bi vrlo povoljni, što bi nas moglo navesti na misao da su fazni vodiči sigurniji nego što zapravo jesu. Zato se ovaj način određivanja položaja zaštitnog užeta, odnosno računanje kuta zaštite, koji je u svojoj osnovi logičan i fizikalno ispravan, mora prilagoditi stvarnom stanju. To bi se postiglo uzimajući u obzir sve manjkavosti što smo ih spomenuli. U tu svrhu trebalo bi unijeti u sve naše proračune mnoge faktore sigurnosti, što bi praktički bilo komplicirano. Zato je bolje sve faktore sigurnosti grubo obuhvatiti samo jednim faktorom, koji onda fiktivno povećava visinu našega faznog vodiča nad zemljom za 10%. To bi, računajući po prije napisanoj formuli (9.5), značilo promjenu kuta zaštite do otprilike 6° (za $y = 18$ m, $c = 4$ m, $r_k = 28$ m, kut φ° iznosi 13°).

Ovaj način nalaženja položaja zaštitnog vodiča na slici 9.3. proveden je ne samo uz idealizirane pretpostavke i zanemarenja mnogih činjenica nego je proveden i za samo jedan, i to najjistureniji fazni vodič. Međutim, nadzemni vodovi imaju najmanje tri ili više vodiča, pa se, prema tome, za zaštitu dalekovoda u cjelini moraju štititi i drugi fazni vodiči. Rijetko se događa da jedno zaštitno uže štiti sva tri vodiča. To se postiže izuzetno, kad je sama konstrukcija dalekovoda takva da se zaštitno uže daje po-staviti u sredinu iznad nadzemnog voda.

Češće je danas da se moraju postaviti dva zaštitna vodiča, koji štite isturene fazne vodiče na krajevima stupova, a ujedno i fazne vodiče smještene u sredini voda. Takve se konstrukcije vodova danas gotovo isključivo susreću, zato ćemo ih, barem ukratko, razmotriti. Pri tome će se koristiti i ovdje već dosad spominjanom geometrijskom konstruk-

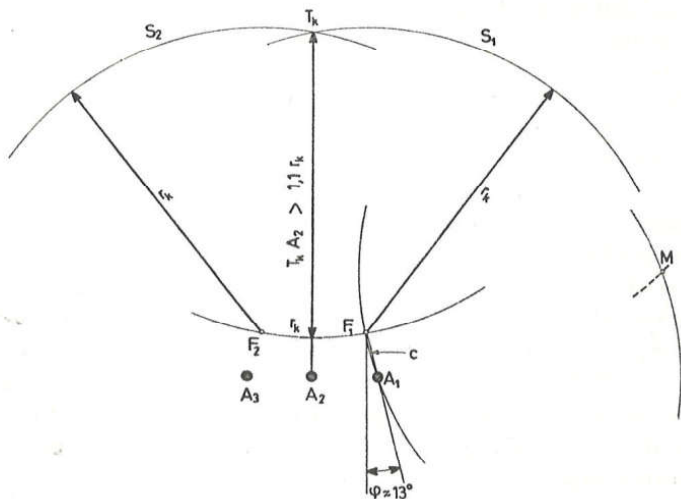
cijom na slici 9.3. i analitičkim izrazima za račun zaštitnog kuta. Osim toga, prilikom određivanja kuta zaštite za ovaj slučaj nastojale su se uračunati i sve one manjkavosti i zanemarenja malo prije spomenuta, a koja su se nužno morala učiniti u obrazlaganju osnovnog modela zaštite. U nemogućnosti da se detaljnije ovdje prikaže ovaj postupak, morat ćemo se zadovoljiti samo dijagramom na slici 9.4, a koji počiva na principima elektromagnetnog modela. Iz njega će se izravno naći kut zaštite kad su u upotrebi dva užeta koja štite, svaki za sebe, isturene fazne vodiče A_1 i A_3 , a zajedno i srednji vodič A_2 .

Da bi se to postiglo, moraju se iz točaka F_1 i F_2 , koje su zamišljene kao mjesta za smještaj zaštitnih užeta, povući kružni lukovi S_1 i S_2 pomoću polumjera r_k . Tamo gdje se ta dva kružna luka sijeku nad srednjim vodičem A_2 određen je položaj kritične točke T_K . Da bi zaštitna užad smještena u točkama F_1 i F_2 osim faznih vodiča A_1 i A_3 dobro štitila i vodič A_2 , mora biti ispunjena relacija:

$$T_K A_2 \geq 1,1 r_k. \quad (9.6)$$

Tu je r_k , prirodno, posljednja probodna udaljenost koja se izračunava posebno za svaki dalekovod vodeći računa o kritičnoj struji i_k što je dalekovod može podnijeti.

Ako se dogodi pri konstrukciji dijagrama da nam je razmak $T_K A_2$ puno veći od $1,1 r_k$, to se može iskoristiti i razmaknuti zaštitnu užad u točkama F_1 i F_2 jedno od drugoga. Time će se povećati ukupni zaštitni prostor jer se zaštitni kut smanjuje (naravno uz čvrstu visinu $A_1 A_2 A_3$). Obrnuto, ako nam je razmak $T_K A_2$ manji od $1,1 r_k$, zaštitnu užad moramo približiti, što, svakako, izlaže vanjske vodiče opasnostima od udara. U glavnim crtama moglo bi se reći da pri određivanju položaja zaštitnih užeta na nekom dalekovodu, valja paziti na to da budu zaštićeni istureni krajnji vodiči. Zato treba poštovati geometrijsku konstrukciju i analitičke izraze na slici 9.3, a jednako tako mora biti zadovoljena relacija (9.6), kojom se osigurava zaštita i srednjeg vodiča. Ta dva, katkad i malo suprotna zahtjeva valjalo bi, koliko je moguće, uskladiti za svaki dalekovod posebno. Usklađivanja treba provesti tako da kao re-



Sl. 9.4. Određivanje zaštitnog kuta φ za srednju visinu faznih vodiča nad zemljom

zultat postignemo najmanji mogući kut zaštite. Pri tome će se, naravno, tražiti najpovoljnije vrijednosti parametara y/r_k i c/r_k . Ili, uz više ili manje čvrsto r_k , za određeni dalekovod treba odrediti visinu faznih vodiča nad zemljom y i razmak zaštitnog užeta c od tog faznog vodiča. Takvih rješenja ima mnogo za jednaki kut zaštite. No uz poštovanje već iznesenih principa taj je broj ipak ograničen.

S obzirom na to da je ovdje riječ o novijim istraživanjima, teško je donositi neke čvrste zaključke o djelotvornosti ovog načina nalaženja položaja zaštitnog užeta prema faznim vodičima. Iako je on sasvim ispravan i prilično logičan, još uvijek su pretpostavke na kojima se osniva nedovoljno utvrđene i uvijek su mogući u borbi s prirodom neki nepredvidivi događaji i iznenađenja. Dosadašnja iskustva stečena na dalekovodima kojima je kut zaštite određen ovakvim postupkom pokazuju da se mogu ipak očekivati dobri rezultati. Podaci iz literature govore o tome da su se na dalekovodima koji nisu imali zaštitu kvarovi smanjili 50 puta kad im je postavljeno zaštitno uže pod kutom izračunatim na prije opisani način.

9.6. Udar u okolinu voda

Kad udari grom u okolinu dalekovoda, naglo se mijenja električno polje, koje je neposredno prije udara bilo vrlo intenzivno. Ta nagla promjena izaziva i promjenu magnetskog polja. Dalekovod koji se nalazi u samoj blizini djeluje kao razapeta antena i na njemu se induciraju visoki naponi. Takvi naponi mogu dosegnuti i vrijednost do 400 kV, pa bi zato za izolaciju vodova do 30 i 35 kV oni mogli biti opasni. Već za izolaciju vodova višu od 60 kV, a pogotovo za onu od 110 kV oni nisu štetni. U tim slučajevima udara, vodovi su koji imaju zaštitno uže i od tih prenapona bolje zaštićeni od onih bez takve zaštite. Naime, pri induciranju napona na dalekovodu isti se napon inducira i na zaštitnom užetu kao i na faznom vodiču pa su kratkotrajno i stup na kojem je zaštitno uže i fazni vodič na istom potencijalu. Zato ne može odmah doći do preskoka s faznog vodiča na stup. Malo poslije nestaje napon (naboj) sa uzemljenoga zaštitnog užeta, ali već tada su i oni valovi napona kretanjem preko faznih vodiča prigušeni, pa nisu više opasni za izolaciju voda.

Ako vodovi nemaju zaštitno uže, nema na njima ni spomenute jednakosti potencijala između napona inducirana na faznom vodiču i napona koji bi se inducirao na zaštitnom užetu kad bi ga bilo. Zato u okolnostima kad nema zaštitnog užeta, nastaje preskok prema stupu ako su fazni vodiči na metalnim ili armiranobetonskim stupovima, a njega neće biti kad se vodovi nalaze na drvenim stupovima.

Međutim, ovdje ćemo pripomenuti da se vrlo rijetko induciraju naponi do 400 kV, koji smo malo prije spomenuli. Zato, pri izolaciji nadzemnih vodova preko 30 (35) kV-ne mreže o ovim induciranim prenaponima nije potrebno voditi posebno računa u projektiranju prenaponske zaštite. Oni, doduše, mogu biti opasni za ljude koji bi u tom trenutku radili na dalekovodu, pa to valja uzeti u obzir i vodiče na mjestu gdje se radi uzemljiti.

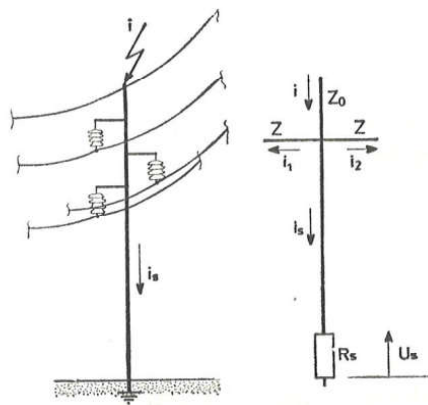
10. Odvođenje struje groma zaštitnim užetom

Dosad smo opisivali kako zaštitno uže zaštićuje fazne vodiče od izravnih udara kad ga pravilno postavimo iznad njih. Razmotrit ćemo, dalje, kako se pri tome ponaša zaštitno uže, kako ono odvodi struje groma i koje se sve teškoće i opasnosti mogu pojaviti prilikom odvođenja struje zaštitnim vodičem.

Uže je na svakom stupu uzemljeno da bi moglo odvoditi struju groma u zemlju, pa je potrebno da ono skupa s uzemljenjem bude dobra gromobranska instalacija. Utvrđeno je istraživanjima da pojedini stupovi katkad odvedu u zemlju struje groma jačine i do 60 kA, pa je neobično važno da otpori uzemljenja pojedinih stupova ne prekorače određenu granicu. Ali ne samo to, jake struje groma vremenski su vrlo promjenljive na svome čelu pa zato stvaraju i jako promjenljiva magnetska polja. Zbog toga odvođenje struja groma od vrha stupa do tla nije tako jednostavni postupak.

Dakle, u ovom poglavlju će se razmotriti drugo osnovno djelovanje zaštitnog užeta, i to s gledišta dobrog odvođenja struje groma u zemlju.

Kako smo vidjeli, grom može udariti bilo gdje u zaštitno uže, ali pretpostavimo, radi lakšeg razumijevanja električkih prilika, da je udario u zaštitno uže na samom vrhu stupa, kao na slici 10.1. To je vrlo nepovoljan udar, ali koji nam znatno za početak razmatranja pojednostavnjuje ekvivalentnu shemu. U toj shemi pogodeno zaštitno uže koje prolazi vrhom stupa nadomještamo valnim otporom Z , a uzemljenje stupa otporom R_s , dok je sa Z_0 , po običaju, označen valni otpor kanala groma. U trenutku udara u zaštitno uže na vrhu stupa će kombinacijom paralelnih otpora na slici 10.1. proteći dio struje groma i . Ta se struja od tog trenutka dijeli na tri dijela, na tri prolazna strujna vala. Dva se vala kreću po zaštitnom užetu lijevo i desno kao struje i_1 i i_2 , a treći se kreće stupom prema zemlji kao struja i_s jer je zaštitno uže uzemljeno.



Sl. 10.1. Udar groma u zaštitno uže na vrhu stupa

Veličine tih struja mogu biti različite, a njihove vrijednosti ovise o tome koliko je velik otpor neke grane u našoj ekvivalentnoj shemi. Naprotiv, veličina napona što ga te struje stvaraju ima po svakoj grani jednaku vrijednost, jer je u ovoj situaciji riječ o paralelnim otporima. Nas posebno zanima vrijednost i oblik tog napona prema dalekoj zemlji, jer taj napon napreže izolaciju dalekovoda. Njegovu ćemo veličinu odrediti za svaku granu, ali radi naknadnih izlaganja izračunat ćemo je na grani koja spaja vrh stupa s uzemljivačem. Imamo općenito da je:

$$U_s = i_s R_s. \quad (10.1)$$

U izrazu je i_s struja kroz stup i uzemljivač, a R_s je otpor uzemljenja stupa.

Da bismo napon U_s detaljnije izračunali za neki dalekovod, moramo se koristiti prijašnjim razmatranjima. Najprije ćemo poći s usvojenog gledišta da na svakome mjestu udara groma nastaje izjednačenje potencijala, što nam omogućuje da odmah u početku doznamo koliki će dio od ukupne struje groma i_g proteći tog trenutka zaštitnim užetom i stupom prema zemlji. Napisat ćemo da taj dio iznosi:

$$i = i_g \frac{Z_0}{Z_0 + Z_k}.$$

U našem slučaju je $Z_k = \frac{\frac{Z}{2} \cdot R_s}{\frac{Z}{2} + R_s}$ jer je riječ o kombinaciji triju pa-

ralelnih otpora koji električki predaju naš objekt.

Struju i_s u grani prema zemlji nalazimo prema ekvivalentnoj shemi na slici 10.1. iz odnosa:

$$i_s = i \frac{\frac{Z/2}{\frac{Z}{2} + R_s}}{\frac{Z/2}{\frac{Z}{2} + R_s}}.$$

Uvrstimo li taj izraz u jednadžbu (10.1), iz ekvivalentne sheme izlazi da je napon na vrhu stupa:

$$U_s = i_s R_s = i \frac{\frac{Z}{2}}{\frac{Z}{2} + R_s} \cdot R_s = i_g \frac{Z_0}{Z_0 + Z_k} \cdot \frac{\frac{Z}{2}}{\frac{Z}{2} + R_s} \cdot R_s.$$

Ako se zamijeni još u jednadžbi vrijednost paralelne kombinacije otpora pogođenog objekta Z_k , konačno će napon na vrhu stupa, ovisno o jačini struje groma i konstrukciji dalekovoda, biti:

$$U_s = \frac{i_g}{\frac{1}{R_s} + \frac{2}{Z} + \frac{1}{Z_0}}. \quad (10.2)$$

Iz toga sad konačnog izraza vidi se da će napon na vrhu pogođenog stupa biti niži ako dalekovod ima dobro uzemljeno zaštitno uže. On će biti niži od onog napona koji bi se pojavio na faznom vodiču kad bi on bio pogođen jednakom jačinom struje groma. To je shvatljivo jer se na dobro uzemljenome zaštitnom užetu struja raspodjeljuje na tri grane i brzo se odvodi u zemlju.

Na primjer, kad bi dalekovod bio pogođen u zaštitno uže gromom struje $i_g = 50 \text{ kA}$ i kad bi otpor uzemljenja stupa bio $R_s = 10 \, \Omega$, tad bi uz valni otpor zaštitnog užeta $Z = 400 \, \Omega$, i uz otpor kanala groma $Z_0 = 200 \, \Omega$, napon na vrhu stupa iznosio 454 kV, računajući ga po izrazu (10.2). Međutim, kad smo pretpostavili da je grom jednake jačine udario fazni vodič dalekovoda, onda smo vidjeli da je uz jednaku vrijednost valnog otpora faznog vodiča Z i uz jednake vrijednosti valnog otpora kanala groma Z_0 , napon putujućeg vala iznosio čak 5 000 kV. Do tog rezultata lako bismo došli i računajući napon prema izrazu (10.2), samo bismo za otpor uzemljenja stupa morali uvrstiti da je $R_s = \infty$. Kratki račun nam pokazuje korisno djelovanje zaštitnog vodiča ne samo kao zaklona od izravnog udara groma nego kao i dobre instalacije kojom se djelotvorno odvođe struje groma u zemlju, osobito onda kad možemo postići da otpor uzemljenja R_s bude male vrijednosti.

10.1. Točniji proračun napona na vrhu stupa

Za konstrukciju stupa, posebno radi dobrog dimenzioniranja izolacije, nije dovoljno poznavati samo vrijednost amplitude napona koji se pojavljuje između vrha stupa i zemlje pri direktnom udaru u stup dalekovoda nego i traje li taj napon dugo i kako se brzo snizuje odnosno kako se vremenski mijenja. Dosadašnja razmatranja i obavljeni proračuni provedeni su na jako pojednostavnjenim ekvivalentnim shemama, i to zato jer se htjelo samo pokazati kako uzemljeno zaštitno uže djeluje na sniženje tjemene vrijednosti napona na vrhu stupa. Iz tog se razloga uzela u obzir samo veličina otpora uzemljenja R_s , koja praktički najviše utječe na sniženje napona što ga poprima vrh stupa prema zemlji. Vidjeli smo u prethodnim izlaganjima da taj omski pad napona iznosi $U_s = I_s \cdot R_s$. No, ovdje ćemo provesti i nešto složenija razmatranja toka odvođenja struje groma u zemlju i ovom prilikom uzeti u obzir neke prije zanemarene veličine. Grana zaštitnog užeta usmjerena prema zemlji, kad udari grom, preuzima na sebe, zbog malog otpora stupa i otpora uzemljenja prema otporu zaštitnog užeta, i najveći dio struje, pa možemo govoriti o tome da se na toj grani električna energija gotovo cijela pretvara u magnetsku energiju. A ondje kuda teku jake struje i magnetska su polja jaka taj se dio puta struje u ekvivalentnoj shemi dade namjestiti induktivitetom L_s . Za jedinični induktivitet stupa L_1 može se uzeti da mu je vrijednost od 1 do 2 mikrohenrija po metru visine stu-

pa, odnosno duljine onog vodiča koji spaja zaštitno uže s uzemljivačem. Budući da je kod izbijanja u stup riječ o strujama koje se vremenski brzo mijenjaju, osobito su, gotovo uvijek, na svom čelu veoma strme, tad vrijednost strmine (di_s/dt) u grani prema zemlji može biti vrlo visoka. Zato, bilo kako da je kratak put struje do tla i da je malen induktivitet L_s te veze sa zemljom, moramo uzeti u obzir da nam u toj grani nastaje i pad napona zbog samoindukcije, koji iznosi:

$$U_L = L_1 H_s \frac{di_s}{dt} . \quad (10.3)$$

Obično se uzima da je jedinični induktivitet stupa L_1 u ($\mu\text{H/m}$), H_s visina stupa u (m), a (di_s/dt) strmina struje u ($\text{kA}/\mu\text{s}$), tako da napon U_L dobivamo u (kV).

Ta činjenica nas upućuje da za točnije proračune napona između vrha stupa i daleke zemlje osim omskog pada napona na otporu uzemljenja R_s uzmemo još i induktivni pad napona na induktivitetu stupa $L_s = L_1 H_s$. Ta dva pada napona zbrojena zajedno daju u svakom trenutku vrijednost napona na vrhu stupa:

$$U_s = i_s R_s + L_s \frac{di_s}{dt} \quad (10.4)$$

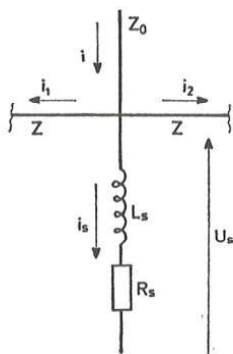
ili, drukčije izraženo u donjem području, bit će:

$$U_s(p) = i_s(p) (R_s + L_p) = i_s(p) \cdot Z_s(p),$$

pri čemu je $Z_s(p)$ impedancija uzemljene grane.

Za račun ovog napona prema dalekoj zemlji treba osim čvrstih veličina R_s i L_s poznavati i struju i_s . No, ne smije se zaboraviti da je struja u stupu i_s samo dio ukupne struje »i« koja ulazi u paralelnu kombinaciju otpora, što svi zajedno svojim vrijednostima utječu na njezinu veličinu, a prema tome i na napon stupa prema zemlji. Zato će se taj napon izračunati iz ekvivalentne sheme na slici 10.2. U toj shemi su osim otpora uzemljenja R_s uzemljene grane i induktiviteta L_s te grane uzeti u obzir još valni otpor kanala groma Z_0 i valni otpor zaštitnog užeta Z .

Sve pripadajuće veličine potrebne za proračun navedene su na slici uz ekvivalentnu shemu.



- Z_0 — valni otpor kanala groma
- Z — valni otpor užeta
- L_s — induktivitet
- R_s — otpor uzemljenja
- i_s — struja u uzemljenoj grani
- i — struja koja ulazi u kombinaciju
- i_g — struja groma
- $R_2 = \frac{Z}{2}$ — otpor paralelne kombinacije zaštitnog užeta.

Sl. 10.2. Ekvivalentna shema za proračun napona na vrhu stupa

Za računanje napona na vrhu stupa pođimo od osnovnog pravila da je napon na uzemljenoj grani jednak naponu koji se pojavljuje na cijeloj paralelnoj kombinaciji otpora, pa je:

$$U_s(p) = i_s(p) \cdot Z_s(p) = i(p) \cdot Z_k(p).$$

Tu je $Z_k(p)$ impedancija paralelne kombinacije prema shemi na slici 10.2.

Ako za struju i koja ulazi u cijelu kombinaciju otpora napišemo prema dosadašnjim izlaganjima da iznosi:

$$i(p) = i_g(p) \frac{Z_0}{Z_0 + Z_k(p)},$$

tada dobivamo, da je napon uzemljene grane, odnosno vrha stupa prema dalekoj zemlji:

$$U_s(p) = i(p) \cdot Z_k(p) = i_g(p) \frac{Z_0 \cdot Z_k(p)}{Z_0 + Z_k(p)} \quad (10.5)$$

Pri tome je:

$$Z_k(p) = \frac{\frac{Z}{2} \cdot Z_s(p)}{\frac{Z}{2} \cdot Z_s(p)}, \quad \text{a} \quad Z_s(p) = R_s + L_s p.$$

Uz pretpostavku, dalje, da struja groma ima okomito čelo i ravan hrbat amplitude i_g , te da beskonačno dugo traje, valja u jednadžbu (10.5) umjesto $i_g(p)$ uvrstiti (i_g/p) . Zatim, ako otpor paralelne kombinacije zaštitnog vodiča $(Z/2)$ označimo s R_2 i u tu jednadžbu uvrstimo pripadajuće vrijednosti za $Z_k(p)$ i $Z_s(p)$, pa to sve skupa sredimo i prilagodimo za transformaciju u gornje područje, konačno ćemo napisati da nam se napon na vrhu stupa prema dalekoj zemlji, u svakom trenutku, mijenja po izrazu:

$$U_s(t) = \frac{i_g Z_0 R_2}{Z_0 + R_2} e^{-(t/T)} + \frac{i_g Z_0 R_s}{Z_0 \left(\frac{R_s}{R_2} + 1 \right) + R_s} (1 - e^{-(t/T)}), \quad (10.6)$$

pri čemu je: $T = \frac{L_s (Z_0 + R_2)}{R_2 Z_0 + R_s Z_0 + R_s R_2}$ vremenska konstanta kruga.

Iz izraza (10.6) vidi se da je u trenutku udara, za $t = 0$, napon na vrhu stupa:

$$U_s(0) = \frac{i_g Z_0 R_2}{Z_0 + R_2}. \quad (10.7)$$

Taj rezultat pokazuje da će u prvom trenutku napon na vrhu stupa biti tako velik kao da nemamo nikakve veze sa zemljom.

U tom izrazu, kako vidimo, nema veličine otpora uzemljenja R_s . Razlog za takvo stanje je u tome što induktivitet stupa ili veza sa zemljom neće u prvom trenutku dopustiti da struja krene prema tlu. Odnosno, pretvorba električne u magnetsku energiju ne ide tako naglo kako smo prije točnog proračuna pretpostavljali.

Zato će u prvom trenutku ukupni napon biti jednak padu napona na zaštitnom užetu, odnosno na otporu $R_2 = (Z/2)$. To je vrlo nepovoljno jer se pod tako visokim naponom izolacija jako napreže. Napon je vrlo visok i ne opada brzo kao što se to događalo u prošlim razmatranjima, kad nismo u proračun uzimali induktivitet stupa. To praktički traje nekoliko mikrosekundi.

Postepeno, kako vrijeme bude prolazilo, struja će polako prodirati kroz induktivitet, početak će pretvorba električne u magnetsku energiju i put struje prema zemlji biti otvoren. To će utjecati povoljno na sniženje napona na vrhu stupa. Matematički ćemo to odmah utvrditi ako u izraz (10.6) uvrstimo $t = \infty$ pa izlazi:

$$U_s(\infty) = \frac{i_g Z_0 R_s}{Z_0 \left(\frac{R_s}{R_2} + 1 \right) + R_s} \quad (10.8)$$

Iz dobivenog se izraza zapaža da je napon stupa U_s prema zemlji postepeno poprimio nižu vrijednost od one koju je imao u prvom trenutku. Dakle, induktivitet u grani koja je uzemljena neće nakon izvjesnog vremena biti prepreka za sniženje napona na vrhu stupa (kao da ga nema). A to se događa i zbog toga što smo pretpostavili da nam struja groma i_g ima okomito čelo i ravan hrbat. Naravno da to samo približno odgovara i praktičkim situacijama. No, za teorijsko razmatranje trebalo je računati s najjednostavnijim oblicima struje groma i_g . Ako u dobivene izraze za napon stupa prema dalekoj zemlji u trenucima $t = 0$ i $t = \infty$ uvrstimo brojčane vrijednosti za $I_g = 50 \text{ kA}$, $Z_0 = 200 \Omega$, $R_s = 10 \Omega$ i $Z = 400 \Omega$, odnosno one koje smo prije uzeli, dobivamo da nam napon stupa U_s za $t = 0$ iznosi 5 000 kV, a da za $t = \infty$ bit će 454 kV. Prema tome, nakon izvjesnog vremena, praktički već poslije nekoliko trenutaka, napon na vrhu stupa poprima nižu vrijednost, onu vrijednost koju bi imao da nema induktiviteta stupa, pa da na njegovu vrijednost utječe samo veličina otpora uzemljenja ($U_s = i_s \cdot R_s$). Zato se često u praktičkim proračunima induktivitet stupa zanemaruje.

Vrijednosti koje bismo izračunali po izrazu (10.6) za svaki trenutak od $t = 0$ do $t = \infty$ pokazale bi, vrlo pregledno, mijenjanje napona na vrhu stupa od trenutka udara groma pa do izvjesnog vremena. Činjenica da induktivitet stupa sprečava momentalno sniženje napona na vrhu stupa, a da to tek poslije dopušta, jest nepovoljna, pa valja nastojati da taj induktivitet bude što manji. U suprotnome i to zna biti razlog probojima i preskocima. Ali najvažnije je ipak postići da otpor uzemljenja bude malen jer, kako smo rekli, on bitno i najviše utječe na veličinu napona na vrhu stupa. Ostale veličine u ekvivalentnoj shemi, kao što je

otpor $R_2 = (Z/2)$ i Z_0 , uzima se da su konstantne i njih ne možemo mijenjati na nekom dalekovodu.

U dosadašnjim izlaganjima konstatirali smo da susjedni stupovi svojim malim otporima uzemljenja povećavaju grananje naponskih valova zbog veće raspodjele struje groma. To je povoljna okolnost jer se onda valovi odbijaju od uzemljivača, i to s protivnim predznacima. To sve skupa utječe na sniženje napona tokom vremena na vrhu pogođenog stupa. Međutim, da bi se točnijim proračunom obuhvatila najnepovoljnija situacija, odnosno da bi se izračunao najviši napon koji se može pojaviti na vrhu stupa, trebalo je pretpostaviti da susjedni stupovi sa svojim otporima uzemljenja R_s i induktivitetima L_s nemaju nikakvo djelovanje na napon pogođenog stupa. Pa se u proračunu uzeo u obzir samo otpor uzemljenja R_s i induktivitet L_s pogođenog stupa. No, iako smo donekle naš stup izolirali od drugih stupova, vrijednost se valnog otpora promatranoga malog dijela zaštitnog užeta ne mijenja, jer valni otpor općenito nije ovisan o duljini vodiča. Taj je valni otpor uzet u obzir kod računanja s vrijednošću $(Z/2)$ zbog toga što se valovi napona i struje nakon udara dijele na lijevu i desnu stranu.

Da bi razmatranja bila što jasnija i jednostavnija i da bi se mogla povesti usporedba s prethodnim rezultatima, uzeto je da strujni valovi kojima je naš stup pogođen imaju okomito čelo i ravan hrbat, amplitude i_g .

10.2. Utjecaj induktiviteta stupa i njegova otpora uzemljenja na smetnje prilikom udara groma. Povratni preskoci

Kad se dobro postavi zaštitno uže, pod dobro određenim zaštitnim kutom, učinjeno je mnogo jer će onda ono dobro zaklanjati fazne vodiče od izravnih udara groma i njih većinom neće biti ili će biti vrlo rijetki. To smo dosad već razmotrili. Ta bi tehnika, na prvi pogled, izgledala jednostavna i vrlo djelotvorna. Međutim, to nije tako. Takva izvedba sama po sebi nije dovoljna da osigura dalekovod od svih teškoća koje mogu nastati za vrijeme izbijanja. Doduše, struja groma više neće teći faznim vodičima, nego zaštitnim užetom prema zemlji, ali na svakom stupu mogu zato nastati takvi padovi napona, odnosno takva povišenja potencijala prema faznim vodičima, koja mogu izazvati preskoke ili preboje prema njima. To će se dogoditi ako je taj pad napona veći od udarnog napona kojim se izolacija voda ispituje. Takav preskok nazivamo »povratni« preskok, za razliku od onoga koji smo prije razmatrali, a kojemu je bio razlog povišenje napona na faznim vodičima. No, to je za izolaciju nadzemnih vodova svejedno; ona će biti ugrožena i od normalnog preskoka i od povratnog preskoka jer kroz taj ionizirani kanal mogu dalje teći struje tjerane pogonskim naponom i oštećivati izolatore i, u krajnjemu, ugroziti sigurnost pogona.

Kad udari grom u zaštitno uže, struja će groma njime odlaziti u zemlju na više mjesta, preko više stupova, a ne samo jednoga i njezina će raspodjela ovisiti o mnogo faktora, pa među ostalim i o broju zaštitnih užeta. Ali za naša daljnja razmatranja uzmimo opet samo dio stru-

je groma koja neka teče samo jednim određenim stupom u zemlju i koja neka se vremenski mijenja pa je označimo opet s i_s . Rekli smo da će ta struja stvarati padove napona na stupu, i to induktivni pad napona $L_s \cdot (di_s/dt)$ na induktivitetu stupa L_s i omski pad napona $i_s R_s$ na otporu uzemljenja R_s . Zbroj tih padova napona u svakom nam trenutku daje napon stupa prema zemlji za vrijeme dok traje odvođenje struje groma. Takav način određivanja napona na vrhu stupa izgleda još uvijek relativno jednostavan, i svodi se na računanje napona na vrhu bilo kakva drugog objekta koji na sebi ima gromobransku instalaciju. Ali kad pažljivije promotrimo analitički izraz (10.4), koji nam daje napon na vrhu stupa, odmah će se opaziti da taj napon ne ovisi samo o jačini i obliku struje groma nego i o faktoru samoindukcije L_s i otporu uzemljenja R_s . Dakle, osim karakteristika struje groma za računanje tog potencijala valja naći parametre (karakteristike) stupa i uzemljivača. Moglo bi se čak reći da je te parametre važnije točno poznavati od oblika i jačine struje groma. Jer, na njih, eventualno, možemo utjecati konstrukcijom stupa i načinom uzemljenja, ali ne možemo lako utjecati na jačinu i oblik struje groma i na njezinu raspodjelu po stupovima.

Međutim, točno utvrđivanje koeficijenta samoindukcije L_s nije lako, a još manje je mjerodavno određivanje otpora uzemljenja R_s pomoću klasičnih metoda mjerenja. Ti su parametri kod stupova na stvarnim dalekovodima drukčiji od onih koje dobivamo računanjem ili mjerenjem na modelima. Zato, ako se priđe računanju napona na vrhu stupa s ne sasvim točnim parametrima, dobivenima na modelima, dolazimo do približnih rezultata koji uvijek ne moraju zadovoljavati.

Jedan od glavnih razloga zbog kojih je teško ustanoviti induktivitet L_s stupa je taj što se glavni magnetski tokovi koji nastaju od pogonskih struja i struja groma nalaze između zaštitnog užeta i faznih vodiča koji vise na izolatorima, a stup je samo jedan kraći odvojak zaštitnog užeta. Te magnetske i elektrostatičke prilike, na tom mjestu su zbog toga tako složene da se nisu mogle, uz sve nastojanje, dosad teorijski obuhvatiti. Ni ispitivanja na modelima ne daju pravu sliku o onome što se događa u stvarnosti, iako se na tome danas mnogo radi. Jedino što bi moglo pružiti pravu sliku o onome što se zbiva bila bi ispitivanja na stvarnim stupovima za vrijeme prolaska struje groma. A to nije lako ostvariti.

Drugi je problem nalaženje otpora uzemljenja R_s . Naime, pri prolasku struje groma uzemljivači sa zemljom ne pružaju takav otpor kakav bi pokazali da kroz njih protekne obična izmjenična struja frekvencije od 50 Hz. To se događa iz dva razloga.

Prvi je već u prethodnim poglavljima u osnovi protumačen. Naime, taj uzemljivač sam po sebi ne obuhvaća samo omski otpor i odvod nego se može govoriti da ima i induktivnog i kapacitivnog otpora, makar oni bili i male vrijednosti. To ovisi o geometrijskom obliku uzemljivača, a i o vrsti tla gdje je on ukopan. Zapravo se uzemljivač može električki zamisliti kako smo vidjeli, kao složena impedancija. Za prolaske nekih oblika i veličina struja sva četiri parametra nekog uzemljivača ne moraju dolaziti do izražaja, ali prilikom prolaska struje groma, koja se može shvatiti kao vrlo jaka struja visoke frekvencije (od 5 do 50 kHz), neke od tih veličina nisu zanemarive. Zato će uzemljivač s okolišnom

zemljom pružiti struji groma jedan otpor, a običnoj izmjeničnoj struji sasvim drugi otpor. Još nekako, to različito ponašanje uzemljivača radi raznih frekvencija struja groma i obične struje može se relativno dosta dobro ispitivati na modelima. Pa kad bi se samo takvi problemi pojavljivali, onda bi se iz opažanja na modelima dalo zaključivati o ponašanju uzemljivača u praksi. Međutim, druge teškoće nastaju pri tim istraživanjima zato što se na modelima ne mogu simulirati pojave pri prolasku struja visoke frekvencije, ali i velikih jakosti. Naime, struje groma velikih jakosti stvaraju prolazeći kroz uzemljivač i zemlju velike razlike napona koje mogu dovesti do lokalnih proboja unutar tla. Te probojne staze tako formirane u okolišu uzemljivača smanjuju ukupnu impedanciju uzemljivača i sve skupa zato postaje vodljivije, pa s gledišta odvođenja ne bi trebalo biti problema. Ali, iako taj proces traje kratko, često se događa da se zbog tih proboja oko uzemljivača okolišna zemlja pretvara u staklo, osobito onda ako je sadržavala primjese silicija. To staklo nakon prolaska struje ostaje, pa obrnuto onome malo prije: zemlja oko uzemljivača postaje izolator i time se ukupni otpor uzemljenja jako povećava. Te se pojave ne mogu ispitivati na modelima, nego bi ih valjalo ispitivati na stvarnim uzemljivačima.

Kako vidimo, pri određivanju parametara L_s i R_s nailazimo na teškoće koje nije lako svladati. To dovodi do toga da nam rezultati računanja napona na vrhu stupa nisu sasvim pouzdani. Naravno da se onda može i pogriješiti u ocjeni hoće li doći do povratnog preskoka ili ne.

11. Neka praktička razmatranja kad štitimo nadzemne vodove

U ovom će se poglavlju iznijeti načelna gledišta koja bi trebala poslužiti kao osnova prilikom projektiranja zaštite nadzemnih vodova. Naravno da ova opća rješenja nije lako primjenjivati svugdje jer se prilike mijenjaju.

Nadzemni vodovi, koji prekrivaju veći teritorij, negdje se kreću mjestima gdje često udaraju gromovi, a negdje se kreću pravcima gdje su manje izloženi takvim izbijanjima. To se događa i onda kada se oni nalaze na jednom području prilično izjednačene izokerauničke razine. U svakom slučaju, bilo bi zbog toga, od interesa znati broj udara groma na četvorni kilometar površine.

Nešto što je još od velike važnosti, da bi se principi zaštite od atmosferskih prenapona mogli dobro primijeniti, je poznavanje i evidentiranje šteta ili kvarova koje su gromovi prouzrokovali na nekom području, a posebno na nekom elektroenergetskom sistemu. Tako sređeni statistički podaci vrlo često ne postoje na jednom mjestu, nego, ako ih ima, onda su oni sakupljeni za različite druge svrhe kao npr. radi osiguranja kod osiguravajućih zavoda itd. To stvara posebne poteškoće, jer se tada ne može ocijeniti stepen ugroženosti od groma, što je vrlo važno prilikom projektiranja prenaponske zaštite. Međutim, ako se radi o elektroenergetskim sistemima nazivnih napona do 110 kV, možemo ipak uzeti, prema podacima koji su do sada sakupljeni, da 70—80% svih kvarova, koje prouzrokuju gromovi nastaju na nadzemnim vodovima, a da tek 15—20% kvarova nastaje na električnim postrojenjima. Dakle, vidimo da su nadzemni vodovi mnogo više ugroženi od postrojenja pa je vrijedno razmatrati njihovu zaštitu. Možda bi nas relativno jednostavna teoretska razmatranja krivo navela na zaključak, da je i praktična primjena zaštite nadzemnih vodova pomoću zaštitnog užeta isto tako jednostavna.

Međutim, u praksi to nije tako, nego je mnogo složenije. Istina, zaštitno uže nije teško ispravno postaviti i tom prvom zahtjevu, recimo, da je lako udovoljiti, iako to može tražiti veće ili manje troškove; ali pretpostavimo, da se dobro izabrani zaštitni kut, može i postići na ekonomičan način. Problemi se ipak javljaju tada, kada se pokušava udovoljiti daljnjem zahtjevu da otpor uzemljenja zaštitnog užeta ili otpor uzemljenja stupa bude u određenim izračunatim granicama. Taj se problem javlja zbog toga što cijelo zemljište kuda prolaze dalekovodi nije

jednako vodljivo, odnosno što zemljište ima negdje specifični otpor $\rho = 100 \Omega\text{m}$, a negdje taj specifični otpor iznosi i $1\,000 \Omega\text{m}$ i $2\,000 \Omega\text{m}$, pa čak i $10\,000 \Omega\text{m}$, tamo gdje je vrlo kamenito tlo. Naravno da se na takvom zemljištu ne mogu postizavati na svakom stupu nikakvim uzemljivačima zadovoljavajući mali otpori uzemljenja.

No, tada tek nastupaju neželjene posljedice o kojima smo prije govorili. Naime, na tako velikim otporima uzemljenja nastaju veliki padovi napona koji zapravo dovode stup i zaštitno uže na vrlo visoki potencijal, koji može dovesti do preskoka preko izolatorskih lanaca prema faznim vodičima koji za to vrijeme ostaju na nižem potencijalu. Te preskoke, kako znamo, nazivamo povratnim preskocima, a moglo bi se reći da su to praktički direktni udari groma u fazne vodiče. To je vrlo opasno, jer tada nastaju zemljospojevi ili kratki spojevi već prema tome da li je mreža uzemljena ili neuzemljena. U jednom i u drugom slučaju taj kontakt kojega stvaraju eventualni preskoci, može dovesti do električnog luka koji može oštetiti izolatorske lance dalekovoda. Takav luk obično duže traje jer njega u stvari podržava napon koji tjera dalje izmjeničnu struju iz mreže. Prenaponi izazvani udarom groma to ne bi mogli podržavati jer oni kratko traju. Npr. električno polje, koje podržava električni luk iznosi za izolaciju 2 K 170/280 koja se nalazi normalno na nadzemnim vodovima 30 kV-ne mreže je:

$$E = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot \ell_z} = \frac{30}{\sqrt{3} \cdot 0,34} = 50,94 \text{ kV/m}$$

U — linijski napon (a uzet je za 30 kV-tnu mrežu)

ℓ_z — visina od 2 članka izolatora K 170/280 koja iznosi približno $2 \times 0,17 = 0,34 \text{ m}$

To je vrlo jako električno polje i može podržavati električni luk, jer se računa da jače polje od 5 do 10 kV/m to može učiniti. Dakle u našem slučaju 30 (35) kV-ne mreže, električni luk može biti vrlo opasan za izolaciju nadzemnog voda ($50 \text{ kV/m} \gg 5 \text{ kV/m}$).

11.1. Mjere kojima se smanjuju povratni preskoci

Razloge za povratne preskoke ne treba tražiti samo u većim ili manjim otporima uzemljenja R_s stupa, odnosno zaštitnog užeta. Naime, broj povratnih preskoka nije samo ovisan o većem ili manjem otporu uzemljenja nego je nadalje ovisan i o većoj ili manjoj struji groma koja prolazi kroz stup ili dozemnim užetom, dalje kroz uzemljenje stupa. Kada su se npr. mjerile struje koje prolaze kroz stup onda se približno utvrdilo da je 65% od ukupnog broja udara groma u dalekovod izazvalo struje u stupu manje od 15 kA, zatim da je 80% od svih udara groma izazvalo struje u stupu manje od 20 kA itd. Struje u stupu su mjerene i kod 90%, 97% i 99% od ukupnog broja udara groma. Svi rezultati mjerenja su navedeni u tablici 11.1.

Tablica 11.1. Izmjerene struje u stupu

Jakost struje u stupu i_s u (kA)	15	20	30	40	50	60
Postotak od ukupnog broja udara groma	65	80	85	90	97	99

Kad ove struje prolaze stupom one stvaraju padove napona, ne samo na otporu uzemljenja R_s , nego i na induktivitetu stupa L_s što pogoršava još više situaciju, pogotovo u nekoliko prvih mikrosekunda dok ne prođe čelo strujnog vala.

Ranije se smatralo da je za ocjenu opasnosti od povratnih preskoka dovoljno uzeti u razmatranje samo pad napona na omskom otporu uzemljenja stupa, koji iznosi:

$$U_s = I_s \cdot R_s \quad (11.1)$$

Iz toga slijedi, ako ne želimo da dođe do povratnih preskoka, odnosno ako ih hoćemo spriječiti, da uz unaprijed odabranu čvrstoću izolacije U_i i unaprijed očekivanu struju groma I_s , otpor uzemljenja stupa R_s mora zadovoljiti uvjet:

$$R_s \leq \frac{U_i}{I_s} \quad (11.2)$$

Međutim, novija istraživanja u svijetu odbacuju takva pojednostavnjena gledanja na zaštitu od povratnih preskoka i pokazuju, da kod udara groma u stup pad napona na uzemljivaču čini samo jedan manji dio u ukupnom naponu na izolaciji stupa.

Tako, prema npr. ruskim izvorima, u momentu direktnog udara groma u stup ili u zaštitno uže na izolaciji stupa vlada neki ukupni napon, koji je rezultat slijedećih utjecaja:

a) Inducirani prenaponi

Za vrijeme putovanja lidera groma prema zemlji prikupljaju se na vodu ispod njega pozitivni naboji, vezani električnim poljem negativnih naboj (u većini slučajeva) lidera groma. U momentu proboja zračne izolacije između lidera i zemlje, dakle u momentu udara groma u vod ili u zemlju kraj voda, nestaje električno polje stvoreno nabojima lidera, pozitivni naboji na vodičima prestaju biti vezani i kreću se duž voda u obliku dvaju putnih valova, lijevo i desno od mjesta proboja. Kao rezultat tog procesa potencijal vodiča se povisuje i na vodu se kreću prenaponi inducirani elektromagnetskim poljem struje groma. Za ocjenu utjecaja elektromagnetskog polja kanala groma na dalekovod bit će nadalje posebno razmotrene električka i magnetska komponenta induciranih napona. Treba reći da pri udaru groma u zemlju prenaponi, indu-

cirani u vodičima dalekovoda, u pravilu ne prelaze 300—400 kV i prema tome nisu opasni za izolaciju dalekovoda 380 i 220 kV, pa niti za izolaciju dalekovoda 110 kV. Što je bliže mjesto udara groma vodičima dalekovoda to će i inducirani prenaponi biti veći, a najveću vrijednost postižu pri udaru groma neposredno u stup, kod čega je kanal groma u maksimalno mogućoj mjeri približen vodičima.

Električna komponenta induciranog napona definira se potencijalom na vodu, stvorenim vanjskim poljem i reakcijom voda na djelovanje tog polja, koja se manifestira dijeljenjem naboja na vodu i njihovim kretanjem na razne strane. Veličina električke komponente, na vodu koji je zaštićen zaštitnim užetom, može se odrediti po formuli

$$U_{ie(t)} = \frac{0,1 \cdot a \cdot h_v}{\beta} \ln \frac{(vt + h_s) \sqrt{(vt + \Delta h)(vt - H)}}{(1 + \beta^2) + h_s \sqrt{\Delta h \cdot H}} \quad (11.3)$$

a — strmina struje groma

h_v — visina zavješanja vodiča

h_s — visina stupa

v — brzina svjetla

β — relativna brzina rasprostiranja glavnog naboja u kanalu groma u odnosu na brzinu svjetla

$H = h_v + h_s$

$\Delta h = h_s - h_v$

Na vodu koji je zaštićen zaštitnim užetom, situacija je nešto drugačija. Za vrijeme kretanja lidera groma prema zemlji se i na zaštitnom užetu, jednako kao i na vodičima, prikupljaju naboji, koji se nakon udara groma oslobađaju i putuju na obje strane duž zaštitnog užeta. Takva situacija je znatno povoljnija, jer je napon na izolaciji manji za iznos potencijala zaštitnog užeta. Dakle, prolaz struje po zaštitnom užetu dovodi do smanjenja električke komponente induciranog napona na vodičima, koja u tom slučaju može biti određena po formuli:

$$U_{ie} = U_{ie(t)} \left(1 - k \frac{h_{zu}}{h_v} \right) \quad (11.4)$$

k — koeficijent veze između zaštitnog užeta i vodiča

h_{zu} — visina zavješanja zaštitnog užeta

Može se izračunati da npr. za dalekovod 330 kV na stupovima portalnog tipa, zaštićen na cijeloj dužini sa dva zaštitna užeta, električka komponenta induciranog napona čini oko 30% ukupne veličine napona na izolaciji.

Magnetska komponenta induciranog napona sastoji se iz dva dijela, prvog koji je određen strujom koja kod direktnog udara groma prelazi kroz stup, i drugog koji je određen strujom u kanalu groma. Ovi dijelovi magnetske komponente su jednakog reda veličine. Ukupna magnetska komponenta induciranog napona može se odrediti njihovom sumom:

$$U_{im(t)} = L_s \frac{di_s}{dt} + M_k \frac{di_{gr}}{dt} \quad (11.5)$$

- L_s^v — induktivitet dijela stupa čija je duljina jednaka visini zavješanja vodiča
 M_k^v — međusobni induktivitet između kanala groma i petlje vodič—zemlja
 i_s — struja koja prolazi kroz stup
 i_{gr} — struja u kanalu groma

Veličina magnetske komponente na dalekovodima 330 kV s portalnim stupovima i s udarnim otporima uzemljenja stupova od 10Ω , čini također oko 30% ukupne veličine napona na izolaciji.

b) Pad napona na otporu uzemljenja stupa

U slučaju direktnog udara groma u uzemljeni stup dalekovoda, nakon višekratne refleksije vala od uzemljivača i vrha stupa, započinje proces tečenja impulsne struje kroz uzemljivač u zemlju. Na udarnom otporu uzemljenja nastaje pad napona:

$$U_s = I_s \cdot R_u \quad (11.6)$$

- I_s — struja kroz stup
 R_u — udarni otpor uzemljenja

Značajan podatak da ovaj pad napona kod udarnog otpora uzemljenja od 10Ω čini svega oko 25% ukupnog napona koji vlada na izolaciji. Dakako da je taj podatak vrlo grub, jer stvarni udio napona na uzemljivaču stupa u ukupnom naponu na izolaciji može od slučaja do slučaja biti vrlo različit. On zavisi od čitavog niza okolnosti, od visine i konstrukcije stupa, od veličine struje u kanalu groma, od dijela te struje koja prolazi kroz stup (što opet ovisi o valnom otporu zaštitnog užeta), od broja zaštitnih užadi, od veličine udarnog otpora uzemljenja itd. Međutim, ipak ovi orijentacioni podaci jasno pokazuju da se ne može samo taj napon uzeti u razmatranje prilikom ocjene sigurnosti voda od povratnih preskoka.

c) Napon na vodičima induciran strujom kroz zaštitno uže

Pad napona na otporu uzemljenja stupa, te magnetska komponenta induciranog napona, tjerat će dio struje kroz zaštitno uže prema susjednim stupovima. Ova struja, čija veličina osim od spomenutih napona ovisi i o otporu kruga zaštitno uže — stupovi, izazvat će također inducirane napone u vodičima, zavisno od veličine te struje i koeficijenta veze između zaštitnog užeta i vodiča:

$$U_{izu} = k \cdot i_{zu} \cdot Z_{zu} \quad (11.7)$$

Ovaj napon ima suprotni polaritet od polariteta induciranih napona u vodičima, razmatranim pod a).

d) Utjecaj pogonskog napona

Konačno treba spomenuti i utjecaj pogonskog napona dalekovoda na ukupni napon izolacije kod udara groma, koji doduše nije veliki, ali kod vrlo visokih napona ima značajnu veličinu. Taj se napon mijenja po sinusoidalnom zakonu i može u momentu udara groma imati bilo koju momentalnu vrijednost. S obzirom da će na trofaznomvodu u momentu udara groma bar jedna od faza imati polaritet koji se podudara s polaritetom napona u toj fazi induciranog od groma, to će za momentalnu vrijednost pogonskog napona U_p biti u toj fazi viši napon na izolaciji.

Dakle, u momentu direktnog udara groma na izolaciju dalekovoda djeluju različiti naponi. U skladu s opisanim procesom nastajanje induciranih prenapona, elektromagnetsko polje kanala groma inducira u vodičima napon pozitivnog polariteta, a pad napona na uzemljivaču, kao i struja groma, u većini slučajeva ima negativni polaritet. Kako ovi naponi djeluju sa suprotne strane na izolaciju to se njihovi utjecaji zbrajaju. Dodaju li se tome utjecaji momentalne vrijednosti pogonskog napona i induciranog napona u vodičima od struje u zaštitnom užetu, dobiti će se ukupni napon koji vlada na izolaciji stupa:

$$U_{iz(t)} = U_{ind} + U_s + U_p - U_{izu} \quad (11.8)$$

gdje je U_{ind} suma električke i magnetske komponente induciranog napona. Kada je napon $U_{iz(t)}$ veći od 50%-nog udarnog preskočnog napona izolacije, doći će do preskoka na izolaciji.

Ova razmatranja pokazuju da nisu opravdane, i pretjerano su optimističke ranije tvrdnje da preskoci na izolaciji neće nastupiti bude li otpor uzemljenja stupa manji ili jednak kvocijentu podnosivog napona izolacije i očekivane struje groma. No, to ne znači da otpori uzemljenja stupova smiju imati bilo koju vrijednost, nego da treba nastojati postići što nižu vrijednost otpora uzemljenja (jer se time ipak smanjuje vjerojatnost nastajanja povratnih preskoka), ali da u troškovima za izvedbu uzemljivača stupova ne treba pretjeravati.

Zbog toga je npr. u zemljama SEV-a na snazi preporuka za zaštitu nadzemnih vodova od groma, gdje su vrijednosti otpora uzemljenja stupova normirane u zavisnosti od specifičnog otpora tla:

$\varrho = \text{do } 100 \, \Omega\text{m}$	$R = \text{do } 10 \, \Omega$
$\varrho = 100 \dots 500 \, \Omega\text{m}$	$R = \text{do } 15 \, \Omega$
$\varrho = 500 \dots 1\,000 \, \Omega\text{m}$	$R = \text{do } 20 \, \Omega$
$\varrho = \text{veći od } 1\,000 \, \Omega\text{m}$	$R = \text{do } 30 \, \Omega$

Pri tome se jednake vrijednosti otpora uzemljenja propisuju za sve vodove, neovisno o njihovom nazivnom naponu, ili izolacionom nivou, što je logično, jer su vodovi višeg napona ugroženiji i važniji.

11.2. Mjere za sprečavanje povreda izolacije

Nije moguće, dakle, spriječiti nastajanje povratnih preskoka niti sa vrlo niskim vrijednostima otpora uzemljenja stupova, nego ih se time samo može učiniti manje vjerojatnima.

Preostaje potražiti druge načine zaštite izolacije vodova od povratnih preskoka. Za tu svrhu se paralelno izolatorskim lancima vodova postavljaju zaštitna iskrišta, ili tzv. zaštitne armature, čiji je preskočni napon manji od preskočnog napona izolacije voda, a osnovna im je zadaća da odmaknu nastali luk uslijed povratnog preskoka od izolatorskog lanca i tako spriječe povredu izolatora. Ova se zaštitna iskrišta redovito ugrađuju na vodovima 110 kV i višeg napona, a u sredjenaponskim mrežama samo na ugroženijim vodovima, istaknutim stupovima, točkama nehomogenosti izolacije i slično.

11.3. Zaštita izolacije nadzemnih vodova od 10 i 20 kV od izravnih udara

Većina nadzemnih vodova od 10 kV nalazi se na drvenim stupovima. To će ostati i dulje vremena jer će se vrlo teško i sporo preći na neku drugu vrstu stupova, npr. na metalne ili armiranobetonske, koji bi, sa stajališta zaštite od prenapona, bolje odgovarali. Eventualnim prijelazom na nazivni napon od 20 kV situacija se jednako tako neće posebno mijenjati jer će, barem u početku, mreža ostati na drvenim stupovima ako oni još budu u dobrom stanju. Izolacija će se doduše razlikovati od sadašnje, koja se sastoji od izolatora VHD—10 (D 135) i prijeći će na VHD—20 (D 175). Nešto će se tako povećati izolacijska razina nadzemnih vodova U_i , i to sa 75 kV na 125 kV, što bi nešto smanjilo mogućnost povratnih preskoka, kad bi oni imali dobro uzemljeno zaštitno uže. Ipak to neće bitno utjecati na smanjenje opasnosti pri udarima groma u 10 kV-ne i 20 kV-ne nadzemne vodove.

Nadzemni vodovi od 10 kV, i u budućnosti od 20 kV, veoma su rasprostranjeni po zemlji i zato su veoma ugroženi atmosferskim izbijanjima. A kad se jedanput ošteti njihova izolacija zbog takvih smetnji, pojavljuju se dosta velike teškoće u prijenosu električne energije.

Budući da nadzemni vodovi na drvenim stupovima nemaju zaštitno uže, svaki udar groma u dalekovod znači udar u fazni vodič. To uzrokuje odmah preskok na drugi susjedni vodič, a to se događa najčešće na stupu jer su tamo vodiči najbliži jedan drugome. U tome mogu stradati izolatori na kojima se ti vodiči nalaze jer onda teku struje kratkog spoja.

Katkad ne mora biti preskoka s jednoga faznog vodiča na drugi, ali stup dolazi pod vrlo visoki napon prema zemlji. Prema podacima iz literature taj napon zna iznositi od 1 000 do 3 000 kV, što su vrlo visoke vrijednosti.

Takav se naponski val, doduše, zbog korone brzo prigušuje kad se kreće nadzemnim vodovima, ali u blizini mjesta udara on stvara jako električno polje, koje previše napreže izolaciju voda. A budući da su izolatori na drvenim stupovima, tad i oni čine izolaciju voda, pa su i izolatori i drveni dijelovi stupa izloženi izbijanjima zbog tako visokih

napona na faznim vodičima. Poznato je da svako izbijanje može oštetiti vrh stupa.

Katkad su mogući i izravni udari groma u sam vrh stupa. Tad kroz stup teče jaka struja koja izaziva naglo isparavanje vlage, a to zna uzrokovati eksploziju i uništiti stup. Općenito svugdje gdje teče struja groma tijesnim prostorima, kao što su to u našem primjeru kapilare drvenog stupa, može doći do mehaničkog razaranja.

Idealna zaštita bilo bi zaštitno uže koje bi zaklanjalo fazne vodiče od direktnih udara groma i te izravne udare preuzimalo na sebe. Međutim, tu se javlja jedna teškoća. Mreže nazivnog napona od 10 i 20 kV imaju relativno slabu izolaciju. Podnosivi udarni napon izolatora VHD 10, na kojima su fazni vodiči 10 kV-ne mreže, svega je 75 kV (a 50%-tni preskočni napon iznosi 110 kV), a podnosivi udarni napon izolatora VHD 20, na kojima se nalaze fazni vodiči 20 kV-ne mreže iznosi 125 kV (50%-tni preskočni napon je 150 kV). Ta relativno slaba izolacija lako bi popustila kad bi se pojavili povratni preskoci. Da se to ne bi dogodilo, morali bismo postići vrlo male otpore uzemljenja zaštitnog užeta, koji za 10 kV-nu mrežu ne bi smjeli premašiti nikako iznos od:

$$R_s = \frac{U_i}{i_s} = \frac{110}{15} = 7,3 \, \Omega.$$

Za 20 kV-nu mrežu, uz jednaku sigurnost od 65%, oni ne bi smjeli prekoračiti otpor uzemljenja od:

$$R_s = \frac{U_i}{i_s} = \frac{150}{15} = 10 \, \Omega.$$

Doduše, tako male otpore uzemljenja lako je ostvariti pogotovo na zemljištu gdje specifični otpor nije veći od 200 do 300 Ω m. Ali, ako bismo htjeli postići tako male otpore uzemljenja u loše vodljivom tlu, bilo bi to skupo.

Dakle, kako vidimo, zaštitno uže koje bi eventualno dobro zaklanjalo fazne vodiče od neposrednog udara ne bi lako odvodilo struje groma, nego uz visoke cijene koštanja. Zato ono kao zaštita 10 kV-ne i 20 kV-ne mreže, na samo malo lošijem tlu, ne bi bilo preporučljivo.

Pa kad razmišljamo o zaštiti izolacije 10 kV-ne i 20 kV-ne mreže ne možemo donijeti jedno opće rješenje, nego valja rješavati zaštitu te izolacije samo na onim mjestima (odnosno stupovima) gdje smo opazili da se ona barem dva puta oštetila, a znamo da je to bilo zbog groma. Na tom će se mjestu postaviti željezni stup jer tad neće biti izbijanja na vrhu stupa ili rasprsnuća stupa pri izravnom udaru u njega. Prenaponi, pak, koji se pojavljuju na faznim vodičima češće će, doduše, uzrokovati preskoke preko izolatora jer je ukupna izolacijska moć smanjena. Ali zato stup mora biti dobro uzemljen kako bi se spriječili povratni preskoci nakon udara groma u njega.

Postavljanjem metalnog stupa, kako smo rekli, povećava se vjerojatnost preskoka, pa zato na njega treba ugraditi iskrišta. Hoće li se

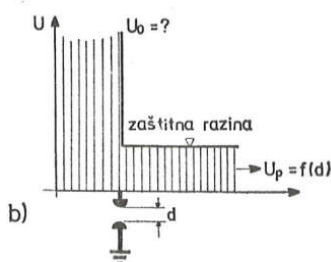
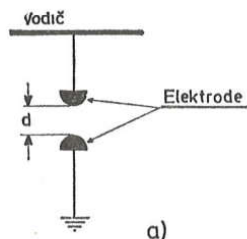
postaviti obično ili specijalno iskrište s gašenjem luka, ovisi o tome kolika je struja zemljospoja na tom mjestu. Ako je ona manja od 5 A, odgovarat će obična iskrišta, a ako je veća od 5 A, trebalo bi postaviti specijalna iskrišta koja gase nastali luk. Da bi se eventualno smanjili preskoci na metalnom stupu koji, kada se nalazi u nizu drvenih stupova, znači neko smanjenje izolacije dalekovoda, može se na metalnom stupu izolacija nešto povećati. Tako se za 10 kV-ne nadzemne vodove na takav stup postavljaju izolatori VHD 15 ili VHD 20 umjesto VHD 10. Još uvijek će prenaponi na tom mjestu biti manji nego što bi bili kad bi se naponski valovi kretali samo drvenim stupovima.

11.4. Jednostavna zaštitna iskrišta i njihovo djelovanje

Zaštitno iskrište je uređaj kojim se smanjuje amplituda naponskog vala. Ono se sastoji od dvije metalne elektrode na stanovitome međusobnom razmaku, a postavlja se između dijelova postrojenja koja su pod naponom i zemlje (sl. 11.1.a). Koliko god velika bila amplituda upadnog vala U_0 , iskrištem se nastoji postići njezino smanjenje na unaprijed određenu neopasnu vrijednost (sl. 11.1.b). Tu vrijednost nazivamo probojni napon iskrišta, odnosno zaštitna razina iskrišta, a ona ovisi o razmaku između elektroda. Što je razmak veći, to je zaštitno djelovanje iskrišta slabije, a što je on manji, njegov je zaštitni učinak bolji. Zaštitnu funkciju iskrišta možemo formalno usporediti sa zaštitnom funkcijom rastalnih osigurača. Za njih vrijedi, naime, pravilo: što je strujna nit tanja, oni djelotvornije štite postrojenje od jakih struja. U praksi se nastoji postići da zaštitna razina iskrišta U_0 bude najmanje 25% niža od izolacijske razine U_i štice opreme.

Naponski valovi koji obično nailaze veći su ili manji od probojnog napona upotrijebljenog iskrišta. Dok su tjemene vrijednosti naponskih valova manje od probojnog napona iskrišta, ono neće proraditi, nego će se ponašati kao izolator između vodiča i zemlje. Ako naiđu naponski valovi amplitude veće od probojnog napona iskrišta, nastat će proboj u zraku između elektroda iskrišta, pa će kroz tu vodljivu vezu naponski val biti odveden u zemlju (sl. 11.2.a). Ako je razmak između elektroda bio tako podešen da je iskrište propustilo naponske valove neopasne za izolaciju, a odvelo u zemlju one koji su opasni, onda je iskrište djelotvorno izvršilo svoju zaštitnu funkciju. To je dobra osobina iskrišta.

Međutim, kako je iskrište uređaj vrlo jednostavne konstrukcije, ono ima i mnoge nedostatke.



Glavni nedostatak je taj što se poslije odvođenja prenapona ne gasi električni luk između elektroda. To se događa

Sl. 11.1. Jednostavna iskrišta

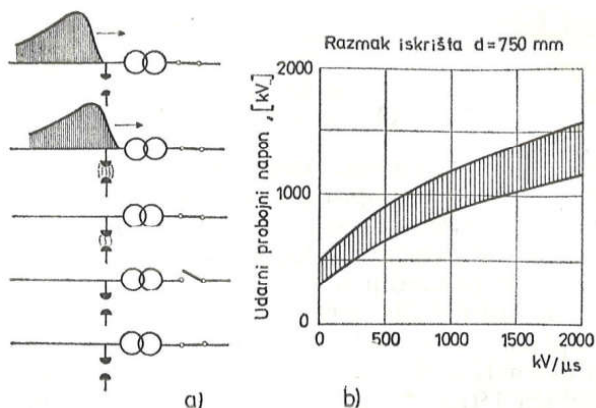
Sl. 11.2. Djelovanje iskrišta i njegova karakteristika

zato što je za vrijeme proboja nastao između elektroda ionizirani kanal kojim dalje teče struja što je tjera pogonski napon mreže. Praktički, takvo stanje odgovara kratkom spoju između vodiča i zemlje, pa treba prekidačem prekinuti vezu koja

napaja to mjesto kratkog spoja. Tek nakon gašenja luka ponovno će se ukopčati prekidač (sl. 11.2.a). Taj nedostatak stvara velike teškoće jer nastaje prekid dobave električne energije. U posljednje se vrijeme upotrebljavaju prekidači s automatskim ponovnim ukapčanjem, čime se mnogo ublažava ta manjkavost. Međutim, sama činjenica da za vrijeme rada iskrišta prolaze vodičem i zemljom jake struje je nepovoljna, pa treba razmotriti kako će djelovati relejna zaštita, uređaji za ponovno ukapčanje i drugi elementi cijelog sistema sa svojim karakteristikama.

Opet zbog jednostavne konstrukcije, ono ima još i svojih drugih slabih strana. Budući da se vođenje naponskog vala u zemlju izvodi kroz zrak između elektroda, nastaju teškoće zbog atmosferskih prilika. Kako je poznato, na visinu probojnog napona utječu tlak, temperatura i vlažnost zraka, pa je probojna vrijednost napona gotovo uvijek različita. Osim toga i valovi koji nailaze nemaju uvijek jednaku strminu, što opet mijenja visinu probojnog napona (sl. 11.2.b). Naravno, da takva nestabilnost vrijednosti probojnog napona utječe na sigurnost zaštite.

Kad val naiđe na iskrište određenom strminom, neće trenutno nastupiti proboj iskrišta, jer napon na njemu, zbog strmine, postepeno raste. Ono propušta kroz to vrijeme taj dio vala prema štićenom objektu. U trenutku kad napon na iskrištu dostigne vrijednost koja može izvršiti proboj zračnog sloja između elektroda, tek tad počinje naglo odvođenje preostalog dijela vala u zemlju. To naglo rušenje napona na nulu nije dobro jer je nastao odrezan val. Takav oblik vala koji se naglo mijenja, ne samo na čelu nego sada i na hrptu, može uzrokovati oštećenja na izolaciji opreme koju bi iskrište zapravo moralo zaštititi. Tom se prilikom posebno pojavljuju jaka naprezanja između zavoja na namotima nekog aparata ili stroja, pa čak i na drugim namotima koji su s njima magnetski povezani. To se zbiva zato što nagle promjene napona uzrokuju i jake promjene magnetskog polja. Zbog svih tih nedostataka što ih imaju iskrišta treba nastojati da ona što manje rade. Zato se ne preporučuje upotrebljavati iskrište na mjestima gdje očekujemo da će se pojaviti jaki unutrašnji prenaponi, koji bi slučajno svojim visokim vrijednostima napona potaknuli proradu tih iskrišta i time još više izazivali teškoće. Takvih mjesta u elektroenergetskim sistemima ima mnogo, ali da bismo obrazložili što se sve događa, izabrat će se dva takva kritična mjesta.





Sl. 11.3. Mjesta gdje se ne preporučuje priključiti iskrište

Kao prvo pretpostavimo da smo iskrište radi zaštite od posljedica atmosferskih prenapona postavili između prekidača i transformatora s uzemljenim zvjezdištem, kao što je to prikazano na slici 11.3.a. U svakom pogonu obavezno se događa da moramo prekidačem iskopčati i transformator u praznom hodu. Pri takvu isključivanju prekida se tok relativno male induktivne struje, ali se time oslobađa i magnetska energija prikupljena u namotima transformatora. Ona ne može nestati, nego će se pretvoriti u električnu energiju, pa zato između razmaknutih noževa prekidača i transformatora nastaju visoki prenaponi. Ako su oni dovoljno veliki, lako će se dogoditi da proradi iskrište smješteno u blizini i da u tom trenutku nastane kratki spoj sa zemljom. Prekidač s već razmaknutim noževima, koji je do tog trenutka prekidao slabu induktivnu struju, sada mora prekidati i vrlo jaku struju kratkog spoja. U tom slučaju u sklopki može ponovno nastati električni luk, koji će ponekad za nju u tom trenutku biti veliko opterećenje. Zato, ako sklopka nije konstruirana za takvu vrstu opterećenja, mogla bi biti oštećena. Tad nastaju neželjene smetnje u pogonu.

Drugi slučaj, koji pokazuje koliko valja biti oprezan pri upotrebi iskrišta na nekim mjestima, nalazimo na slici 11.3.b. Tu je postavljeno iskrište između prekidača i nekog dalekovoda. Kad moramo iskopčati dalekovod u praznom hodu koji je nadomješten jednim kondenzatorom, prekidač će prekidati male kapacitivne struje. No i tad dolazi do prenapona na razmaknutim noževima prekidača koji je opasan zbog proboja iskrišta i kratkog spoja sa zemljom. Prekidač je i pri tome jako opterećen pa se može oštetiti.

Upotreba iskrišta zna uzrokovati i više drugih teškoća. Tako, ako se dogodi da na jednoj mreži prorade u istom trenutku dva ili više iskrišta na različitim fazama, mreža će se naći u dvopolnom ili čak trolnom kratkom spoju. Dakle, kad se upotrebljavaju iskrišta, moramo paziti kako bi bila ona postavljena i podešena tako da, s jedne strane, štite od prenapona, a, s druge strane, ne bi stvarale teškoće u pogonu. To doduše nije lako postići, pa se zato svaki slučaj posebno temeljito razmatra.

11.5. Upotreba i vrste iskrišta

Osim što se zaštitno iskrište može upotrijebiti kao jedino sredstvo zaštite od prenapona, ono će poslužiti i kao dopunsko sredstvo zaštite uz odvodnike prenapona.

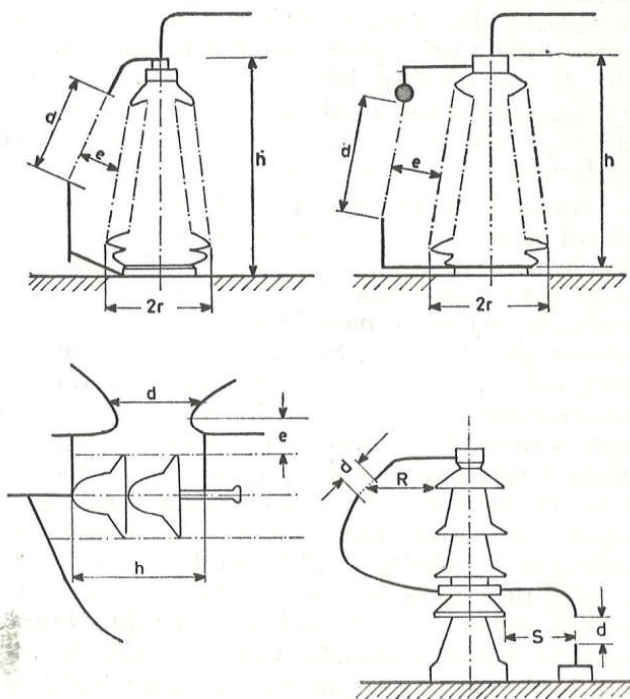
Kao jedino zaštitno sredstvo od prenapona upotrebljava se ono samo u energetske postojenja koja nisu mnogo izložena jakim atmosferskim praznjenjima i kod kojih nema visokih prenapona kod sklapanja. Kad je iskrište jedino zaštitno sredstvo, tad ga je preporučeno postaviti na stanovitoj udaljenosti od štice objekata, kako ne bi električni luk, koji se pri njegovoj proradi obavezno pojavljuje, oštetio štiti-

čene objekte. Katkad se izuzetno ipak iskrište postavlja na provodne izolatore aparata, a služi kao jedino sredstvo zaštite. Ako slučajno ispitujemo propisanim naponom taj aparat, razumljivo je da moramo za vrijeme ispitivanja skinuti iskrište, koje će poslije u pogonu služiti kao zaštita, jer bi na njemu nastao proboj.

Kao dopunskim zaštitnim sredstvom, uz odvodnik prenapona, iskrištem se posebno osigurava samo neki aparat, pa se ono i na njega postavlja. Tad razmak iskrišta treba podesiti tako da nastane proboj kod vrijednosti napona propisanoj za stupanj izolacije tog aparata ili na nešto malo višoj. Takvu zaštitu obično zahtijevaju aparati kojima je vanjska izolacija konstrukcijom pojačana zbog toga što se očekuje da će u pogonu biti oslabljena zbog vlage, prašine itd. U tim okolnostima, postavljenim iskrištima na samom aparatu zadatak je, da za vrijeme ispitivanja zaštite unutrašnju izolaciju što je konstrukcijom slabije izvedena. Razumljivije je da prilikom ispitivanja takva aparata ne treba skidati ta iskrišta. Iskrište koje je tako podešeno naziva se i iskrište za utvrđivanje stupnja izolacije, a za zaštitu od atmosferskih prenapona takav aparat mora biti obavezno zaštićen ventilnim odvodnicima prenapona.

Osim zaštite od prenapona, što je najvažnija funkcija iskrišta, ono služi i za usmjeravanje električnog luka, koji nastaje kod nekog aparata prilikom proboja prema zemlji. Treba tad nastojati da oblik postavljenih iskrišta omogući kanalu električnog luka tendenciju odvajanja od površine izolacije aparata. Potrebni razmak između kanala električnog luka i površine izolacije mora biti tako velik da taljivi dijelovi metala i toplina luka ne oštete površinu izolacije. Tako, ako je »d« razmak između elektroda iskrišta, onda općenito treba da razmak između kanala luka i površine izolacije bude otprilike 0,7 za niže, a 0,3 d za više pogonske napone. To se postizava oblikom elektroda. Često se iskrišta s takvim zahtjevima postavljaju na provodne izolatore i na izolatore koji nose nadzemne vodove.

Uz sve ostale funkcije, katkad iskrište služi i za formiranje povoljnije raspodjele električnog polja. Time



Sl. 11.4. Oblici iskrišta

se dobiva povoljnija raspodjela napona i sprečavaju razne vrste izbijanja (korona). Iskrišta kojima je svrha usmjeravanje električnog luka i raspodjela električnog polja također se ne skidaju za vrijeme ispitivanja aparata.

Sasvim općenito, s obzirom na različite zadatke, može se reći da djelotvoran rad nekog iskrišta ovisi o ispravno odabranom razmaku između elektroda, o obliku elektroda i njihovu položaju prema izolaciji te o materijalu od kojega su elektrode izvedene.

Da bi se udovoljilo svim tim zahtjevima, iskrišta su standardizirana, pa se, prema potrebi, različite konstrukcije prilagođuju standardima.

Grubo uzevši, konstrukcije svih zaštitnih iskrišta mogu se podijeliti na one kod kojih su elektrode u obliku jednog ili dva para štapova i na iskrišta kojima su elektrode u obliku rogova. Ima i drugih konstrukcija iskrišta, no one služe za specijalne svrhe.

Na slici 11.4. prikazani su oblici nekih iskrišta. Te konstrukcije preporučila je Međunarodna elektrotehnička komisija i prihvaćene su u mnogim zemljama. Na pojedinim iskrištima označene su i dimenzije na koje treba paziti jer su od važnosti u odabiranju zaštitnog iskrišta. Sve te naznačene dimenzije eksperimentalno se određuju i prilagođuju vrstama aparata koje treba štititi.

11.6. Ispitivanje i podešavanje zaštitnih iskrišta

Vidjeli smo iz dosadašnjih izlaganja da je iskrište uređaj po konstrukciji vrlo jednostavan, ali je njegova upotreba relativno vrlo složena i mnogostruka. Zato je dobro upozoriti na neke okolnosti što ih valja uzeti u obzir pri ispitivanju tog uređaja, kako bi ono poslije dobro radilo. Za sva iskrišta, bilo kakva oblika i bilo kakve namjene, najvažnije je ustanoviti točnu udaljenost između njihovih elektroda. Taj se razmak određuje redovito u visokonaponskim laboratorijima, a rjeđe na već postavljenim iskrištima u pogonu.

Razmak se utvrđuje tako da se na neko iskrište primijeni više puta udarni naponski val stanovite veličine i standardnog oblika od $1,2/50\mu\text{s}$. Ako je razmak između elektroda velik, neće biti preskoka između njih, pa ga zato treba smanjivati sve dok se između elektroda sasvim ustale preskoci. Taj iznos napona nazivamo 100%-tni preskočni napon, a označujemo ga s $U_{100\%}$. Svaki razmak između elektroda ima posebno svoj 100%-tni preskočni napon. Tako dobivamo neku krivulju koja pokazuje karakteristiku tog iskrišta. Tu karakteristiku nije lako utvrditi jer ona osim o razmaku elektroda ovisi još i o njihovu obliku te o njihovu položaju i udaljenosti od susjednih predmeta, bili ti predmeti uzemljeni ili ne. Prema tome, za svako iskrište posebno, treba ustanoviti preskočne napone, uzimajući koliko je najviše moguće u obzir sve one okolnosti u kojima će to iskrište raditi. No, kad promislimo da smo za neko iskrište utvrdili preskočne napone, to još ne znači da će ono poslije i u pogonu pružati sigurnu zaštitu nekom uređaju. Naime, na postrojenjima se pojavljuju putni naponski valovi različitih vrijednosti i strmina, a ne standardni valovi kojim smo iskrište ispitivali. Zato se može očekivati

da preskočni napon nekog iskrišta bude mnogo veći od onoga što bi mi inače dopustili da bude.

Pomoću udarnog napona provjeravamo rad iskrišta za vrijeme kad u elektroenergetskim postrojenjima djeluju atmosferski prenaponi. Ali iskrište je stalno ukopčano, pa će se dogoditi da razmak između njegovih elektroda bude izložen prenaponima frekvencije od 50 Hz, na koje iskrište u pravilu ne smije proraditi. Zato se ona ispituju i naponom industrijske frekvencije koji se označava s U 50 Hz. Jednako tako ona ne smiju proraditi na druge vrste unutrašnjih prenapona. Međutim, i nakon svih ispitivanja i provjera njihova rada može se dogoditi da iskrišta prorade i kad nema oluje i da time prekinu rad normalnog pogona. U tim okolnostima kad nije moguće uskladiti zahtjev da iskrište štiti od prenapona, a da time ne narušava normalni rad pogona, onda ga kao zaštitu ne možemo upotrijebiti, nego ćemo umjesto njega postaviti ventilne odvodnike.

Da bismo te teškoće koje se pojavljuju prilikom upotrebe iskrišta što uspješnije rješavali, dobro je u početku iskrišta podesiti na nešto manji razmak od onoga što smo projektima i ispitivanjima odredili. Na osnovi njihova rada i stečenog iskustva, može se poslije, u svakom pogonu posebno, taj razmak u određenim granicama povećati. Naravno da pri tom pomicanju treba uzeti u obzir zahtjeve što sigurnije zaštite i ne dopustiti da razmak između elektroda postane prevelik, jer bi time izolacija koju štitimo bila ugrožena. Naime, mora se uvijek paziti na to da preskočni napon iskrišta $U_{100\%}$ ostane 25% niži od podnosivog napona izolacije U_i , jer time osiguravamo djelotvornu zaštitu.

Ako taj razmak ipak moramo povećati, onda obavezno $U_{100\%}$ ostaje barem 10% niži od podnosivog napona izolacije U_i . Iz dosadašnjih izlaganja možemo zaključiti da dobar rad iskrišta ovisi o mnogo faktora i da se ono prije mora ispitati u laboratoriju ili na samom mjestu upotrebe. Međutim, za takva složena i precizna ispitivanja nemamo uvijek mogućnosti, pa njegove karakteristike ostaju nepoznate i nije nam lako odrediti razmak između elektroda za razne vrste iskrišta. Da bi se izbjegla neizvjesnost u tim prilikama, možemo se, kada tražimo razmak između elektroda za iskrišta u obliku štapova i onih u obliku rogova, poslužiti podacima u tablici 11.2. Ta su iskrišta namijenjena postrojenjima s najvišim pogonskim naponom samo do 38 kV, a njihova konstrukcija i dimenzije preporučene su jugoslavenskim standardima pa (JUS NBO 031) vrijede pretežno kad nadzemne vodove zaštite od atmosferskih prenapona.

Tablica 11.2. Razmaci između elektroda iskrišta

Najviši napon mreže (kV)	Oblik elektroda	12	24	38
Razmak između elektroda (mm)	štapovi rogovi	40 ... 45 25	90 ... 100 35	140 ... 150 90

Iskrišta kao jedina zaštita od prenapona katkad se upotrebljavaju u elektroenergetskim postrojenjima nižih nazivnih napona, pa su u tab-

lici razmaci elektrode za svaki nazivni napon posebno. Njih postavljamo na te razmake samo na mrežama gdje su nadzemni vodovi zaštićeni zaštitnim užetom ili je ono barem 1 km ispred postrojenja koje štiti. Kad bismo iskrišta upotrijebili na mrežama bez zaštitnih užeta, tad bi na njih mogli naići putni valovi velikih strmina, pa proboji između tako razmaknutih elektroda ne bi nastajali i iskrište ne bi štitilo postrojenje.

Kako smo u početku naših izlaganja ustanovili, iskrišta se dadu upotrijebiti i kao dopunsko zaštitno sredstvo, i to kad ona zaštite samo jedan aparat i kad služe za usmjeravanje električnog luka. Naravno da se tad njihove elektrode podešavaju na neki drugi način.

Ako ih upotrebljavamo za zaštitu samo jednog aparata, podesit ćemo ih na takav razmak da njegova izolacija bude zaštićena, a to znači na razmak koji će taj akarat zaštititi samo od napona viših nego ih njegova unutrašnja izolacija može izdržati. Iskrišta koja služe za tu svrhu nazvali smo iskrištima za utvrđivanje stupnja izolacije. I taj se razmak utvrđuje u laboratorijima, ali radi orijentacije i boljeg snalaženja u praksi možemo se poslužiti podacima u tablici 11.3.

Tablica 11.3. Razmaci između elektroda iskrišta

Najviši napon mreže (kV)	Oblik elektroda	12	24	38
Razmak između elektroda (mm)	štapovi rogovi	55 35	110 75	160 120

U tablici su razmaci elektroda za iskrišta kojima je namijenjen takav zadatak. Vidimo da su oni nešto veći od razmaka između elektroda iskrišta kojima se štiti cijelo postrojenje od atmosferskih prenapona. To je razumljivo jer ona prva moraju sniziti napon za 25%, tako da svi aparati budu zaštićeni od atmosferskih prenapona, a ne samo jedan od njih.

Kod iskrišta kojima se usmjerava električni luk ne bi bio u pravilu tako važan razmak između elektroda, nego njihov oblik. Međutim, kako su ona, i kao takva, sastavni dio nekog postrojenja, treba paziti na to da ne bismo, ne vodeći računa o razmaku između njihovih elektroda, poremetili normalni rad cijelog postrojenja. Zato se preporučuje da njihov najmanji razmak ne premaši vrijednosti u tablici 11.3.

11.7. Opće upute za upotrebu iskrišta

Iz dosadašnjih izlaganja zaključit ćemo da su iskrišta kao zaštitno sredstvo nesavršena i da se mogu upotrijebiti samo kao gruba zaštita. Ta činjenica nam ne dopušta da ih upotrebljavamo u svim prilikama i pogonskim okolnostima da ne bi bila više štetna nego korisna.

Ako se njima poslužimo na mrežama s izoliranom nul-točkom, tad će svaka prorada iskrišta izazvati jednopolni zemljospoj. To ne bi možda, samo po sebi, bio tako veliki problem kad se luk na iskrištu ne bi

katkad periodički palio i gasio i time uzrokovao prenapone u mreži. Zato iskrišta u takvim mrežama moramo oprezno upotrebljavati ili to uopće ne smijemo onda kad struja zemljospoja prekoračuje vrijednosti od 5 do 10 A, jer se za veće vrijednosti struje luk neće lako sam od sebe ugasiti. U takvim prilikama bolje je pokušati s iskrištima u obliku rogova jer se na njima lakše gasi luk nego na onima kojima se elektrode sastoje od štapova. Općenito uzevši, za iskrišta u obliku štapova ili rogova vrijedi pravilo da ih kao zaštitu od prenapona upotrebljavamo kad je izolirana mreža opskrbljena uređajima što odmah nakon prorade iskrišta iskapčaju dionicu mreže gdje je zbog rada iskrišta nastao zemljospoj. Tada ih možemo upotrebljavati i u mrežama gdje struje jednopolnog zemljospoja premašuju vrijednosti od 10 A. No, kako se iskrišta sastoje od elektroda ograničena presjeka, ona se ne smiju ni mnogo opterećivati jakim strujama jer bi se mogla oštetiti. Tako iskrište u obliku štapova ne odgovara mrežama s izravno uzemljenom nul-točkom gdje struje jednopolnoga kratkog spoja dosežu vrijednosti veće od 300 A, a jačina struja trolnoga kratkog spoja premašuje 500 A. I u takvim okolnostima iskrišta su u obliku rogova mnogo otpornija i manje su osjetljiva na utjecaj električnog luka, pa se zato više preporučuju.

Iskrišta su ne samo jednostavnija nego su mnogo i jeftinija od ventilnih odvodnika prenapona. Ali pri njihovoj upotrebi moramo računati s tim da ćemo imati česte ispade pojedinih dijelova električne mreže gdje su ona ugrađena. Zato ih nije baš poželjno upotrebljavati u radijalnim mrežama jer njihova prorada znači i ispad jednoga cijelog sektora. Bolje odgovaraju zamkastim mrežama, gdje pri proradi iskrišta ne ispadaju veći sektori mreže.

Električni luk koji nastaje između elektroda iskrišta opasan je za druge aparate u njegovoj blizini, zato iskrišta treba ugraditi na otvorenim prostorima. Kad iz tih razloga udaljujemo iskrište od drugih aparata, moramo paziti da se opet ne udaljimo previše jer ono štiti područje od 2,0 do 30 m kad je priključeno na nadzemnim vodovima, a od 50 do 100 m na kabelskim mrežama. Taj kriterij vrijedi samo kad na mrežama nema ventilnih odvodnika. Ako su oni glavna zaštita od atmosferskih prenapona, iskrište možemo još više udaljiti od aparata koji štiti-mo, a razmak između njihovih elektroda možemo povećati do vrijednosti u tablici 11.2.

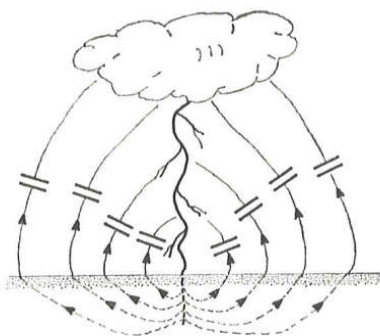
Moramo još na kraju spomenuti da jedna elektroda iskrišta u svim slučajevima mora biti dobro uzemljena i da otpor uzemljenja ne smije prekoračiti dopuštene granice kako ne bi bilo povratnih preskoka.

12. Prenaponi nastali udarom groma u kabelima koji su položeni u loše vodljivom tlu i zaštita

Poznato je iz načina kretanja pojave atmosferskog izbijanja da je zemlja važni dio puta struje groma. Nipošto se prilikom udara groma u tlo ne smije isključiti i taj dio strujnog kruga.

Kad prolazi struja kroz tlo, moramo razlikovati je li ono homogeno ili je nehomogeno. U homogenom i dobro vodljivom tlu struja će se groma kretati kao na slici 12.1. Vidimo da će se ona lijevo i desno od mjesta udara ravnomjerno raspršivati zemljom. Ona će, naime, kroz homogeno tlo, pogotovo ako ono ima mali specifični otpor, sa svake strane mjesta udara naći sebi put. Pri tome što je najvažnije, struja se neće kretati eventualno položenim metalnim strukturama koje bi se našle u blizini mjesta udara. Te metalne strukture mogu biti i metalni plaštev i energetskih ili signalnih kabela.

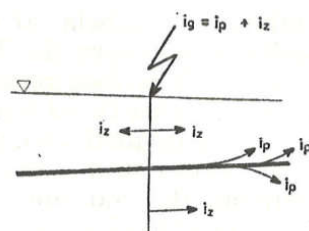
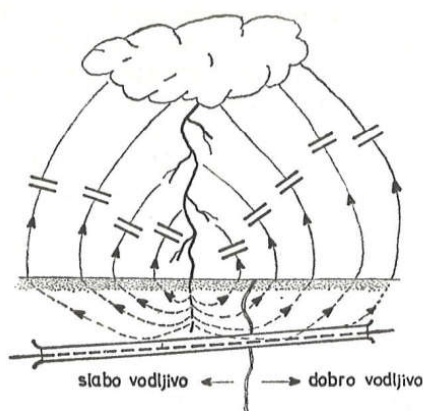
Ako je tlo nehomogeno, odnosno ako je dio tla maloga specifičnog otpora, a drugi ima veliki specifični otpor, kao što je to na slici 12.2, sigurno će se struje groma nastojati kretati tлом koje je manjega specifičnog otpora. Ako je slučajno ispod mjesta udara kabel s metalnim plaštem, pa on prolazi kroz ta dva različita sloja zemlje, struja će, tražeći sebi lakši put, sigurno ući u plašt kabela i strujati njime prema tlu koje ima manji specifični otpor.



Sl. 12.1. Udar groma u homogeno tlo

Dakle, tu je zapravo kabelski plašt omogućio lakši put struji groma u okviru njezina prirodnoga strujnog kruga. U izvjesnom smislu moglo bi se reći da plašt kabela pri tome kratko spaja mjesto udara groma s dobro vodljivim tлом. Naravno, tad kabelskim plaštem mogu teći i velike struje.

Takav razvoj događaja posebno se može očekivati kad kabel, zbog svoje duljine, povezuje više slojeva dobro i loše vodljive zemlje. Plaštem kabela ne mora proći ukupna struja groma, ali dio



Sl. 12.2. Udar groma u nehomogeno tlo

nje će biti veći što je zemljište u kojem je ukopan kabel slabije vodljivo i što je kabel bliži mjestu udara. Skicama na slici 12.2. prikazana je podjela struje groma kroz kabelski plašt i zemlju. Iz tako zamišljene raspodjele dade se zaključiti da će plaštem teći struja:

$$i_p = i_g - i_z. \quad (12.1)$$

Pri tome je i_p dio struje groma što će prolaziti plaštem kabela, i_g je ukupna struja groma pri udaru, a i_z dio struje groma koji se neće kretati plaštem, nego drugim putovima kroz tlo.

Osvrnimo se najprije na zbivanja nekoliko trenutaka prije ulaska struje u plašt. Vidi se da se pri izbijanjima u zemlju struja groma raspršuje u različitim pravcima. Ta će struja prolazeći tlom stvarati razlike potencijala. Potencijal u točki T, koja bi bila udaljena od mjesta udara za dužinu ℓ , možemo izračunati iz izraza:

$$U_T = \hat{i}_g \frac{\rho}{2 \pi \ell}. \quad (12.2)$$

Tu smo s ρ označili po običaju specifični otpor zemlje, a s $\hat{i}_g$ tjeme-nu vrijednost struje groma.

Iz izraza (12.2) uočavamo da će potencijal na nekoj udaljenosti od mjesta udara biti to veći što su amplituda struje groma i specifični otpor tla veći. Te razlike napona od točke do točke zemljišta, u okolici kabela, stvaraju proboje u tlu jer se pojavljuju jaka električna polja. Budući da se metalni plašt kabela nalazi na potencijalu daleke zemlje (potencijal nula), nastaje između plašta kabela i okolne zemlje velika razlika napona. Tad je moguće da tanka vanjska zaštitna izolacija bude probijena i da metalni plašt kabela poprmi vrlo visoki potencijal. Taj visoki potencijal tjera dio struje kroz metalni plašt.

No, kabel može biti više ili manje udaljen od mjesta udara. Ako je mnogo udaljen od tog mjesta, kabelski plašt neće doći u opasnost da poprmi neki potencijal i da kroz njega počne teći struja. Ali, kad je on blizu, tad se ta mogućnost povećava. Ispitivanjem se utvrdilo da je kri-

tična udaljenost kabela od mjesta udara ovisna o veličini struje groma i o specifičnom otporu tla. Tako se može uzeti da će pri struji groma od 20 kA nastupiti proboj zemljišta na 3 m udaljenosti za specifični otpor tla od 80 Ωm , a da će uz istu struju, od 20 kA, proboj zemljišta nastupiti i na 16 m udaljenosti ako je specifični otpor tla 5 000 Ωm .

Dakle, pojavljuju li nam se visoke vrijednosti struje groma i na loše vodljivom tlu, možemo očekivati da će kabelski plašt poprimiti potencijal i na velikoj udaljenosti od mjesta udara. Njegova vanjska zaštitna izolacija bit će probijena i struja će groma protjecati plaštem. Obrnuto ako nam je struja groma malena, a teren je dobro vodljiv, kabel će biti sigurniji jer je manja vjerojatnost da će nastupiti proboj zemljišta i eventualni tok struje kroz njegov plašt.

Koliki će potencijal poprimiti plašt kabela u času kad nastane proboj okolnog zemljišta i struja groma počne ulaziti u njega, teško je odrediti. Na izraz (12.2) ne možemo se osloniti jer kabelski plašt ne uzima cijelu struju groma, nego samo jedan njezin dio, a drugi dio odvodi zemlja. A i otpor plašta kabela razlikuje se od otpora okolne zemlje. Proračunima koji nisu baš jednostavni Sunde je pokazao da se potencijal plašta na mjestu ulaska struje u njega, može približno uzeti da iznosi:

$$U_{(x=0)} \sim K \cdot R_p \cdot \sqrt{\varrho} \cdot \sqrt{T_h} \cdot i_p \text{ (V)}. \quad (12.3)$$

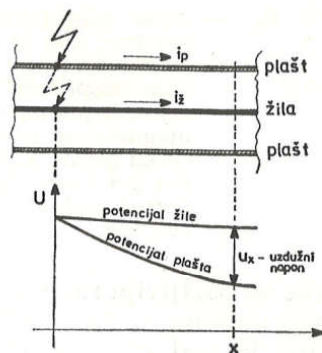
- x — udaljenost od mjesta ulaska struje u plašt kabela
- R_p — otpor plašta (Ω/km)
- ϱ — specifični otpor tla (Ωm)
- T_h — trajanje hrpta vala do polovice njegove tjemene vrijednosti (s)
- i_p — dio struje groma koja prolazi uzduž plašta (A)
- K — konstanta koju je dopušteno uzeti jednaku jedinici ako su za ostale faktore upotrijebljene jedinice u zgradama

Izraz (12.3) je točniji što je vrijeme T_h manje od 100 μs . On nam pokazuje da će potencijal plašta kabela na mjestu ulaska struje biti veći što je plaštu omski otpor veći, što je dio struje groma kroz plašt veći i, što je najvažnije, bit će velik ako je specifični otpor tla velik. Dakle, kako smo već napomenuli, u loše vodljivom zemljištu kabeli su izloženi većim opasnostima.

(Kad ukupna struja groma npr. od 75 kA ulazi u plašt uz specifični otpor zemlje $\varrho = 10\,000\ \Omega\text{m}$, te uz polutrajanje hrpta vala 100 μs i otpora plašta $R_p = 1,33\ \Omega$, potencijal će na plaštu biti 100 000 V.) Olakšavajuća je okolnost možda u tome što su jake struje rjeđe od slabijih struja groma, koje su mnogo češće, pa tad i kabeli neće dolaziti u opasnost da budu eventualno probijeni. Samo strujanje kroz plašt kabela ne bi bilo tako opasno jer je ono kratkotrajno, pa iako je vrlo intenzivno, neće zagrijavati kabel.

Međutim, kad plašt kabela poprimi potencijal $U_{(x=0)}$, nastaje i razlika napona između plašta kabela i vodiča u njemu, odnosno žile u kabelu. Ta razlika napona može iznositi samo $U_{(x=0)}$ ako je u tome trenutku slučajno napon žile prema zemlji $u = 0$, ali zna biti čak povećana za momentalnu vrijednost napona suprotna polariteta koju taj trenutak ima žila prema zemlji. (Tako, ako je $U_{(x=0)} = +100\ \text{kV}$, a žila tog trenutka ima $u = -10\ \text{kV}$, razlika je napona između plašta kabela i žile kabela 110 kV.)

Tolika razlika napona može biti zabrinjavajuća na mjestu ulaska struje u plašt, pogotovo ako je ona veća od probojne čvrstoće kabela. Tad je sigurno za očekivati da će nastupiti proboj i unutrašnje izolacije, dakle proboj u kabelu (sl. 12.3). U trenutku proboja plašt i žila kratko su spojeni pa žile poprimaju isti potencijal. Taj potencijal tjera dalje valove struje i napona ne samo kroz plašt kao prije nego i kroz vodič u kabelu. Ti se valovi zajedno šire dalje prema dobro vodljivoj zemlji. Budući da je omski i induktivni otpor žile manji od otpora plašta, a osim toga veći dio struje ide kroz plašt, a manji kroz vodič u kabelu, to će padovi napona na vodiču biti manji nego na plaštu, odnosno žila će manje prigušivati napon nego plašt (sl. 12.3). Zbog toga će na nekoj udaljenosti x od mjesta ulaska struje groma i proboja kabela, ponovno nastati između plašta i vodiča razlika napona, koju nazivamo uzdužni napon. Taj je napon to veći što se više udaljavamo od mjesta gdje je nastao proboj unutrašnje izolacije kabela. On se izračunava iz slike 12.3. po zakonu indukcije:



Sl. 12.3. Uzdužni napon u kabelu

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

Ako integriramo po zatvorenoj zamci od mjesta udara $x = 0$ do udaljenosti x i natrag, bit će:

$$\int_{x=0}^x R_p \cdot i_p \cdot dx - u_x - \int_{x=0}^x R_z \cdot i_z \cdot dx = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

Budući da smo već rekli kako je pad napona na vodiču, odnosno na žili u kabelu, vrlo malen, tad je član:

$$\int_{x=0}^x R_z \cdot i_z \cdot dx \sim 0$$

pa kao rezultat izraza dobivamo da uzdužni napon na udaljenosti x iznosi:

$$u_x = \int_{x=0}^x R_p \cdot i_p \cdot dx + \frac{d\Phi}{dt} = U_R + U_L. \quad (12.4)$$

u_x — uzdužni napon koji se pojavljuje na udaljenosti x od mjesta ulaska struje u kabel, odnosno na udaljenosti x od mjesta gdje je nastao proboj u kabelu između plašta i vodiča

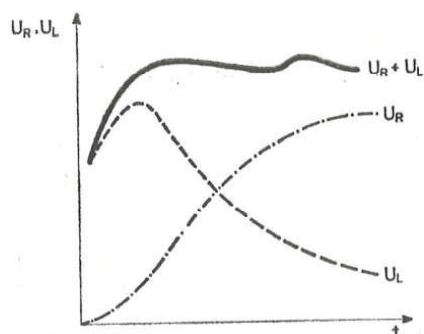
Φ — ulančeni magnetski tok što ga stvaraju struje kroz plašt i vodič u kabelu

R_p — otpor plašta koji ovisi o frekvenciji. Tu razlikujemo dva slučaja. U prvome, ako je plašt kabela od nemagnetskog materijala, može se računati da se po cijeloj duljini plašta gustoća struje po presjeku jednolično raspoređuje, pa je taj otpor jednak omskom otporu, što dobivamo mjereći pomoću istosmjernje struje. U drugom slučaju, ako je plašt od magnetskog materijala, nastaje potiskivanje struje pa gustoća po presjeku plašta nije jednaka, a tad otpor ovisi o frekvenciji $R_p = f(\omega)$. Otpor pri tome nije lako računski odrediti, a prema tome se ne može izračunati uzdužni napon. Najbolje je tad uzdužni napon ustanoviti mjerenjem.

Ako se pažljivije razmotri izraz (12.4), opazit će se da je vrijednost uzdužnog napona sastavljena od dvije komponente: omske komponente U_R , koja je pod znakom integrala, i induktivne komponente U_L , koja joj je pribrojena. Budući da je ovdje riječ o struji impulsnog oblika koja izaziva uzdužni napon, u prvim će trenucima, dakle za vrijeme trajanja čela vala, biti velika induktivna komponenta. Struja se u tim prvim mikrosekundama vrlo brzo mijenja s vremenom ($\gg di/dt$). Zato baš tad induktivna komponenta U_L uzdužnog napona ima maksimum. Budući da se poslije struja sporije mijenja, to se induktivna komponenta naglo smanjuje. Najveća, pak, vrijednost omske komponente uzdužnog napona ne nastaje u isto vrijeme kada i najveća vrijednost induktivne komponente uzdužnog napona. Razlog zbog kojega omska komponenta U_R naknadno postizava svoj maksimum leži u činjenici što induktivitet novonastalog strujnog kruga u prvim trenucima za struju impulsnog oblika znači velik otpor i struja nije u mogućnosti u prvo vrijeme krenuti uzduž kabelskog plašta i vodičem. Nešto nakon toga, kad induktivitet pruža manji otpor, struja se kreće plaštem stvarajući padove napona samo na omskom otporu plašta (koliko će poslije doći do maksimalne vrijednosti omske komponente uzdužnog napona, ovisi o vodljivosti, debljini i kvaliteti plašta). Na slici 12.4. prikazane su samo kvalitativno krivuljama omske i induktivne komponente uzdužnog napona, iz kojih se vidi kako njihove maksimalne vrijednosti ne nastaju u isto vrijeme. To je vrlo povoljno jer nema zbrajanja njihovih tjemernih vrijednosti, koje bi zajedno vrlo brzo izazvale visok uzdužni napon. Takvom vremenskom raspodjelom omske i induktivne komponente uzdužnog napona zbraja se njihove trenutne vrijednosti, ali vremenski razinaknute. Tako se dobiva ukupni uzdužni napon $U_R + U_L$, prikazan na slici 12.4.

Da bi se ocijenio iznos uzdužnog napona na nekoj udaljenosti od ulaska struje groma, dovoljno je znati samo veću od spomenute dvije komponente i nju smatrati mjerodavnom za novi proboj.

Radi boljeg razumijevanja ovoga što smo rekli i radi usporedbe, izradit ćemo jedan numerički primjer s podacima koje imamo, a izmjereni su na jednom kabelu. Neka je zadano:



Sl. 12.4. Omska i induktivna komponenta uzdužnog napona

$$R_p = 1,33 \, \Omega/\text{km}, \quad i_p = 60 \, \text{kA},$$

pa tad omska komponenta uzdužnog napona na duljini od 1 km iznosi:

$$U_R = \int_0^{x=1} R_p \cdot i_p \cdot dx = R_p \cdot i_p \cdot 1 = 1,33 \cdot 60 \cdot 1 = 80 \, \text{kV/km}.$$

Pri računanju pretpostavili smo da struja poslije ulaska u plašt ne odlazi s njega, iako se to normalno događa. Samo izuzetno, u vrlo slabo vodljivom tlu ona se zadržava u plaštu kabela za vrijeme kretanja prema dobro vodljivoj zemlji. No, bolje je računati da ona ostaje u kabelskom plaštu za vrijeme svog kretanja jer se time dobivaju nepovoljniji rezultati u računanju veličine uzdužnog napona.

Induktivnu komponentu U_L uzdužnog napona obično dobivamo prema izrazu $U_L = L(di/dt)$. Da bismo to proveli, moramo poznavati dvije veličine: koeficijent samoindukcije plašta L i strminu struje (di/dt) . Strminu struje groma uzmimo iz statističkih ili izmjerenih podataka koje imamo, a induktivitet moramo za svaku vrstu kabela posebno izračunati. Takav račun nije lako provesti jer plaševi različitih vrsta kabela nisu jednako izvedeni. Neki imaju jedan plašt, a neki odnosno ti drugi imaju vanjski i unutrašnji plašt, pa se teško odlučiti treba li računati induktivnu komponentu uzdužnog napona s induktivitetom vanjskog ili unutrašnjeg plašta. Sve to još dalje ovisi o tome od kakva su materijala plaševi, kako su namotani itd. Ocjena o tome treba li uzeti u obzir induktivitet vanjskog ili unutrašnjeg plašta, mora se pažljivo razmotriti od zgrade do zgrade jer su strujanja u takvim odnosima vrlo složena. Može se čak dogoditi da se pri udaru groma na više mjesta ošteti tanka izolacija što razdvaja vanjski od unutrašnjeg plašta. Tad induktivitet takvo spojenih namota poprima sasvim drugu vrijednost, a strujanje kroz takvu kombinaciju postaje još složenije. No, u takva razmatranja ovdje se nećemo upuštati i vratit ćemo se prethodnim pojednostavnjenim izlaganjima.

Pretpostavimo da kabel ima samo jedan plašt i da mu je induktivitet $L = 10^{-8} \, \text{H/m}$, te zamislimo, kao i prije, da je u njegov plašt ušla struja amplitude od 60 kA, koje strmo čelo traje $8 \, \mu\text{s}$. Induktivna komponenta tad će iznositi:

$$U_L = L \frac{di}{dt} = \frac{10^{-8} \cdot 60 \cdot 10^3}{8 \cdot 10^{-6}} = 75 \, \text{kV/km}.$$

Usporedimo li rezultate izvedenih primjera za istu struju od 60 kA, opazit ćemo da je omski pad napona veći od induktivnoga. Zato ćemo, s obzirom na to da oni ne nastupaju u isto vrijeme, uzeti kao mjerodavan za probojnu čvrstoću u kabelu samo omski pad napona U_R (on je prije iznosio 80 kV/km). Za drugu struju dobili bismo i drugi induktivni pad napona i drugi omski pad napona, ali bi njihov odnos ostao isti.

Naravno, omska nam komponenta uzdužnog napona ne mora biti uvijek veća od induktivne, zna biti i obrnuto. Samo u odabranom primjeru omska je bila veća od induktivne.

Ponovimo još jednom: u bilo kakvu odnosu bile po veličini ove dvije komponente, uzet ćemo kao mjerodavnu za probojnu čvrstoću kabela onu koja je veća.

Još valja istaknuti da se induktivna komponenta uzdužnog napona pojavljuje samo kad je plašt kabela izveden od jednog ili dva namota. Inače, ako on nije u obliku namota, te induktivne komponente uzdužnog napona nema, nego ostaje samo omska komponenta. Kada bismo i plašt kabela zamislili da je izveden u obliku jedne homogene zatvorene cijevi, tad u njegovoj unutrašnjosti ne bi bilo magnetskog toka pa je u izrazu (12.4) dopustivo zanemariti faktor $(d\Phi/dt)$, a onda bi se uzdužni napon mogao izračunati prema izrazu:

$$u_x = \int_0^x R_p \cdot i_p \cdot dx \quad (12.5)$$

ili, jednostavnije:

$$\hat{u}_x = \frac{\rho \cdot x}{q} \hat{i}_p \text{ (V)}. \quad (12.6)$$

Tu je ρ specifični otpor plašta u (Ωm), q je presjek kabelskog plašta u (m^2), x duljina kabela u (m), a $\hat{i}_p$ je tjemena vrijednost struje u plaštu.

Poslije zanemarenja, ovaj pojednostavljeni izraz omogućuje da sva zbivanja i zaključke promatramo i izvodimo mnogo lakše. Ali će nam, razumljivo, i rezultati koji se iz takva načina gledanja dobivaju biti samo približno točni. No, za praksu su oni ipak prihvatljivi.

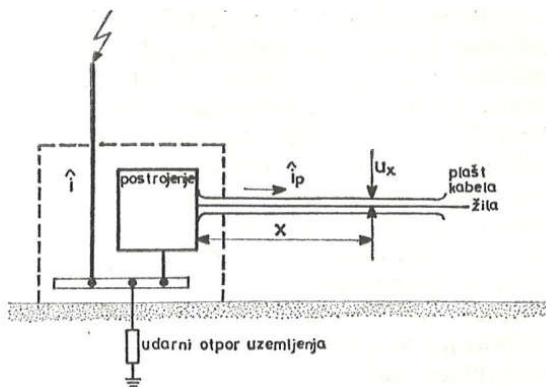
Ovaj upravo izvedeni izraz pokazuje da je uzdužni napon viši što se više udaljujemo od mjesta gdje je struja groma probivši izolaciju ušla u kabel. Ta veličina uzdužnog napona može na nekoj udaljenosti od tog mjesta toliko narasti da nam još jedanput ili dvaput probije kabel, a to se događa kad iznos uzdužnog napona prekorači izolacijsku čvrstoću kabela. Udaljenost na kojoj može nastati proboj kabela ovisi, naravno, i o veličini struje groma što je ušla u kabel. Zapravo, o tome najviše ovisi.

Zna se dogoditi da na mjestu gdje struja uđe u plašt kabela ne nastane proboj izolacije, odnosno da vodiči kabela ne dođu na isti potencijal kao i plašt. To se može dogoditi kad je struja groma malena ili kad je kabelska izolacija električki čvrsta. U tom slučaju će se na tom mjestu pojaviti razlika napona između plašta i vodiča u kabelu. Ako se udaljimo od tog mjesta, ta razlika napona, odnosno uzdužni napon bit će sve manji i manji, jer struja groma krećući se samo plaštem stvara velike padove napona. Naravno da tad razlika između napona pod kojima su stalno vodiči i napona pod kojim je plašt postaje sve manja. Nju možemo izračunati također po izrazu (12.6). (Otpor R se sve više s duljinom povećava pa struja groma uzrokuje sve veći pad napona.)

12.1. Udar groma u kraj kabela

Dosad smo razmatrali kako se ponaša kabel kad grom udari u blizini trase gdje je on postavljen ili iznad same trase gdje se kabel nalazi.

Sl. 12.5. Udar groma u kraj kabela. Uzdužni napon



Međutim, mnogo kritičnija situacija nastaje onda kad grom udari u sam kraj kabela. To se događa često kad se kabelom napaja neko mjesto obično jako izloženo izbijanjima. To su uređaji za napajanje RTV-antena ili uređaji za napajanje plinskih žičara itd. U takvim postrojenjima plašt je kabela povezan iz drugih razloga za uzemljenje antenskog stupa. Kad nastane izbijanje npr. u antenski stup, onda će i cijelo uzemljenje poprimiti vrlo visoki potencijal, posebno ako je specifični otpor tla vrlo visok pa se ne da postići mali udarni otpor uzemljenja (sl. 12.5). Naravno da tad i plašt, koji je povezan za to uzemljenje, poprima jednako tako visoki potencijal. Budući da plašt kabela spaja u tom slučaju mjesto visokog potencijala s dalekom zemljom, kroz njega protječe jaka struja groma. Na samom ulazu svruje već se pojavljuju velike razlike napona između kablenskog plašta i vodiča u kabelu, pa tu odmah može nastupiti proboj. U toj situaciji valovi napona i struja teku plaštem i vodičima, pa se pojavljuje uzdužni napon. Kako je tu riječ o naponskim valovima koji nisu ničim prigušeni jer je udar u blizini, takvi valovi napona imaju ekstremno visoke amplitude pa one izazivaju jako strujanje u kabelu. Osim toga, zbog visokih strmina znatno se povećava induktivna komponenta uzdužnog napona, pa za kablensku izolaciju u samoj blizini tako izloženog objekta velika je opasnost da će biti oštećena.

Udar groma u kraj kabela u osnovi se ne razlikuje od udara u trasu u blizini kabela ili iznad trase kabela. Jer kad grom udari u kraj kabela, struja groma ulazi u njegov plašt jednako tako kao što bi probijajući se kroz zemlju ušla u plašt kabela. Samo je udar groma u kraj kabela iz prije spomenutih razloga za njega opasniji.

12.2. Zaštita kabela

Iz dosadašnjih izlaganja mogli smo zaključiti da sigurnost kabela od atmosferskih izbijanja ovisi o mnogo činilaca, ali su pri tome ipak glavni: specifični otpor zemlje i jakost struje groma. Zato, kad odabiremo zaštitu treba svaki pojedini slučaj posebno razmotriti. Osim toga, sve vrste kabela nisu jednako osjetljive na sve moguće veličine prenapona. Tako su energetske kabele otpornije od signalnih jer je njihova izolacija jača itd. Dakle, više faktora i okolnosti valja uzeti u obzir pri odabiru zaštite, te sve zajedno pažljivo ocijeniti. Kao i uvijek, moraju se uskladiti zahtjevi pogonske sigurnosti, s jedne, s ekonomskim mogućnostima, s druge strane. U tehnici zaštite kabela dosad su se u osnovi razvile dvije kategorije zaštitnih mjera.

Prva kategorija zaštitnih mjera sastoji se od više konstrukcijskih zahvata na samom kabelu, kako bi se on sam, svojom otpornošću, mogao održati i u nepovoljnim prilikama u kojima bi se mogao naći. Sve te vrste zaštite koje pripadaju ovoj kategoriji mogli bismo nazvati »unutrašnjim« zaštitnim mjerama. Da bi se one provele, potrebno je prije polaganja kabela istražiti specifični otpor tla, utvrditi izokerauničku razinu tog područja i eventualni broj udara groma prema trasi polaganja. Ako unaprijed upoznamo te opće okolnosti u kojima će se kabel nalaziti, daje se, na osnovi statističkih podataka o jakosti struja groma, procijeniti, uz stanoviti oprez, gustoća i veličina prenaponskih smetnji. Kako vidimo, ono što općenito moramo poznavati u određivanju zaštite ostalih objekata, vrijedi i za kabele. Kad jedanput donesemo ocjenu ili barem steknemo osjećaj o prilikama u kojima će kabel biti, tek tad možemo odabrati i njegovu odgovarajuću konstrukciju. U prethodnim razmatranjima vidjeli smo da je glavnu opasnost za kabel uzdužni napon koji se pojavljuje kad prolazi struja groma njegovim plaštem. Zato treba prilikom biranja konstrukcije kabela nastojati da se na njemu pojavi što manji uzdužni napon ili da izolacija kabela koja mora izdržati taj napon bude što jača.

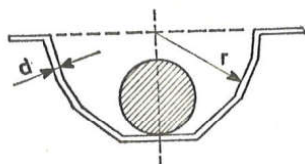
Smanjenje uzdužnog napona postizavamo odabравši kabel s povećanom debljinom plašta, tako da otpor plašta pri prolasku struje groma bude što manji. To se daje izvesti kod svih vrsta kabela. Ako ne možemo ili ne želimo smanjiti uzdužni napon promjenom presjeka plašta, moramo odabrati takav kabel da njegova izolacija između plašta i faznih vodiča u kabelu izdrži sva naprezanja koja će u njoj nastati prilikom pojave uzdužnog napona. U pravilu se za takve prilike odabire kabel s debljom izolacijom. Takav način zaštite susrećemo kod kabela nazivnih napona od 1 do 10 kV, a manje za one nazivnih napona od 20 do 30 kV. To je rješenje s ekonomskog stajališta slično onome koje smo proveli povećavši presjek metalnog plašta, ali je u pogledu sigurnosti znatno slabije jer njime nismo uklonili uzrok proboja, nego sprečavamo samo nezgodne posljedice. Osim toga, pojačanje izolacije u kabelu zahtijeva i pojačanje izolacije kablinskih glava, spojnica i, općenito, kablenskog pribora.

Kad upotrebljavamo kabele kojima je vanjski plašt izveden od sintetskih materijala, a unutrašnji je od metala, tad će vanjski plašt nešto smanjiti razliku napona između mjesta udara groma i unutrašnjega metalnog plašta, pa će zato i struja kroz metalni plašt biti nešto slabija. Kabel s vanjskim sintetskim plaštem u stanovitim će prilikama biti nešto povoljniji od prethodnih rješenja, posebno u zemljištima kojima specifični otpor ne prekoračuje 1 000 Ω m. Sve ovo što smo dosad iznijeli kao mogućnost zaštite kabela na neki se način odnosi na njegovu konstrukciju i njegovu sposobnost da sam sebe zaštiti. No, to obično nije dovoljno.

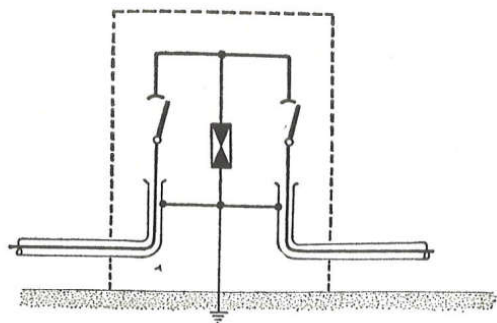
U osobito nepovoljnim okolnostima, kad je specifični otpor tla vrlo visok i kad se kabel polaže preko posebno izloženih mjesta, gdje su izbijanja česta, kao što je to npr. kamenito i brdovito zemljište, tad je osim odabrane odgovarajuće konstrukcije kabela potrebno provesti još i više drugih zaštitnih zahvata, ali koji više ne zadiru u konstrukciju kabela. Zato bismo ovu drugu kategoriju zaštitnih mjera možda mogli nazvati »vanjskim« zaštitnim mjerama. Smisao tih dodatnih postupaka

u osnovi je u tome da od kabela, koliko je to najviše moguće, odvojimo strujanje kroz njegov plašt. To postizavamo polaganjem drugih vodiča na nekoj udaljenosti iznad kabela. Takvim paralelnim vodičima pokušava se odvesti veći dio struje groma drugim putovima. Taj način odvajanja struje groma od kabelskog plašta izvodi se i onda kad je kabel položen uz ivicu šume ili nekoga osamljenog stabla i u drugim sličnim situacijama gdje se očekuju češći udari i jaka strujanja kroz tlo. Udomaćilo se nazvati te vodiče »ekranski« vodiči. Izvedeni su od pocinčane ili pobakrene čelične trake, a katkad su i od bakrenog užeta. Oni su na više mjesta uzemljeni i povezani su s kabelskim plaštem i po svojoj funkciji podsjećaju na zaštitno uže kod nadzemnih vodova pa sprečavaju izravne udare groma u kabel. Ovom vrstom zaštite teško je u loše vodljivom tlu postići zadovoljavajući otpor uzemljenja, koji ni u kojem slučaju ne smije prekoračiti iznos od 40Ω . Ako su oni izvedeni od čelika, onda je njihov presjek 95 mm^2 , a ako su od bakra, dovoljno je 16 mm^2 .

U nastojanjima da se provede što djelotvornija zaštita od atmosferskih prenapona, i to ne samo energetskih nego osobito signalnih kabela koji su osjetljiviji na struje kroz njihove plašteve, došlo se do toga da je kabel na surovom području najbolje položiti u čelične pocinčane cijevi, kao što je to predloženo na slici 12.6. Time se, zapravo, primijenio princip zaštite Faradayevom krletkom. Polaganjem kabela u cijevi i njegovim spajanjem za njih, postizemo ukupno smanjenje omskog otpora plašta jer cijevi povećavaju njegov presjek. Ta okolnost, naravno, smanjuje uzdužni napon kad takvom kombinacijom nastane strujanje prilikom udara groma u zemlju u njenoj neposrednoj blizini. Međutim, to smanjenje uzdužnog napona ne nastaje samo zato što smo smanjili ukupni otpor već se ono pojavljuje i zbog skin-efekta pa će čak i do 60% struje groma protjecati kroz cijevi, a ostali, manji dio, kroz plašt kabela. Još i zbog tog potiskivanja može se uzdužni napon ukupno smanjiti i do 50 puta. Kabel koji je na takav način potpuno oklopljen ne može biti pogođen direktnim udarom groma, pa se ova zaštita upotrebljava u predjelima gdje je prosječni broj grmljavinskih dana u godini veći od 40 ili 50 i kad specifični otpor tla premašuje i $5\,000 \Omega \text{ m}$. Ova je zaštita vrlo uspješna tamo gdje je kabel položen u vrlo kamenitom tlu, na brdima u blizini visokih antenskih tornjeva itd. Čelične cijevi u koje se on polaže poznate su pod nazivom Zoresovi kanali. Oni se lako u dijelovima spajaju, a zbog svoje težine i jednostavnosti izvedbe nisu ni osobito skupi. Njihov polumjer r na slici 12.6. iznosi od 20 do 100 mm, a debljina stijenki je od 2 do 3 mm. Kabeli koji se polažu u takve kanale nešto se slabije hlade pa treba nastojati da unutrašnji promjer kanala bude barem dva puta veći od promjera kabela. Polaganjem kabela u takve oklope ne štitimo ga samo od smetnji koje uzrokuju atmosferska izbijanja ili blizina visokonaponskih vodova nego kanali zaštićuju kabel i od mehaničkih oštećenja. Kad je za njega određena takva zaštita, tada odabrani kabel može biti i slabije mehaničke konstrukcije. Ta prednost dolazi posebno do izražaja u tlu koje je podložno različitim geološkim i drugim nepovoljnim poremećajima. Zaštita pomoću Zore-



Sl. 12.6. Oblik Zoresovih kanala



Sl. 12.7. Zaštita kabela pomoću odvodnika. Kabelska kućica

iznos. Oni se mogu ukapčati i iskapčati radi izmjene i održavanja pa su zato priključeni preko rastavljača. Nedostatak ovog načina zaštite je u velikom broju odvodnika, te mnogo kabelskog i drugog pribora, osobito kad je kabel veće duljine. Mehanička čvrstoća i kompaktnost kabela time su smanjene.

sovih kanala drži se danas najdjelotvornijom i primjenjuje se za energetske i signalne kabele.

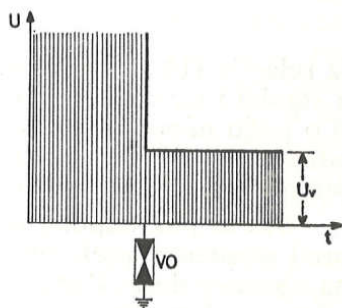
Prije ove vrste zaštite, za energetske se kabele koji su položeni u slabo vodljivom zemljištu primjenjivala, a i danas se upotrebljava, zaštita pomoću ventilnih odvodnika. Oni se priključuju između plašta i žila u kabelu, što je jednopolno prikazano na slici 12.7. Odvodnici su smješteni u kabelskim kućicama, kojih ima više uzduž trase, a zadatak im je da smanje veličinu uzdužnog napona kad on prekorači dopušteni

13. Odvodnici prenapona

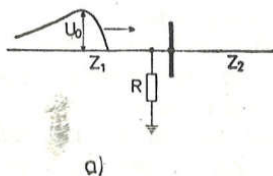
Za zaštitu izolacije u elektroenergetskim postrojenjima, osobito u transformatorskim stanicama, upotrebljavamo odvodnike prenapona. Oni se priključuju na ulazu u stanicu ili na sabirnicima, već prema tome kako je stanica izvedena i ovisno o drugim zahtjevima zaštite. Namjena ovih aparata za odvođenje struje je u tome da smanje napon vala koji nailazi na veličinu neopasnu za izolaciju stanice (sl. 13.1). Ima ih više vrsta i konstrukcija, a naša razmatranja počnimo opisom djelovanja ventilnih odvodnika, odnosno odvodnika s promjenljivim otporima, koji se danas najviše upotrebljavaju.

Da bismo u početku mogli što bolje razumjeti kako se odvodnikom smanjuje napon u stanici na dopuštenu vrijednost, uključit ćemo pred stanicu »odvodnik« nadomješten nepromjenljivim otporom, dakle običnim omskim otporom. Ograničit ćemo naša razmatranja samo na to da vidimo kako se pomoću toga uključenog otpora smanjuje tjemena vrijednost vala koji nailazi.

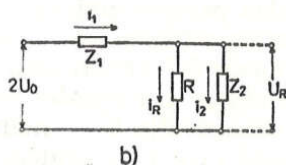
Zamislimo da nam u stanicu po vodu valnog otpora Z_1 dolazi val amplitude U_0 . Neka ispred stanice iz koje izlazi jedan vod, i koja je zajedno s vodom predočena valnim otporom Z_2 , bude uključen odvodnik prenapona nepromjenljiva otpora R (sl. 13.2.a). Mjesto na kojem je priključen odvodnik smatrajmo čvornom točkom u kojoj se grana struja vala što nailazi. Budući da smo u prethodnim izlaganjima uočili da za svaku čvornu točku nekog sklopa valnih otpora možemo primijeniti Petersenovo pravilo, onda se time poslužimo i u ovoj prilici. Prema shemi na slici 13.2.b po tom će



Sl. 13.1. Smanjenje napona pomoću odvodnika



Sl. 13.2. Dolazak vala na stanicu i ekvivalentna shema



se pravilu računati veličina napona koji će se u ovakvom sklopu pojaviti na otporu R , odnosno u stanici i na vodu što odlazi.

Struja vala koji nailazi i_1 grana se u čvornoj točki na struju kroz otpor R , označenu s i_R , i struju kroz stanicu, označenu s i_2 . Prema Petersenovu pravilu možemo iz ekvivalentne sheme napisati da vrijedi jednadžba:

$$2U_0 = i_1 \cdot Z_1 + i_R \cdot R = (i_2 + i_R) \cdot Z_1 + U_R. \quad (13.1)$$

Na otporu R nastaje napon $U_R = i_R \cdot R$, jednak naponu U_2 u stanici i na vodu što odlazi. Ta dva napona su jednaka jer se pojavljuju na paralelnom sklopu otpora R odvodnika i Z_2 stanice s vodom koji je na nju priključen. Zato za struju i_2 možemo napisati:

$$i_2 = \frac{U_2}{Z_2} = \frac{U_R}{Z_2}.$$

Uvrštavajući taj izraz za struju u stanici u jednadžbu (13.1) i rješavajući je po U_R , dobivamo da je:

$$U_R = U_0 \cdot \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} - i_R \cdot Z_1 \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = U_0 \alpha - i_R Z_1 \frac{\alpha}{2}. \quad (13.2)$$

Pri tome je α faktor prolaska i u ovoj prilici iznosi:

$$\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}. \quad (13.3)$$

Iz relacije (13.2), koja izražava vrijednost napona na otporu R , odnosno u stanici i na vodu koji od nje odlazi, vidimo da veličina tog napona ovisi o padu napona na prvom vodu uzrokovanome prolaskom struje i_R . Za određenu veličinu vala koji nailazi ta će struja biti veća ili manja, već prema tome kakav smo otpor uključili paralelno stanici.

Što se pak napona tiče, može se reći da smo priključivanjem otpora pred stanicu uspjeli smanjiti napon u njoj, i naravno, na vodu koji je na njezinoj desnoj strani priključen. Otpor R , koji je u našim razmatranjima nadomještao odvodnik prenapona, omogućio je pad amplitude upadnog vala i, prema tome, zasada sasvim grubo zaključujući, zaštitio je stanicu.

Iz jednadžbe (13.2), međutim, još se može vidjeti da napon u stanici ne ovisi samo o veličini struje i_R nego i o veličini faktora prolaska α . Ako pretpostavimo najnepovoljnije okolnosti da nemamo valnog otpora Z_2 , odnosno da je $Z_2 = \infty$, tad će faktor prolaska α zadan izrazom (13.3) poprimiti vrijednost $\alpha = 2$. To je najnepovoljnija situacija koja se pojavljuje pri upadu naponskog vala na završnu stanicu, odnosno na stanicu poslije koje nema više vodova što od nje odlaze, nego su tu samo sabirnice i priključeni aparati. Za tu posebnu priliku jednadžba (13.2),

koja daje napon na otporu R , odnosno u promatranoj stanici, poprima oblik:

$$U_R = 2U_0 - i_R Z_1. \quad (13.4)$$

Taj ćemo posebni primjer stanice bez vodova koji od nje odlaze, dalje razmatrati i proučavati jer je najnepovoljniji.

13.1. Odvodnici prenapona promjenljiva otpora ili ventilni odvodnici. Fizikalna zbivanja

Radi najosnovnijeg fizikalnog razumijevanja, razmatrala se zaštita stanice s uključenim odvodnikom nepromjenjiva otpora R (običnim radnim otporom). Međutim, takav otpor ne bi osigurao, pri bilo kojoj veličini napona upadnog vala, da uvijek u stanici bude približno jednaki napon koji će izolacija stanice izdržati. Zato se odvodnici ne izvode od nepromjenljivih otpora, dakle takvih kojima se vrijednost mijenja ovisno o veličini napona. Promjena otpora pod utjecajem veličine napona, pretpostavljamo, događa se na ovaj način. U izolacijskom materijalu od kojega je sastavljen otpor odvodnika ima čestica korborunduma (SiC). Kad se na takav materijal narine visoki napon, stvara se među tim sitnim djelićima jako električno polje pri čemu se prostor oko njih ionizira i postaje vodljiv. Što je veći napon koji djeluje na otporu, to je jače polje i ionizacija koja omogućuje stvaranje vodljivih kanala, pa je utoliko manji otpor. Kad se, naprotiv, napon na otporu odvodnika smanjuje, slabi i električno polje i ionizacija oko čestica korborunduma, pa se smanjuju i vodljivi kanali, što djeluje na porast otpora.

To nam dobro dolazi za zaštitu stanice od prenapona. Naime, u času kad je napon na odvodniku visok, dobro je da njegov otpor bude malen, a kad se napon na odvodniku snizi, poželjno je da njegov otpor postane veliki. Takva promjena otpora u njemu omogućuje da u trenutku nailaska vala, smanjujući svoj otpor, odvodnik odvede jake struje u zemlju. Naprotiv, kad naponski val prestane djelovati, on će ponovno povećavajući svoj otpor prekinuti struju, koja bi inače dalje tekla kroz zemlju zbog djelovanja pogonskog napona voda, nazvanu popratnom ili preostalom strujom. Ona ima sinusoidan oblik.

Osvrnimo se, međutim, detaljnije na vrijeme kad na odvodnik s nelinearnim otporom djeluju naponski valovi (ne kad oni već prođu). Valovi koji se pojavljuju na vodovima i postrojenjima vremenski mijenjaju oblik, a osim toga su i različite veličine amplitude. U provedbi zaštite teži se tome da se napon na odvodniku što manje mijenja i za vrijeme djelovanja takvih valova. I to se postizava pomoću odvodnika što ih opisujemo, a koji imaju nelinearne otpore. Tako, ako naiđe naponski val vremenski promjenljiva oblika i velike amplitude, koji bi potjerao veliku struju, otpor na odvodniku će se smanjiti, a naiđe li jednako takav val, ali manje amplitude, koji bi potjerao manju struju, otpor na odvodniku će se povećati. Iz toga se daje zaključiti da će se napon na odvodniku vrlo malo mijenjati za vrijeme djelovanja svih naponskih valova. To je dobro.

Dakle, u svim fazama djelovanja upadnog napona odnos između napona na odvodniku U_v , koji se kod prorade i nakon nje pojavljuje na nelinearnom otporu odvodnika, i struje i_v , koja kroz njega prolazi, zadan je izrazom:

$$U_v = k \cdot i_v^a. \quad (13.5)$$

U_v — napon na promjenljivim otporima odvodnika

i_v — struja kroz odvodnik

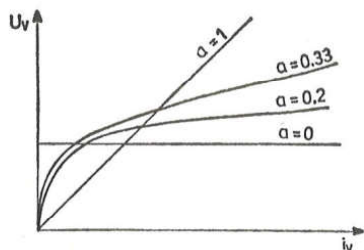
k — konstanta jednaka naponu na odvodniku kad kroz njega teče struja od 1 A

a — konstanta nelinearnosti

Po načinu rada nelinearnih otpora ovakav odvodnik dobio je naziv ventilni odvodnik. Njegov se rad može usporediti s radom nekog »ventila« koji kod visokih vrijednosti napona ima mali omski otpor i kroz njega teče velika struja. Već u idućim trenucima kad se val smanjuje i na kraju prođe, te napon na odvodniku poprimi malu vrijednost, njegov će otpor, kako smo već vidjeli, naglo porasti i neće propuštati više struju. Napon na njemu označili smo s U_v umjesto U_R , a struju kroz njega s i_v umjesto i_a da bi nas indeks »v« podsjetio na vrstu odvodnika koji upotrebljavamo.

Konstanta a u izrazu (13.5) određuje ta ventilna svojstva. Vrijednosti $a = 1$ odgovara nepromjenljivi otpor pa se napon mijenja po Ohmovu zakonu, tj. $U_v = k i_v$, a za $a = 0$ odgovaraju mu idealna ventilna svojstva. Na slici 13.3. nacrtane su te karakteristike, iz kojih se vidi kako su svojstva odvodnika ovisna o konstanti nelinearnosti, pa i struji koja kroz njega protječe. Idealnim ventilnim odvodnikom smatrali bismo onaj kojemu bi napon ostao konstantan za sve struje što kroz njega prolaze. Njegov bi se otpor tad mijenjao obrnuto proporcionalno struji.

Međutim, u stvarnosti nemamo idealnih odvodnika, ali nastojimo da se njihova svojstva približe idealnima. Napon se na odvodnicima koji se upotrebljavaju u praksi ipak malo povišuje zbog porasta struje koja njime prolazi. Teži se tome da to povišenje napona na njima bude što je moguće manje za vrijeme dok su napregnuti naponima različite veličine. Zbog toga se nastoji da nelinearnost bude što veća, a to se postizava malom konstantom nelinearnosti a . U novijim konstrukcijama ventilnih odvodnika prenapona za a se približno uzima 0,2. Ako pogledamo sliku 13.3. vidjet ćemo da se krivulja s konstantnom nelinearnosti $a = 0,2$ gotovo



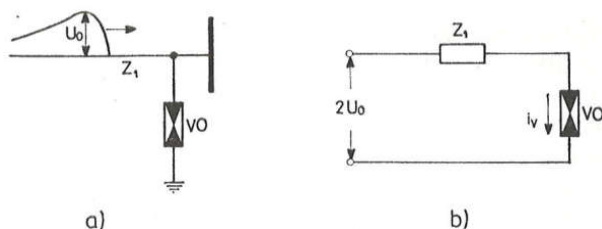
Sl. 13.3. Karakteristike napon — struja ventilnih odvodnika

poklapa s krivuljom $a = 0$. Naime, za svaku struju napon se na odvodniku vrlo malo mijenja i stanica poprima gotovo konstantni napon.

Napon U_v koji nastaje na odvodniku i stanici nakon prorade, nazivamo zaštitnim naponom odvodnika, ili, još češće, preostalom naponom. Kad se usklađuju u nekome elektroenergetskom sistemu različiti stupnjevi izolacije, tad se za iznos tog napona udomačio naziv zaštitna razina ili zaštitni »nivo«.

13.2. Val na ventilnom odvodniku u elektroenergetskim sistemima

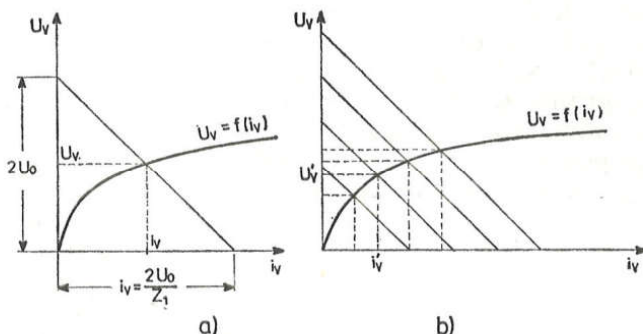
Razmatrajmo, dalje, kako takav odvodnik promjenljivih otpora radi u elektroenergetskim sistemima. Kao primjer istražimo koliki će se napon pojaviti na takvu odvodniku u završnoj stanici, odnosno na sklopu prikazanome na slici 13.4, kad na njega nailazi putni val amplitude U_0 .



Sl. 13.4. Ventilni odvodnik pred završnom stanicom. Ekvivalentna shema

Taj se napon određuje na više načina. Ovdje će se dati samo jedno grafičko rješenje koje će nam ipak pružiti dovoljno jasnu sliku o djelovanju ventilnog odvodnika priključenoga pred stanicom.

Najprije moramo poznavati karakteristiku »napon-struja« određenog odvodnika koji upotrebljavamo. To je karakteristika $U_v = f(i_v)$ iz izraza (13.5). Uzmimo npr. karakteristiku sa slike 13.3, koja vrijedi za konstantu nelinearnosti $a = 0,3$ i nacrtajmo je na slici 13.5. Zatim nanesimo na istoj slici vrijednosti U_v i i_v , koje su međusobno povezane jednadžbom $U_v = 2U_0 - i_v Z_1$.



Sl. 13.5. Određivanje napona u stanici za različite vrijednosti nailazećeg vala

Iz te dvije jednadžbe naći ćemo rješenja za napon na ventilnom odvodniku U_v i za struju kroz odvodnik i_v . Kako smo već vidjeli, jednadžba (13.4) upotrijebljena je u razmatranju veličine napona na odvodniku nepromjenljiva otpora. Vrijednosti U_v i I_v u drugoj jednadžbi međusobno

su povezane pravcem, a da bi se taj pravac povukao, dovoljno je da poznamo koordinate barem dviju točaka. Koordinate tih dviju točaka odredit ćemo uzimajući u obzir ove činjenice: 1. ako odvodnik ne radi, onda kroz njega ne teče struja, te je $i_v = 0$, a $U_v = 2U_0$; 2. ako je odvodnik u kratkom spoju, onda je $U_v = 0$, pa će biti:

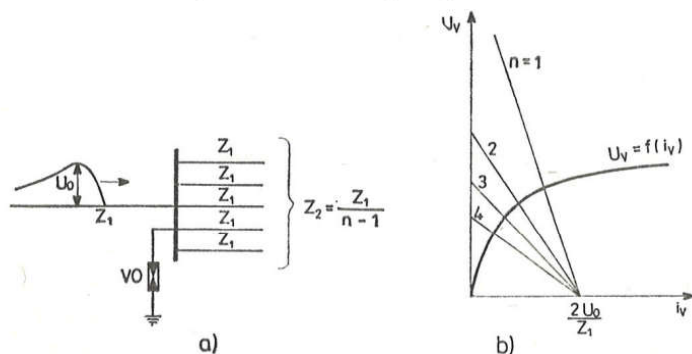
$$i_v = \frac{2U_0}{Z_1}.$$

Kad kroz te dvije točke nacrtamo pravac izražen jednadžbom (13.4), presjecište će tog pravca s karakteristikom ventilnog odvodnika $U_v = f(i_v)$ dati vrijednosti napona na odvodniku U_v i struje i_v koja protječe kroz njega (sl. 13.5.a).

Tako ustanovljen napon U_v na odvodniku, odnosno u stanici, pojavio se zbog djelovanja naponskog vala što nailazi i kojem je amplituda U_0 . Kod drugih vrijednosti amplitude tog vala pravac bi se pomaknuo paralelno samom sebi (sl.13.5.b) jer su odsjeci koje dobivamo na koordinatnim osima proporcionalni amplitudi naponskog vala. No, kako vidimo na toj slici, napon na odvodniku i stanici postepeno poprima konstantnu vrijednost U_v , što smo i očekivali.

Osim završnih stanica u elektroenergetskim sistemima još su češće stanice od kojih se dalje grana više nadzemnih vodova, kao što je to predloženo na slici 13.6.a. To su prolazne stanice. U takvim okolnostima će se za računanje napona na odvodniku i u stanici te na vodovima koji su na nju priključeni, upotrijebiti jednadžba (13.2) skupa s karakteristikom odvodnika $U_v = f(i_v)$. Međutim, pri tome treba u jednadžbu (13.2) za valni otpor Z_2 uvrstiti ekvivalentnu vrijednost paralelno spojenih valnih otpora vodova što od stanice odlaze, a koja iznosi $[(Z_1/(n-1))]$. Uz pretpostavku da se tjemena vrijednost naponskog vala koji nailazi nije promijenila, rješenja jednadžbi za napon na odvodniku U_v i struju kroz odvodnik i_v potražiti ćemo grafički jednako onako kao za završnu stanicu. Rezultat će ipak biti drukčiji jer, kako je poznato, broj vodova koji odlaze bitno utječe na napon u stanici, a prema tome i na ventilnom odvodniku. Iz dijagrama na slici 13.6.b uočavamo da će napon na odvodniku i stanici biti niži, što je ukupni broj priključenih vodova »n« na stanici veći. To je povoljna okolnost, o kojoj u tehnici zaštite treba voditi računa. Uz izvjesne idealne pretpostavke tad ne bi ni trebalo postavljati

ventilni odvodnik prenapona jer je sama konfiguracija mreže dovoljna da smanji opasna povišenja napona.



Sl. 13.6. Napon i struja na odvodniku ovisno o broju priključenih vodova

Za jednostavnija računanja dopušteno je pretpostaviti da će napon na odvodniku nakon prorade biti konstantan, što se i vidi iz toka krivulje $U_v = f(i_v)$ za $a = 0,2$ ili $0,33$ na slici 13.3. Zato struju kroz odvodnik možemo odmah izračunati iz jednadžbe (13.2) za svaki, mogući broj na stanicu priključenih vodova. Obično praktičke dileme nastaju kad su priključeni jedan, dva ili tri voda ($n = 1$, $n = 2$ i $n = 3$). Tako, kad je to završna stanica i kad uzmemo da je $n = 1$, što je najnepovoljnije, struja kroz odvodnik nakon prorade, izračunata iz jednadžbe (13.2), iznosi:

$$i_v = \frac{2U_0 - U_v}{Z_1} \quad (13.6)$$

Međutim, kad je riječ o prolaznim stanicama na koje su priključena dva ili tri voda i kad uzimamo da je $n = 2$, odnosno $n = 3$, odgovarajuće struje kroz odvodnik nakon prorade, izračunate po jednadžbi (13.2), bit će:

$$i_v = \frac{2U_0 - 2U_v}{Z_1} \quad (13.7)$$

$$i_v = \frac{2U_0 - 3U_v}{Z_1} \quad (13.8)$$

Ti upravo izvedeni izrazi za struju kroz ventilni odvodnik omogućuju nam da zaštitu energetskih postrojenja ne kontroliramo preko veličine napona na odvodniku (preostali napon), nego preko veličine struje kroz odvodnik. Takav način promatranja moguć je onda kad su unaprijed odabrane dopuštene veličine amplituda putnih valova U_0 koji nailaze u postrojenje i kad je odabrana dopuštena veličina preostalog napona U_v na odvodniku. Te su veličine obično zadane pravilima o koordinaciji izolacije, pa se zato i veličine dopuštenih struja izračunate po prethodnim izrazima u praksi kreću od 2 do 15 kA. Ako se dogodi da su izračunate struje manje od dopuštenih iznosa struja, to znači da je preostali napon na odvodniku viši od dopuštenoga. Tad situacija postaje pomalo kritična jer se potrebna razlika između napona koji je ostao na odvodniku i električne čvrstoće izolacije postrojenja smanjila, što nije dopušteno. Tako bismo prema ovome što smo iznijeli mogli reći da za dobru i djelotvornu zaštitu moramo držati struje kroz odvodnik u malo prije spomenutim granicama. Dobro je pri tome još istaknuti da nam račun struja kroz odvodnik omogućuje ne samo orijentaciju jesmo li dobro odabrali veličinu preostalog napona nego i dimenzioniranje samog odvodnika. Naime, svaki ventilni odvodnik ne može podnijeti sve jakosti struja, pa se zato oni i konstruiraju za manje i veće jakosti struja koje trebaju odvesti. Popratit ćemo ova izlaganja jednim brojčanim primjerom.

Primjer 13.1.

Na transformatorsku stanicu nailazi val amplitude $U_0 = 1\,550$ kV preko nadzemnog voda kojemu je valni otpor $Z_1 = 400 \, \Omega$. Ispred stanice nalazi se ventilni odvodnik koji ne smije propustiti napon veći od

$U_1 = 1\,100$ kV. Treba izračunati struju kroz takav odvodnik ako je to završna stanica, a u drugom slučaju je prolazna stanica s jednim vodom što od nje odlazi i kojemu je također valni otpor $Z_2 = 400\ \Omega$.

a) Struja kroz odvodnik ispred završne stanice:

$$i_v = \frac{2U_0 - U_v}{Z_1} = \frac{2 \cdot 1\,550 - 1\,100}{400} = 5\text{ kA}.$$

b) Struja kroz odvodnik ispred prolazne stanice s jednim vodom koji od nje odlazi:

$$i_v = \frac{2U_0 - 2U_v}{Z_1} = \frac{2 \cdot 1\,550 - 1\,100 \cdot 2}{400} = 2,25\text{ kA}.$$

U primjeru vidimo da se veličina izračunatih struja kreće između 2 i 5 kA pa možemo smatrati da je dopušteni preostali napon na odvodniku od 1 100 kV razmotren i s ovog gledišta dobro odabran.

Katkad su na postrojenjima priključeni i vodovi i kabeli. Tad takvi priključci nemaju jednak valni otpor pa se struja kroz odvodnik izračunava kao iz jednadžbe (13.2), ali tako da se umjesto Z_2 uvisti ekvivalentna vrijednost valnih otpora u određenoj situaciji. Jednadžba prema kojoj se računaju struje kroz odvodnik uz pretpostavku da je unaprijed određen preostali napon na odvodniku, glasi:

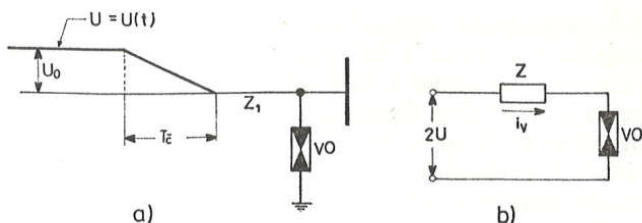
$$i_v = \frac{2U_0}{Z_1} - \frac{U_v}{Z_2} - \frac{U_v}{Z_1}. \quad (13.9)$$

I tad se veličina struje mora u praksi kretati u prije spomenutim granicama.

13.3. Nailazak beskonačno dugačkog vala strma čela na ventilni odvodnik

U prethodnim izlaganjima nije bilo riječi o obliku vala što se vodom kretao prema odvodniku, nego se promatrala samo promjena njegove amplitude U_0 . To je učinjeno radi jednostavnosti razmatranja i zbog toga što nas je zanimalo samo smanjenje amplitude vala koji bi eventualno oštetio stanicu. Međutim, osim opasnosti koju donosi aparatima u stanici visoka tjemena vrijednost nekoga naponskog vala jednako tako važno je znati i brzinu promjene napona za određeno vrijeme ili, drukčije: promjenu njegove strmine. Zato ćemo se u ovom poglavlju na to pitanje osvrnuti, ali sad uz pretpostavku da vodom nailazi beskonačno dugački val strma čela i da je kao prije, pred stanicom priključen ventilni odvodnik. Veličina amplitude i strmina čela vala koji nailazi vodom na stanicu, na njegovu kraju, prikazani su na slici 13.7.a, a na slici 13.7.b. ekvivalentna je shema tog sklopa prema Petersenovu pravilu.

Sl. 13.7. Val strma čela na ventilnom odvodniku. Ekvivalentna shema



Prije se utvrdilo da se amplituda vala koji se kretao prema stanici smanjila na razinu koju je odredila karakteristika ugrađena odvodnika. Tako će se i sad dogoditi. Ali će se sad osim promjene njegove amplitude promatrati i ponašanje strmine njegova čela.

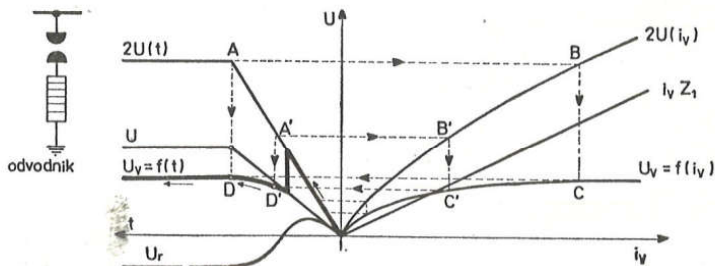
Koristeći se i dalje ekvivalentnom shemom, najprije će se na desnoj polovici dijagrama na slici 13.8. nacrtati krivulja ovisnosti napona o struji $U_v = f(i_v)$ i pravac koji pokazuje pad napona $i_v \cdot Z_1$. Zatim će se te dvije krivulje zbrojiti u sumarnu krivulju koja daje sve vrijednosti dvostrukog napona $2U$, pa će se i ona nacrtati na desnoj strani iste slike.

Nakon toga, na lijevoj strani dijagrama na slici 13.8. nacrtajmo sve dvostruke vrijednosti napona vala koji nailazi, ali ovdje ovisno o vremenu $2U(t)$.

Kad nacrtamo sve te veličine, odabrat ćemo na krivulji dvostrukog napona $2U(t)$ na lijevoj strani dijagrama točku A. Iz te ćemo točke povući paralelno s apscisnom osi ravnu liniju do presjeka s krivuljom $2U(i_v)$ na desnoj strani dijagrama. Iz tako dobivene točke B spustit ćemo okomicu do presjeka s krivuljom $U_v = f(i_v)$ u točki C. Iz točke C će se zatim povući natrag, ali opet paralelno s apscisnom osi, pravac do presjeka u točki D sa spušenom okomicom iz početne točke A. Opisani postupak označen je na slici 13.8. strelicama. Ponavljamo ga više puta, za druge po volji odabrane točke, kao npr. za točku A'.

Na taj način naći ćemo sve točke čela i hrpta vala koji je prošao odvodnik, odnosno sve vrijednosti preostalog napona na njemu. Kad se nađene točke spoje, dobit ćemo krivulju preostalog napona, ali sad, što je novo, ovisno o vremenu $U_v = f(t)$. To određivanje oblika napona na ventilnom odvodniku ovisno o vremenu važno je radi sigurnosti izolacije same stanice (naime, napon se ne smije brzo mijenjati).

U svim dosadašnjim analizama pretpostavljalo se da su promjenljivi otpori odvodnika stalno priključeni na vodu pa i kad nema prenapona. Međutim, to u stvarnosti nije tako. To bi u praksi stvaralo teškoće jer bi onda pogonski napon tjerao stalno neku struju kroz taj aparat i držao bi stalno vod u spoju sa zemljom. Zato svaki ventilni odvod-



Sl. 13.8. Određivanje oblika napona na odvodniku

nik prenapona ima iskrište i ono drži promjenljive otpore odvodnika odvojene od voda i od pogonskog napona. Tek kad naiđe naponski val stanovite veličine i kad njegov napon prekorači određenu vrijednost, za koju je iskrište dimenzionirano, onda se preko iskrišta uključuju u rad promjenljivi otpori u odvodniku. Napon pri kojem proradi iskrište nazivamo proradni napon odvodnika. Na slici 13.8. shematski je nacrtan takav aparat i na istoj je slici protumačeno djelovanje takva odvodnika koji se nalazi u promatranom sklopu voda i krajnje stanice.

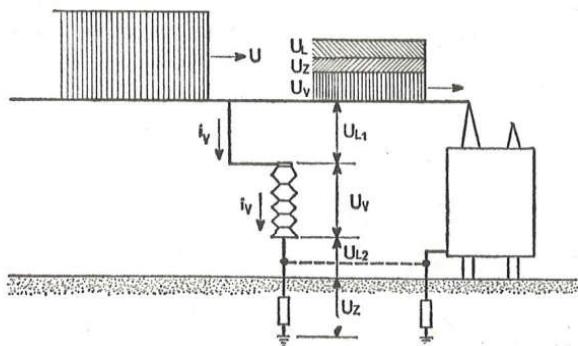
Iz dijagrama se vidi da dok iskrište ne proradi, napon na odvodniku raste zajedno s naponom upadnog vala, ali kad se ono aktivira, tad napon naglo pada do visine određene vremenskom karakteristikom odvodnika $U_v = f(t)$, pa zatim dalje slijedi njezin tok. Odvodnicima koji se upotrebljavaju u postrojenjima proradni je napon odvodnika približno jednak preostalom naponu odvodnika, odnosno naponu onog dijela vala koji se probio u stanicu. Na slici 13.8. radi boljeg razlikovanja pojmo-va ta je razlika oštrije izražena. Na istoj je slici nanesena i veličina onog dijela vala koji se nije probio u stanicu i označen je s U_r . Taj dio vala dobio se odbijanjem preostalog napona U_v od veličine napona vala U koji je na stanicu nailazio. Dakle, u ovom osvrtu utvrdili smo da se strmina vala mijenja nakon prorade ventilnog odvodnika pa treba paziti na to da u upotrebi ventilnih odvodnika te deformacije ne prekorače dopuštene vrijednosti.

13.4. Način spajanja odvodnika prenapona

Kad smo opisivali djelovanje ovog aparata, smatrali smo da je preostali napon U_v samo jednak padu napona na promjenljivim otporima što ga izaziva prolazak struje kroz njih. Međutim, struja odvoda ne prolazi samo kroz promjenljive otpore nego već prije toga protječe kroz njegov priključak, a zatim i kroz njegovo uzemljenje rasprostirući se na kraju u zemlji (sl. 13.9).

Na tom putu ona također izaziva padove napona na induktivitetima priključaka (U_{L1} i U_{L2}) i na otporu uzemljenja (U_z). Ta okolnost dovodi do toga da se preostalom naponu U_v pribrajaju i ti padovi napona. Prema tome, nakon prorade odvodnika transformator neće biti opterećen samo preostalim naponom nego će ukupni napon na njemu biti veći i sasvim će općenito iznositi:

$$U_T = U_v + U_z + U_{L1} + U_{L2}.$$



Sl. 13.9. Način priključivanja odvodnika

Ili, drukčije napisano, s obzirom na momentalne vrijednosti struje, dobivamo:

$$U_T = i(R_v + R_z) + L \cdot \frac{di}{dt}. \quad (13.10)$$

Pri tome je R_v otpor promjenljivih otpora u odvodniku, R_z je otpor uzemljenja odvodnika, a L je zbroj induktiviteta priključaka L_1 i L_2 .

Iako je duljina priključaka odvodnika obično kratka, a vrijednost je induktiviteta po jedinici duljine malena, ipak se na tim priključcima mogu pojaviti padovi napona koji nisu zanemarivi. Razlog zbog kojega nastaju na priključcima padovi napona je taj što se struja vala koji nailazi vremenski veoma brzo mijenja.

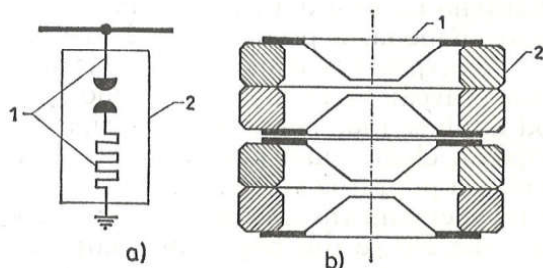
Da bi se ukupni pad napona sveo na što manji mogući iznos, nije lako smanjivati padove napona na induktivitetima priključaka, ali se zato daje izbjeći pad napona na otporu uzemljenja R_z — jednadžba (13.10). Zbog toga se, kako je to crtkano prikazano na slici 13.9, vezuje odvodnik prenapona na uzemljenje transformatora. Time se posebno ne povećava pad napona na induktivitetu nešto produljenog priključka, a nema više pada napona na otporu uzemljenja. To je posebno važno kad nam je otpor uzemljenja zbog vrste zemljišta velik.

Radi orijentacije dobro je pripomenuti da bi pri nailasku struje grama amplitude od 5 000 A i strmine od 1 000 A po mikrosekundi, te uz otpor uzemljenja odvodnika od 2 Ω i duljinu priključka od 10 m, naponi U_{L1} , U_{L2} i U_z iznosili zajedno 20 kV. To nije sasvim zanemarivo, pa to povećanje treba uzimati u obzir kod priključivanja odvodnika.

13.5. Izvedbe i vrste ventilnih odvodnika

Može se uglavnom uzeti da se konstrukcija ventilnog odvodnika sastoji od aktivnog i pasivnog dijela. Aktivni dijelovi su oni koji sudjeluju u odvođenju struje putnog vala (npr. iskrišta i nelinearni otpori), a pasivni su oni dijelovi koji u tome nemaju udjela (npr. porcelansko kućište).

Na slici 13.10.a shematski je prikaz ventilnog odvodnika. Iz sheme vidimo da iskrište svojim razmakom drži vod izoliran od zemlje, a u isti mah taj razmak određuje i visinu proradnog napona. Proboj je ovisan i o strmini čela onog vala koji nailazi. Dalje je na slici 13.10.b predloženo kako otprilike nekim odvodnicima izgledaju iskrišta kon-



Sl. 13.10. Shema odvodnika i presjek iskrišta

1. Aktivni dio
2. Pasivni dio

1. Iskrišta
2. Porcelanski prsten

strukcijski složena. Tako složena serija tih elemenata (tj. njihov broj) određena je nazivnim naponom odvodnika.

Drugi aktivni elementi ventilnog odvodnika su promjenljivi otpori. Oni služe ne samo za održavanje stalnog napona u stanici za vrijeme djelovanja prenapona nego i za prekid popratne struje nakon prolaska prenapona.

Nelinearni se otpori rade u obliku valjčica različita promjera i debljine već prema veličini napona i struje. Izrađeni su od karborunduma (SiC) pomiješanoga s izolacijskim materijalom, a zatim su prešani u željeni oblik. Na djelovanje nelinearnih otpora već smo se osvrnuli kad smo opisivali fizikalna zbivanja u ventilnom odvodniku.

U vezi s porcelanskim kućištem, koje je glavna pasivnih dijelova odvodnika, važno je istaknuti da ono služi kao izolacija voda od zemlje, a mora biti izvedeno tako da hermetički zatvara aktivne dijelove tog aparata. Tako je osiguran nezavisan rad aktivnih dijelova od klimatskih prilika. Kućišta odvodnika izvedena su za unutrašnju i vanjsku montažu.

Sa stajališta zaštite i djelovanja odvodnik mora zadovoljavati ove opće uvjete:

Kad ugrađujemo ventilni odvodnik, treba bezuvjetno paziti na to da na razmaku njegovih iskrišta nastane proboj prije nego bi se on pojavio na izolaciji opreme koju želimo njime zaštititi. Provjera takva odnosa izvodi se udarnim naponima pa zato kažemo da njegova udarna karakteristika mora biti niža od udarne karakteristike štićene opreme.

Preostali napon ni u jednom trenutku ne smije biti veći od onog napona koji izolacija opreme može izdržati, odnosno od njezine izolacijske razine.

Popratna struja mora biti veoma brzo prekinuta. Poželjno je da se to postigne odmah poslije njezina prvog prolaska kroz nulu.

U normalnim uvjetima rada i pri pogonskim zahvatima sklapanja odvodnik se mora vladati kao izolator, a za vrijeme djelovanja prenapona kao promjenljivi otpor čime je osigurano njegovo ventilno djelovanje.

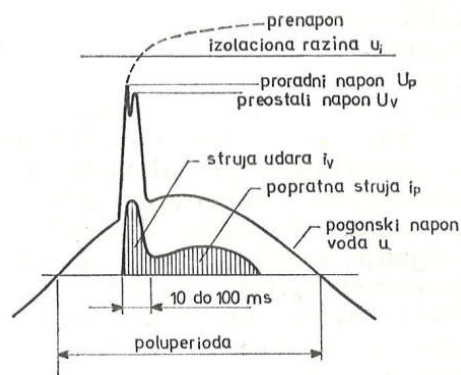
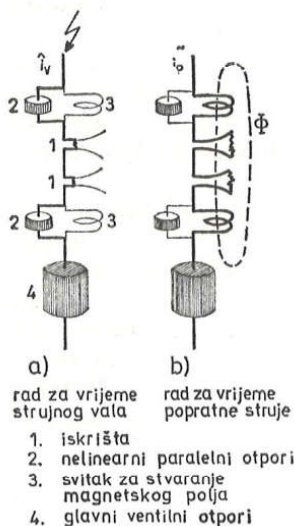
Polazeći od tih općih zahtjeva, tehnika je gradnje ovih aparata u posljednje vrijeme znatno napredovala. U daljnjem tekstu dat ćemo neke podatke o suvremenim odvodnicima prenapona s obzirom na njihove konstrukcije.

Već smo rekli da se važna funkcija nelinearnih otpora sastoji u tome što oni prekidaju popratnu struju. Međutim, za vrijeme odvođenja struje putnog vala i prekidanja toka popratne struje troše se i stare nelinearni otpori, odnosno mijenjaju se njihove karakteristike k — vidi izraz (13.5). Naravno da to u daljem radu uzrokuje promjenu veličine i oblika preostalog napona, a prema tome i promjenu predviđene sigurnosti zaštite.

Novijim konstrukcijama odvodnika nastoji se izvesti napredak u dva pravca: savršenijom se tehnologijom poboljšavaju vrste materijala od kojih se rade nelinearni otpori, a, s druge strane, drugim se konstrukcijskim elementima pokušava, što je moguće više, skratiti vrijeme prekidanja popratne struje. Kao rezultat tih nastojanja izveden je odvodnik s magnetskim raspršivanjem luka (sl. 13.11). Osnovna ideja te izvedbe je u tome što se dio naprezanja koji se pojavljuje kod prekida popratne struje na nelinearnim otporima nanovo prebaci na iskrišta. To je zahtijevalo novu izvedbu iskrišta i ugrađivanje svitaka za stvaranje magnet-

skog toka Φ . U toj je konstrukciji upotrijebljen princip poznat u osnovama elektrotehnike, po kojemu se ako je vodič protjecan strujom u magnetskom polju, pojavljuje sila koja taj vodič pomiče u prostor slabijeg polja. Iako u odvodniku nema vodiča u klasičnom smislu, nego je to luk između iskrišta, ipak možemo očekivati da će sila magnetskog polja djelovati u smislu raspršivanja luka, odnosno širenja ioniziranog kanala. To pogoduje gašenju luka, pa i prekidanju toka popratne struje. Ta konstrukcija omogućuje da se smanje dimenzije odvodnika upotrijebi li se ili manji broj nelinearnih otpora ili se uzmu oni jeftiniji i manje kvalitetni. Iskrišta su izvedena na razne načine, a smještena su tako da se okruglim izolacijskim umecima stvaraju komore za gašenje luka. Magnetski su svici smješteni na krajevima iskrišta radi simetrične raspodjele magnetskog polja po njima. Da bismo obrazložili ukupno djelovanje ovog aparata, razmatrajmo po konstrukcijskim skicama na slici 13.11. i po krivuljama rada na slici 13.12. pojedine faze njegova djelovanja.

Sl. 13.11. Rad odvodnika s magnetskim raspršivanjem luka



Sl. 13.12. Krivulje rada ventilnog odvodnika

Na slici 13.11.a predložen je odvodnik u toku odvođenja jednog dijela prenapona U , odnosno dijela njegove struje i_v . Pretpostavimo da su iskrišta djelovanjem prenapona proradila i da za to vrijeme odvodnik odvodi dio struje udara i_v u zemlju. Na odvodniku vlada preostali napon U_v . Ta će faza rada trajati sve dok traje djelovanje putnog vala. Za to vrijeme struja i_v ne može aktivirati magnetske svitke jer je ona impulsnog oblika i njoj svici, iako malog induktiviteta, pružaju veliki otpor. Struja i_v kroz odvodnik je na slici 13.11.a označena punom crtanom linijom, a na slici 13.12. prvim dijelom iscrtkane površine.

Na slici 13.11.b vidimo prilike u odvodniku trenutak nakon što je prenapon prošao, odnosno trenutak poslije kako je struja odvođenja i_v prošla kroz odvodnik. Za vrijeme prolaska struje i_v bio je između iskrišta i u nelinearnim otporima postignut veoma visok stupanj ionizacije, pa je to, naravno, sada otvoreni put za struju koju tjera pogonski napon voda u . Ta, dalje, struja nije više impulsnog oblika, nego je industrijske fre-

kvencije, pa će biti u stanju aktivirati magnetske svitke paralelno priključene iskrištima. To je popratna struja i_p . Induktiviteti tih svitaka ne pružaju sada, kao prije, velik otpor. Magnetski tok proizveden tim svicama djelovat će silom odbijanja na prostore između iskrišta kojima teče popratna struja i_p , pa će tu struju raspršivati kako je to na slici 13.11. punom crtom označeno. Djelovanjem tog raspršivanja kombiniranim s porastom otpora u nelinearnim otporima, dolazi konačno do prekida toka popratne struje u odvodniku. Trenutak prekida toka popratne struje uslijedit će vjerojatno u času prolaska te struje kroz nulu. Za vrijeme njezina prolaska kroz odvodnik stvaraju se između iskrišta i na nelinearnim otporima padovi napona, ali znatno manji od preostalog napona U_v prije stvorenoga prolaskom struje udara i_v .

Uz određene kombinacije broja iskrišta i magnetskih svitaka te uz stanovit broj nelinearnih otpora možemo izvesti takve vrste ventilnih odvodnika da oni vrijede za područje napona od 5 do 700 kV.

Osim ovog odvodnika dobro je spomenuti i one njemu slične s magnetskim raspršivanjem luka. Osnovna ideja svih tih drugih konstrukcija jednaka je kao kod već opisanog odvodnika. Ipak ima nekih razlika u izvedbi. Naime, kod tih drugih odvodnika magnetsko se polje za raspršivanje luka ne stvara pomoću magnetskih svitaka, nego ga uspostavljaju permanentni magneti. Osim toga, te druge konstrukcije imaju uz iskrišta i paralelno spojene visokoomske otpore koji služe za povoljniju raspodjelu napona po pojedinim elementima odvodnika.

Informacije radi treba spomenuti još i kondenzatorski odvodnik koji se upotrebljava na vodovima istosmjernog napona do 4 000 V. To je posebna vrsta kondenzatora velikoga električnog otpora, koji je ispunjen *pyranolom*. Paralelno kondenzatoru spojen je i jedan otpor koji služi za izbijanje. Kondenzator je smješten u limenom kućištu što se nalazi na posebnom postolju. Njegov zaštitni učinak svodi se na smanjenje strmine čela i trajanja dolazećeg vala. Upotrebljava se za zaštitu instalacija istosmjerne električne vuče. Djelovanje ove vrste odvodnika bit će potanje opisano u daljnjim izlaganjima.

13.6. Izbor ventilnih odvodnika

Kad se odabiru ventilni odvodnici, treba uzeti u obzir koliko često nailaze putni valovi visokih vrijednosti da bi zaštita ventilnim odvodnicima bila djelotvorna i ekonomična. Već je o tome bilo riječi, ali radi razumijevanja daljnjih izlaganja ponovimo još jedanput da je smanjenje tih prenapona na neopasnu vrijednost zajamčeno preostalim naponom U_v koji je manji od naponske razine U_i izolacije što je štitimo. Odnosno, ventilni odvodnik ne smije propustiti prema objektu veći napon od onoga koji izolacija može izdržati (sl. 13.12). Taj gornji granični uvjet, ta gornja granica rada ventilnih odvodnika onda logično mora biti dopunjena donjim graničnim uvjetima, odnosno nekom donjom granicom rada ventilnih odvodnika. I zaista ta donja granica postoji. Poznato je da odvodnici prenapona ne mogu termički izdržati duže vrijeme opterećenja izmjeničnom strujom pogonske frekvencije, pa zato treba spriječiti da izmjenična struja kroz njih dulje prolazi. Iz tih razloga oni ne smiju reagirati

na izmjenične pogonske napone. Kad se, ipak, ponekad uz struju udara provuče koji poluval izmjenične struje, iz spomenutih razloga dobar ventilni odvodnik mora tu struju što prije ugasiti i radi pogonske, a i radi vlastite sigurnosti. Zato donjom granicom pri kojoj ventilni odvodnik ne smije raditi možemo smatrati najviši linijski pogonski napon mreže U_m , jer fazni vodič, gdje je priključen odvodnik, može prilikom zemljospoja poprimiti i tu vrijednost napona. A taj napon može tjerati tad kroz odvodnik za njega opasnu izmjeničnu struju. Ako želimo biti još stroži, pretpostavit ćemo da na naš odvodnik istodobno djeluje i porast napona zbog Ferantijeva efekta, pa o svim tim mogućnostima valja voditi računa kad se odabiru karakteristike odvodnika. Dakle, jednostavno rečeno, treba spriječiti da kroz odvodnik teku izmjenične frekvencije od 50 Hz, te se prema tom zahtjevu određuje donja granica rada nekog odvodnika.

Osim toga, svi odvodnici prenapona nisu građeni tako da mogu izdržati termičko naprezanje pri odvođenju struja koje bi bile izazvane putnim valovima što se pojavljuju u trenutku kad se isključuju i uključuju strujni krugovi. Zato treba spriječiti da ventilni odvodnici prilikom nailaska takvih prenapona počnu djelovati, kao što se maločas zahtijevalo za izmjenične napone. Izuzetno, kad su odvodnici rađeni za odvođenje struja koje nastaju pri unutrašnjim prenaponima, tada oni mogu proraditi, ali to se odnosi na one što se priključuju na postrojenja od 400 kV i više. Svi odvodnici prenapona nisu jednaki. Ima ih različitih vrsta, građanih za veća ili manja strujna opterećenja, za veću ili manju zaštitu nekog aparata, za bržu ili sporiju proradu itd. Da bismo proveli najbolji izbor, moramo prije toga znati po čemu se odvodnici prenapona razlikuju jedan od drugoga, odnosno moramo uspoređivati njihove karakteristične veličine. Te se veličine dadu slobodnije opisati pa ćemo to i učiniti.

13.6.1. Nazivni napon odvodnika

Nazivni napon, možemo reći, najveća je efektivna vrijednost izmjeničnog napona pogonske frekvencije koju ventilni odvodnik stalno i sigurno podnosi i pri kojoj sigurno prekida ili gasi popratnu struju nakon odvođenja struje udara. Drugim riječima, to je izmjenični napon koji odvodnik mora stalno podnositi i prije i poslije odvođenja struje udara. (Njegova iskrišta ne smiju proraditi.) Vrijednost nazivnog napona praktički se uzima nešto većom od povremenoga najvećeg porasta pogonskog napona, tako da odvodnik ne može kod tog povremenog povišenja napona proraditi, a osim toga je i gašenje popratne struje osigurano. Zato se nazivni napon odvodnika u literaturi naziva i nazivni napon gašenja. Međutim, povremeno povišenje pogonskog napona prema zemlji nije jednako kod izravno uzemljenih mreža i onih koje su izolirane ili uzemljene preko prigušnice. Zato se često razlikuju i nazivni naponi odvodnika prenapona za ta dva načina pogona. Iz svih tih razloga treba prije odabiranja nazivnog napona utvrditi najveće povremeno povišenje pogonskog napona U_{po} , a ono se općenito za uzemljenu i izoliranu mrežu izračunava iz izraza:

$$U_{po} = c_d \cdot c_f \cdot U_m / \sqrt{3}. \quad (13.11)$$

- c_d — dinamički faktor prenapona; njegova vrijednost za izravno uzemljenu i izoliranu mrežu uzima se da iznosi $c_d = 1,07$
 c_f — faktor greške radi spoja jednog vodiča sa zemljom; za izravno uzemljenu mrežu uzima se da iznosi $c_f = 1,3$, a za izoliranu i gašenu mrežu $c_f = 1,73$
 U_m — najveća vrijednost linijskoga pogonskog napona neke mreže, koja se uzima i kao stupanj njezine izolacije (npr. vrijednost U_m je za 30 kV-nu i 35 kV-nu mrežu 38 kV, a za 110 kV-nu mrežu 123 kV itd.)

Kad se izračuna povremeno povišenje U_{po} , odabere se odvodnik tako da mu nazivni napon U_n bude veći od povremenog povišenja napona U_{po} ($U_n > U_{po}$). U izrazu (13.11), koji nam omogućuje da do nazivnog napona odvodnika dođemo računanjem, pretpostavlja se da na porast pogonskog napona U_{po} djeluje istodobno zemljospoj i Ferantijev efekt. Dakle, kao osnovu uzimamo najnepovoljnije uvjete rada.

Nešto praktičnije i jednostavnije dolazi se do veličine nazivnog napona ako se za izoliranu mrežu uzme približno da je nazivni napon odvodnika nešto viši od najvećega linijskog napona mreže ($U_n > U_m$), a za izravno uzemljenu mrežu $U_n > 0,8 U_m$.

Primjer 13.2.

Potrebno je naći nazivni napon za ventilni odvodnik koji bi se ugradio u 110 kV-nu mrežu pretpostavljajući da je ona jedanput neposredno uzemljena, a drugi put je uzemljena preko prigušnice ili je izolirana. Najveća vrijednost pogonskog napona za tu mrežu iznosi $U_m = 123$ kV.

Rješenje:

a) Za neposredno uzemljenu mrežu povremeno povišenje napona prema izrazu (13.11) bit će:

$$U_{po} = c_d \cdot c_f \cdot \frac{U_m}{\sqrt{3}} = 1,07 \cdot 1,3 \cdot \frac{123}{\sqrt{3}} = 98,78 \text{ kV},$$

pa bi nazivni napon U_n odvodnika morao biti nešto viši od 98 kV.

b) Za posredno uzemljenu mrežu preko prigušnice ili za izoliranu mrežu povremeno povišenje napona iznosi:

$$U_{po} = c_d \cdot c_f \cdot \frac{U_m}{\sqrt{3}} = 1,07 \cdot 1,73 \cdot \frac{123}{\sqrt{3}} = 131,45 \text{ kV},$$

pa bi nazivni napon odvodnika morao biti nešto viši od 131,6 kV.

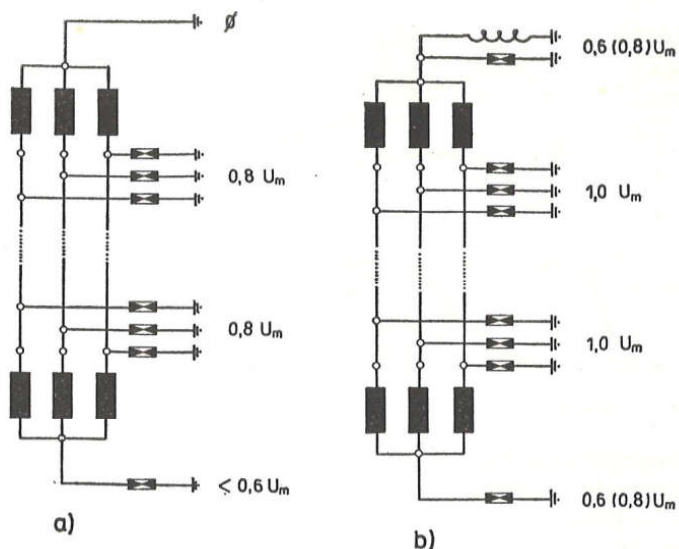
Približnim računanjem bismo u prvom slučaju dobili da nam nazivni napon odvodnika U_n mora biti nešto viši od $0,8 U_m = 98,8$ kV, a u drugome nešto viši od $1 \cdot U_m = 123$ kV.

Na slici 13.13. shematski su nacrtana ta dva stanja s naznačenim mogućnostima približnog računanja nazivnih napona odvodnika.

Na slici 13.13.a nacrtana je izravno ili, kako se udomaćilo nazivati, »kruto« uzemljena mreža. Odvodnicima prenapona, već smo spomenuli, nazivni je napon 80% najvišega pogonskog napona mreže. Kad se mreža tako uzemljuje, tad se ne moraju uzemljiti zvjezdišta na svim transfor-

Sl. 13.13. Upotreba odvodnika

matorima, pa u takvoj mreži možemo postaviti odvodnike u zvjezdista koja su ostala neuzemljena. Nazivni napon takvih odvodnika treba odrediti pretežno računanjem, a on otprilike zna iznositi i manje od 60% pogonskog napona mreže. Na slici 13.13.b shematski je prikaz

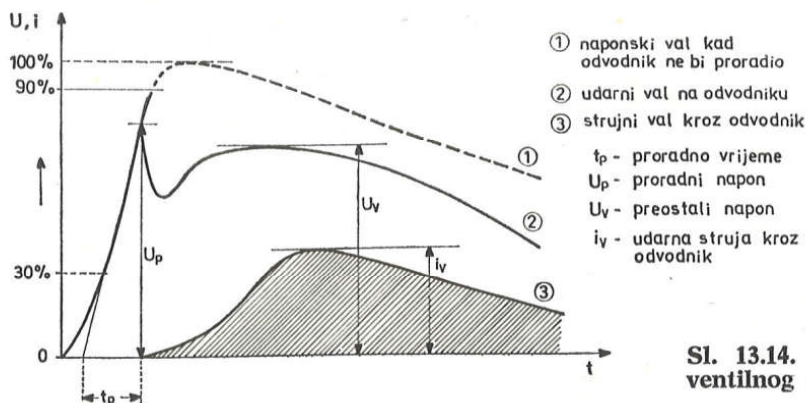


posredno ili, kako kažu, indirektno uzemljene mreže, odnosno mreže u kojoj su zvjezdista transformatora uzemljena preko Petersenova svitka. Takvu mrežu valja shvatiti kao gašenu izoliranu mrežu. Nazivni napon odvodnika koji se ugrađuje u takvu mrežu mora iznositi najmanje 100% najvišega pogonskog napona U_m , a nazivni napon onih odvodnika što se priključuju u zvjezdista transformatora uz sam svitak moraju biti najmanje 80% najvišega pogonskog napona U_m . Međutim, treba se podsjetiti na to da u odabiranju ventilnog odvodnika nije dovoljno samo odrediti njegov nazivni napon nego je potrebno da i njegove druge karakteristične veličine, npr. proradni napon, preostali napon, nazivna struja itd., odgovaraju zahtjevima zaštite nekog objekta. Zato ćemo dalje opisivati i ostale karakteristične veličine ventilnih odvodnika kako bi se oni mogli međusobno uspoređivati i točnije odabrati prema potrebama zaštite.

13.6.2. Proradni napon

Prije smo ustanovili da ventilni odvodnik prenapona ne smije proraditi pri nazivnom naponu U_m . Ali on ipak mora jedanput početi teći struja. To će se zaista i dogoditi, ali pri višem naponu, koji nazivamo proradni napon odvodnika, a označen je na slici 13.14. s U_p . Ta slika prikazuje neke karakteristične veličine već označene na slici 13.12, samo su radi njihova boljeg uočavanja neki detalji te slike na slici 13.14. vremenski razvučeni.

Odvodnici mogu proraditi kad na njih narinemo izmjenični napon, istosmjerni napon i udarni napon. Međutim, radi zaštite električnih postrojenja ovdje nas zanima ona efektivna vrijednost izmjeničnog napona frekvencije od 50 Hz i ona vrijednost udarnog napona oblika $1,2/50 \mu s$ pri kojoj će ventilni odvodnik proraditi. Te se vrijednosti utvrđuju ispi-



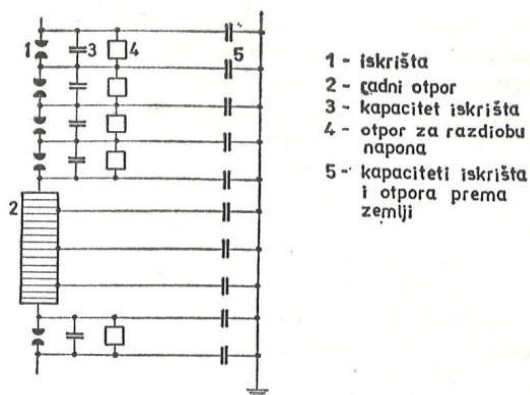
Sl. 13.14. Proradni napon ventilnog odvodnika

tivanjem i zovu: minimalni proradni izmjenični napon od 50 Hz i 100%-tni proradni udarni napon kojemu je oblik $1,2/50 \mu s$.

Proradni naponi ventilnih odvodnika koji se ugrađuju za zaštitu postrojenja do 220 kV napona moraju biti toliko visoki da oni ne prorade zbog nailaska unutrašnjih prenapona. Iz svih dosadašnjih izlaganja moglo se zaključiti, pa to nije možda potrebno posebno isticati, da i proradni napon ne smije nipošto premašiti onu vrijednost udarnog napona koju će izolacija opreme izdržati. Zato se nastoji postići da proradni napon i preostali napon nekog odvodnika budu približno jednake vrijednosti. Za naponske razine od 400 kV i više, gdje su stalno prisutne znatnije količine unutrašnjih energija, unutrašnji prenaponi svojom veličinom jače ugrožavaju postrojenja od atmosferskih prenapona. Zbog toga moramo paziti na to da postavljeni odvodnici prorade kad naiđu takvi prenaponi, a najveći broj atmosferskih prenapona izolacija takvih postrojenja prema današnjim gledanjima i stečenim iskustvima može izdržati. Takve ocjene treba donositi, svakako, uz stanoviti oprez. Prema tome, proradni naponi odvodnika za naponske razine od 400 kV i više moraju biti barem od 10 do 15% niži od onoga unutrašnjeg prenapona koji će izolacija podnijeti ili, nešto točnije rečeno, manji od izolacijske otpornosti opreme u postrojenjima prema sklopnim prenaponima. Ta vrsta odvodnika, kako vidimo, osim energije struja groma mora biti sposobna da odvede još veće energije unutrašnjih prenapona, pa su oni i posebne izvedbe. No, nama je želja da se bavimo zaštitom od groma, pa u izvedbe i mogućnosti tih odvodnika nećemo potanje ulaziti.

Da bi ventilni odvodnici, bilo koje vrste, točno proradili pri onoj visini prenapona koja još nije opasna za izolaciju opreme u postrojenjima, moramo nastojati da raspodjela napona po cijeloj duljini odvodnika bude više ili manje jednolika. To nije jednostavno postići samom konstrukcijom odvodnika. Na slici 13.15. vidimo da se niz spojenih iskrišta može električki predložiti kao niz serijski spojenih kapaciteta i da svako iskrište posebno, kao i radni otpori posebno, ima svoj kapacitet prema zemlji. Takvi električni odnosi u konstrukciji onemogućuju da se napon vala koji na njih nailazi raspodijeli jednoliko po njima. Posebno se ta nejednolikost osjeća kad na odvodnik nailaze valovi velikih strmina, pa na raspodjelu napona utječu i mali kapaciteti tih elemenata prema zemlji. Zbog toga se zna dogoditi da jedno iskrište bude jače napregnuto,

Sl. 13.15. Osnovna ekvivalentna shema odvodnika prilikom određivanja proradnog napona



a drugo manje, pa neko može prije proraditi, a neko poslije. Ta nejednolikost prilikom prorade stvara teškoće posebno kad se zahtijeva da odvodnici prorade kod nižih napona. Da bi se smanjio taj nedostatak, u

odvodnike se paralelno iskrištima ugrađuju visokoomski otpori, a i posebni kondenzatori s vrlo velikom dielektričnom konstantom.

Točnost prorade ventilnih odvodnika jedan je od vrlo važnih zahtjeva sigurne zaštite postrojenja svih nazivnih napona. Odvodnici prenapona brže ili sporije pružaju zaštitu opremi koju želimo štititi. To ovisi o tome kad će odvodnik početi raditi. Zato, vrijeme koje će proteći od trenutka pojave prenapona na odvodniku do trenutka prorade njegovih iskrišta nazivamo vremenom prorade. Taj vremenski interval označen je na slici 13.14. s t_p i drži se jednom od karakteristika ventilnih odvodnika.

13.6.3. Nazivna struja

Prilikom nailaska prenaponskog vala, koji će imati više ili manje energije, odvodnikom će proteći jača ili slabija struja, koja će dulje ili kraće trajati. To ovisi o mnogo činilaca. Međutim, nakon prorade svaki odvodnik ne može, zbog svoje konstrukcije, izdržati sve jakosti struja različitog trajanja. Zato pod nazivnom strujom nekog odvodnika razumijevamo tjemenu vrijednost one udarne struje oblika $8/20 \mu s$ za koju je konstrukcija odvodnika proračunata i koju će on bez oštećenja izdržati. Po veličini nazivne struje odvodnici se prenapona razlikuju jedan od drugoga. Neki su od njih dimenzionirani za slabije udarne struje, a neki za jače, pa se udomaćilo govoriti da imamo više klasa odvodnika. Prema međunarodnom dogovoru ventilni odvodnici se rade za udarne struje od 1,5, 2,5, 5, 10 i 20 kA. Oni mogu, i kad su jednakoga nazivnog napona, imati različitu odvodnu moć, ali obično se oni slabije odvodne moći ugrađuju u postrojenja nižih napona, a veće odvodne moći u postrojenja viših napona ili kad se očekuju posebno teški uvjeti rada. Odvodnici se nakon proizvodnje ispituju nazivnom strujom za koju su konstruirani. Međutim, da bi se njihova izdržljivost provjerila, moraju se ispitivati i udarnim strujama jačima od nazivne struje pa se tako npr. odvodnici kojima je nazivna struja od 10 kA ispituju kratkom udarnom strujom tjemene vrijednosti čak od 100 kA, ali koja ne traje $20 \mu s$, nego samo $10 \mu s$. Tom jakom i kratkotrajnom strujom provjerava se njegoa odvodna moć, i to s dva uzastopna udara.

Kad smo opisivali rad ventilnih odvodnika, vidjeli smo da oni nakon odvođenja struje udara odvedu i poneki poluval popratne izmjenične struje. Takva struja može toplinom koju stvara oštetiti odvodnik ako ona dulje protječe njegovim otporima. Da bi se provjerila izdržljivost odvodnika i prema takvim naprezanjima, oni se ispituju dugotrajnom udarnom strujom što dulje protječe njegovom konstrukcijom. Ta struja ima približno pravokutni oblik. Ispitivanje takvim strujnim valom obavlja se 20 puta, i to tako da se svake minute pošalje po jedan udar. Samo se nakon prvih deset udara prekida ispitivanje za 30 minuta, a poslije se normalno nastavlja. Za vrijeme tih ispitivanja odvodnik mora izdržati sva toplinska naprezanja i na njemu se ne smije pojaviti nikakvo oštećenje. Na primjer, za jedan odvodnik prenapona nazivne struje odvoda od 5 kA upotrebljava se dulji strujni val, približno pravokutna oblika amplitude od 75 A, koji traje 1 000 μ s, a odvodnik bi nazivne struje od 10 kA morao biti podvrgnut ispitivanju dugim valom amplitude od 150 A, trajanja od 2 000 μ s.

Možda nije suvišno podsjetiti na to da se u proračunu zaštite nekog postrojenja od putnih valova i odabiranju odvodnika mora računati s njegovom nazivnom strujom, a ne sa strujama kojima se on ispituje.

13.6.4. Preostali napon

Preostali je napon najvažnija karakteristika ventilnog odvodnika, koja omogućuje da se on u praksi korisno primjenjuje. On se naziva katkad i propušteni napon ili zaštitni »nivo«. Taj napon za vrijeme rada odvodnika mora izolacija izdržati. Općenito, pod preostalim naponom razumijevamo onu najvišu vrijednost napona na odvodniku koja se na njemu pojavljuje za vrijeme dok kroz njega prolazi udarna struja. Nelinearni otpori ugrađeni u odvodniku osiguravaju da veličina preostalog napona ne prekorači dopuštenu vrijednost i onda kada kroz odvodnik teče i najveća moguća struja odvoda. Može se približno reći da vrijednost preostalog napona ostaje konstantna za cijelo vrijeme odvođenja struje udara. Međutim, valja napomenuti da se ipak pod nazivnim preostalim naponom smatra ona vrijednost preostalog napona koja se pojavljuje na odvodniku kad njime prolazi nazivna struja za koju je on konstruiran. Na slici 13.14. najviša je vrijednost preostalog napona označena s U_v .

Znamo da se preostali napon na odvodniku prenapona U_v i 100%-tni proradni napon na istom odvodniku U_n praktički vrlo malo razlikuju jedan od drugoga. No, prilikom odabiranja ventilnog odvodnika treba ipak uzeti u obzir te moguće male razlike. Naime, može se dogoditi da se na štićenom objektu prije odvođenja struje kroz odvodnik pojavi i napon viši od onoga koji smo predvidjeli da će neki aparat izdržati. Zato valja u proračunima od te dvije vrijednosti uzeti onu koja je veća. Odvodnici prenapona jednakoga nazivnog napona U_n ne moraju imati i jednak preostali napon U_v . Neki imaju nakon prorade veći, a neki manji preostali napon. Dakle, neki odvodnik slabije štiti neko postrojenje, a neki to čini bolje. Zato je dogovoreno i preporučeno da se u odabiru ventilnih odvodnika za zaštitu postrojenja uzme onaj kojem je preostali napon U_v obavezno manji od onoga što ga izolacija može podnijeti, odnosno manji

od podnosivog napona izolacije U_i . Taj je razmak prilikom usklađivanja izolacije određen »koeficijentom zaštite« $f_k = (U_i/U_v)$, za koji se uzima da iznosi 1,4 za mreže i postrojenja do 24 kV, a 1,2 za mreže od 30 do 35 kV i više. Zato preostali napon, odnosno zaštitni napon nekoga odabranog odvodnika prenapona, mora biti manji ili najviše jednak omjeru (U_i/f_k) . Tako, preostali napon nekog odvodnika kojim treba štititi postrojenje od 10 kV izolacijske razine $U_i = 75$ kV, morao bi biti manji od omjera $(75/1,4) = 53,57$ kV ili jednak njemu. Za mrežu od 30 do 35 kV on bi morao biti manji od $(170/1,2)$, te analogno za mreže od 110 i 220 kV manji od $(450/1,2)$ i manji od $(900/1,2)$.

Naravno da i 100%-tni proradni udarni naponi ne smiju premašivati te vrijednosti jer bi i u toj prilici izolacija postrojenja bila ugrožena.

13.6.5. Tendencije razvoja ventilnih odvodnika

Osvrnut ćemo se sasvim ukratko i općenito na razvoj ventilnih odvodnika ili, točnije, na promjene njihovih osnovnih karakteristika nastalih tokom vremena i na one promjene koje se eventualno naslućuju u budućnosti, ako se ova vrsta zaštite bude dulje upotrebljavala. Vidjeli smo da ventilni odvodnici koje smo dosad razmatrali štite uglavnom električna postrojenja od putnih valova prouzrokovanih udarom groma. Atmosferska izbijanja kao prirodni fenomen izvori su koji se po količini sadržane energije više ili manje nisu dosad mijenjali, a neće se ni ubuduće promijeniti. Udari iz takvih izvora ugrožavaju jače izolaciju električnih postrojenja nižih nazivnih napona, a manje izolaciju viših nazivnih napona. Kad određujemo zaštitu za postrojenja bilo kojih nazivnih napona, tamo negdje do 220 kV, onda se odlučujemo za zaštitne ili preostale napone ventilnih odvodnika koje izolacija opreme u tim postrojenjima može izdržati. Kad bismo razmatrali samo tu karakteristiku odvodnika, mogli bismo reći da se ona u tehnici zaštite posljednjih tridesetak godina nije bitnije mijenjala. Doduše, pažljivim uvidom u podatke iz literature opazit ćemo da se visina preostalog napona na odvodnicima nešto malo smanjila radi veće sigurnosti i bolje zaštite od putnih valova uzrokovanih udarima groma. Ali, uglavnom bismo mogli reći da je visina preostalog napona s obzirom na otpornost izolacije postrojenja ostala nepromijenjena.

Kad su se počela graditi postrojenja i vodovi nazivnih napona od 400 kV i više, oni su postali sijela velikih količina unutrašnjih energija, pa su unutrašnji prenaponi postali opasni za opremu u postrojenjima, što je nalagalo da se visina zaštitnog ili preostalog napona osjetno smanji. Osim toga su se i konstrukcije odvodnika morale promijeniti i pojačati da bi te vrlo jake struje mogle nesmetano odvoditi. Mogli bismo konstatirati da se posljednjih desetak godina zbog toga osjeća tendencija jačeg smanjenja visine preostalog napona, posebno s obzirom na sklopne prenapone. Takav razvoj u konstrukciji i promjena te karakteristike ventilnih odvodnika za više nazivne napone najvjerojatnije će se i dalje nastaviti jer se izvori unutrašnjih prenapona pojačavaju dok izvori vanjskih prenapona, kao prirodne pojave, ostaju isti.

Sposobnost odvođenja jakih struja što ih izazivaju unutrašnji prenaponi, posebno oni sklopni, postignuta je sve boljim i boljim strujno-naponskim karakteristikama suvremenih odvodnika prenapona. To je usavršavanje osobito izraženo pri upotrebi odvodnika s magnetskim raspršivanjem električnog luka, što smo ih u prethodnim izlaganjima opširnije opisali. U praksi takve odvodnike nazivaju odvodnicima s aktivnim iskrištima. Oni su najvjerojatnije tako nazvani da bi se na neki način razlikovali od klasičnih odvodnika, koji nisu takve konstrukcije, a nazivaju ih odvodnicima s pasivnim iskrištima.

Da bismo što više ograničili naprezanje izolacije zbog djelovanja unutrašnjih prenapona, posebno onda kad su oni duljeg trajanja, nastoji se da električni luk između iskrišta bude što dulji i da dio energije preuzme na sebe. Međutim, to povećanje duljine luka, s druge strane, povisuje preostali napon, što može biti opasno za opremu postrojenja, osobito u vremenskom razmaku kad se odvođe visoke vrijednosti sklopnih prenapona. Ta se dva suprotna zahtjeva kod najnovijih odvodnika usklađuju radom tzv. kontroliranih aktivnih iskrišta. Na takav se način poboljšava njihova karakteristika odvođenja.

Mnogo se danas radi i na točnosti i pouzdanosti prorade ventilnih odvodnika prilikom nailaska valova različitih oblika. Da bi se postigao točan napon prorade, nastoji se u točki blizu napona prorade izvršiti predionizacija. Ta se točka odabere na onoj visini napona kad je jakost električnog polja već toliko velika da nastaje tinjavo izbijanje. Naravno, tinjanje se mora pojaviti na naponu nižem od proradnoga. Radi točnosti prorade usavršavaju se visokoomski otpornici i kondenzatori pomoću kojih se postizava najpravnomjernija raspodjela napona po iskrištima.

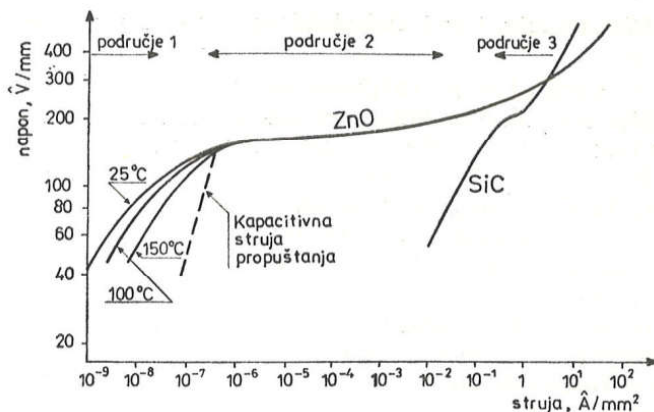
13.7. Cink-oksidni odvodnici

Cink-oksidni odvodnici prenapona ZnO ili, kako ih nazivaju, »varistori« najnovija su izvedba odvodnika koji su u upotrebi posljednjih desetak godina. Oni su pronađeni u Japanu za zaštitu aparata u visokonaponskim postrojenjima. U Evropi su prvi put upotrijebljeni 1975. godine za zaštitu u elektroenergetskom sistemu Švedske, a u novije ih je vrijeme relativno veliki broj i u drugim zemljama. S obzirom na to da su te konstrukcije odvodnika novijeg datuma, za njih se još uvijek drži da su u pokusnom radu jer njihovu djelotvornost i sigurnost treba još provjeravati.

Glavna razlika između konstruiranja cink-oksidnih i klasičnih ventilnih odvodnika je ta što oni nemaju iskrišta, pa se njihove karakteristike i njihov rad u pogonu međusobno nešto razlikuju.

Kad smo opisivali ventilne odvodnike, istaknuli smo da su oni izvedeni od promjenljivih otpora sastavljenih od čestica karborunduma, odnosno silicijeva karbida (SiC). Toj novoj vrsti odvodnika promjenljivost je otpora postignuta djelovanjem čestica cink-oksida koji su obloženi oksidima bizmuta i drugim metalnim oksidima. Smjesa se tih sastojaka prethodno miješa s izolacijskim materijalom i preša. Zatim se otpori oblikuju kao valjčići i peku na visokoj temperaturi tako da na kraju dobijemo kompaktno keramičko tijelo koje se ugrađuje u odvodnik.

Sl. 13.16. Karakteristika struja — napon ZnO -odvodnika



Djelovanje ovih odvodnika prikazano je na slici 13.16. karakteristikom struje i napona. Kako ova vrsta odvodnika nema iskrišta, kroz njih bi morala proteći odmah struja koju bi tjerao pogonski napon mreže ili najmanji prenapon. Međutim, kako vidimo iz karakteristike, to se ne događa. U samom početku struja koja protječe, odnosno struja propuštanja, zanemarivo je malena jer izolacija između cink-oksidsnih čestica to protjecanje ne dopušta. Doduše, to područje rada ovog odvodnika, na karakteristici označeno brojkom 1, osjetljivo je na temperaturu, ali u tom području o vodljivosti ovih otpora ne možemo govoriti. Naprotiv, dielektrička konstanta toga izolacijskog stanja vrlo je visoka i iznosi oko 1 000, pa struja propuštanja ima više kapacitivni karakter. Njezine vrijednosti s obzirom na napon na slici su crtkano označene.

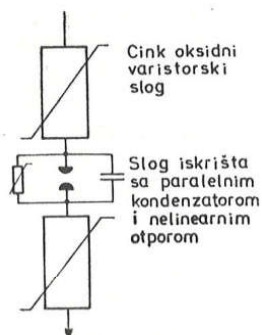
Kad se varistoru dalje povisuje napon, tada izolacijski materijal u kojem su čestice cink-oksida postaje vodljiviji pa se struja propuštanja jako pojačava, a to je uvjetovano ravnim dijelom karakteristike struje i napona na istoj slici. To područje rada cink-oksidsnog odvodnika, na slici označeno brojem 2, pokazuje nam da se povećanjem struje propuštanja gotovo milijun puta preostali napon na njemu malo mijenja. To je područje rada vrlo povoljno za zaštitu postrojenja jer odvodnik pokazuje gotovo idealna ventilna svojstva. Kod još veće struje propuštanja preostali napon na njemu nešto bi se osjetnije mijenjao (područje 3). Da bi se uočila razlika između djelovanja ovog i klasičnog odvodnika, na slici 13.16. nacrtana je karakteristika rada i odvodnika kojem su promjenljivi otpori sastavljeni od čestica karborunduma (SiC). Uspoređujući te karakteristike možemo utvrditi da se napon na klasičnom brže mijenja nego na cink-oksidsnom odvodniku.

Budući da ova nova izvedba odvodnika nema iskrišta, njegovi su promjenljivi otpori za vrijeme normalnog pogona stalno pod izmjeničnim naponom industrijske frekvencije. Treba zato nastojati, kad upotrebljavamo ovakav odvodnik, da kroz njega ne bi trajno protjecala jača izmjenična struja koja bi ga eventualno zagrijavala i tako mijenjala njegova ventilna svojstva. Da se to ne dogodi, on se trajno daje priključiti samo na takav iznos pogonskog napona koji neće kroz njega tjerati veće struje. Kad bismo tu trajnu radnu točku tražili na nacrtanoj karakteristici na slici 13.16, tad bismo je našli dosta ispod koljena te krivulje, između područja rada 1 i 2. U tom intervalu cink-oksidsni odvodnik se prema podacima proizvođača vlada gotovo kao dobar izolator, pa kroz njega, kad ne odvodi struju udara, protječe, kako smo već spomenuli samo slabašna kapacitivna struja.

13.7.1. Izvedba i rad cink-oksidge odvodnika u pogonu

Cink-oksidge valjkasti otpori ugrađuju se i slažu u porcelansko kućište na jednak način kao što su složeni otpori od čestica karborunduma s iskrišta u ventilnom odvodniku, u izvedbama koje smo prethodno opisivali. Broj tih elemenata ovisi o jačini udarne struje koju treba odvoditi. Ako očekujemo jaku struju odvođenja, treba u odvodnik ugraditi više takvih elemenata i paralelno ih povezati. Danas se već proizvodi više vrsta ovakvih odvodnika. Neke novije konstrukcije koje moraju održavati vrlo niski preostali napon izvode se, u usporedbi s klasičnim odvodnicima, čak s malim brojem iskrišta, a opskrbljeni su promjenljivim otporima i kondenzatorima radi povoljnije raspodjele napona (sl. 13.17). Te konstrukcije, na neki način, koriste se dobrim stranama starijih odvodnika, spajajući ih sa suvremenijim elementima. Cink-oksidge odvodnici smješteni su u kućišta, kojih, opet, imamo više vrsta, već prema tome u kakvim će pogonima i atmosferskim prilikama raditi. Toliko o karakteristikama i konstrukcijama cink-oksidge odvodnika.

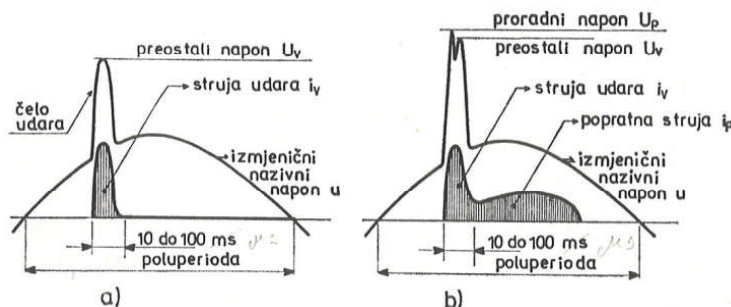
Najvažnije je, međutim, kako se oni ponašaju u pogonu, zato ćemo se u daljnjem tekstu osvrnuti na njihovo djelovanje kad su priključeni na mrežu. Kako smo već ustanovili, konstrukcija ovih odvodnika u osnovi se razlikuje od konstrukcije klasičnih odvodnika, pa je i njihovo djelovanje u pogonu drukčije. Da bismo što bolje uočili tu razliku, na



Sl. 13.17. Osnovna konstruktivna shema složenog ZnO -odvodnika

slici 13.18. radi usporedbe je prikazana krivulja rada cink-oksidge odvodnika i, ponovno, krivulja rada ventilnog odvodnika s iskrištima, koju smo u prethodnim izlaganjima opisali, pa je ovdje nećemo ponovno potanje i tumačiti. Usredotočimo se zato na način rada cink-oksidge odvodnika u pogonu prikazanoga na slici 13.18.a.

Pretpostavimo da na odvodnik ZnO nailazi putni val uzrokovan udarom groma i da na njemu djeluje nekoliko desetaka milisekundi. Prije no što je val stigao do njega, takvim odvodnikom protječe samo zanemarujuće mala kapacitivna izmjenična struja, što se kod klasičnog odvodnika jednako tako događa. Trenutno, čim val stigne i za cijelo vrijeme djelovanja tog prenapona, odvodnik će propuštati udarnu struju koja je na slici označena iscrtkanom površinom. Klasični bi



Sl. 13.18. Karakteristike rada odvodnika ZnO i SiC

odvodnik tu struju propustio tek nakon prorade njegovih iskrišta. Za vrijeme protoka te struje na cink-oksidsnom odvodniku se kao na klasičnome pojavljuje preostali napon ili zaštitni napon, kojem je iznos određen karakteristikama napona i struje. Nakon što je odvodnik odveo struju udara u zemlju, promjenljivi otpori u njemu poprimaju visoku vrijednost i djeluju kao izolatori prekidajući gotovo trenutno popratnu struju. Iz dijagrama na slici 13.18. a vidimo da će cink-oksidsni odvodnik popratnu struju prekidati gotovo potpuno i mnogo brže od klasičnog SiC-odvodnika (sl. 13.18.b).

Uspoređujući dalje rad dviju različitih konstrukcija, o njihovu se djelovanju u pogonu opažaju još neke razlike.

Kod cink-oksidsnih odvodnika nema naglih prijelaznih pojava koje se kod sadašnjih ventilnih odvodnika ne mogu izbjeći zbog djelovanja iskrišta kad napon vala na iskrištima dostigne proradnu vrijednost.

Vrlo vrijedna mogućnost varistora je brzo prekidanje izmjeničnih valova popratne struje koja može elektroenergetskim pogonima, a i samim klasičnim odvodnicima, stvarati velike teškoće. Osim toga, ta nepropusnost za valove izmjenične struje, nakon odvođenja struje udara, omogućuje da se pomoću novih konstrukcija odvodnika uz isti preostali napon, odvedu u zemlju jače struje groma. Dakle, mogli bismo reći da oni imaju veću odvodnu moć. No, karakteristike i ponašanje u pogonu cink-oksidsnih odvodnika zasad treba uzimati uz stanoviti oprez jer o njihovoj upotrebi ima relativno malo iskustva. Ako tehnička praksa potvrdi njihove osobine, to bi moglo dovesti do niza promjena u tehnici zaštite elektroenergetskih postrojenja.

S obzirom na njihovu osjetljivost na zagrijavanje treba uz trajni radni napon pažljivo odabrati i njihov nazivni napon, koji se uzima otprilike 20% veći od trajnoga radnog napona.

13.8. Cijevni odvodnici

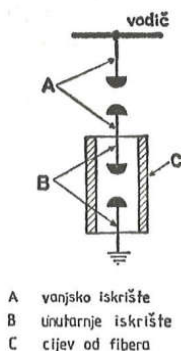
Cijevni su odvodnici relativno davno izvedeni u nastojanju da se izbjegnu nedostaci običnih iskrišta, koja se zbog svog načina djelovanja nisu mogla upotrebljavati kao jedino zaštitno sredstvo od prenapona. Pomoću njih se pokušao riješiti problem gašenja popratne struje nakon prorade, što obična iskrišta sama po sebi ne mogu provesti. Posebno se taj problem pojavio kod mreža s uzemljenom nul-točkom, gdje popratne struje nakon prorade mogu dosegnuti visoke vrijednosti. Cijevni odvodnici danas služe i dalje za zaštitu od prenapona, ali i dalje pretežno kao dopunsko sredstvo zaštite rasterećujući ventilne odvodnike od jakih struja udara groma. Ako su dobro izvedeni, dobro će doći, uz stanoviti oprez, u izvjesnim okolnostima i kao jedino sredstvo zaštite. Relativno su jednostavne konstrukcije i prema tome im cijena nije visoka.

Cijevni se odvodnik sastoji od dva iskrišta i jedne cijevi od fibera. Jedno iskrište smješteno je u cijevi, a drugo izvan nje. Međusobno su ona spojena serijski. Idejna skica takva odvodnika prikazana je na slici 13.19. Iskrište u cijevi izvedeno je u obliku dviju elektroda od kojih je jedna spojena sa zemljom, a druga na elektrodu vanjskog iskrišta. Vanjsko iskrište služi za odvajanje cijevi s unutarnjim iskrištem od radnog

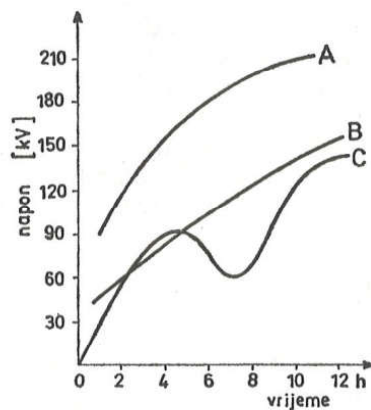
napona mreže. Kad to ne bi bilo tako izvedeno, radni bi napon stalno naprezao cijev tjerajući preko njezine površine struju odvoda. Ako bi to dulje vremena trajalo i ako bi to strujanje bilo intenzivno, moglo bi se dogoditi da nastupi izgaranje površine cijevi i tokom vremena potpuno uništenje odvodnika.

Opisat ćemo zaštitno djelovanje odvodnika. Kad val naiđe na odvodnik, odmah prorade oba iskrišta i struja u obliku luka počne strujati u zemlju kroz sad ionizirani prostor u odvodniku. Struja, odnosno luk, razvija u cijevi visoku temperaturu, te dolazeći u dodir s unutrašnjom površinom cijevi izaziva isparavanje jednoga tankog sloja fibera. Plin koji se tim isparavanjem stvara uzrokuje tlak u prostoru cijevi, pa pod tim tlakom izlazi iz odvodnika kroz šupljine izvedene na dnu cijevi, povlačeći za sobom ionizirani zrak. Na takav način nastupa deionizacija u prostoru unutrašnjeg iskrišta, pa prema tome i gašenje luka ili prekid toka popratne struje.

Ako je deionizacija dobro provedena, tok popratne struje će se prekinuti pri prolasku struje kroz vrijednost nula. Odvodnik na takav način postaje opet dobar izolator između voda i zemlje ili, kako se drukčije kaže: odvodniku se ponovno vratila njegova izolacijska čvrstoća.



Sl. 13.19. Osnovna shema cijevnog odvodnika



Sl. 13.20. Krivulje izolacijske čvrstoće

Ako deionizacija u odvodniku nije dobro i brzo provedena, prisutna je i dalje opasnost od ponovnog paljenja luka. Sad ne više zbog prenapona, nego zbog djelovanja radnog napona mreže. Taj napon nazivamo povratni napon. Na slici 13.20. krivulja C prikazuje vremenski tok uspostavljanja povratnog napona koja se dobila eksperimentiranjem i mjerenjem. Cijevni odvodnik mora, iz tih razloga, zadovoljiti uvjet da njegova izolacijska čvrstoća tako brzo naraste kako povratni napon ne bi bio u stanju ponovno upaliti luk. Drugim riječima, brzina porasta izolacijske čvrstoće odvodnika mora biti veća od brzine porasta povratnog napona. Na slici 13.20. predočene su karakteristike za dva cijevna odvodnika koji imaju različite brzine uspostavljanja izolacijske čvrstoće. Iz slike se vidi da će izolacijska čvrstoća odvodnika prenapona A (krivulja A) zado-

voljavati postavljene uvjete i da popratna struja neće ponovno kroz nje ga proteći (krivulja A je u cijelom toku iznad krivulje povratnog napona C). Pri tome odvodnik B (krivulja B) neće zadovoljiti postavljene uvjete, pa se kod njega može lako dogoditi na nastupi ponovno paljenje luka, odnosno strujanje popratne struje (krivulja B nije u svojem cijelom toku iznad krivulje C). Zato se ni jednog trenutka ne smije dopustiti da veličina povratnog napona bude veća od uspostavljene izolacijske čvrstoće. Konstrukcija cijevnog odvodnika treba da udovoljava još nekim uvjetima. Rekli smo da je njegova važna funkcija prekidanje popratne struje. No, kod uzemljene je mreže popratna struja u biti struja jednopolnoga kratkog spoja, koju tjera fazni napon mreže nakon odvođenja struje groma. Prema tome, ta popratna struja može biti i velika i mala, što ovisi o konfiguraciji i parametrima mreže.

Ako je popratna struja malena, može se dogoditi da odvodnik zbog svoje konstrukcije pod djelovanjem te struje ne ostvari toliko jako isparavanje sloja fibera potrebnoga za deionizaciju prostora, odnosno za prekidanje toka te struje. Zato on mora biti dimenzioniran tako da prekida struju još manju od one koju mi očekujemo da će proteći. Tu granicu zovemo donjom granicom struje isključivanja.

Jednako tako će se dogoditi da popratna struja bude veća od struje koju dana konstrukcija odvodnika može uopće podnijeti bez oštećenja. Zato tu valja imati odvodnik takve konstrukcije da prekida struju još veću od one koju očekujemo da će se nakon prorade u njemu pojaviti. Tu granicu nazivamo gornjom granicom struje isključivanja.

Naravno da ti zahtjevi uvjetuju i konstrukciju odvodnika. Tako je donja granica struje isključivanja niža što je cijev odvodnika dulja i što je manjeg promjera jer će tad zbog dobrog kontakta i mala struja izazvati dovoljno jako isparavanje fibera, odnosno nastupit će dovoljno jaka deionizacija, a i najzad prekidanje struje.

Naprotiv, da bi gornja granica struje isključivanja bila što veća, konstrukcija odvodnika mora biti što kraća, ali sa što većim promjerom, jer će tako jaka struja izazvati i na kratkom putu dovoljno jako isparavanje fibera i na kraju će se ostvariti proces prekidanja.

Njegova montaža i konstrukcija ovisna je o načinu zavješanja vodiča. Ako je vodič na potpornim izolatorima, onda se odvodnik konstruira tako da nema elektrodu vanjskog iskrišta u obliku luka jer se vodiči na mjestu zavješanja ne miču. Ako je vodič zavješan na izolatorskim lancima, konstrukcija odvodnika i njegova montaža nešto su drukčiji jer se vodiči, zbog djelovanja vjetra, tad stalno pomiču, mijenjajući stalno i razmak prema iskrištu odvodnika. Da bi taj razmak ostao nepromijenjen gornji je kraj odvodnika, koji je ujedno i elektroda vanjskog iskrišta, izveden u obliku luka.

Kad cijevni odvodnik proradi, na njegovu donjem kraju izlaze ionizirani plinovi pod tlakom, koji mogu omogućiti preskok na susjedni dio stupa ili fazu. Zato kao orijentaciju za određivanje sigurnosnih razmaka između cijevnih odvodnika prenapona i susjednih dijelova konstrukcije dalekovoda služi duljina vidljivog dijela plamena koji se pojavljuje na donjem kraju odvodnika.

Tokom rada cijevni se odvodnik troši. S unutrašnje se površine cijevi svaki put kad odvodnik proradi ispari tanki sloj fibera. Tim trošenjem povećava se promjer i mijenja se karakteristika izolacijske čvrstoće odvodnika. To su nedostaci koje treba uzimati u obzir i koji ograničavaju vrijeme upotrebe cijevnog odvodnika. I najmoderniji odvodnici imaju ograničen broj prorada. Poslije ih valja zamijeniti novima jer se unutrašnji promjer cijevi trošenjem fibera povećava, tlak se smanjuje, a deionizacija postaje toliko mala da odvodnik gubi sposobnost prekidanja struje koja prolazi.

14. Zaštita elektroenergetskih postrojenja

14.1. Zaštita elektroenergetskih postrojenja od izravnih udara groma

Elektroenergetska su postrojenja doduše rijetko izložena neposrednim udarima groma, ali, ipak, njihovu sigurnost treba posebno razmotriti. Zaštita od takvog načina udara u neko postrojenje izvodi se u praksi šipkastim gromobranima ili uzemljenim zaštitnim užetima. Na osnovna načela zaštite od izravnih udara takvim instalacijama općenito smo se osvrnuli u prethodnim poglavljima pa ih ovdje nećemo posebno iznositi. Ipak, prilikom upotrebe takve zaštite u elektroenergetskim postrojenjima valja uzeti u obzir neke specifičnosti koje utječu na njezino pravilno postavljanje i dimenzioniranje.

Da bismo uštedjeli materijal i da ne bismo s mnogo šipkastih gromobrana ili zaštitnih užeta komplicirali već i tako složene objekte kao što su elektrane i rasklopna postrojenja, treba se pri postavljanju te zaštite koristiti postojećim krovovima zgrada, portalima ili stupovima na kojima su postavljeni reflektori itd. Kad jedanput postavimo potrebni broj gromobrana ili zaštitne užadi, tako da nam oni svojim zaštitnim prostorima štite postrojenje, onda moramo sve šipkaste gromobrane ili zaštitnu užad skupa s konstrukcijama spojiti na uzemljenje rasklopnog postrojenja. Pri tome ne smijemo zaboraviti činjenicu da nam struja pri udaru u takvu zaštitnu instalaciju stvara na otporima uzemljenja potencijal $i \cdot R$. Taj potencijal (ili njegov veći dio) djeluje na kućišta aparata što se nalaze u blizini pogođenog gromobrana. To zna biti opasno za njihovu izolaciju ili bi moglo uzrokovati povratne preskoke prema faznim vodičima.

Može se također dogoditi da preskok prema faznim vodičima nastupi i s portala gdje su postavljeni gromobrani ili zaštitna užad. To se događa zbog toga što prilikom udara groma u portal nastaje visoki napon na njegovu vrhu, sastavljen od pada napona ne samo na njegovu uzemljenju nego i pada napona na induktivitetu samoga portalnog stupa. Te preskoke i proboje prema faznim vodičima preko izolatora pa i one proboje koji bi mogli nastupiti s kućišta aparata kroz unutrašnju izolaciju, treba u svakom slučaju spriječiti. No, budući da je unutrašnja izolacija slabija od one na portalima, tad kao mjerilo u sprečavanju tih preskoka ili proboja valja uzeti podnosivi udarni napon unutrašnje izolacije U_i i

ne dopustiti da nam potencijali koji se pojavljuju pri prolasku struje groma bilo gdje prekorače tu vrijednost ($i \cdot R < U_i$). To se, kako znamo, postizava smanjenjem udarnog otpora uzemljenja.

Transformator se drži najvažnijim elementom u rasklopnim postrojenjima pa se zato najviše štiti njegova izolacija. Zato, da bi se vjerojatnost povrede njegove izolacije što više smanjila, treba izbjegavati postavljanje gromobrana na transformatorske portale. Kućište transformatora uzemljuje se najmanje 15 m daleko od mjesta gdje je uzemljen gromobran jer će tu potencijal, zbog omskog i induktivnog pada napona na uzemljivaču, biti nešto niži. Ako se ipak moraju postaviti šipkasti gromobrani na transformatorske portale, tad valja zaštititi namote nižeg napona ventilnim odvodnicima. Njih treba priključiti na izvode namota nižeg napona transformatora. Ako su transformatorski namoti slučajno skupa povezani s namotima rotacionih strojeva pomoću sabirnica, onda nije dobro postavljati ventilne odvodnike jer bi oni nakon prorade mogli izazvati oscilacije i visoke napone na namotima tih strojeva. Tad se mora u najvećoj mogućoj mjeri smanjiti otpor uzemljenja. Kad su transformatori i rotacioni strojevi međusobno povezani kabelima kojima su plaševi uzemljeni, nije potrebno priključivati ventilne odvodnike jer je grananje valova pod zemljom veliko.

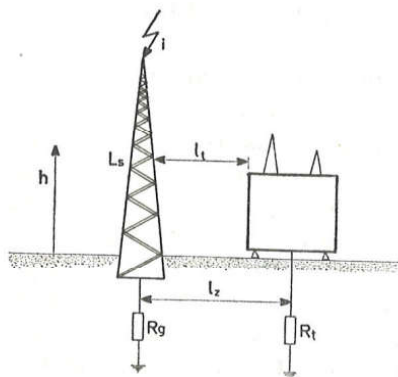
Za postrojenja nižih nazivnih napona do 35 kV koja su na loše vodljivom zemljištu vrlo je teško postići mali otpor uzemljenja i tako spriječiti povratne preskoke i proboje unutrašnje izolacije. U tim okolnostima mora se uzemljenje gromobrana odvojiti od uzemljenja postrojenja koje štitimo (sl. 14.1). Pri tome se pazi na to da udaljenost ℓ_z između uzemljivača gromobrana kojemu je otpor uzemljenja R_g i uzemljivača transformatora otpora R_t , bude toliko velika da ne nastupi proboj kroz sloj zemlje između ta dva uzemljenja. Da bi se to ostvarilo, mora biti:

$$i \cdot R_g < E_z \cdot \ell_z. \quad (14.1)$$

Tu smo s E_z označili srednji probojni napon u zemlji, za koji se uzima da iznosi 300 kV/m.

Za vrijeme prolaska struje groma i točke na stupu gromobrana po primaju visoki potencijal pa zato također moramo spriječiti preskok sa stupa na štićeni objekt kroz slojeve zraka. Da bismo i to ostvarili, moramo nastojati da bude:

$$i \cdot R_g + L_1 \frac{di}{dt} h = E_t \cdot \ell_t. \quad (14.2)$$

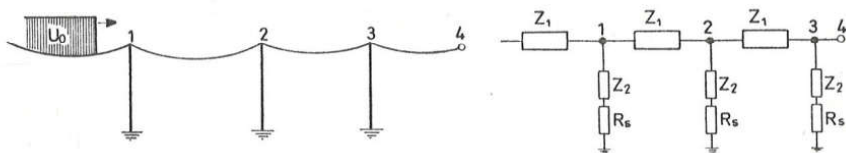


Sl. 14.1. Mogućnosti preskoka s gromobrana kojemu je uzemljenje odvojeno od uzemljenja transformatora

Pri tome smo s E_t označili srednju vrijednost probojnog napona zraka, za koji se uzima da iznosi 500 kV/m, a s L_1 smo označili jedinični induktivitet stupa, koji iznosi oko $1,7 \mu\text{H/m}$. Obično su vrijednosti R_g , L_1 , h , ℓ_t i R_z za odabrano postrojenje čvrste i teško ih je mijenjati, pa zato treba dobro odabrati tjemenu vrijednost struje groma »i« te strminu (di/dt), tako da te vrijednosti udovoljavaju zahtjevima o potrebnim zaštićenim prostorima, s jedne strane, a pri tome ne stvaraju povratne preskoke, s druge strane. Odnosno, te odabrane veličine zadovoljavaju zahtjeve u jednadžbama (14.1) i (14.2).

14.2. Zaštita postrojenja od posrednih udara groma ili zaštita od putnih valova

Elektroenergetska postrojenja zauzimaju relativno malu površinu zemljišta pa zato nisu tako mnogo izložena izravnim udarima groma. Mnogo je češće njihovo oštećenje zbog indirektnih udara jer vodovi koji ulaze u takva postrojenja zahvaćaju velike daljine i izdignuti su iznad zemlje, pa je zbog toga velika vjerojatnost da u njih udari grom. Tada to, razumljivo, može biti opasno i za elektroenergetska postrojenja jer se, kako znamo, prilikom udara groma u vodove stvaraju strujni i naponski valovi koji putuju po vodovima prema postrojenjima. Ponovimo ovdje da oni nastaju udarima u fazne vodiče ako vodovi nisu zaštićeni zaštitnim vodičima. Međutim, oni nastaju i na onim vodovima sa zaštitom uzadi koja nije dobro uzemljena. Što se tiče njihove veličine, dobro se podsjetiti na to da se oni ne mogu vodovima kretati vrijednostima napona većima od onih koje njihova izolacija može izdržati. Ako se dogodi da na mjestu udara njihove veličine prekorače tu vrijednost, na tim mjestima nastaje preskok preko izolacije pa se valovi kreću dalje nešto nižom vrijednošću od probojne čvrstoće izolacije vodova.



Sl. 14.2. Kretanje vala po vodu bez gubitaka

Slika 14.2. prikazuje idealni vod i njegovu nadomjesnu shemu. Vodiče smo zamijenili valnim otporima Z_1 , stupove valnim otporima Z_2 , a uzemljenje stupa otporom R_s .

To je shema koja nam omogućuje da izračunamo kako se valu smanjuje njegova amplituda dok se kreće po nekom vodiču zamišljenom da ne izaziva nikakve gubitke. Taj se vodič nalazi na stupovima, pa ne smijemo zanemariti da i svaki stup ima svoj valni otpor, u našoj shemi označen sa Z_2 . Otpor je paralelno priključen na taj vodič kojim se kreće naponski val. Naravno da te paralelne grane smanjuju tad amplitude U_0 vala što se tim vodom počeo kretati. Kad bismo htjeli pratiti promjene vala u jednome duljem vremenskom intervalu, bio bi to nešto složeniji

posao. Zato utvrdimo samo promjenu amplitude toga vala što je stigao u nekom trenutku do točke 4. Koeficijent prolaska u točkama 1, 2 i 3 ima istu vrijednost i iznosi:

$$a_{1,2,3} = \frac{2 \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}}{Z_1 + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}} = \frac{2Z_2}{Z_1 + 2Z_2}.$$

Tad amplituda vala u točki 4 poprima vrijednost:

$$U_4 = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot U_0 = U_0 \left(\frac{2Z_2}{Z_1 + 2Z_2} \right)^3.$$

Ovo razmatranje nema praktičke vrijednosti jer smo promatrajući ovo kretanje vala zanemarili više drugih veličina koje se pojavljuju pri kretanju vala nekim vodičem. Ipak ovo nam je razmatranje pokazalo kako je amplituda vala ovisna o duljini puta što ga taj val mora proći.

Međutim, na smanjenje amplitude putnih valova iz ovih razloga ne možemo računati jer je duljinu puta koju će oni proći teško odrediti, pa u računanju zaštite pretpostavljamo da amplituda vala ne opada.

Elektroenergetska se postrojenja u današnje vrijeme izvode tako da je izolacija aparata u njima nešto slabija od izolacije nadzemnih vodova jer to nalažu ekonomski razlozi. Zbog toga, putni valovi što se kreću vodovima i nailaze na postrojenja izolacije slabije od izolacije vodova mogu biti opasni za aparate koje želimo štititi. Tu opasnost nastojimo ukloniti tako da tjemenu vrijednost napona putnih valova što se kreću vodovima ograničimo na vrijednost koja je oko 20 do 25% niža od udarne čvrstoće aparata koje štitimo. To postizavamo postavljanjem ventilnih odvodnika prenapona, koji smanjuju, kako znamo, tjemenu vrijednost putnog vala na razinu zaštitnog napona, odnosno preostalog napona U_v .

Odvodnici se zasad smatraju jedinim sredstvom za zaštitu elektroenergetskog postrojenja od putnih valova. Oni svojim nelinearnim otporima osiguravaju dosta konstantan preostali napon U_v i ne stvaraju odrezane valove, koji bi nastali kad bismo neko postrojenje štitili samo običnim iskrištima.

Da bi zaštita ventilnim odvodnicima bila djelotvorna, moraju općenito na vodovima i elektroenergetskim postrojenjima izolacijski odnosi biti usklađeni tako da, kao prvo, odvodnikom ne teku struje jače od 5 do 20 kA, ovisno o vrsti odvodnika, i da pazimo na to da nam strmine valova što nailaze na odvodnike ne budu jako velike. To su dva uvjeta koja općenito moraju biti ispunjena da bi se zaštita današnjih elektroenergetskih postrojenja mogla dobro provesti. Jer, ako bi struje koje prolaze kroz odvodnike bile jače od normalnih, moglo bi se dogoditi da preostali napon U_v na odvodniku postane veći od dopuštenoga, pa bi tad došla u pitanje sigurnost izolacije, koju želimo štititi, i nije isključeno da nam u tim okolnostima i odvodnik ne bi bio oštećen. A ako bi

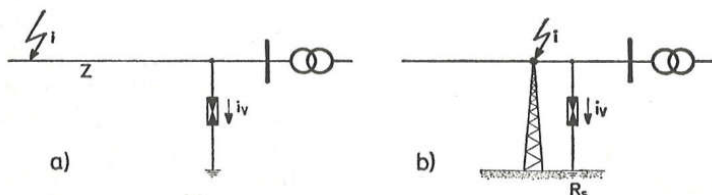
na odvodnike naišli putni valovi strmina od dopuštenih, većih smanjila bi se bitno zaštitna udaljenost nekog odvodnika od pojedinih aparata. To su neka opća i gruba pravila koja treba uzimati u obzir kad projektiramo zaštitu. Počnimo s tumačenjem prvog zahtjeva dobre zaštite, odnosno kako ograničiti jake struje. Kad procjenjujemo granične vrijednosti udarne struje i_v kroz odvodnik, treba promatrati one najnepovoljnije okolnosti koje se u praksi susreću. Uzmimo zato završnu stanicu pred kojom se nalazi ventilni odvodnik i pretpostavimo da je na izvjesnoj udaljenosti od nje udario grom (sl. 14.3.a). Pri tome će val od tog mjesta putovati dosta dugo vremena do sabirnica stanice, i to s tjemnom vrijednošću nižom ili jednakom vrijednosti izolacijske razine voda U_i . Na sabirnicama će se on reflektirati dvostrukom vrijednošću, pa će, prema već izvedenim formulama u poglavlju o putnim valovima, biti da je struja kroz priključeni odvodnik:

$$i_v = \frac{2U_i - U_v}{Z} \quad (14.3)$$

Ako za praktične proračune zanemarimo preostali napon odvodnika U_v , tad približna vrijednost za struju kroz odvodnik iznosi:

$$i_v = \frac{2U_i}{Z}$$

Za U_i pretpostavljamo obično izolacijsku razinu nadzemnog voda po kojemu se val kreće do stanice, ali se može za U_i uzeti i 50%-tni preskočni udarni napon izolacije na vodu, i to negativnog polariteta, u pravilu nešto viši od podnosivog napona U_i . Na primjer, ako je to 110 kV-ni vod, onda je njegov podnosivi napon izolacije $U_i = 700$ kV, a preskočni bi napon bio 10% veći i iznosio bi 770 kV. Struja kroz odvodnik bila bi po pojednostavljenom izrazu: $i_v = 2 \cdot 770/400 = 3,85$ kA. Tolika je struja dopuštena prema onim kriterijima koje smo malo prije iznijeli.



Sl. 14.3. Sheme za računanje struje kroz odvodnik: a) udar groma na izvjesnoj udaljenosti od stanice; b) udar groma u blizini stanice

Na ovakav način izračunali smo struju kroz odvodnik uz uvjet da je grom udario na izvjesnoj udaljenosti od stanice i od odvodnika te da se struji udara suprotstavljao vod s valnim otporom Z . Uzmimo sada jednako tako nepovoljan slučaj završne stanice, ali uz pretpostavku da je izbijanje nastupilo u njezinoj neposrednoj blizini. Neka se taj udar npr.

dogodi na vrhu prvog stupa (sl. 14.3.b). Valu se više ne suprotstavlja valni otpor voda Z . Tad se sva električna energija pretvara u magnetsku. Zato kroz stup protječe gotovo ukupna struja tjemene vrijednosti $\hat{i}$, koja na njegovu otporu uzemljenja može stvarati veliki pad napona $\hat{i} \cdot R_s$. Taj pad napona može tad izazvati povratni preskok prema faznom vodiču, što, drugim riječima, znači da se i napon na paralelno priključenom odvodniku povisio i preko njegove prorađne vrijednosti U_p . Tu se postavlja pitanje nije li struja kroz odvodnik prejaka i neće li ona svojom jačinom uzrokovati velike padove napona na otporu uzemljenja odvodnika i neće li ona, eventualno, razoriti sam odvodnik otpori kojeg nisu dimenzionirani za takvo opterećenje. Da bismo to ocijenili, moramo izračunati struju I_v kroz odvodnik.

Podimo od prvog trenutka, kad potencijal stupa i $\cdot R_s$ djeluje na svoju paralelnu granu, sastavljenu od promjenljivih otpora u ventilnom odvodniku i otpora uzemljenja samog odvodnika, a kroz koje će taj potencijal protjerati struju i_v , pa pišemo da je:

$$\hat{i} \cdot R_s = U_v + i_v \cdot R_s.$$

Iz jednadžbe lako dobivamo struju kroz odvodnik:

$$i_v = \hat{i} - \frac{U_v}{R_s}. \quad (14.4)$$

Pretpostavimo npr. da je na nekom 110 kV-nom postrojenju priključen ventilni odvodnik prenapona kojemu je prorađni napon jednak preostalom naponu $U_v = 400$ kV. Neka bude zajednički otpor uzemljenja tog postrojenja, gdje je priključen i prvi stup i odvodnik, $R_s = 10 \Omega$, te neka u vrh prvog stupa, dakle u samoj blizini postrojenja, udari grom jačine struje od 100 kA. Pitamo se kolika će struja proći odvodnikom i je li ona, prema našim ograničenjima, opasna za postrojenje i za sam odvodnik. Ako se koristimo izrazom (14.4), utvrdit ćemo da maksimalna struja kroz odvodnik iznosi $I_v = 100 - 400/10 = 60$ kA. To je jaka struja; ona mnogo premašuje vrijednosti od 20 kA pa su sve negativne posljedice takva udara groma moguće. Tako tu može nastupiti proboj izolacije svih aparata kojima su kućišta uzemljena na istom uzemljivaču gdje je uzemljen i odvodnik. Osim toga i sam odvodnik neće izdržati tako jaku struju, nego može biti oštećen. Analizirajući dalje izraz (14.4), koji pokazuje o čemu ovisi struja kroz odvodnik, uočiti će se da ona osim o jačini struje groma tjemene vrijednosti $\hat{i}$ ovisi i o veličini preostalog napona na odvodniku U_v . Zato možemo zaključiti da će ona biti jača što je preostali napon U_v manji. To je u praksi vrlo često kad imamo postrojenje s nižom izolacijskom razinom, odnosno to se pojavljuje kod postrojenja s nižim nazivnim naponom, jer je tamo i preostali napon manji, pa su udari groma u blizinu postrojenja vrlo opasni.

No, što razumijevamo pod »blizim« udarima groma? U praksi uzimamo da su to oni udari u stupove ili vodiče koji su se dogodili na udaljenosti 1—2 km od štićenog postrojenja. Udari groma na većoj udaljenosti neće biti tako opasni za postrojenje jer se smanjuju amplitude na-

ponskih valova zbog višestrukih refleksija i gubitaka na vodu, pa oni ne mogu potjerati jake struje kroz odvodnik.

Prema tome, da bismo ograničili jake struje kroz ventilne odvodnike, treba spriječiti izravne udare blizu postrojenja ili barem nastojati da ih bude što manje.

14.3. Zaštićeni prilazi

Kako bi se spriječili udari groma u blizinu postrojenja, moraju dijelovi visokonaponskih nadzemnih vodova na duljini od 1—2 km ispred postrojenja biti zaštićeni užetima. Obično su svi vodovi viših napona zaštićeni zaštitnom užadi po cijeloj duljini pa taj zahtjev ne bi trebalo posebno isticati. Međutim, u takvim okolnostima valja paziti na to da na spomenutoj udaljenosti od postrojenja zaštitna užad bude postavljena pod što manjim zaštitnim kutom i da uzemljenje stupova skupa sa zaštitnim užetom ima što manji otpor. Tako pažljivo osigurani dijelovi nadzemnih vodova od direktnih udara groma nazivaju se relativno zaštićeni prilazi, a za postrojenje koje se štiti kaže se da je ono djelotvorno ili efikasno zaštićeno.

Zaštićeni prilazi, osim što sprečavaju izravne udare u blizinu postrojenja, i time ograničavaju jake struje kroz odvodnike, također onemogućuju i da putni valovi dođu na njih s velikim strminama. Na takav način, zaštićenim prilazima udovoljavamo i drugom zahtjevu za sigurnu zaštitu postrojenja, a to ima i te kako značenje. Obrazložimo zašto je to važno, ali ovdje u najkraćim crtama.

Kad putni val udari u blizinu stanice, on se vrlo kratko kreće vodom. Međutim, kad je prisutan zaštićeni prilaz stanici, tad grom neće udariti u blizinu stanice, nego se to može dogoditi na izvjesnoj udaljenosti od nje. Val koji se tad od tog mjesta kreće vodom do stanice provodi dulje vrijeme na vodu, pa se njegova strmina smanjuje. To je vrlo važna činjenica za postrojenja visokog napona koja su velikih dimenzija. Za ona malih dimenzija ta okolnost, kako ćemo poslije vidjeti, nema značenja.

Poznato je, naime, da val na mjestu udara ima gotovo okomito čelo i da ono postaje sve položenije — to više što se val dulje kreće vodom i što se više udaljuje od tog mjesta. Kad čelo postaje položenije, onda mi računamo da čelo i dulje traje, odnosno da mu se strmina smanjuje. To se događa zato što pri tako visokim naponima na vodovima nastaje tinjavo izbijanje ili korona. Takvo izbijanje u biti znači gubitak energije. Ono se ne pojavljuje baš uvijek, ali kad napon vala prekorači kritičnu vrijednost korone U_k , koja nije za sve vodove jednaka, na tom će vodu nastati korona. Da nema te korone, val bi se vodom kretao brzinom svjetlosti, ali kad se ona pojavi, tad se brzinom svjetlosti kreće samo onaj dio vala kojem je napon niži od kritičnog napona korone U_k . Onaj se drugi dio vala, kojemu je napon viši od kritičnoga, kreće nešto sporije. To dovodi do toga da čelo vala postaje položenije i dulje traje. Koliko će ono dulje trajati, računamo iz izraza:

$$\Delta T_{\delta} = \frac{\ell (1 - k)}{v \cdot k}.$$

Pri tome je ΔT_{δ} povećano trajanje čela vala u (μs), ℓ je duljina prijeđenog puta u (m), v brzina svjetlosti, koja iznosi $300 \text{ m}/\mu\text{s}$, a k je faktor korone, koji se uzima da iznosi $0,75$.

Primjer 14.1.

Koliko će se vremenski povećati trajanje čela vala na duljini $\ell = 1 \text{ km}$?

Rješenje:

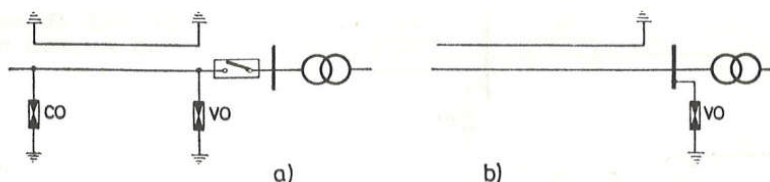
$$\Delta T_{\delta} = \frac{\ell (1 - k)}{v \cdot k} = \frac{1\,000 \cdot (1 - 0,75)}{300 \cdot 0,75} = 1,11 \mu\text{s}.$$

Iz primjera se vidi da se trajanje čela vala za svaki prijedeni kilometar povećava $1,1 \mu\text{s}$. U zaključku bismo mogli reći da je smanjenje amplitude i strmine tokom njegova kretanja vrlo povoljna okolnost. Zato, u projektiranju zaštite od atmosferskih prenapona nekog postrojenja moramo nastojati da ne udari grom u blizinu samog postrojenja jer tad val ne bi dugo putovao i ne bi putem smanjio svoju tjemenu vrijednost, pa ni ublažio svoju strminu.

Kako smo vidjeli, današnja praksa zaštite od atmosferskih prenapona provodi se tako da se na izvjesnoj udaljenosti od aparata koje želimo štititi postave odvodnici. Najbolje bi bilo kad bi svaki aparat imao svoj odvodnik, ali se to ne može učiniti iz ekonomskih razloga. Obično se oni priključuju na sistem sabirnica ili na transformatore, koji su najvažniji elementi nekog postrojenja. To dovodi do toga da se kod velikih postrojenja ostali aparati nalaze na udaljenosti od odvodnika i nekoliko desetaka metara. Zbog toga nastaju neke teškoće. Naime, sabirnice postrojenja skupa sa spojnim vodičima imaju svoj induktivitet i kapacitet, a jednako tako i aparati imaju svoj kapacitet. Oni su zajedno nakon prorade odvodnika za preostali napon složeni visokofrekventni titrajni krug, o kojem je bilo riječi u poglavlju o putnim valovima. Zato se prilikom dolaska u postrojenje vala koji je imao vrlo strmo čelo, poslije prorade odvodnika, pojavljuju na izvjesnoj udaljenosti od njega visokofrekventni prigušeni titraji. Amplitude tih titraja to su veće što je veća strmina vala koji je naišao. Može se zbog toga dogoditi da umjesto preostalog napona koji očekujemo zbog djelovanja odvodnika, dobijemo na udaljenim aparaturama povećani preostali napon. Zato je, u zaštiti velikih postrojenja koje štitimo samo s nekoliko odvodnika prenapona, potrebno ograničiti strminu vala koji nailazi, a to se postizava zaštićenim prilazima nekom postrojenju. Da bismo dobili još bolji uvid u to što razumijevamo pod zaštićenim prilazima, na slici 14.4. shematski su oni prikazani na različite izvedbe vodova.

Slika 14.4 a predočuje vod priključen na postrojenje koji se nalazi na drvenim stupovima i nema po cijeloj svojoj duljini zaštitno uže. U

Sl. 14.4. Zaštićeni prilazi postrojenju



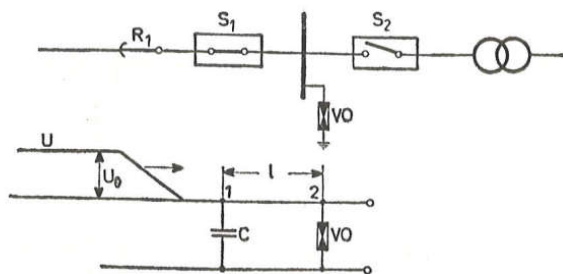
takvoj prilici potrebno je, kako smo rekli, ispred postrojenja na duljini od 1 do 3 km postaviti zaštitno uže, što je na slici i prikazano. Međutim, tu valja podsjetiti na to da se postavljanjem toga zaštitnog vodiča, ispred postrojenja, taj dio izolacije nadzemnog voda znatno smanjuje s obzirom na onaj ostali dio na drvenim stupovima na koji nismo postavili zaštitno uže. Tako taj zaštićeni prilaz možemo smatrati oslabljenim dijelom izolacije voda, čak dva do tri puta. Naravno da na tom mjestu mogu nastajati preskoci i oštećenja. Da bismo to spriječili, dobro je ispred zaštićenog dijela postaviti jedno iskrište ili, još bolje, cijevni odvodnik prenapona, koji će putne valove visokih amplituda što budu nailazili vodom na drvenim stupovima odmah na početku smanjiti. Budući da smo postavljanjem cijevnog odvodnika na početku zaštićenog prilaza već ograničili veličinu prenapona, odvodnik nam u samom postrojenju ne bi bio potreban. Ali, može nam se dogoditi da prekidač bude isključen, pa bi pri tome mogla na njemu nastati totalna refleksija i povišenje napona. Zato nije naodmet postaviti i ispred njega još i jedan ventilni odvodnik, koji zapravo ne štiti transformator, nego samo prekidač od oštećenja kad je on isključen.

Na slici 14.4.b shema je zaštićenog prilaza nekog postrojenja priključenoga na nadzemni vod što se nalazi na metalnim stupovima i po svojoj cijeloj duljini ima postavljeno zaštitno uže. U tom slučaju problemi su mnogo manji jer je vod zaštićen po cijeloj svojoj duljini, i tu praktički nije za očekivati da u postrojenje uđu valovi velikih amplituda i visokih strmina. Odvodnik se u tim okolnostima postavlja na sabirnice, ali pri tome valja paziti da odvodnik ne bude suviše udaljen od aparata koje štitimo.

14.4. Mjesto ventilnog odvodnika u postrojenjima koja su priključena na nadzemne vodove

Ventilni odvodnik redovito štiti aparate što su ispred njega, npr. rastavljače i prekidače, ali i one koji se nalaze iza njega, kao npr. transformator. Tako možemo govoriti o dva slučaja kad moramo razmatrati zaštitu aparata u nekom postrojenju.

Obično aparati pred odvodnikom ne zahtijevaju tako strogu zaštitu kao oni iza njega, a i za fizikalna zbivanja možemo uzeti da su nešto drukčija u prvim i u drugim okolnostima. Zato, da bismo mogli pomoću ventilnog odvodnika dobro zaštititi one aparate ispred njega i one aparate iza njega, moramo što točnije odrediti udaljenost odvodnika od jednih i od drugih, odnosno valja odrediti mjesto u postrojenju gdje će se odvodnik priključiti.



Sl. 14.5. Odvodnik štiti aparate koji su pred njim

Počnimo razmatranja zahtjevom da odvodnik koji smo priključili na sabirnice mora zaštititi prekidač S_1 i rastavljač R_1 , kako je to pokazano na slici 14.5. Dakle, one aparate koji su priključeni pred njim. Najnepovoljnije prilike nastaju pretpostavimo li da je prekidač S_2 isključen. U ekvivalentnoj shemi na istoj slici prekidač S_1 i rastavljač R_1 nadomjestit ćemo kapacitetom C . Na osnovi nelinearnih otpora u ventilnom odvodniku možemo idealno uzeti da nam je napon na odvodniku za cijelo vrijeme odvođenja struje groma konstantan i da je, osim toga, proradni napon jednak tome preostalom naponu ($U_p = U_v$). Pretpostavimo još za početak i da je kapacitet kojim smo nadomjestili aparate što ih želimo zaštititi malen i zanemariv ($C = 0$). Te smo pretpostavke učinili radi jednostavnijeg razmatranja ovog slučaja.

Val strmog čela prolazeći kroz točku 1 dolazi do točke 2, gdje je priključen odvodnik. Tu se on reflektira dvostrukom vrijednošću jer točku 2 smatramo otvorenim krajem voda kad je prekidač S_2 isključen. Na odvodniku koji dotad nije proradio zbog toga što pretpostavljamo da je još $st < U_p$, sada raste naglo napon i on će u nekom trenutku t_1 proraditi i smanjiti taj napon na veličinu U_v .

Ako se napon vala koji nailazi na čelu mijenja po izrazu:

$$U = \frac{U_0}{T_\delta} \cdot t,$$

tad je strmina tog vala $s = \frac{dU}{dt} = \frac{U_0}{T_\delta}$, a napon je vala pri proradi odvodnika $U_v = 2st_1$. Odatle možemo izračunati trenutak t_1 kad će odvodnik proraditi:

$$t_1 = \frac{U_v}{2s}. \quad (14.5)$$

To naglo smanjenje vala u točki 2 zbog djelovanja odvodnika u trenutku t_1 , možemo zamisliti kao da se u toj točki pojavio reflektirani val U_r , koji dalje stalno smanjuje val što nailazi. Općenito ćemo napisati, da je napon na odvodniku U_v zbroj napona vala koji nailazi $U = st$ i napona odbijenog vala U_r (sl. 14.6):

$$U_v = st + U_r,$$

a odatle je vrijednost napona reflektiranog vala:

Sl. 14.6. Promjena napona u točki 2, za $U_p = U_v$ i $C = 0$

$$U_r = U_v - st.$$

Val se kreće od točke 1 do točke 2 prelazeći dužinu ℓ , pa dok se uopće pojavi reflektirani val u točki 2 prošlo je vrijeme T_f . Dok taj reflektirani val U_r stigne natrag do točke 1, gdje je prekidač 1, proći će još toliko vremena T_f pa možemo reći da će taj val tamo stići sa zakašnjenjem od $2T_f = (2\ell/v)$ i napisati da napon odbijenog vala u točki 1 iznosi:

$$U_r = U_v - s(t - 2T_f).$$

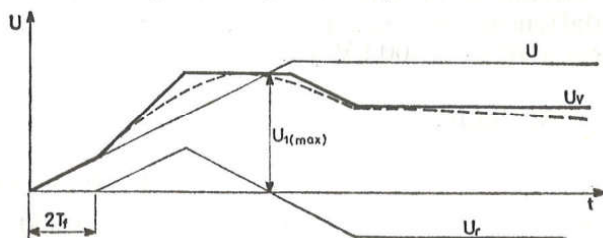
Najviši napon u točki 1 izračunat će se tako da ćemo zbrojiti napon vala koji nailazi s onom vrijednošću reflektiranog vala što je tamo stigao sa zakašnjenjem (sl. 14.7), pa imamo da je:

$$(U_1)_{\max} = st + U_r = st + U_v - s(t - 2T_f) = U_v + 2s \frac{\ell}{v}. \quad (14.6)$$

Analizirajući taj izraz uočavamo da će najviši napon na prekidaču S_1 i rastavljaču R_1 biti veći što je njihova udaljenost od odvodnika prenapona veća. Obrnuto, što su oni bliže odvodniku, najveći napon na njima bit će manji. Prema tome, za neki dopušteni najviši napon možemo udaljenost odvodnika od štice objekta izračunati iz izraza (14.6) i to nazvati najvećim dopuštenim razmakom:

$$\ell_{\max} = \frac{(U_1)_{\max} - U_v}{2s} \cdot v. \quad (14.7)$$

Na taj način ćemo odrediti dopuštenu udaljenost odvodnika od štice objekta samo onda ako nam je slučajno najviši napon koji će se na njemu pojaviti niži ili jednak onom naponu koji izolacija može izdržati i koji je prethodno ispitivanjem utvrđen. Ako to nije tako, treba u izraz (14.7) umjesto najvišeg



Sl. 14.7. Promjena napona u točki 1, za $U_p = U_v$ i $C = 0$

napona $(U_i)_{\max}$ uvrstiti vrijednost onog napona koji će izolaciju izdržati, a to je podnosivi udarni napon izolacije U_i . Tad će se najviši dopušteni razmak odvodnika od štićenog objekta smanjiti.

Ako razmatramo dalje izraz (14.7), još ćemo opaziti da na dopuštenu razmak između odvodnika i štićene opreme djeluje i veličina preostalog napona na odvodniku U_v . Što je taj preostali napon viši, dopušteni je razmak odvodnika manji, ili je manja njegova zaštitna udaljenost. Naprotiv, ako je taj napon malen, veća je zaštitna udaljenost. U ovoj okolnosti sklopka S_1 i rastavljač R_1 mogli bi biti priključeni na većem razmaku od odvodnika. Jednako tako na taj razmak utječe i strmina vala koji nailazi s. No, obično su strmine valova ovisne o mnogim okolnostima, npr. o mjestu udara groma, konfiguraciji postrojenja itd. Tako je na strmine teško djelovati, pa su one zato pri proračunu unaprijed čvrsto zadane.

Izraz (14.7), kojim se računa zaštitna udaljenost odvodnika, vrijedi za sve vrijednosti napona na čelu vala koji nailazi, odnosno on vrijedi sve dotle dok je $t < T_\delta$. Poslije, on više ne vrijedi. Iza čela vala, odnosno za one vrijednosti napona kad je $t > T_\delta$, pomoću već izvedenih izraza može se samo izračunati da će napon na izolaciji prekidača i rastavljača ispred odvodnika biti jednak naponu koji određuje odvodnik, i tad dalje problema nema. Zato pišemo da je za $t > T_\delta$ napon na izolaciji prekidača i rastavljača R_1 :

$$U_1 = st + U_r = sT_\delta + U_v - sT_\delta = U_v.$$

U izlaganjima smo izostavili kapacitet štićenog objekta, odnosno zanemarili smo prema našim računima zajednički kapacitet prekidača S_1 i rastavljača R_1 . Taj će kapacitet smanjiti i strminu vala što nailazi, a i strminu vala koji se reflektira. Zbog refleksija vala na tom kapacitetu se donekle usporava prorada odvodnika prenapona, ali se maksimalni napon na štićenom objektu neće posebno promijeniti, a oštri prijelazi jednog stanja u drugo bit će blaži, kako je to na slikama 14.6. i 14.7. crtkanom krivuljom otprilike označeno. Utjecaj kapaciteta bit će manji što je manji kapacitet aparata koji štitimo. Obično su uređaji u malim postrojenjima malog kapaciteta, a jednako tako i uređaji ispred odvodnika i u velikim postrojenjima, pa se kapaciteti za orijentacijsko računanje u jednom i drugom slučaju dadu zanemariti.

Primjer 14.2.

Oprema koju želimo zaštititi ima izolacijsku razinu $U_i = 1\,050$ kV, a odvodnik prenapona preostali napon $U_v = 800$ kV. Na koju najveću udaljenost možemo postaviti odvodnik prenapona ako je strmina vala koji nailazi $1\,500$ kV/ μ s.

Rješenje:

$$\ell = \frac{U_i - U_v}{2s} \cdot v = \frac{1\,050 - 800}{2 \cdot 1\,500} \cdot 300 = 25 \text{ m.}$$

Najveća udaljenost odvodnika od opreme koju želimo štititi smije biti 25 m.

Primjer 14.3.

Vodom nailazi strmi val amplitude $U_0 = 1\,600$ kV i dužina trajanja čela $T_\delta = 2,2\ \mu\text{s}$. Oprema koju štitimo izdržat će samo 900 kV. Na koju udaljenost moramo postaviti odvodnik prenapona kojemu preostali napon iznosi 700 kV.

Rješenje:

$$s = \frac{U_0}{T_\delta} = \frac{1\,600}{2,2} = 727,27\ \text{kV}/\mu\text{s}$$

$$\ell = \frac{U_i - U_v}{2s} \cdot v = \frac{900 - 700}{2 \cdot 727,2} \cdot 300 = 41,25\ \text{m}.$$

Primjer 14.4.

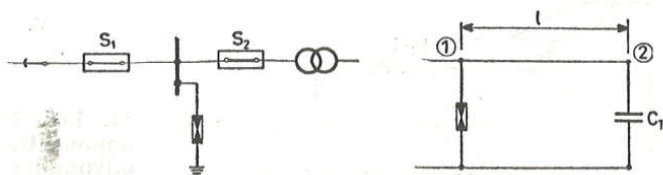
Koliki bi se napon pojavio na opremi kad bismo 20% povećali razmak u odnosu prema izračunatoj udaljenosti u zadatku 14.3?

Rješenje:

$$U_i = U_v + \frac{2s\ell}{v} = 700 + \frac{2 \cdot 727,2 \cdot 49,5}{300} = 935,99\ \text{kV}.$$

To bi već bio napon koji oprema ne bi mogla izdržati.

Dosad smo ustanovljivali veličinu zaštitne udaljenosti ispred odvodnika, ali bismo možda pogrešno zaključili kada bismo pomislili da on iza sebe, na istoj udaljenosti, ne bi mogao štititi neki aparat. No, da bi nam vrijedilo isto razmatranje, moramo pretpostaviti da nam taj aparat ima beskonačnu impedanciju ili, drugim riječima, da nam je taj aparat iza odvodnika točka potpune refleksije. Uz takav uvjet izraz (14.7) vrijedi i za račun zaštitne udaljenosti i za one aparate koji se nalaze iza odvodnika. Od te pretpostavke se katkad za praktičke proračune i polazi, pa se zato izraz (14.7) upotrebljava za račun zaštitne udaljenosti i onih aparata iza odvodnika prenapona. Naravno da tad rezultati imaju idealiziranu i orijentacijsku vrijednost. Kad želimo točnije računati, moramo poći s gledišta da se neki aparati, kao npr. transformatori, u prvim trenucima nailaska vala bolje nadomještaju kapacitetom nego beskonačnom impedancijom. Zato će se prići proračunu zaštitne udaljenosti odvodnika za one aparate iza njega prema shemi na slici 14.8, gdje odvodnik



Sl. 14.8. Odvodnik štiti aparate iza sebe

štiti aparat iza sebe, a takvi uređaji su najčešće transformatori. Tako smo došli do drugog slučaja šticeanja aparata, koji smo na početku ovog izlaganja spomenuli.

Pretpostavimo da odvodnik neće proraditi do trenutka t_1 , odnosno da je do tog trenutka na njemu napon $2st < U_p$. Tu pretpostavku činimo radi veće zaštite postrojenja. Fizikalna zbivanja do tog trenutka otprilike su ova. Naponski val nailazi nesmetano na točku 2, gdje je priključen naš transformator, koji smo nadomjestili kapacitetom C_T . Tu se on reflektira s negativnim predznakom jer nenabijeni kondenzator izaziva kratki spoj pa se sva električna energija u tim prvim trenucima pretvara u energiju magnetskog polja. Taj negativni od kondenzatora reflektirani val vraća se natrag do točke 1, gdje je priključen odvodnik, i tamo smanjuje napon koji taj trenutak ima val što dalje nailazi. Taj pad napona vala izaziva kašnjenje prorade ventilnog odvodnika, a za to se vrijeme kondenzator i dalje puni i napon na njemu raste. U nekom trenutku t_1 proradit će odvodnik i od tog trenutka valovi će se od odvodnika reflektirati s negativnim, a od kondenzatora C_T s pozitivnim predznakom, jer se kondenzator nabio pa možemo tako nabiti kondenzator shvatiti kao otvoreni kraj voda. Fizikalna zbivanja nakon trenutka t_1 su ova. Napon na odvodniku možemo smatrati konstantnim i jednakim preostalom naponu odvodnika dok napon na vodu i šticeanom aparatu (na transformatoru) titra oko vrijednosti preostalog napona odvodnika. Tu posljednju tvrdnju bolje ćemo uočiti i analitički opisati ako vod nadomjestimo π -shemom i ako napon na odvodniku zamislimo kao val strmog čela amplitude jednake preostalom naponu odvodnika U_v ; strmina čela neka mu je isto s kao i kod onog vala koji je nailazio. Dakle, u prikazu stanja nakon trenutka t_1 zanemarujemo djelovanje kapaciteta o kojem je malo prije bilo riječi, a koji je utjecao na smanjenje strmine i tako uzrokovao da odvodnik kasnije proradi.

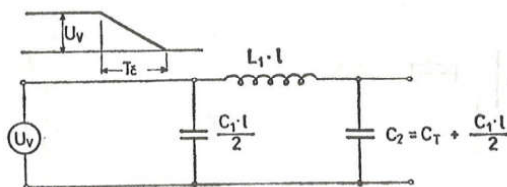
Na slici 14.9. nacrtana je nadomjesna π -shema za opisanu situaciju, a i oblik napona U_v koji na nju djeluje poslije prorade. Transformator je nadomješten, kako smo rekli, kapacitetom C_T , a s C_1 i L_1 označene su jedinične vrijednosti kapaciteta i induktiviteta onog dijela nadzemnog voda između odvodnika i mjesta gdje je priključen transformator.

Odmah je dobro podsjetiti na to da se vrijednosti C_1 i L_1 mogu izračunati ako znamo veličinu valnog otpora Z nadzemnog voda i brzinu širenja vala v . Te su vrijednosti međusobno povezane poznatim jednadžbama:

$$Z = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad \text{ i } \quad v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}},$$

iz kojih se lako dobiva:

$$L_1 = \frac{Z}{v} \quad \text{ i } \quad C_1 = \frac{1}{Zv}. \quad (14.8)$$



Sl. 14.9. Ekvivalentna shema i oblik napona U_v koji djeluje nakon prorade odvodnika

Vrijednost kapaciteta prvog dijela voda ili sabirnica dopušteno je u proračunima katkad zanemariti jer je malena i u blizini je odvodnika, koji na tom dijelu mijenja odnose voda prema zemlji. Uz takve pretpostavke, kad pažljivije promotrimo shemu na slici 14.9, opazit ćemo da nas ona podsjeća na LC-krug u kojemu će se pojavljivati oscilacije što smo ih opširnije opisali u poglavlju o putnim valovima. Zato ćemo ovdje ta razmatranja malo proširiti, a zatim primijeniti u računanju zaštite aparata priključenoga iza odvodnika. Da bismo to proveli, mora se poći od osnovnog zahtjeva da nam nipošto najviši napon na transformatoru, odnosno na kondenzatoru C_T , ne smije premašiti onu vrijednost što je njegova izolacija može izdržati. Opći izraz, kako smo tamo vidjeli, za sve najviše vrijednosti napona koje se mogu pojaviti na nekom kondenzatoru za vrijeme djelovanja vala kad je $t > T_\delta$, sastoji se od amplitude U_0 nailazećeg vala i sinusoide. To je izraz (8.48).

Ovdje ćemo ga samo prilagoditi za računanje najviše vrijednosti napona na kapacitetu transformatora koja nastaje nakon prorade odvodnika. Zato će se u tom izrazu umjesto $(U_c)_{\max}$ napisati $(U_i)_{\max}$, a U_0 ćemo zamijeniti vrijednošću preostalog napona na odvodniku U_v . Nakon tih zamjena izraz (8.48) glasi ovako:

$$(U_i)_{\max} = U_v \left(1 + \left| \frac{\sin \frac{\pi \cdot T_\delta}{\tau}}{\frac{\pi \cdot T_\delta}{\tau}} \right| \right). \quad (14.9)$$

Rješenja te jednadžbe grafički su predočena na slici 8.15. u istom poglavlju ovisno o (T_δ/τ) , pa se vrijednosti najvišeg napona na izolaciji transformatora $(U_i)_{\max}$ s obzirom na preostali napon U_v mogu tamo pročitati.

Raščlanjujući dijagram vidimo da nam najviši napon na izolaciji transformatora može poprimiti različite vrijednosti preostalog napona od U_v do $2U_v$. Koju ćemo od tih vrijednosti dopustiti da djeluje na izolaciji, ovisi o mnogo faktora, ali ni jedan od njih ne smije prekoračiti onu vrijednost koju će izolacija izdržati. Najviša vrijednost napona na izolaciji pojaviti će se kad bude omjer $T_\delta/\tau = 0$, a lokalne se najveće vrijednosti pojavljuju kod $T_\delta/\tau = 1,5$, $T_\delta/\tau = 2,5$ itd.

Da bi dosadašnja razmatranja poslužila za proračun zaštite nekog aparata koji se nalazi iza odvodnika, evo nekoliko numeričkih primjera uz komentar dobivenih rezultata.

Primjer 14.5.

Potrebno je ustanoviti najviši napon na transformatoru kad je valni otpor voda $Z = 400 \, \Omega$, a udaljenost odvodnika od transformatora $\ell = 10$ m. Preostali napon na odvodniku neka bude $U_v = 300$ kV, njegova strmina $s = 600$ kV/ μ s, a za kapacitet transformatora uzmimo da iznosi 3 000 pF.

Rješenje:

Izračunajmo najprije parametre u π -shemi L i C, pa će po izrazima (14.8) biti:

$$L_1 = \frac{Z}{v} = \frac{400}{300} = 1,33 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$$

$$L = L_1 \cdot \ell = 1,33 \cdot 10^{-6} \cdot 10 = 13,3 \cdot 10^{-6} \text{ H}$$

$$C_1 = \frac{1}{Z \cdot v} = \frac{1}{400 \cdot 300} = 8,3 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$C_2 = C_T + \frac{C_1 \cdot \ell}{2} = 3\,000 \cdot 10^{-12} + \frac{8,3 \cdot 10^{-12} \cdot 10}{2} = 3\,041 \cdot 10^{-12} \text{ F.}$$

Trajanje čela vala nakon prorade odvodnika je:

$$T_{\tilde{e}} = \frac{U_v}{s} = \frac{300}{600} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ s.}$$

Omjer $\frac{T_{\tilde{e}}}{\tau}$, potreban za računanje $(U_i)_{\max}$, iznosi:

$$\frac{T_{\tilde{e}}}{\tau} = \frac{T_{\tilde{e}}}{2\pi \sqrt{LC_2}} = \frac{0,5 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{13,3 \cdot 10^{-6} \cdot 3\,041 \cdot 10^{-12}}} = 0,40.$$

Najviši napon na transformatoru prema izrazu (14.9) bit će:

$$\begin{aligned} (U_i)_{\max} &= U_v \left(1 + \left| \frac{\sin \frac{\pi T_{\tilde{e}}}{\tau}}{\frac{\pi T_{\tilde{e}}}{\tau}} \right| \right) = 300 \cdot \left(1 + \left| \frac{\sin 1,256}{1,256} \right| \right) = \\ &= 1,757 \cdot 300 = 527,11 \\ \frac{(U_i)_{\max}}{U_v} &= \frac{527,11}{300} = 1,757. \end{aligned}$$

Rezultat koji smo dobili, promatran s gledišta praktičkih zahtjeva, oslanjajući se na pravila o koordinaciji izolacije, pokazuje da je izračunati napon prevelik. Naime, kako znamo, omjer između udarnoga podnosivog napona izolacije U_i i zaštitne razine odvodnika U_v za nazivne se napone više od 24 kV kreće oko 1,2, a mi smo dobili za taj omjer 1,757. Tako povišeni omjer, odnosno tako visoki napon na izolaciji prema preostalom naponu, ne može se dopustiti, pa ga valja smanjiti. To se postiže na više načina. Prvo, pokušajmo to učiniti smanjivši udaljenost između odvodnika i transformatora. Da bismo izračunali tu udaljenost, moramo prije na dijagramu na slici 8.15. naći onaj omjer $T_{\tilde{e}}/\tau$ kod kojeg najviši

napon $(U_i)_{\max}$ na transformatoru ne premašuje $1,2 U_v$. Krećući se udesno po apscisnoj osi lako će se utvrditi da već od omjera $T_\delta/\tau = 1,5$ pa dalje najviši napon na transformatoru neće prekoračiti dopuštenu vrijednost od $1,2 U_v$. Zato će se sad kada računamo dopuštenu udaljenost odvodnika od transformatora koristiti upravo utvrđenim podatkom da je:

$$\frac{T_\delta}{\tau} = \frac{T_\delta}{2\pi\sqrt{LC_T}} = 1,5,$$

a odatle izlazi da je induktivitet voda:

$$L = \frac{\left(\frac{T_\delta}{2\pi \cdot 1,5}\right)^2}{C_T} = \frac{\left(\frac{0,5 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,5}\right)^2}{3\,000} = 0,94 \cdot 10^{-6} \text{ H}.$$

Jedinični induktivitet voda L_1 , kako smo utvrdili računanjem, iznosi $1,33 \cdot 10^{-6} \text{ H}$, pa se onda udaljenost odvodnika od transformatora ℓ izračunava iz izraza $L = L_1 \cdot \ell$ i iznosi:

$$\ell = \frac{L}{L_1} = 0,706 \text{ m}.$$

Dakle, da bismo snizili napon na transformatoru na dopuštenu vrijednost od $1,2 U_v$, ne smijemo odvodnik postaviti na veću udaljenost od one što smo je upravo izračunali. U tom računu zanemarili smo kapacitet voda, koji je malen.

Katkad, iz mnogo razloga, u rasklopnim se postrojenjima ne da postaviti odvodnik bliže transformatoru, pa se tad na drugi način snizuje napon na njemu. To se postizava smanjujući strminu onog vala koji nailazi, i to tako da sprečava udare groma u blizinu stanice, što se ostvaruje produljenjem šticeenog prilaza. Ovdje će se izračunati koliko taj šticeeni prilaz stanici mora biti dugačak. Pretpostavimo, dakle, kao i prije, da nam nipošto napon na transformatoru ne smije biti viši od $1,2 U_v$ i neka, naravno, odvodnik od njega bude udaljen 10 m, što smo u početku ovih razmatranja zadali. Koristeći se podacima iz prethodnih zadataka, vrijeme će vlastitih oscilacija iznositi:

$$\tau = 2\pi\sqrt{LC_T} = 2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{13,3 \cdot 10^{-6} \cdot 3\,000 \cdot 10^{-12}} = 12,55 \cdot 10^{-7} \text{ s},$$

a radi ograničavanja napona na vrijednost $1,2 U_v$ moramo držati omjer $(T_\delta/\tau) = 1,5$.

Iz tih podataka izlazi da duljina trajanja čela vala mora nakon prograde odvodnika biti:

$$T_\delta = 1,5 \cdot \tau = 1,5 \cdot 12,55 \cdot 10^{-7} = 1,882 \mu\text{s},$$

a za strminu koju val ne smije prekoračiti nakon prorade odvodnika dobivamo:

$$s = \frac{U_v}{T_{\bar{e}}} = \frac{300}{1,882} = 159,40 \text{ kV}/\mu\text{s}.$$

Pretpostavimo još dalje da nam je izolacijska razina voda $U_i = 900 \text{ kV}$, pa tad val koji nailazi tim vodom ne smije imati trajanje čela manje od:

$$(T_{\bar{e}})_{\min} = \frac{U_i}{s} = \frac{900}{159,40} = 5,646 \mu\text{s}.$$

Ako se poslužimo podacima u literaturi, da će nam se na 1 km duljine voda trajanje čela vala produljiti za $1,11 \mu\text{s}/\text{km}$, onda je lako ustanoviti da će val krećući se od mjesta udara do postrojenja morati putovati zaštićenim prilazom kojemu je duljina:

$$\ell = \frac{(T_{\bar{e}})_{\min}}{1,11} = \frac{5,646}{1,11} = 5,086 \text{ km}.$$

Na tolikoj udaljenosti od stanice morala bi biti postavljena zaštitna užad da se onemogući direktan udar groma i povratni preskoci zbog slabog uzemljenja. Kad to ne bismo proveli, u jednom i u drugom slučaju valovi koji dolaze u stanicu imali bi vrlo strmo, pa čak i okomito čelo koje kratko traje, te bi tad izazivali vrlo visoke napone i oscilacije. U praksi je većina rasklopnih postrojenja opskrbljena zaštitnom užadi i taj se problem, posebno, na takav način ne pojavljuje. Međutim, ponekad neka postrojenja nemaju zaštitno uže ili, ako ga i imaju, zbog slabih se mogućnosti uzemljenja stupova pojavljuju povratni preskoci, koje nije moguće eliminirati zbog velikoga specifičnog otpora tla. U tim okolnostima, izvođenje ovako dugačkih šticećenih prilaza zna biti ekonomski neopravdano, pa se strmina vala koji nailazi može smanjiti i kraćim zaštićenim prilazima, ali se tad upotrebljavaju kondenzatori koji se priključuju na isto mjesto uz odvodnik.

14.5. Upotreba kondenzatora

Dakle, i dalje ostajući pri istim zahtjevima u pogledu dopuštene visine napona na transformatoru kao u prethodnim razmatranjima, od $1,2 U_v$, moramo kondenzatorom postići da nam čelo vala koji nailazi na odvodnike ne bude manje od $(T_{\bar{e}})_{\min} = 5,646 \mu\text{s}$. Pri tome se pitamo koliki kapacitet mora imati takav kondenzator koji bi umjesto zaštitnog užeta omogućio da val na odvodnik ne dođe s kraćim trajanjem čela, odnosno s većom strminom. Da bismo to bolje razumjeli, pretpostavimo da val koji nailazi na odvodnik ima čelo kraće od $5,646 \mu\text{s}$ i da ono iznosi $T_{\bar{e}} = 2 \mu\text{s}$. Kondenzator mora tad trajanje tog čela produžiti na od nas dopuštenu vrijednost $(T_{\bar{e}})_{\min}$. Za računanje tog problema koristit ćemo

se izrazom (8.30) iz poglavlja o putnim valovima, koji nam pokazuje međusobne odnose čela vala što nailazi na kondenzator i čela vala poslije nego je on prošao pored kondenzatora, a on glasi:

$$(T_{\delta})_{\min} = \frac{T_{\delta}}{1 - e^{-(T_{\delta}/T)}}.$$

Budući da smo u razmatranjima unaprijed postavili uvjete, pa smo unaprijed zadali vrijednosti za $(T_{\delta})_{\min}$ i T_{δ} , tad pomoću prethodnog izraza možemo računajući zaključiti da će nam oni biti ispunjeni ako vremenska konstanta kruga bude:

$$T = \frac{T_{\delta}}{\ln \left(1 - \frac{T_{\delta}}{(T_{\delta})_{\min}} \right)} = - \frac{2 \cdot 10^{-6}}{\ln \left(1 - \frac{2 \cdot 10^{-6}}{5,646 \cdot 10^{-6}} \right)} = 4,573 \cdot 10^{-6} \text{ s}.$$

Iz tako ustanovljene vremenske konstante kruga $T = (ZC/2) = 4,573 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ izračunavamo vrijednost kapaciteta kondenzatorske baterije, koji za naše zahtjeve iznosi:

$$C = \frac{2T}{Z} = \frac{2 \cdot 4,573 \cdot 10^{-6}}{400} = 22,86 \cdot 10^{-9} \text{ F}.$$

Kondenzatorska baterija koja bi imala tu vrijednost kapaciteta spriječila bi umjesto dugoga zaštićenog prilaza stanici da strmina vala ne prekorači dopuštenu veličinu.

Kad se vodom ne kreću putni valovi, tada su takvi kondenzatori i dalje pod pogonskim naponom, i uzimaju kapacitivnu snagu ili, bolje rečeno, oni su izvori jalovih snaga. Snaga jedne takve kondenzatorske baterije po fazi bit će:

$$S = U_f^2 \cdot \omega C.$$

Tu je s U_f označen fazni napon, a s ω kružna frekvencija. Trofazna snaga je:

$$S = U_{\ell}^2 \cdot \omega C.$$

Pri tome je s U_{ℓ} označen linijski napon. Ako je riječ o trofaznomvodu nazivnog napona od 110 kV, trofazna snaga će iznositi:

$$S = 110^2 \cdot 10^6 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 21,6 \cdot 10^{-9} = 86,9 \text{ kVar}.$$

Kad se priključuju kondenzatori kojima bi se smanjivala strmina naponskih valova, treba voditi računa o mnoštvu drugih činilaca što se pojavljuju u normalnom pogonu elektroenergetskog sistema. Tako, ako je riječ o rasklopnom postrojenju koje je u blizini nekog potrošača,

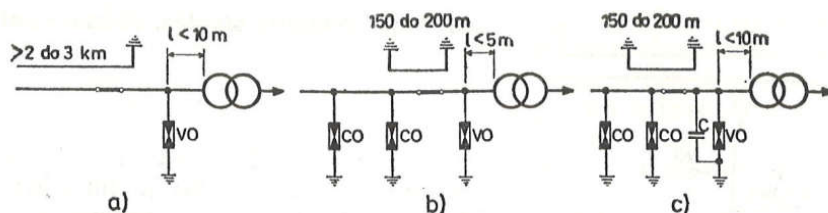
kondenzatori mogu biti od koristi za ekonomičan prijenos električne energije. Naprotiv, ako se oni priključuju blizu izvora energije, kao npr. kad bismo željeli štititi transformator u bloku s generatorom, onda su nam takvi kondenzatori za zaštitu od atmosferskih prenapona dodatno opterećenje za izvor energije i za vodove. Taj nedostatak naravno dolazi do izražaja u elektroenergetskim postrojenjima gdje je snaga izvora malena, a kod onih velikih snaga ta teškoća iščezava. Na primjer, ako je postrojenje koje štitimo reda veličine od 100 MVA, a jalova snaga što smo je malo prije izračunali iznosi samo 0,0869 MVAR, tad je jasno da tu problema neće biti. Međutim, kod postrojenja malih snaga i visokih napona takva bi kondenzatorska baterija stvarala teškoće.

14.6. Pojednostavljene sheme zaštite

Upravo smo izložili zaštitu elektroenergetskih postrojenja priključenih na nadzemne vodove. Mogli bismo reći da se njihov način zaštite nešto razlikuje od zaštite elektroenergetskih postrojenja koja su priključena na kabele, što ćemo poslije opisati, pa su problemi zaštite takvih postrojenja od udara groma sami za sebe jedna zaokružena cjelina.

Iz prethodnih razmatranja i izračunatih primjera, gdje smo uzimali u obzir mnogo električnih veličina i parametara koji djeluju pri odabiranju mjesta ventilnog odvodnika u elektroenergetskim postrojenjima priključenima na nadzemne vodove, može se zaključiti da je najvažnije odvodnik postaviti što bliže transformatoru. To bismo mogli uzeti kao pravilo i tome podrediti sva naša računanja. Tu ćemo tvrdnju potkrijepiti podsjetimo li se fizikalnih zbivanja nakon prorade odvodnika, kad ulazni kapacitet transformatora i induktivitet nadzemnih vodova djeluju kao sijela električne i magnetske energije, kojih pretvorba jedne u drugu izaziva titraje, to veće što je trajanje čela vala kraće, odnosno strmina vala veća.

Kapacitet transformatora ne možemo smanjiti, ali se zato daje smanjiti induktivitet nadzemnih vodova time što ćemo odvodnik postaviti što bliže transformatoru kao najvažnijem elementu u elektroenergetskim postrojenjima. Titrajne su pojave osobito izražene u velikim postrojenjima jer tamo transformatori imaju i velike kapacitete prema zemlji. Prosječna veličina ulaznog kapaciteta nekoga učinskog transformatora nazivnog napona od 110 do 220 kV uzima se otprilike da iznosi 1 500 pF. U malim postrojenjima taj je kapacitet malen, pa se u proračunima može zanemariti. Ukoliko nismo u mogućnosti odvodnik priključiti što bliže transformatoru, tad se titrajne pojave ublažavaju što duljim štićenim prilazima pomoću kojih se smanjuje napon i strmina naponskog vala što bi mogao naići u postrojenje. Smanjivši strminu produljuje se čelo pa su amplitude titraja manje. Pojednostavljene sheme mnogih postrojenja sadrže tri karakteristične točke: rastavljač, čvor gdje je priključen odvodnik i transformator. Na slici 14.10. prikazane su pojednostavljene sheme zaštite za transformatorske stanice od 35 do 220 kV priključene na kraju nekoga nadzemnog voda. Dakle, za završne stanice ($n = 1$), gdje se valne pojave pojavljuju u najnepovoljnijem obliku. Te sheme vrijede redovito i za postrojenja nižih nazivnih napona (10 i 20 kV) uz uzimanje u obzir nekih specifičnosti koje su tamo prisutne.



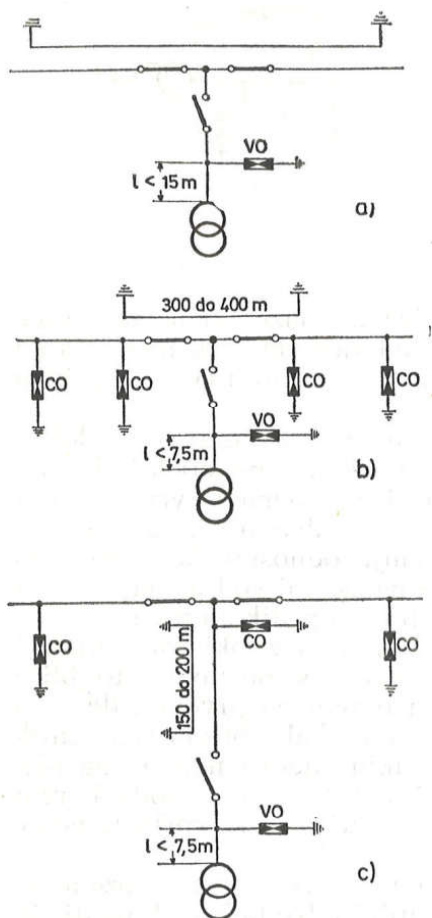
Sl. 14.10. Završna stanica. Sheme zaštite

Za sve završne transformatorske stanice tih nazivnih napona koje su danas u upotrebi ventilni je odvodnik udaljen od transformatora i ostalih aparata najviše prosječno od 10 do 15 m. Za njih ćemo otprilike prikazati sheme zaštite.

Na slici 14.10.a, gdje je stanica priključena na nadzemni vod s dobro uzemljenim i dobro postavljenim zaštitnim užetom po cijeloj duljini, pa zbog toga putni valovi ne mogu imati visoke tjemene vrijednosti i velike strmine, nije potrebno postavljati cijevne odvodnike, pa ni tražiti načina da se njihova strmina još više smanji, odnosno da se njihovo trajanje čela produlji. Na slici 14.10.b, gdje nadzemni vod nema zaštitno uže, pa stanica nije djelotvorno zaštićena i na nju prilikom udara groma u nadzemni vod mogu naići putni valovi ekstremno visokih amplituda i velikih strmina, potrebno je, kao prvo, odvodnik postaviti što bliže transformatoru ($l < 5$ m). Osim toga, valja barem na prvom i drugom stupu ispred stanice, postaviti cijevne odvodnike kako bi oni rad ventilnog odvodnika rasteretili jakih struja i velikih padova napona na njegovu otporu uzemljenja. Poželjno je, dalje, iznad nadzemnog voda, barem prvih 100 do 200 m, dobro uzemljeno zaštitno uže, da se spriječe neposredni udari u samu blizinu stanice.

Na slici 14.10.c prikazan je nadzemni vod bez zaštitnog užeta po cijeloj svojoj duljini i kad nije moguće ventilni odvodnik priključiti tik uz sam transformator. U toj situaciji potrebno je uz ventilni odvodnik priključiti kondenzator kapaciteta od nekoliko desetaka nanofarada, da bismo smanjili velike strmine valova koji u takvim okolnostima mogu naići na stanicu. Kondenzator, kako smo vidjeli, produljuje trajanje čela vala, odnosno smanjuje strminu. Toliko o zaštiti završnih stanica priključenih na nadzemne vodove gdje se pojavljuju najnepovoljnije prilike pri udaru groma.

Osvrnimo se, dalje, na osnovne sheme zaštite prolaznih transformatorskih stanica, dakle onih koje su priključene najmanje na dva nadzemna voda ($n = 2$). Za takve transformatorske stanice udomaćilo se reći da su priključene na otcjepu jednoga prijenosnoga glavnog voda ili na ogranku neke mreže. Na slici 14.11. prikazani su takvi primjeri. U početku napominjemo da prilikom proračuna zaštitnih udaljenosti pretpostavljamo kako su to završne stanice jer jedan ili drugi rastavljač mogu biti iskopčani. No ipak, u normalnim prilikama, kad su oba rastavljača ukopčana, imamo znatno smirenije valne pojave prilikom udara, bilo s njezine lijeve ili desne strane. Naime, u normalnim uvjetima pogona neće biti potpune refleksije na mjestu gdje je priključena stanica. To mjesto smatramo čvornom točkom gdje dolazi do grananja putnih



Sl. 14.11. Prolazna stanica. Sheme zaštite

valova, pa čak i do smanjenja njihove naponske razine, ako je na njoj priključeno više od dva nadzemna voda ($n > 2$). Takvo stanje stvari upućuje nas na blaže zahtjeve prilikom određivanja zaštitne udaljenosti ventilnih odvodnika.

Na slikama 14.11.a i b prikazana je jedna prolazna stanica, odnosno jedna priključena na sasvim kratkom otcjepu, tik uz prijenosni vod. Na slici 14.11.a prijenosni je vod djelotvorno zaštićen, pa priključenoj stanici ne prijeti opasnost od bližih udara groma, a zbog grananja putnih valova neće biti nigdje ni potpunih refleksija. Zaštitna udaljenost može biti veća nego kod završene stanice ($l < 15$ m). Na slici 14.11.b prijenosni vod nije djelotvorno zaštićen po cijeloj duljini, pa stanici na jednako tako kratkom otcjepu prijeti opasnost od blizih udara groma. Iako je to prolazna stanica, pa neće biti potpunih refleksija putnih valova, ipak treba zbog velikih strmina smanjiti zaštitnu udaljenost odvodnika na $l < 7,5$ m. U takvoj je prilici

potrebno barem do prvog stupa s njezine lijeve i desne strane postaviti zaštitno uže i cijevne odvodnike da bismo rasteretili rad ventilnog odvodnika.

Na slici 14.11.c stanica je priključena na nešto duljem otcjepu, ali koji ne premašuje 150—200 m. Takvu ćemo stanicu i dalje prihvaćati kao prolaznu, pa su i zaštitne mjere i zaštitne udaljenosti jednake kao u primjeru pokazanome na slici 14.11.b.

Međutim, ako otcjep premašuje duljinu od 200 m, npr. ako je on dugačak 2 000—3 000 m, tad u tako dugački otcjep može neposredno udariti grom, pa se opasnost za stanicu povećava. U takvoj okolnosti, ako taj dugi otcjep ima po cijeloj svojoj duljini postavljeno zaštitno uže, može se i dalje ta stanica shvaćati kao prolazna stanica i ništa ne poduzimati prema prethodnim izlaganjima. Ako tako dugi otcjep nema zaštitno uže, tad tu stanicu na njegovu kraju treba smatrati završnom stanicom jer su sve nepovoljne mogućnosti valnih pojava otvorene.

U dosadašnjim razmatranjima, da bismo izložili osnovne principe zaštite transformatorskih stanica, mi smo jedanput pretpostavljali da stanice imaju zaštićene prilaze, a drugi put da toga nemaju. U praksi nadzemni vodovi koji povezuju postrojenja od 35 kV i više od toga imaju

zaštitnu užad po cijeloj svojoj duljini, tako da se problem njihove zaštite od putnih valova, kako smo vidjeli na prikazanim shemama, znatno pojednostavljuje (sl. 14.10.a i 14.11.a). No, ne bismo bili dosljedni kad se ovdje ne bismo sjetili i onih rijetkih udara groma u fazne vodiče koji se mogu pojaviti kad nadzemni vodovi imaju dobro postavljeno i dobro uzemljeno zaštitno uže, o čemu je bilo riječi u prethodnim izlaganjima. Naravno da nas tako malo vjerojatni događaji ne smiju obeshrabriti, ali je dobro imati na umu i takve mogućnosti, kako bismo što savjesnije izvršili mjere zaštite koje isključuju one česte smetnje što mogu nastati prilikom izbijanja u nadzemne vodove. U izračunatim primjerima u ovom poglavlju, a i na prikazanim shemama, brojčani rezultati koje smo dobili relativno su vrlo strogi. Oni su navedeni samo zbog toga da bismo lakše uputili na osnovna fizikalna zbivanja i obrazložili postupke računanja. Zato oni imaju samo orijentacijski smisao. Kad bismo npr. izračunali točnu zaštitnu udaljenost ventilnog odvodnika u jednome stvarnom postrojenju, morali bismo računati po mnogo složenijim ekvivalentnim shemama. One bi osim kapaciteta učinskog transformatora kao dosada morale sadržavati još i kapacitete mjernih transformatora, sabirnica, prekidača, rastavljača itd. Osim toga bi trebalo uzeti u obzir i induktivitete vodiča koji ih međusobno povezuju. Tako detaljno računanje postalo bi mnogo napornije i složenije pa se to danas izvodi na računskim strojevima.

Čitaocu ovog teksta mogu dobro doći podaci o veličinama kapaciteta pojedinih elemenata u postrojenjima koji su bili dostupni u sovjetskoj literaturi, pa ih ovdje navodimo radi eventualne upotrebe.

Ekvivalentni kapaciteti aparata od 35 do 220 kV		
	Kapaciteti (pF)	
	granice	srednja vrijednost
<i>Učinski transformatori</i>		
a) s kompenzacijom, velikih snaga	1 000—3 000	1 500
b) bez kompenzacije, manjih snaga	300—1 000	500
<i>Naponski transformatori</i>	200—500	300
<i>Prekidači</i>		
a) u uključenom stanju	300—800	500
b) u isključenom stanju	200—500	300
<i>Rastavljači</i>		
a) u uključenom stanju	40—80	60
b) u isključenom stanju	30—60	40
<i>Provodni izolatori</i>	100—300	150

14.7. Zaštita postrojenja nazivnih napona od 10 i 20 kV

U elektroenergetska postrojenja od 10 i 20 kV ubrajamo transformatorske stanice međusobno povezane nadzemnim vodovima i kabelima, koje služe za raspodjelu električne energije do samog potrošača uz napon

od 380 V. S obzirom na svoju namjenu, njih je mnogo veći broj od stanica od 35 do 220 kV. Nadzemni vodovi koji međusobno povezuju te stanice obično nisu zaštićeni zaštitnim užetom, pa su kao takvi izloženi izravnim udarima groma u fazne vodiče. Takvo stanje pogoduje stvaranju putnih valova visoke amplitude i velike strmine, koji se kreću prema transformatorskim stanicama. Osobito su nepovoljne valne pojave povezane za nadzemne vodove na drvenim stupovima kad se opskrbljuju stanice i potrošači na nekome širem brdovitom ili poljoprivrednom području. Nadzemni vodovi nižih napona u gradskim električnim mrežama okruženi su zgradama i drugim objektima, pa je manja vjerojatnost da će oni biti izloženi udarima groma. Zato su transformatorske stanice u gradovima u povoljnijem položaju. Osim toga, gradske električne mreže danas se najvećim dijelom izvode kabelima, pa je sigurnost električnih postrojenja u gradovima još veća. Udari u nadzemne vodove ili kabele na velikoj udaljenosti od postrojenja tu nisu tako opasni jer zbog njihove niske izolacijske razine na njima vrlo brzo nastaju preskoci i prigušenja putnih valova. Za stanice nižih nazivnih napona opasni su udari groma u njihovu blizinu.

Elektroenergetska postrojenja od 10 i 20 kV relativno su malena po fizičkom obujmu. Međutim, taj mali fizički obujam treba u električnom smislu shvatiti i kao postrojenja malih spremnika električne i magnetske energije. To je u izvjesnom smislu povoljna okolnost jer prilikom nailaska putnih valova nema na njima znatnijih titrajnih pojava. Možemo reći da se postrojenja nižih nazivnih napona, za razliku od onih viših nazivnih napona, kruto ponašaju i da na njima nema znatnijih promjena strmina pa ni promjena oblika napona zbog djelovanja kapaciteta.

Te okolnosti nam omogućuju da elektroenergetsko postrojenje nižih nazivnih napona shvatimo kao da je koncentrirano u jednoj točki iz koje se grana n nadzemnih vodova ili kabela. Prilikom ulaska vala amplitude U_0 na sabirnice nekoga takvog postrojenja nastat će jednostavno grananje valova, pa ako svi vodovi imaju jednak valni otpor, napon na sabirnicama i izolaciji aparata u stanici izračunat će se iz izraza:

$$U_{st} = \frac{2U_0}{n}.$$

Taj smo izraz već upoznali u poglavlju o putnim valovima kao jednadžbu (8.10), kad smo razmatrali pravila kako se oni granaju. Ako ga usporedimo s relacijom (14.9) iz ovog poglavlja, po kojoj se računa napon na izolaciji postrojenja viših nazivnih napona, odnosno postrojenja većeg fizičkog obujma, uočit će se razlika u pristupu ovom problemu. Osim toga, uočit će se i sva zanemarenja koja činimo u računanju napona na sabirnicama postrojenja nižih nazivnih napona.

Osvrnimo se s nekoliko riječi i na određivanje zaštitne udaljenosti ventilnih odvodnika kad se oni upotrebljavaju u postrojenjima od 10 i 20 kV. Transformatori tih stanica imaju, kako smo već više puta ustanovili, mali kapacitet, pa ih u proračunskim shemama umjesto kapacitetom nadomještamo koncentriranim induktivitetom. Zamišljamo da na njima dolazi odmah do pozitivne refleksije vala, pa će zato poslužiti izraz (14.7)

iz ovog poglavlja, koji, prilagođen za praktičko računanje zaštitne udaljenosti ispred odvodnika u malim postrojenjima i iza njega, poprima oblik:

$$\ell = \frac{U_i - U_v}{2s} \cdot v. \quad (14.10)$$

Tu je U_i izolacijska razina transformatora, U_v je preostali napon na odvodniku, s strmina vala što nailazi, v brzina vala, a ℓ je zaštitna udaljenost.

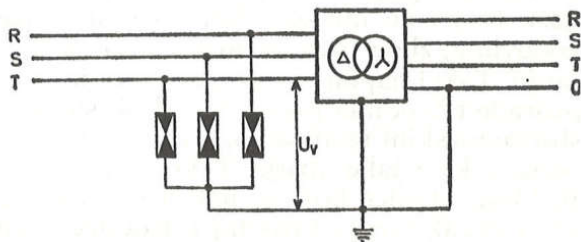
Transformatori i drugi aparati nižih nazivnih napona imaju relativno nisku izolacijsku otpornost između pojedinih točaka konstrukcije i prema zemlji. Zato razlike napona koje nastaju prilikom djelovanja njihovih sistema uzemljenja mogu oštetiti unutrašnju izolaciju. Ta specifična okolnost nalaže da se uzemljenja transformatora i odvodnika spoje i da padovi napona na takvome zajedničkom uzemljenju budu što manji. Kod postrojenja viših nazivnih napona, od 30 kV pa dalje, taj se problem ne pojavljuje u tako kritičnom obliku i nema toliko značajnu ulogu. Prema tome, uzemljenju postrojenja od 10 i 20 kV treba posvetiti osobitu pažnju. Reći ćemo o tome potanje nekoliko riječi

U zaštiti transformatora općenito, a posebno kad štitimo distributivne transformatore ventilnim odvodnikom, štitimo tri vrste izolacije. To su:

- izolacija između namota visokog napona i jezgre; jezgra je spojena s kućištem transformatora;
- izolacija između namota nižeg napona i jezgre, odnosno kućišta transformatora;
- izolacija između namota visokog i niskog napona.

Da bismo zaštitili te tri vrste izolacije, potrebno je detaljnije razmotriti rad ventilnog odvodnika, a posebno djelovanje njegova uzemljenja na razlike napona koje se mogu pojaviti na šticeu transformatoru.

U poglavlju o ventilnim odvodnicima opširnije smo opisali kako se zna dogoditi da preostali napon na odvodniku bude znatno povećan zbog pada napona na otporu uzemljenja ventilnog odvodnika, posebno ako taj otpor nije u dopuštenim granicama. To prekoračenje preostalog napona može biti kritično za sve tri kategorije izolacije u transformatoru. Da bismo to izbjegli, moramo uzemljenje odvodnika i uzemljenje transformatora izvesti kao zajedničko, a da bismo zaštitili sve tri izolacije — treba zajedno uzemljiti odvodnik prenapona, kućište transformatora i nul-točku namota nižeg napona. Shema spajanja na slici 14.12. prikazuje povezivanje svih uzemljenja. To izjednačavanje potencijala osigurava nam



Sl. 14.12. Povezivanje uzemljenja odvodnika i transformatora

u prvom redu da prilikom prorade odvodnika napon na visokonaponskom namotu transformatora bude jednak preostalom naponu, što smo i željeli. Doduše, potpuno jednake potencijale između tih dviju točaka nije idealno lako postići jer vodiči koji spajaju odvodnike sa zajedničkim uzemljivačem, iako kratke duljine jesu za udarne struje koje tuda protječu ne baš zanemariv induktivni otpor. Međutim, za praktička razmatranja zanemarimo tu činjenicu i smatrajmo da smo tim spajanjem izbjegli nepotrebne razlike napona koje bi se inače pojavljivale da su uzemljenja odvodnika i kućišta transformatora izvedena odvojeno. Kako smo tim spajanjem kućišta transformatora povišili potencijal jednak padu napona na zajedničkom uzemljivaču koji nastaje poslije prorade odvodnika, tad je potrebno spojiti i zvjezdište niskonaponskog namotaja s kućištem transformatora kako bi se izbjegle i prema njemu razlike potencijala. Napon između nul-točke niskonaponskog namota i kućišta bit će poslije spajanja jednak nuli. Tim spajanjem smo postigli da napon na izolaciji visokonaponskog svitka bude potpuno neovisan o padu napona na uzemljivaču odvodnika, pa bi se moglo pomisliti da ni veličina otpora uzemljenja nema nikakvu ulogu. Međutim, ne valja zaboraviti da smo tim zajedničkim uzemljenjem stvorili situaciju u kojoj će nam kućište i namot nižeg napona transformatora poprimiti potencijal jednak padu napona na otporu zajedničkog uzemljivača. Ta okolnost nas obavezuje da taj potencijal ne bude velik, odnosno da pad napona na zajedničkom uzemljivaču ne prekorači dopuštene vrijednosti. Da bismo to postigli, potrebno je da otpor uzemljenja zajedničkog uzemljivača bude što manji i da ni u bilo kojem slučaju ne premaši vrijednost od 10Ω .

Iz ovih naših izlaganja mogli bismo zaključiti i jednostavno reći da je potrebno prilikom zaštite distributivnih stanica spojiti uzemljenje odvodnika sa zaštitnim i pogonskim uzemljenjem transformatora u jedno zajedničko uzemljenje. Obavezno pri tome treba nastojati da otpor zajedničkog uzemljenja bude što manji.

14.8. Praktička razmatranja

Na nekim primjerima pokazat će se kako se provodi zaštita postrojenja od 10 i 20 kV uzimajući u obzir sve ono što smo u prethodnim izlaganjima sasvim općenito iznosili.

U našoj se praksi 10 kV-na mreža sastoji od nadzemnih vodova većinom postavljenih na drvenim stupovima i bez zaštitnog užeta. To će tako vjerojatno ostati i dulje vremena bez obzira na to hoće li se upotrebljavati na nekim mjestima nazivni napon od 10 ili 20 kV. Izolatorski nosači nisu nigdje uzemljeni. Dakle, može se reći da su nadzemni vodovi naše 10 kV-ne mreže relativno dobro izolirani od zemlje. U takvim se vodovima, zbog toga, stvaraju vrlo visoki naponi pri atmosferskom izbijanju. Takvi naponi mogu doseći vrijednosti od 1 000 do 2 000 kV, pa kad prorade odvodnici prenapona, koji su obično postavljeni pred svim transformatorskim stanicama, onda kroz te odvodnike, zbog tako visokih napona, teku i jake struje. Tako, ako je odvodnik postavljen ispred jedne 10 kV-ne stanice koje se nalazi na kraju nekoga nadzemnog voda (završna stanica), struja kroz taj odvodnik iznositi će prema izrazu (14.3):

$$I_v = \frac{2U_0 - U_v}{Z} = \frac{2 \cdot 1\,000 - 40}{400} = 4,90 \text{ kA.}$$

U_0 — pretpostavljeni napon na vodu izazvan udarom groma

U_v — preostali napon odvodnika

Z — valni otpor voda

Pretpostavimo li da su se nadzemnim vodom kretali putni valovi amplituda i 2 000 kV, što je realno moguće, tad bi struja kroz odvodnik bila približno 10 kA. Za prolaznu stanicu struja kroz odvodnik bila bi nešto manja, ali još uvijek velika.

Tako jake struje uzrokuju velike padove napona na otporima uzemljenja odvodnika, odnosno izazivaju visoke potencijale na uzemljenim dijelovima transformatorske stanice gdje su odvodnici priključeni. To može izazvati proboje prema niskom naponu ili na druge dijelove postrojenja. U tome je glavna opasnost. Da bi se ona spriječila, potrebno je ili smanjiti na najmanju moguću mjeru otpor zajedničkog uzemljenja transformatorskih stanica, odnosno odvodnika, ili smanjiti struje kroz odvodnike. Kako se u kojoj prilici postupa, bit će riječi u tekstu koji slijedi.

14.9. Zaštita stanica koje su priključene na kraju nadzemnih vodova ili na kraju otcjeka duljih od 200 m (završne stanice)

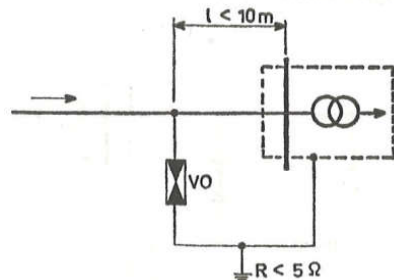
1. Osnovno je za zaštitu ovih stanica postići što manji otpor uzemljenja na koji treba priključiti i odvodnik prenapona. Shemu zaštite jedne takve stanice sadrži slika 14.13.

Izolacijska razina opreme u stanicama od 10 kV iznosi $U_i = 75$ kV, a preostali napon odvodnika prema standardima uzima se $U_v = 43$ kV. Uz pretpostavku da će se nadzemnim vodovima kretati valovi tjemених vrijednosti $U_0 = 1\,000$ kV i strmina i do $500 \text{ kV}/\mu\text{s}$, napon će se u stanici udvostručiti i iznositi će:

$$U_{st} = \frac{2U_0}{n} = \frac{2 \cdot 1\,000}{1} \doteq 2\,000 \text{ kV,}$$

a udaljenost odvodnika prema izrazu (14.10) tad ne smije biti veća od:

$$\ell = \frac{75 - 43}{2 \cdot 500} \cdot 300 \doteq 10 \text{ m.}$$



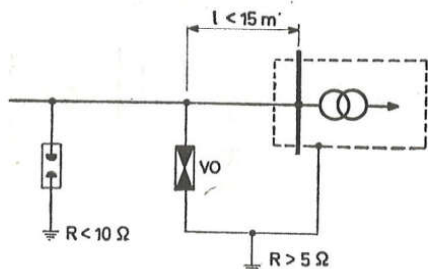
Sl. 14.13. Završna stanica $R < 5 \Omega$

Za 20 kV-ne stanice zaštitna udaljenost bila bi otprilike jednaka. Otpor uzemljenja ne smije biti veći od 5Ω (stacionarni otpor uzemljenja) jer bi se moglo dogoditi da kućište i zvjezdište transformatora povezanih na zajedničkom uzemljenju, poprime vrlo visoke potencijale prilikom odvođenja jakih struja kroz odvodnik. Te struje, kako smo vidjeli, mogu u nepovoljnim okolnostima iznositi od 5 do 10 kA.

2. Ako se ne da ostvariti otpor uzemljenja transformatorske stanice manji od 5Ω ili zbog vrste zemljišta ili iz drugih razloga, a stanica se nalazi u području čestih atmosferskih pražnjenja, pa je velika vjerojatnost da će nadzemni vod biti pogođen izravnim udarima groma, zbog kojih je više od jedanput dolazilo do kvara u toj stanici, takvu transformatorsku stanicu smatramo »prenaponski ugroženom.« U tehničkom smislu ta se stanica smatra ugroženom zbog toga što će jake i česte struje koje prolaze odvodnikom stvarati veliki pad napona na otporu uzemljenja, koji je veći od 5Ω , a taj pad napona može uzrokovati povratne preskoke ili proboje unutrašnje izolacije. Da bismo smanjili pad napona na otporu uzemljenja, treba smanjiti struju kroz odvodnike. Zato će se paralelno odvodnicima postaviti još jedno zaštitno iskrište s gašenjem luka (sl. 14.14). Za iskrište s gašenjem luka valja nastojati da ima što manji otpor uzemljenja (ne veći od 10 do 12Ω). Ne bi bilo dobro postavljati jednostavno iskrište jer nije sigurno da bi se električni luk nakon prorade takva iskrišta ugasio, a to bi izazivalo kratke spojeve. Ako nema iskrišta s gašenjem luka, dade se upotrijebiti i obično iskrište ako struja zemljospoja nije veća od 5 A. Sve te varijante moraju se pažljivo pojedinačno proučiti jer je ponekad čak bolje imati i kratke spojeve nego da cijela stanica bude uništena. No, svakako, kad se postavi iskrište s gašenjem luka kao dodatna zaštita, dopustiva je nešto veća zaštitna udaljenost odvodnika od transformatora, pa se zato uzima ta udaljenost od 15 m.

Ponegdje će se naići na transformatorsku stanicu kod koje se ne može postići mali otpor uzemljenja ($R < 5 \Omega$), ali zato tamo nisu bili zabilježeni kvarovi od groma. Tad tu stanicu ne smatramo »ugroženom od prenapona« i nije potrebno iskrište kao dodatna zaštita, nego je dovoljno postupiti prema shemi na slici 14.13.

3. Transformatorske stanice ne moraju biti na kraju nekog ogranka 10 ili 20 kV-ne mreže pa da vrijede za njihovu zaštitu od prenapona one mjere pod točkama 1. i 2. One mogu biti na kraju nekog otcjepa (ocjepne stanice) duljega od 150 do 200 m, pa da vrijedi sve ono što smo rekli u prethodnim točkama za završne stanice. Jer, kod duljih se otcjepa za njih smatra kao da su na kraju nekog ogranka.



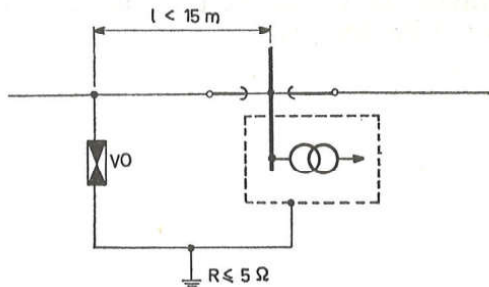
Sl. 14.14. Završna stanica, $R > 5 \Omega$, ugrožena prenaponima

14.10. Zaštita stanica kroz koje prolaze nadzemni vodovi (prolazne stanice) ili se nalaze na kraju otcjepa duljine manje od 150 do 200 m

1. Ugroženost transformatorskih stanica kojima prolazi 10-kV-ni ili 20 kV-ni nadzemni vod nešto je blaža nego kod onih na kraju nekog ogranka mreže. To je zato što kod prolaznih transformatorskih stanica nema pozitivne refleksije naponskog vala ako su rastavljači (onaj na ulazu i onaj na izlazu nadzemnog voda) uvijek uključeni. Tad je $U_{st} = U_0$ jer se uzima da je broj nadzemnih vodova $n = 2$. U tim okolnostima, ako je otpor uzemljenja transformatorske stanice $R < 5 \Omega$, dovoljno je staviti samo jedan slog odvodnika prenapona, kao što je prikazano na slici 14.15. Zaštitna se udaljenost pri tome može nešto povećati s obzirom na krajnju transformatorsku stanicu, ali ta udaljenost ne smije biti veća od 15 m.

2. Teško je, međutim, pretpostaviti da će u nekoj transformatorskoj prolaznoj stanici biti oba ta rastavljača stalno uključena. Uvijek se, iz različitih razloga, događa da je jedan od njih isključen. U toj situaciji moramo računati kao da je ta transformatorska stanica krajnja stanica napajana jednim vodom. Uz takvu pretpostavku zaštita od prenapona provodi se prema shemi na slici 14.16. Tu se vidi da treba u svaki vod, dakle prije ulaznih i izlaznih rastavljača, postaviti odvodnike prenapona. Zaštitna se udaljenost mora pri tome smanjiti i ona ne smije iznositi više od 10 m jer se zapravo to stanje svodi na slučaj krajnje stanice obrađene u točki 1. u odjeljku 14.9. Naravno da otpor uzemljenja stanice ne smije biti veći od $R < 5 \Omega$.

3. Ako slučajno otpor uzemljenja iznosi više od 5Ω , to se donekle tolerira jer je riječ o prolaznoj transformatorskoj stanici; o stanici gdje redovito nema pozitivnih refleksija kad su obadva rastavljača ukopčana. Ipak, treba paziti da taj otpor ne prekorači 10Ω . Jer ako je $R > 10 \Omega$, tad se zna dogoditi da uz isključeni jedan rastavljač imamo naponske prilike kao kod krajnje stanice, pa se onda mora postaviti dodatna zaštita, kao što je to bilo određeno u odjeljku 14.9, točka 2. Ta dodatna zaštita sastoji se u tome da se u oba voda uključi po jedno iskrište s gašenjem električnog luka, što je crtkano prikazano na slici 14.16. Ako je transformatorska stanica otcjepna i nalazi se na kraju kratkog otcjepa ne duljega od 150 do 200 m, a otpor uzemljenja stanice i odvodnika nije veći od 5Ω , ona se može donekle smatrati prolaznom. Tad će se postaviti prema shemi na slici 14.7. jedan slog odvodnika sa zaštitnom udaljenošću odvodnika od transformatora do 15 m, kao da je to obična prolazna stanica.



Sl. 14.15. Prolazna stanica, $R < 5 \Omega$. Ulazni i izlazni rastavljači stalno uključeni

15. Zaštita postrojenja priključenih na nadzemne vodove preko kabela

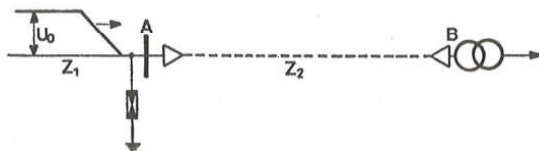
Da bismo zaštitili elektroenergetska postrojenja priključena na nadzemne vodove preko kabela, najprije će se razmotriti kako se naponski val ponaša kad se kreće takvom kombinacijom (sl. 15.1.). Duljina kabela može iznositi više od 1 km.

Tako su često spojena velika elektroenergetska rasklopna postrojenja ili hidroelektrane, i to na onim mjestima gdje izravni priključak na nadzemne vodove nije moguće izvesti ili gdje bi takav priključak mogao biti opasan za ljude ili druge objekte. Da bi se u tim okolnostima što bolje izveo priključak, preko kablenskog umetka, u transformatore se ugrađuje kablenska glava. Zbog toga se, međutim, na tom mjestu ne da priključiti ventilni odvodnik koji bi štitio postrojenje.

Pretpostavimo najprije da nemamo ni ispred kabela priključen odvodnik prenapona i promatrajmo što će se dogoditi s naponskim valom kosog čela i beskonačno dugačkog hrpta, amplitude U_0 , koji bi nadzemnim vodom nailazio na kabel i dalje do transformatora. Uzmimo da je nadzemnom vodu valni otpor $Z_1 = 400$, a kabeu $Z_2 = 40 \Omega$. Zbog takvih odnosa, faktor prolaska u točki A približno će biti $\alpha = 0,2$ a faktor refleksije u točki A za val koji stiže iz točke B približno će iznositi $\beta = 0,8$. Uz pretpostavku da transformator djeluje kao beskonačna impedancija, u točki B faktor je refleksije $\beta = 1$.

Brzina širenja vala u kabeu kreće se oko $150 \mu s$, pa ako je kabel dugačak npr. 1,5 km, valu je potrebno $20 \mu s$ da dva puta prijeđe udaljenost od A do B. Da bi naša razmatranja bila jednostavnija, neka trajanje čela vala bude kraće od $20 \mu s$ i neka ono iznosi $5 \mu s$. Takvih odnosa uostalom susrećemo u praksi.

Nas zanima: kako će se val koji je beskonačno dugačak mijenjati, kako će se u kabeu postepeno povisivati napon i koliki će napon poprimiti točka A i točka B u kojoj je priključen transformator. Promatrajmo



Sl. 15.1. Zaštita postrojenja koja su priključena na nadzemne vodove preko kabela

najprije mijenjanje napona u točki A. Znamo iz zakonitosti o kretanju valova da će se val što nailazi iz nadzemnog voda u kabel u točki A jednim dijelom reflektirati, a drugi će njegov dio prijeći u kabel. Dakle, točka A će u prvim trenucima poprimiti napon:

$$U_{1A} = U_0 \cdot \alpha.$$

Taj dio vala nekoliko se trenutaka nakon toga reflektira potpuno od točke B i ponovno dolazi do točke A, gdje se reflektira pomnožen faktorom refleksije β , pa će tad napon u točki A biti:

$$U_{2A} = U_0 \cdot \alpha + U_0 \cdot \alpha + U_0 \cdot \alpha \cdot \beta = U_0 \cdot \alpha (2 + \beta).$$

Na takav se način dalje odvija putovanje vala između točaka A i B, pa u idućim trenucima napon točke A biti:

$$\begin{aligned} U_{3A} &= U_0 \cdot \alpha + U_0 \cdot \alpha + U_0 \cdot \alpha \cdot \beta + U_0 \cdot \alpha \cdot \beta + U_0 \cdot \alpha \cdot \beta^2 \\ U_{3A} &= U_0 \cdot \alpha (2 + 2 \cdot \beta + \beta^2). \end{aligned}$$

Iz ovog slijeda zaključujemo da je:

$$U_{nA} = U_0 \cdot \alpha \cdot (2 + 2 \cdot \beta + 2 \cdot \beta^2 + 2\beta^{n-2} + \beta^{n-1}).$$

S obzirom na to da smo pretpostavili kako na kabel nailazi val beskonačne duljine, konačni će napon u točki A biti:

$$U_{kA} = 2U_0 \cdot \alpha \frac{1}{1 - \beta} = 2U_0. \quad (15.1)$$

jer je riječ o geometrijskom redu kojemu je koeficijent reda $|\beta| < 1$. Vidimo da će kabel pri nailasku vala beskonačne duljine poprimiti u točki A dvostruki napon, $2U_0$.

Što je s naponom u točki B nakon višestrukih refleksija? Val se kreće iz točke A prema točki B, a tamo je priključen transformator, pa je zanimljivo poznavati kako se napon mijenja i u toj točki. Napon u točki B ne nastupa u isto vrijeme kada i napon u točki A, nego kasni, i to u našem slučaju koji promatramo kasni $10 \mu s$. Tamo se taj napon reflektira dvostrukom vrijednošću i raste dvostrukom strmišom, pa pišemo da će se napon u točki B postepeno mijenjati ovako:

$$U_{1B} = U_0 \cdot \alpha + U_0 \cdot \alpha = 2 \cdot U_0 \cdot \alpha$$

$$U_{2B} = U_0 \cdot \alpha + U_0 \cdot \alpha + U_0 \cdot \alpha \cdot \beta + U_0 \cdot \alpha \cdot \beta = 2 \cdot U_0 \cdot \alpha \cdot (1 + \beta)$$

$$U_{3B} = 2 \cdot U_0 \cdot \alpha \cdot (1 + \beta + \beta^2)$$

$$U_{nB} = 2 \cdot U_0 \cdot \alpha \cdot (1 + \beta + \beta^2 + \dots \beta^{n-1}).$$

Takav razvoj podsjeća, kao i malo prije, na geometrijski red pa će konačna vrijednost napona u točki B biti kao i u točki A i iznositi će:

Sl. 15.2. Napon u točkama A i B nakon prve, druge i treće refleksije

$$U_{KB} = 2 \cdot U_0.$$

Napon u točkama A i B jednak je samo poslije velikog broja refleksija vala između točaka A i B, a u našem primjeru, koji razmatramo prije te konačne vrijednosti, taj napon u točkama A i B u određenim će trenucima, ako uvrstimo za $\alpha = 0,2$ i $\beta = 0,8$, iznositi:

$$U_{1A} = 0,2 U_0$$

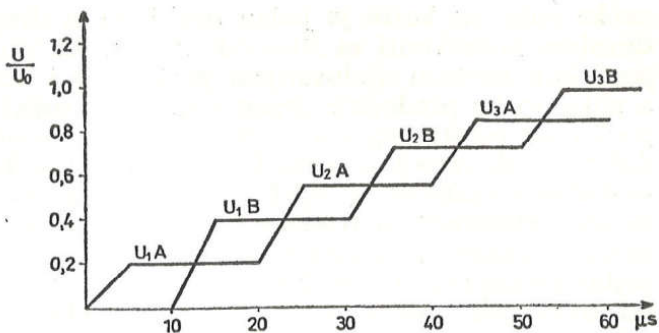
$$U_{1B} = 0,4 U_0$$

$$U_{2A} = 0,56 U_0$$

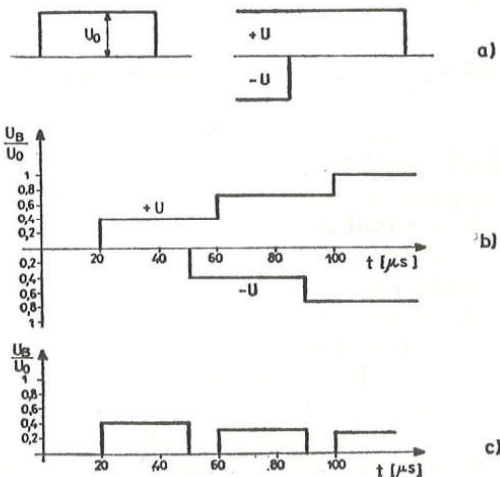
$$U_{2B} = 0,72 U_0$$

$$U_{3A} = 0,84 U_0$$

$$U_{3B} = 0,976 U_0.$$



Slika 15.2. pokazuje kako se napon u kabelu postepeno povisuje nakon prve, druge i treće refleksije. Na kraju viših refleksija on bi poprimio, kako smo izračunali, vrijednosti $2U_0$, naravno uz pretpostavku da val koji nailazi beskonačno dugo traje. Međutim, u praksi, nema takvih valova. Putni valovi koji nastaju prilikom udara groma vrlo su kratkog trajanja, pa je prije razmatranja zaštite kabela i transformatora dobro uočiti kako se tako kratki valovi kreću kabelom i kako se prilikom njihova nailaska mijenja napon, i to posebno u točki B, jer je tamo, kako smo rekli, priključen transformator. Opet će se radi jasnijeg opisivanja ove pojave uzeti jedan numerički primjer s najjednostavnijim pretpostavkama. I na tako pojednostavljenom primjeru zapaziti će se osnovna fizikalna zbivanja. Pretpostavimo npr. da val što nailazi u ovoj prilici ima okomito čelo i traje $30 \mu s$ (sl. 15.3.), a da je duljina kabela 3 km. Valu je potrebno $20 \mu s$ da prijeđe tu duljinu kabela. S obzirom na to da je riječ o sklopu nadzemnog voda i kabela, uzimamo da su faktori prolaska i refleksije kao prije i da iznose $\alpha \sim 0,2$ a $\beta \sim 0,8$. Kratke valove, kako smo vidjeli u prethodnim poglavljima, možemo zamisliti da se sastoje od dva beskonačno du-



Sl. 15.3. Napon u točki B za vrijeme djelovanja pravokutnoga kratkog vala

gačka vala, od kojih je jedan pozitivan, a drugi negativan i da su međusobno pomaknuti za $30\mu\text{s}$ (sl. 15.3.a). Na slici 15.3.b prikazani su naponi koji nastaju djelovanjem pozitivnog i negativnog vala u točki B, a slika 15.3.c predodžuje stvarni napon u točki B koji se dobiva superpozicijom pozitivnog i negativnog vala beskonačnih duljina. Iz slike se dalje vidi da napon u točki B neće u našem konkretnom primjeru premašivati vrijednost od $0,4 U_0$. Pri tome ako U_0 nije veliko, ne bi trebalo biti opasnosti za transformator. Napon U_0 se uostalom može ograničiti šticehim prilazom stanici. Ponovimo i ovdje kako nam šticehim prilaz osigurava da do kabela ne stigne val veće tjemene vrijednosti od izolacijske razine voda U_i . U tom slučaju $0,4 U_i$ neće premašivati udarnu razinu opreme. Dakle, takav kabel, sam, svojim malim valnim otporom, štiti cijelo postrojenje, ali naravno, uz pretpostavku da su valovi kratkog trajanja. Na osnovi ovih izlaganja o ponašanju kratkih valova u kabelu izračunavamo najviši napon u točki B za različite odnose trajanja vala T_v i vremena $2T_1$ potrebnoga da val dva puta prijeđe udaljenost od A do B, pa izlazi:

Za	$\frac{T_v}{2T_1} \leq 1$	$(U_B)_{\max} = 2 U_0 \cdot \alpha,$
za	$1 < \frac{T_v}{2T_1} \leq 2$	$(U_B)_{\max} = 2 \cdot U_0 \cdot \alpha \cdot (1 + \beta),$
za	$2 < \frac{T_v}{2T_1} \leq 3$	$(U_B)_{\max} = 2 \cdot U_0 \cdot \alpha \cdot (1 + \beta + \beta^2),$

itd.

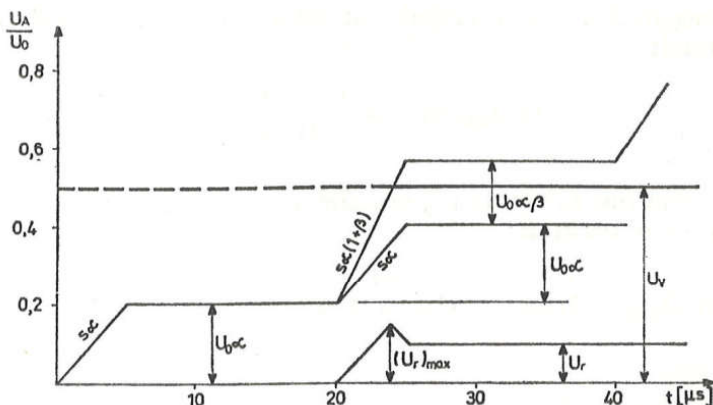
Zapažamo da će se u točki B pojaviti to viši napon što val dulje traje. Zato su za sigurnost potrošača koji bi bili priključeni u točki B, manje opasni oni valovi što traju kratko vrijeme jer tad maksimalni napon ne prekoračuje vrijednost $2 \cdot U_0 \cdot \alpha$. To je i razumljivo kad se zna da kratki valovi nose i manje energije. Međutim, mi ne možemo prepustiti slučaju zaštitu postrojenja, pa zato ipak prikazanu kombinaciju treba štiti.

15.1. Utjecaj ventilnog odvodnika

Dosad smo analizirali kako se ponaša naponski val amplitude U_0 kad dolazi iz nadzemnog voda u kabel kojem je na kraju priključen transformator. Razmatranja smo izvršili pretpostavljajući da pred kabelom nema nikakvoga zaštitnog uređaja.

Utvrđili smo da je potrebno takvu kombinaciju nadzemnog voda, kabela i transformatora štiti. Zato dalje promatrajmo kako će se ponašati naponski val što nailazi nadzemnim vodom ako ispred kabela u točki A postavimo ventilni odvodnik koji će tu cijelu kombinaciju zaštititi (sl. 15.1). Da bismo mogli uspoređivati zbivanja, pretpostavimo da je naponski val što nailazi jednak kao i u prethodnim razmatranjima, odnosno da dugo traje, da mu je strmo čelo koje traje $5\mu\text{s}$, te da je kabel također dugačak 1,5 km. Promatrajmo najprije događaje u točki A i pri-

Sl. 15.4. Promjena napona u točki A kad je tu priključen ventilni odvodnik



kažimo ih dijagramom na slici 15.4. Pretpostavimo da odvodnik koji smo postavili u točki A neće odmah proraditi pri nailasku vala iz nadzemnog voda. Naime, pretpostavljamo da je njegov proradni napon U_p obično viši od napona koji se formira u toj točki zbog prisutnosti kabla koji ima mnogo manji valni otpor od nadzemnog voda; da nam je $U_p > U_0 \cdot \alpha$.

Val u kabeu $U_0 \cdot \alpha$ kreće se dalje do točke B i tamo se reflektira dvostrukom vrijednošću jer smo pretpostavili da u toj točki dolazi na koncentrirani induktivitet. I takvu pretpostavku možemo učiniti jer je kapacitet kabla mnogo veći od kapaciteta transformatora, pa se kapacitet transformatora u takvoj kombinaciji dade zanemariti. Reflektirani val u točki B zbog potpune refleksije ima amplitudu $U_0\alpha$ i strminu s_a . Taj reflektirani val stiže u točku A i tamo ga očekuje nadzemni vod, pa se u toj točki on ponovno reflektira pomnožen faktorom refleksije β . Napon u točki A tad raste strminom $s_a + s_a\beta = s_a \cdot (1 + \beta)$. Za praktičke proračune uzmimo da je napon prorade na iskrištima ventilnog odvodnika jednak preostalom naponu odvodnika $U_p = U_v$, a osim toga uzmimo da se napon toliko povisio u točki A da će proboj na iskrištima ventilnog odvodnika nastati baš sada, za vrijeme prve refleksije vala iz točke B u točki A. Dakle, pretpostavljamo da je proradni napon odvodnika $U_p = U_v$ i da je:

$$U_0\alpha < U_v < U_0\alpha \cdot (2 + \beta).$$

Sada zbivanja u točki A, kako je to na slici 15.4, određuje uz iznesene pretpostavke, proradni napon odvodnika, a ne samo odnosi valnih otpora nadzemnog voda i kabla, kao što se to događalo prije, kod odvodnika nije bilo. Proradu odvodnika, odnosno sniženje napona u točki A zbog djelovanja odvodnika, možemo opisati pojavom reflektivnog vala u točki A koji će se kretati prema točki B, a kad stigne u tu točku, tamo će se potpuno reflektirati. Tako nam se u točki B nakon prorade odvodnika pojavljuje ukupni napon:

$$(U_B)_{max} = 2U_0 \cdot \alpha + 2(U_r)_{max}. \quad (15.2)$$

Da bismo doznali koliki je maksimalni napon u točki B, koji je za nas važan radi sigurnosti kabla i transformatora, u izrazu (15.2) odredit će-

mo maksimalnu vrijednost vala reflektiranog od odvodnika, a ona iznosi:

$$(U_r)_{\max} = s\alpha\beta \frac{U_v - U_0\alpha}{s\alpha(1 + \beta)} = (U_v - U_0\alpha) \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (15.3)$$

Uvrstimo taj izraz u jednadžbu (15.2) pa dobivamo da je maksimalni napon u točki B:

$$(U_B)_{\max} = 2U_0\alpha + 2(U_v - U_0\alpha) \frac{\beta}{1 + \beta} = 2U_v \frac{\beta}{1 + \beta} + 2U_0 \cdot \alpha \left(1 - \frac{\beta}{1 + \beta}\right). \quad (15.4)$$

Za praktička razmatranja obično je važno znati jesmo li dobro odredili preostali napon odvodnika U_v , odnosno jesmo li odabrali takvu zaštitnu razinu da nam napon u točki B ne prekorači dopuštenu vrijednost na izolaciji kabela i transformatora. Zato je važno utvrditi omjer između maksimalnog napona u točki B i preostalog napona odvodnika, pa iz izraza (15.4) izlazi da taj omjer iznosi:

$$\frac{(U_B)_{\max}}{U_v} = 2 \frac{\beta}{1 + \beta} + \frac{2}{1 + \beta} \frac{U_0 \cdot \alpha}{U_v}. \quad (15.5)$$

Sve te jednadžbe, kako smo rekli, vrijede uz polaznu pretpostavku da je do prorade odvodnika, došlo za vrijeme prve refleksije vala iz točke B u točki A, odnosno da se to dogodilo kad je napon na odvodniku bio u intervalu $U_0 \cdot \alpha < U_v < U_0 \cdot \alpha \cdot (2 + \beta)$. Pogledajmo, dalje, kako se mijenja omjer između maksimalnog napona u točki B uz ovako odabrane vrijednosti preostalog napona ventilnog odvodnika, odnosno kad se on kreće u tim granicama. Pretpostavimo da smo za vrijednost preostalog napona odabrali donju granicu intervala $U_v = U_0 \cdot \alpha$ i uvrstimo tu vrijednost u izraz (15.5). Dobit će se da nam omjer između maksimalnog napona u točki B i preostalog napona U_v iznosi:

$$\frac{(U_B)_{\max}}{U_v} = 2 \frac{\beta}{1 + \beta} + \frac{2}{1 + \beta} = 2,$$

a to je vrlo velik omjer za praktičke zahtjeve zaštite. Pokušajmo odabrati za preostalu vrijednost napona ventilnog odvodnika $U_v = U_0 \cdot \alpha \cdot (2 + \beta)$, dakle gornju granicu odabranog intervala i uvrstimo tu vrijednost u izraz (15.5). Dobit će se da omjer između maksimalnog napona u točki B i preostalog napona U_v poprima oblik:

$$\frac{(U_B)_{\max}}{U_v} = 2 \frac{\beta}{1 + \beta} + \frac{2}{1 + \beta} \frac{1}{2 + \beta} = 1 + \frac{\beta}{2 + \beta}.$$

Za odabranu vrijednost $\beta = 0,8$ izlazi da je omjer:

$$\frac{(U_B)_{\max}}{U_v} = 1 + \frac{0,8}{2,8} = 1,2857.$$

Sada je taj omjer nešto manji i povoljniji, ali još uvijek prekoračuje dopuštene granice prema dogovorenim propisima o koordinaciji izolacije. Zato je dobro i poželjno da prorada ventilnog odvodnika nastupi kod nekih viših refleksija; u našem primjeru to će se dogoditi kad je $U_v > U_0 \cdot \alpha \cdot (2 + \beta)$. Onda će omjer $[(U_B)_{\max}/U_v]$ biti sve bliži jedinici, što, drugim riječima, znači da će točka B, gdje je priključen transformator, poprimiti onaj napon koji pri proradi ima ventilni odvodnik, a ne mnogo veći.

Budući da je odvodnik priključen u točki A i nakon prorade odmah određuje napon točke A, možemo jednadžbu (15.5) napisati u obliku:

$$\frac{(U_B)_{\max}}{(U_A)_{\max}} = 2 \frac{\beta}{1 + \beta} + \frac{2}{1 + \beta} \frac{U_0 \cdot \alpha}{U_v} \quad (15.6)$$

i upitati se koliku vrijednost proradnog i preostalog napona U_v mora imati odvodnik prenapona da nam omjer ne prijeđe dogovorene dopuštene vrijednosti.

Da bismo se lakše snalazili, prikazali smo grafički na slici 15.5. funkcijsku ovisnost omjera $[(U_B)_{\max}/(U_A)_{\max}]$ o omjeru $(U_0 \cdot \alpha/U_v)$, koji je zadan jednadžbom (15.6).

Kako vidimo, dijagram je sastavljen od tri pravca što zapravo određuju tri intervala unutar kojih se kreću vrijednosti omjera $(U_0 \cdot \alpha/U_v)$. Ta tri intervala s pripadajućim vrijednostima $[(U_B)_{\max}/(U_A)_{\max}]$ su:

$$0 < \frac{U_0 \cdot \alpha}{U_v} < \frac{\alpha}{2}$$

$$\frac{(U_B)_{\max}}{(U_A)_{\max}} = 1$$

$$\frac{\alpha}{2} < \frac{U_0 \cdot \alpha}{U_v} < 1$$

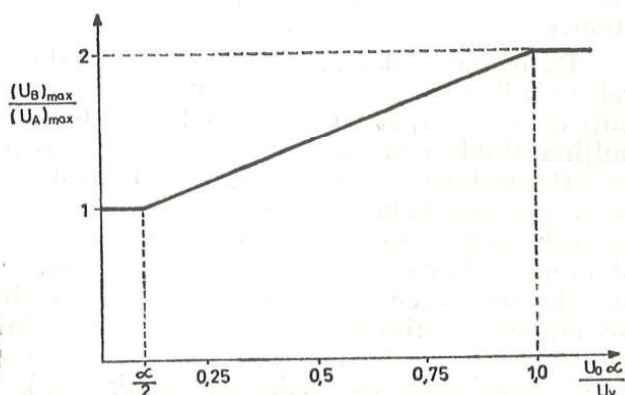
$$\frac{(U_B)_{\max}}{(U_A)_{\max}} = \frac{2\beta}{1 + \beta} + \frac{2}{1 + \beta} \frac{U_0 \cdot \alpha}{U_v}$$

$$1 < \frac{U_0 \cdot \alpha}{U_v}$$

$$\frac{(U_B)_{\max}}{(U_A)_{\max}} = 2.$$

Prvi interval obuhvaća vrijednosti za koje je omjer:

$$\frac{U_0 \cdot \alpha}{U_v} < \frac{\alpha}{2},$$



Sl. 15.5. Napon na kraju kabla ovisno o preostalom naponu odvodnika

što znači da smo proradni napon odvodnika odabrali veći od $2U_0$ i on neće uopće proraditi kod nailaska vala na kabel. Posljedice takva stanja su ove: poslije niza refleksija napon u točki A bit će jednak naponu u točki B i bit će veoma visok, a iznositi će $2U_0$.

Drugi je interval opisan jednadžbom pravca kroz točke $[0, 2\beta(1+\beta)]$ i nagibom pravca $k = [2/(1+\beta)]$. Unutar tog intervala za različite vrijednosti proradnog napona odvodnika U_v dobivamo razne vrijednosti omjera $[(U_B)_{\max}/(U_A)_{\max}]$.

Treći interval vrijedi za vrijednosti proradnog napona odvodnika manje od $U_0 \cdot \alpha$, što znači da će doći do prorade odvodnika pri prvom prolasku vala kroz točku A. U tim okolnostima preostali napon koji se nakon prorade odvodnika širi prema točki B poprimit će u toj točki dvostruku vrijednost.

Upotrebu ovog dijagrama za praktične slučajeve preporučujemo na ovaj način: Najprije se odlučimo za omjer $[(U_B)_{\max}/(U_A)_{\max}]$ zadan propisima o koordinaciji izolacije. Moramo paziti da nam taj omjer bude uvijek nešto malo manji ili jednak koeficijentu koordinacije f_k . Taj koeficijent, kako smo već ustanovili u prethodnim poglavljima, definiran je kao omjer podnosivoga udarnog napona izolacije i zaštitne razine uređaja kojom nju želimo štititi. Kad smo se, dakle, unaprijed odlučili da nam bude:

$$\frac{(U_B)_{\max}}{(U_A)_{\max}} \leq f_k,$$

tad za tako određenu vrijednost očitavamo iz dijagrama na slici 15.5. pripadajuću vrijednost omjera $(U_0 \cdot \alpha/U_v)$ koji je naveden na osi apscisa. Iz tog omjera lako se dolazi do vrijednosti preostalog napona koju mora imati ventilni odvodnik da bi dobro štitio kabel i transformator priključen na njegovu kraju. Kad se računa preostali napon, iz spomenutog omjera, potrebno je paziti na to da vrijednost upadnog vala U_0 ne prekorači dogovorenu vrijednost. Ako je ona previsoka, tad valja nastojati da se i ona kreće u okviru propisanih vrijednosti. Ta se veličina praktički može mijenjati produljenjem zaštićenih prilaza ili smanjenjem izolacijske razine nadzemnog voda pomoću iskrišta ili cijevnih odvodnika. Ponekad se smanjuje izolacijska razina nadzemnog voda samo u blizini stanice.

Da bi naša izlaganja o ovim problemima bila lakše shvatljiva, proveli smo ih na kabelu duljine od 1 do 3 km. Međutim, treba ovdje istaknuti da ona vrijede u principu i za kabele dulje i kraće od odabranih duljina. Dakle i za druge kabele vrijede isti načini računanja i dobivaju se isti rezultati u pogledu naponskih prilika. Ali treba napomenuti da se na kratkim kabelima neće osjetiti smanjenje napona na izolaciji kad na njih djeluju valovi kratkog trajanja, što je nepovoljna okolnost. Pa ako imamo kratke kabele, onda radi njihove zaštite i radi zaštite aparata koji je priključen na njihovu kraju valja obavezno postaviti odvodnik prenapona na njihov početak. Taj je odvodnik sasvim dovoljan ako je prilaz stanici zaštićen. U praksi radi veće sigurnosti, ako je to moguće, ipak postavljamo još i jedan odvodnik i na kraj kabela ili uz aparat koji

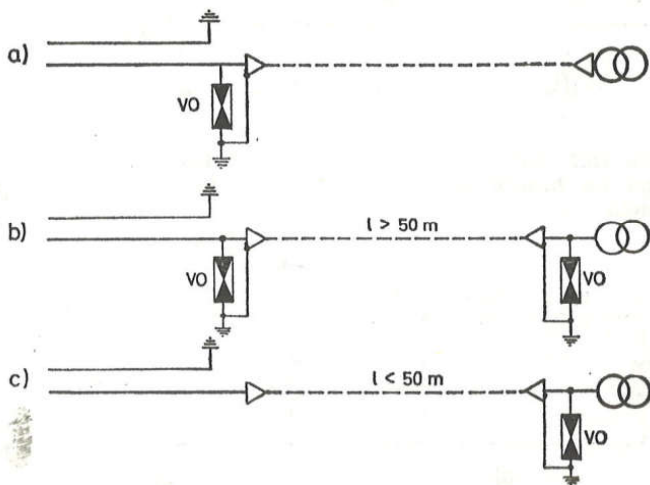
štitimo. Kad su postavljena dva odvodnika, onda nije potrebno da nam prilazi stanici nadzemnim vodom budu strogo zaštićeni. Kad govorimo o kratkim kabelima, onda mislimo još uvijek na one kabele duljina kojih je $l > (T_0 \cdot v/2)$. Za tako kratke kabele vrijede dosad izvedene formule i razmatranja. Međutim, za sasvim kratke kabele kojima je duljina $l < (T_0 \cdot v/2)$ ne vrijede dosad izvedene jednadžbe i razmatranja. Ali, na sreću, kod njih su maksimalni naponi još manji od proračunatih, pa je za sasvim kratke kabele dovoljno, ako je moguće, postaviti samo jedan odvodnik kod štićenog aparata. U toj će situaciji i naponi na početku kabela ostati u dopuštenim granicama. Općenito govoreći o zaštiti stanica koje su priključene na dulje ili kraće kabele, moramo od postavljenih odvodnika očekivati da oni štite i kabele i aparate u njoj.

Da bi sve što smo dosad izložili bilo preglednije, na slici 15.6. prikazani su primjeri zaštite stanica koje su priključene na nadzemne vodove preko duljih ili kraćih kabela.

Na slici 15.6.a predložena je okolnost kad ne možemo postaviti odvodnik prenapona u blizinu transformatora, jer je na njemu ugrađena kabelska glava. Pri tome, imali mi dulji ili kraći kabel, moramo obavezno priključiti odvodnik na početak kabela. To smo posebno razmotrili i utvrdili smo da jednim odvodnikom možemo zaštititi i kabel i transformator, ali uz uvjet da strogo ograničimo tjemenu vrijednost ulaznog vala. Ograničenje tjemene vrijednosti ulaznog vala postizavamo, kako smo više puta napomenuli, ili dugim zaštićenim prilazima ili smanjenjem stupnja izolacije nadzemnog voda. Uzemljenje kablenskog plašta i uzemljenje odvodnika mora biti na istom mjestu.

Na slici 15.6.b situacija je kad se odvodnici prenapona kod duljih ili kraćih kabela mogu postaviti na početak i na kraj kabela. Tu bi bio dovoljan samo jedan odvodnik na početku kabela, ali radi sigurnosti dobro je postaviti još jedan odvodnik na kraj kabela, odnosno tik uz transformator. Taj drugi odvodnik nam omogućuje da tako strogo ne kontroliramo tjemenu vrijednost ulaznog vala. To vrijedi za kabele duge i kratke kojih duljina premašuje 50 m.

Kod kabela kraćih od 50 m (sl. 15.6.c), odnosno sasvim kratkih kabela, nije potrebno postavljati dva odvodnika, nego samo jedan, i to uz sam transformator. Kabelsku glavu na početku tako kratkih kabela možemo zamisliti kao da se nalazi unutar zaštitnog prostora odvodnika smještenoga uz transformator.

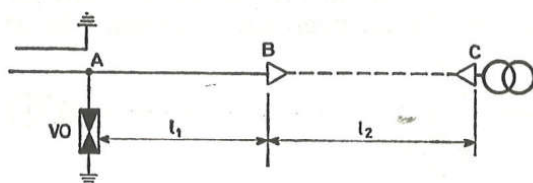


Sl. 15.6. Zaštita stanica s kablskim uvodom

15.2. Zaštita transformatora koji je priključen na kombinaciji nadzemnog voda i kabela

Katkad nije moguće ili nije djelotvorno priključiti odvodnik prenapona tik uz kabelsku glavu na početku kabela jer se zna dogoditi da val reflektiran od kabela prekine rad ventilnog odvodnika. Zato se odvodnik priključuje na nekoj udaljenosti ℓ_1 od početka kabela, kako je to prikazano na slici 15.7. Tada se prilike mijenjaju, pa osim kabela iza odvodnika imamo i djelić nadzemnog voda, tako da je uz valni otpor kabela Z_2 pred njim priključen i valni otpor nadzemnog voda Z_1 . Promatranje kretanja putnog vala nakon prorade odvodnika na način kako smo to provodili u prethodnom primjeru, bilo bi veoma složeno jer se u ovom slučaju prelamaju valovi u točkama A, B i C, a ne samo u točkama B i C. Uočljivo je iz slike da će napon u točki A imati konstantnu vrijednost U_v , koju određuje ventilni odvodnik, a da će u ostalim točkama taj napon titrati oko te vrijednosti. Da bismo te oscilacije napona izračunali, pojednostaviti će se ekvivalentna shema sklopa na slici 15.7.

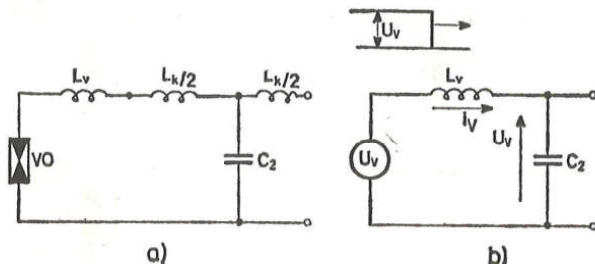
Dio nadzemnog voda duljine ℓ_1 nadomjestiti će se koncentriranim induktivitetom L_v , a ne valnim otporom Z_1 . To se može učiniti ako je taj dio nadzemnog voda kratak, a i zato što je kapacitet nadzemnog voda malen u usporedbi s kapacitetom kabela. Kabel će se predočiti u tako pojednostavnjenom sklopu T-shemom, kao na slici 15.8. a. Ako je induktivitet kabela zanemariv s obzirom na induktivitet nadzemnog voda kabel će se nadomjestiti samo koncentriranim kapacitetom C_2 . Naravno, to vrijedi samo ako i kabelski dio sklopa nije dugačak. Transformator će se kao u prijašnjem slučaju nadomjestiti koncentriranim induktivitetom. Nakon tih pojednostavnjenja nadomjesna shema kombinacije nadzemnog voda i kabela izgledat će onako kako je to prikazano na slici 15.8.b. Napon odvodnika nakon prorade nadomještavamo pravokutnim valom kojemu je tjemena vrijednost jednaka preostalom naponu U_v . Tako zamišljena nadomjesna shema spomenute kombinacije podsjeća nas na



Sl. 15.7. Zaštita transformatora priključena na kombinaciju nadzemnog voda i kabela

titrajni krug što smo ga u nekim primjerima već razmatrali, a zbivanja u ovom konkretnom slučaju odvijaju se otprilike na ovaj način: U trenutku kad proradi odvodnik u točki A, kroz njega će poteći struja:

$$i_v = \frac{2U_0 - U_v}{Z_1},$$



Sl. 15.8. Nadomjesna shema kombinacije nadzemnog voda i kabela

a na njemu će se pojaviti napon U_v konstantne vrijednosti. Taj će napon nekoliko trenutaka nakon toga poprimiti i kapacitet C_2 . Prema tome ćemo ekvivalentnu shemu ($L_v C_2$) na slici 15.8.a zamisliti da je poslije prorade odvodnika ona priključena na neki generator konstante elektromotorne sile ($EMS = U_v$) i konstantne struje i_v . Na induktivitetu spojnih vodova L_v za to se vrijeme nakupila magnetska energija ($i_v^2 L_v / 2$). Budući da se kapacitet C_2 nabio na napon $U_c = U_v$, u kondenzator neće više tim krugom teći struja i_v . To će dovesti do oslobađanja magnetske energije iz svitka, pa će se zato povisiti napon na kapacitetu za ΔU_c . Iz tih razloga napisat ćemo da nam je:

$$\frac{i_v^2 \cdot L_v}{2} = \frac{(\Delta U_c)^2 \cdot C_2}{2},$$

a odatle je:

$$\Delta U_c = i_v \sqrt{\frac{L_v}{C_2}}. \quad (15.7)$$

Tu je L_v induktivitet onog dijela nadzemnog voda između odvodnika i kableske glave, a C_2 je kapacitet kabela. Govorili smo da se jedinične vrijednosti od L_v i od C_2 računaju koristeći se izrazima da je $Z_1 = v_1 \cdot L_v'$ i da je $Z_2 = (1/v_2 C_2')$, kad je unaprijed poznata vrijednost valnog otpora nadzemnog voda Z_1 i valnog otpora kabela Z_2 , te brzina kretanja vala na nadzemnom vodu v_1 i brzina kretanja vala u kabelu v_2 . Iz jediničnih vrijednosti koje tako izračunamo lako se dobivaju ukupne vrijednosti induktiviteta L_v i kapaciteta C_2 , kad te jedinične vrijednosti pomnožimo duljinom ℓ_1 nadzemnog voda i duljinom kabela ℓ_2 , pa možemo napisati:

$$L_v = \frac{Z_1}{v_1} \ell_1 = Z_1 T_1 \quad \text{i} \quad C_2 = \frac{1}{v_2 Z_2} \ell_2 = \frac{T_2}{Z_2}.$$

S T_1 označili smo vrijeme potrebno da val prođe duljinu nadzemnog voda ℓ_1 , a s T_2 vrijeme za koje val prođe duljinu kabela ℓ_2 . Ako izraze za L_v i C_2 , što smo ih izračunali, i izraz za struju kroz odvodnik uvrstimo u izraz (15.7), dobit će se konačni izraz za povišenje napona ΔU_c na kapacitetu C_2 koji je nastao zbog tih oscilacija:

$$\Delta U_c = i_v \sqrt{\frac{L_v}{C_2}} = (2U_0 - U_v) \sqrt{\frac{Z_2 T_1}{Z_1 T_2}}. \quad (15.8)$$

Dobiveni izraz pokazuje nam tri važne činjenice. Prvo, povišenje napona ΔU_c bit će veće što je amplituda U_0 ulaznog vala veća. To je intuitivno lako prihvatljivo. Drugo, to povišenje bit će veće ukoliko omjer između valnog otpora kabela Z_2 i valnog otpora nadzemnog voda Z_1 bude veći. Treći zaključak na koji nas upućuje izraz je taj da će povišenje napona biti veće što je veći omjer između vremena prolaska vala preko nadzemnog voda T_1 i vremena prolaska vala T_2 kroz kabel. Budući da su vremena T_1 i T_2 ovisna o duljinama ℓ_1 i ℓ_2 nadzemnog voda i kabela, izraz

nam pruža mogućnosti da, prema našim zahtjevima, izračunamo i najpovoljniji omjer duljine nadzemnog voda i kabela. Ovo izlaganje upotpunit ćemo dvama numeričkim primjerima.

Primjer 15.1.

Nadzemnim vodom kreće se pravokutni val, amplitude $U_0 = 750$ kV, i nailazi na priključeni odvodnik kojemu je preostali napon $U_v = 420$ kV. Neka izolacijska razina opreme na kraju kabela koju želimo štititi bude $U_i = 525$ kV. Valni otpor nadzemnog voda uzмимо da iznosi $Z_1 = 400 \Omega$, a valni otpor kabela $Z_2 = 40 \Omega$. Dio duljine nadzemnog voda od mjesta gdje je priključen odvodnik do kableske glave je $\ell_1 = 10$ m, a duljina kabela $\ell_2 = 40$ m. Brzina je kretanja vala nadzemnim vodom $v_1 = 300$ m/ μ s, a brzina kretanja vala kabelom $v_2 = 150$ m/ μ s. Treba iz tih podataka utvrditi štiti li odvodnik na toj udaljenosti od kableske glave opremu priključenu na kraju kabela.

Rješenje:

Vrijeme kretanja vala nadzemnim vodom iznosi:

$$T_1 = \frac{\ell_1}{v_1} = \frac{10}{300} = \frac{1}{30} \mu\text{s}.$$

Vrijeme kretanja vala kabelom bit će:

$$T_2 = \frac{\ell_2}{v_2} = \frac{40}{150} = \frac{8}{30} \mu\text{s}.$$

Porast napona na kraju kabela prema izrazu (15.8) je:

$$\Delta U_c = (2U_0 - U_v) \sqrt{\frac{Z_2 T_1}{Z_1 T_2}} = (2 \cdot 750 - 420) \sqrt{\frac{40 \cdot 1}{400 \cdot 8}} = 120,747 \text{ kV}.$$

Napon na kabelu, odnosno na opremi na njegovu kraju bit će:

$$U_c = U_v + \Delta U_c = 420 + 120,747 = 540,747 \text{ kV}.$$

Iz rezultata vidimo da nam napon na izolaciji nadmašuje dopuštenu vrijednost od 525 kV. A kako znamo, povišenje je napona ovisno o duljinama nadzemnog voda i kabela, pa je onda potrebno izračunati takav omjer između duljine kabela ℓ_2 i duljine nadzemnog voda ℓ_1 da napon na izolaciji koju želimo štititi ne prekorači dopuštenu vrijednost. Taj će se proračun obaviti koristeći se osnovnim parametrima iz ovog zadatka.

Primjer 15.2.

Dopušteno povišenje napona na izolaciji opreme može biti prema propisima i uobičajenoj praksi najviše:

$$\Delta U_c = U_i - U_v = 525 - 420 = 105 \text{ kV}$$

$$\Delta U_c = (2U_0 - U_v) \sqrt{\frac{Z_2 T_1}{Z_1 T_2}}$$

Iz tih jednadžbi računanjem izlazi:

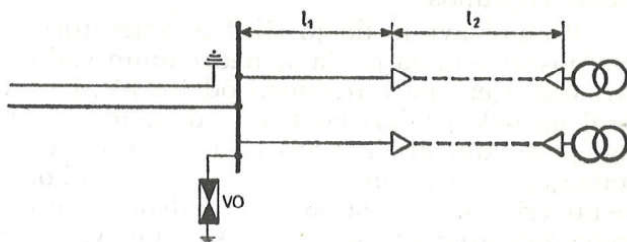
$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{\Delta U_c}{2U_0 - U_v} \right)^2 \cdot \frac{Z_1}{Z_2}$$

$$\frac{\ell_1}{\ell_2} = \left(\frac{\Delta U_c}{2U_0 - U_v} \right)^2 \cdot \frac{Z_1 v_1}{Z_2 v_2}$$

$$\frac{\ell_1}{\ell_2} = \left(\frac{105}{1500 - 420} \right)^2 \cdot \frac{400 \cdot 300}{40 \cdot 150} = 0,189$$

$$\frac{\ell_2}{\ell_1} = 5,2897.$$

Rezultat nam pokazuje da bi duljina kabela ℓ_2 morala biti otprilike pet puta veća od duljine dijela nadzemnog voda ℓ_1 . Budući da u ovom primjeru to nije bilo tako, onda, kako bismo poštovali te zahtjeve, moramo odvodnik približiti kabelskoj glavi na otprilike 8 m udaljenosti. Na slici 15.9. pokazano je kako je moguće štititi više transformatora priključenih kabelom i nadzemnim vodom na sabirnice. Pri tome nije potrebno svakom transformatoru priključiti posebni odvodnik, nego se njihova zaštita provodi samo jednim odvodnikom priključenim na sabirnice. Moramo i tu paziti da nam $(\ell_2/\ell_1) > 5$.



Sl. 15.9. Zaštita više transformatora

Međutim novija saznanja pokazuju da se efikasnija zaštita postiže postavljanjem odvodnika u točki prelaza nadzemni vod — kabel, u neposrednoj blizini kabelske glave i uz neposrednu kratku vezu uzemljenja odvodnika i plašta kabela.

15.3. Zaštita generatora

Izolacija rotacionih strojeva općenito je slabija od izolacije transformatora, bilo prema zemlji ili između zavoja. Ona se tako izvodi zbog toga što je kod rotacionih strojeva manji prostor za njezin smještaj.

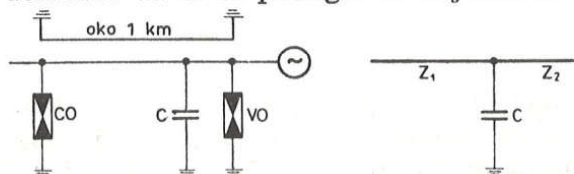
Osim toga, izolacija generatora se ne nalazi u ulju, pa joj je udarna izolacijska razina relativno niska. Te okolnosti nas obvezuju da te strojeve štitimo od atmosferskih prenapona, a pogotovo onda kad su oni izravno priključeni na nadzemne vodove ili preko transformatora. Od zaštitnih uređaja zahtijeva se da sigurno štite njihovu izolaciju od povišenih napona prema zemlji i od povišenih napona između zavoja. Da bismo zaštitili izolaciju generatora prema zemlji, moramo smanjiti tjemenu vrijednost udarnih valova koji nailaze, a štiteći izolaciju između zavoja smanjujemo strminu tih valova. Tjemenu ćemo vrijednost valova obično sniziti odvodnicima prenapona, a njihovu strminu pomoću kondenzatora.

Generatori se u praksi uglavnom priključuju na mreže na dva načina: izravno na nadzemne vodove ili kabele i posredno preko transformatora (u blok-spoju).

15.3.1. Zaštita generatora izravno spojenih s mrežom

Generatori koji se spajaju izravno na nadzemne vodove ili kabele obično su generatori manjih snaga. Redovito ih štitimo ventilnim odvodnicima, koji smanjuju tjemenu vrijednost naponskih valova što nailaze iz mreže, i kondenzatorima, kojima je zadatak da ublaže strmine tih valova na vrijednost ne veću od 1 do 2 kV/ μ s. Na slici 15.10 vidi se shema zaštite generatora neposredno spojenoga na nadzemne vodove. Na toj je slici nacrtana ekvivalentna shema koja će nam poslužiti za računanje veličine napona na stezaljkama generatora i veličine strmine vala između njegovih zavoja. U toj shemi smo za Z_1 označili valni otpor nadzemnog voda, sa Z_2 valni otpor generatora, a s C je označen kapacitet kondenzatora kojemu je zadatak da smanji strminu naponskog vala ne dopuštenu vrijednost.

Pretpostavimo da je riječ o generatoru nazivnog napona od 10 kV. Pretpostavimo, dalje, da se nadzemnim vodom ne mogu kretati putni valovi veće tjemene vrijednosti od 100 kV, jer su nadzemnom vodu postavljani na nekoj udaljenosti od odvodnika cijevni odvodnici, a osim toga vod je jednim dijelom zaštićen zaštitnim vodičem. Uzmimo, radi jednostavnijeg računa, da val što nailazi ima okomito čelo i ravan hrbat. Tjemenu vrijednost vala snizit će odvodnik prenapona i to nas pitanje ne treba zabrinjavati. Međutim, strminu vala moramo smanjiti na dopuštene vrijednosti prije nailaska vala na odvodnik. To će se postići kondenzatorom. Tako, da bi val došao na odvodnik strminom od 1 kV/ μ s, njegovo trajanje čela T_k nakon prolaska pokraj kondenzatora mora biti 100 μ s, a da bi postigao strminu od 2 kV/ μ s, trajanje njegova čela T_k mora iznositi 50 μ s. Pitamo se koju vrijednost kapaciteta mora imati kondenzator da bi se postigle te vrijednosti strmina.



Sl. 15.10. Zaštita generatora koji je izravno spojen na mrežu

U poglavlju o putnim valovima vidjeli smo da se vremenska konstanta nadomjesne sheme na slici 15.10. izračunava iz izraza:

$$T = \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot C}{Z_1 + Z_2}.$$

Uz pretpostavku da je $Z_1 = Z_2 = Z = 400 \, \Omega$, vremenska će konstanta kruga iznositi:

$$T = \frac{C \cdot Z}{2}. \quad (15.9)$$

Lako bismo dokazali da nam je vrijednost vremenske konstante T jednaka vremenu trajanja čela vala T_δ nakon prolaska vala pokraj kondenzatora, odnosno da je $T = T_\delta$. Iz izraza (15.9) dobivamo, dalje, da je za strminu $s = 1 \, \text{kV}/\mu\text{s}$ ($T_\delta = 100 \, \mu\text{s}$) potrebna vrijednost kapaciteta:

$$C = \frac{2T_\delta}{Z} = \frac{2 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{400} = 0,5 \, \mu\text{F}.$$

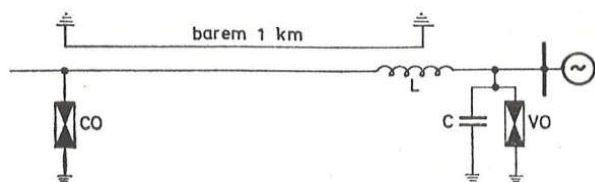
Za strminu od $2 \, \text{kV}/\mu\text{s}$ ($T_\delta = 50 \, \mu\text{s}$) dovoljan bi nam bio kapacitet od $0,25 \, \mu\text{F}$.

Kondenzator od $0,5 \, \mu\text{F}$ koji bi bio stalno ukopčan pred generatorom, trošio bi kapacitivnu snagu:

$$N = U^2 \omega C = 10^8 \cdot 50 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot 10^{-6} = 7,85 \, \text{kVA}.$$

Za manje nazivne napone će se zbog slabije izolacije, kretati nadzemnim vodovima putni valovi manjih amplituda, pa za jednaku strminu takvih valova bit će kraće trajanje njihova čela. Iz tih se razloga na takve nadzemne vodove priključuju i kondenzatori manjih kapaciteta. Osim toga, za manje nazivne napone smanjuje se stalna potrošnja kapacitivne snage, i to s kvadratom nazivnog napona. Potrošnja takve snage nije poželjna na generatorskoj strani jer su time vodovi jako opterećeni dodatnom jalovom snagom. Ovom prilikom je riječ o malim generatorima, koji se obično postavljaju blizu potrošača, pa se taj problem, doduše, ne nameće tako oštro. Potrošačima je općenito potrebna induktivna snaga, zato treba nastojati da takva snaga struji elektroenergetskim sistemom. U poglavlju o putnim valovima utvrdili smo da se strmina nekog vala daje mijenjati ne samo kondenzatorima nego se to postiže i uzdužnim prigušnicama, odnosno induktivitetima. Zato, ako nam ne odgovara tolika kapacitivna snaga, onda uz kondenzator manjeg kapaciteta priključujemo uzdužnu prigušnicu, kao na slici 15.11.

Kad upotrebljavamo ovakvu zaštitu, tada cijevni odvodnici ne moraju biti udaljeni od kondenzatora kao u prethodnom primjeru. Pri tome nema opasnosti da cijevni odvodnik ne proradi jer će se val koji nailazi reflektirati pozitivno u prvim trenucima od uzdužne prigušnice i tako olakšati cijevnom odvodniku da proradi i odvede, eventualno, jače



Sl. 15.11. Zaštita generatora LC-kombinacijom

struje groma u zemlju smanjujući time opterećenje ventilnog odvodnika. Međutim, budući da smo pretpostavili kako je prilaz stanici djelotvorno zaštićen, cijevni odvodnik na tom mjestu nije obično potreban.

Za praksu je često zanimljivo izračunati koliku vrijednost induktiviteta mora imati uzdužna prigušnica kad ona štiti generator u kombinaciji s nekim kondenzatorom. Da bismo to izračunali, uzet će se ponovno primjer iz prethodnog slučaja, gdje je generator bio priključen na 10 kV-nu mrežu i gdje smo pretpostavili da će se vodom kretati putni valovi samo do 100 kV. Za račun će poslužiti shema na slici 15.11, koja će nas, već na prvi pogled, podsjetiti na titrajni krug razmotren u poglavlju o putnim valovima, pa će se za računanje ovog slučaja koristiti tamo navedenim izrazima i pojmovima. Pretpostavimo, za početak, radi jednostavnijeg pristupa problemu, da generator nije štićen odvodnikom prenapona. Našu shemu na slici 5.11. možemo smatrati jednostavnim titrajnim krugom i pretpostaviti da će na priključenom generatoru djelovati napon:

$$U_2 = U_0 (1 - \cos \omega t), \quad (15.10)$$

gdje je U_0 amplituda vala koji nailazi, a $\omega = (1/\sqrt{LC})$. Taj napon djelovao bi na generatoru kad ne bi bio, kako smo pretpostavili, priključen ventilni odvodnik. Taj bi napon bio previsok i opasan. Zato mi, gdje je priključen kondenzator, imamo priključen i odvodnik, pa će u jednom trenutku proraditi odvodnik, i neka se to dogodi npr. u trenutku kad napon U_0 naraste na 25% maksimalne vrijednosti vala što nailazi, odnosno kad taj napon postigne vrijednost $0,25 U_0$. Do te vrijednosti napon se ravna po izrazu (15.10). Za nas je zanimljiva najveća strmina napona, pa istražimo kako se ona mijenja na kondenzatoru, odnosno generatoru dok se postigne vrijednost napona od $0,25 U_0$.

Znamo da je strmina promjena napona po vremenu, pa imamo da ona iznosi:

$$s = \frac{dU_2}{dt} = \omega U_0 \sin \omega t. \quad (15.11)$$

Taj nam izraz pokazuje kako se strmina mijenja u bilo kojem trenutku. Ona će u nekom času poprimiti i svoju najveću vrijednost. Ta najveća vrijednost strmine bit će jednaka najvećoj vrijednosti derivacije napona po vremenu, a ta najveća derivacija napona po vremenu pojaviti će se u trenu kad napon U_2 poprimi svoju najveću vrijednost $(U_2)_{\max}$. Najveća vrijednost što će napon na kondenzatoru postići neka bude kako smo rekli:

$$(U_2)_{\max} = 0,25 U_0.$$

Da bismo ustanovili trenutak $t_{\max}$ kad će se to dogoditi, možemo napisati da vrijedi izraz:

$$0,25 U_0 = U_0 (1 - \cos \omega t_{\max}),$$

a odatle izlazi da je:

$$t_{\max} = \frac{\arccos 0,75}{\omega}.$$

Najveća vrijednost strmine koju želimo doznati pojaviti će se u tom trenutku, pa onda iznos tog trenutka moramo uvrstiti u izraz (15.11), iz kojega dobivamo najveću vrijednost strmine:

$$s_{\max} = U_0 \sin \arccos 0,75. \quad (15.12)$$

Prema učinjenim pretpostavkama, dobivena vrijednost najveće strmine ne smije biti veća od $2 \text{ kV}/\mu\text{s}$. Ako je taj uvjet ispunjen, u generatoru neće biti nedopuštenog naprezanja izolacije između zavoja. Uzimajući, kao malo prije, u razmatranje 10 kV -ni generator na koji nailazi pravokutni putni val tjemene vrijednosti od 100 kV , uz prorađni napon odvodnika od 25 kV , strmina prema izrazu (15.12) morala bi iznositi:

$$s_{\max} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 0,6804 < 2 \cdot 10^9.$$

Umnožak induktiviteta i kapaciteta dobiven iz provedenog računa bit će:

$$LC = 1 \cdot 1569 \cdot 10^{-9}.$$

Iz vrijednosti produkta možemo za zaštitu generatora upotrijebiti kondenzator od $0,1 \mu\text{F}$ i svitak induktiviteta $L = 11,569 \mu\text{H}$.

Treći način zaštite generatora izvodi se pomoću kablenskog umetka koji, sam po sebi, zbog manjega valnog otpora nego u nadzemnog voda, štiti generator (sl. 15.12).

Takav način zaštite vrlo je pouzdan, pa nije potrebno u takvim okolnostima imati zaštićene prilaze. Pred ulaz u kabel može se postaviti jedan cijevni odvodnik, i to uz samu kablensku glavu (CO_2), a drugi na većoj udaljenosti od nje (CO_1). Prorada cijevnog odvodnika CO_2 predviđena je samo onda kad grom udari u njegovoj blizini jer je tad tjemena vrijednost vala velika. Tad će se, preko odvodnika, vodič u kabelu spojiti s



Sl. 15.12. Zaštita generatora pomoću kablenskog umetka

plaštem kabela, ali će, zbog potiskivanja struje, veći dio struje protjecati plaštem kabela, a ne vodičem u kabeu. Struja, krećući se plaštem, stvara pad napona, tako da će do sabirnica, odnosno generatora stići naponski val jednak padu napona na plaštu kabela. Ako se dogodi da grom udari na većoj udaljenosti od kabela, odvodnik CO_2 neće proraditi jer će do njega stići val smanjenje amplitude. Ali će pri tako udaljenom udaru proraditi cijevni odvodnik CO_1 , koji će smanjiti amplitudu vala na dopuštenu vrijednost, pa kabelski umetak prema generatoru neće biti ugrožen. Cijevni se odvodnici postavljaju samo tamo gdje nema zaštićenih prilaza.

15.3.2. Zaštita generatora u blok-spoju

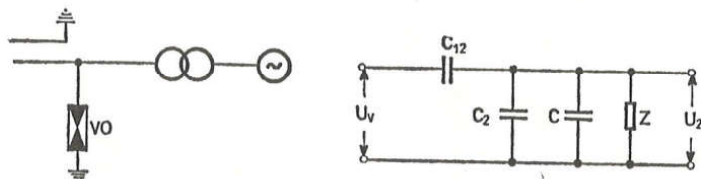
Generatori većih snaga obično su priključeni na nadzemne vodove preko transformatora, a ne izravno. Zato je potrebno zaštititi od udara groma i tu kombinaciju koja je u praksi dosta česta, npr. kod većih elektran. To se obično izvodi pomoću odvodnika prenapona priključenih na visokonaponskoj strani transformatora, kako je to prikazano na slici 5.13. Napon se prema izvodima generatora prenosi nakon prorade odvodnika kapacitivnom i elektroenergetskom vezom. Kad promatramo kako se on prenosi kapacitivnom vezom, onda nam shema na slici 15.13. pokazuje koji sve kapaciteti utječu na veličinu napona što će stići do generatora. Prilikom procjena napona koji će se pojaviti na generatoru priključenome na transformator, generator je u toj shemi nadomješten valnim otporom Z .

Kad želimo utvrditi koliki će nam se napon U_2 pojaviti na generatoru nakon prorade odvodnika, upotrijebit ćemo pojednostavljenu formulu:

$$U_2 = U_v \frac{C_{12}}{(C_{12} + C_2 + C) Z} e^{-\left[\frac{t}{(C_{12} + C_2 + C) Z}\right]}$$

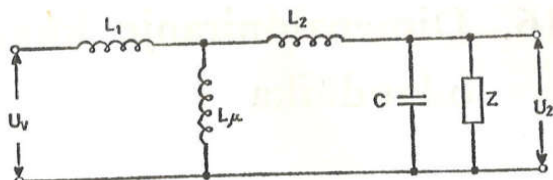
- C_{12} — kapacitet između namota transformatora
- C_2 — kapacitet niskonaponskog namota transformatora prema zemlji
- C — kapacitet generatora, kabela i sabirnica
- U_v — preostali napon odvodnika koji štiti cijelu kombinaciju

Prisutnost spojnih kabela ili sabirnica koje spajaju transformator s generatorom na strani nižeg napona obično smanjuje napon U_2 na veličinu neopasnu za izolaciju generatora. Ako se transformator povezuje s generatorom pomoću nadzemnih vodova, tad može doći zbog oscilacija do prekoračenja napona U_2 . Zato se paralelno generatoru postavlja jedan kondenzator, koji će smanjiti to prekoračenje izazvano kapacitiv-



Sl. 15.13. Zaštita generatora u blok-spoju s transformatorom

Sl. 15.14. Zaštita generatora u blok-spoju s transformatorom



nom vezom. No, budući da se napon prenosi na generator i elektromagnetskom vezom, prilikom upotrebe dodatnog kapaciteta valja paziti na to da on svojom veličinom ne izazove porast oscilacija. Na shemi koju sadrži slika 15.14. vidi se koji sve induktiviteti utječu na veličinu napona što se prenosi elektromagnetskom vezom.

Valni otpor Z nadomještava i tu generator, L_1 i L_2 su induktiviteti vodova i transformatora, a kapacitet C nadomještava kapacitet generatora, kapacitet sabirnica, kapacitet kabela i kapacitet koji smo upotrijebili da se smanji preneseni val kapacitivnom vezom. Obično nema titraja u tom krugu i napon U_v prenosi se nakon prorade odvodnika onako kako to određuje prijenosni omjer transformatora. Uvjet za aperioidičnost je $Z < [0,5 (L_1 + L_2) / C]$. Iz izraza vidimo da povećavajući kapacitet C povećavamo i mogućnost da nastane titranje, a time i prekoračenje dopuštenog napona na generatoru.

Valni otpor Z ovisi o snazi generatora; on je to veći što je snaga generatora manja. Praksa pokazuje da se kod rotacionih strojeva manjih snaga što ih štitimo odvodnicima uz dodavanje kapaciteta, pojavljuju titraji koji mogu povećati napon na generatoru preko dopuštenih granica, pa treba biti oprezan.

16. Dimenzioniranje kondenzatorskih odvodnika

U praksi su kondenzatori za zaštitu od prenapona vrlo česti. Posebno se oni upotrebljavaju za zaštitu željezničkih postrojenja koja su napajana istosmjernom strujom napona od 3 000 V, pa ćemo u najkraćim crtama prikazati kako se određuje vrijednost kapaciteta kondenzatorskog odvodnika koji služi za zaštitu lokomotiva i elektrovnih podstanica.

Općenito, da bi se dimenzionirali bilo kakvi odvodnici prenapona, pa tako i kondenzatorski odvodnici, potrebno je najprije utvrditi koliko se veliki prenaponi mogu pojaviti i kakva oblika, te koliko dugo traju. Potanje rečeno, mora se unaprijed znati koliku tjemenu vrijednost (amplitudu »E«) mogu imati takvi prenaponski valovi što nailaze. Tjemenu vrijednost takvih ulaznih valova ovdje ćemo, radi jasnoće nešto složenijih izlaganja, označiti s E, a ne s U_0 , kako smo u prethodnim poglavljima tu veličinu obično označavali. Osim toga valja unaprijed znati njihovu strminu s, a posebno, ako se žele upotrijebiti kondenzatorski odvodnici, treba još znati koliko oni mogu praktički dugo trajati, odnosno njihovo vrijeme trajanja T_v .

Što se tiče amplitude prenapona, moramo reći da ona poprima različite vrijednosti, ali se vodovima za napajanje lokomotive, odnosno željezničkom kontaktnom mrežom, ne mogu kretati prenaponski valovi koji bi imali amplitudu veću od one što će je izolacija te mreže izdržati. Željeznička kontaktna mreža od 3 000 V može ipak, relativno prema nazivnom naponu, podnositi dosta visoke prenapone. To se događa zbog toga što je ona iz mehaničkih razloga jako dimenzionirana, pa je i njezina izolacija jača. Praktički se uzima da se željezničkom kontaktnom mrežom mogu kretati i valovi kojima amplituda doseže i vrijednosti između 100 i 150 kV, pogotovo kad nema iskrišta. Ako je željeznička mreža zaštićena iskrištima, tad će putni valovi, koji se po njoj kreću i ugrožavaju uređaje u lokomotivi i ispravljače u podstanicama, dosegnuti samo vrijednosti između 20 i 45 kV, ali to je još uvijek za izolaciju tih uređaja opasno. Zato, ako se za zaštitu te opreme upotrebljavaju kondenzatori oni bi morali smanjiti amplitudu i tih smanjenih valova još za 20—30%. Željeznička kontaktna mreža ima relativno dosta malu visinu nad zemljom pa pretpostavljamo da neće biti često izravno pogođena gromom. Mnogo

će se češći udari pojaviti u njezinoj blizini, a prenaponski valovi, koji će se tad inducirati na kontaktnoj mreži, kako iskustvo pokazuje, imaju vrlo strmo čelo. Zbog toga ćemo pretpostaviti da oni već poslije $1 \mu\text{s}$ mogu postići svoju tjemenu vrijednost, E . To su valovi eksponencijalnoga oblika i velike strmice. Dalje pretpostavljamo da će oni praktički dulje ili kraće trajati, što znači da će se njihova amplituda E brže ili sporije smanjivati, sve dotle dok postigne, recimo, polovičnu vrijednost amplitude ($E/2$) (sl. 16.1). Za valove koji brže opadajući stignu prije do te granice, kažemo da su kraći valovi, a one što kasnije stignu, nazivamo dužim valovima, odnosno kažemo da oni imaju kraće ili dulje vrijeme trajanja T_v . Odaberimo jedan praktički primjer i zamislimo da vrijeme trajanja tih valova T_v bude jedanput $30 \mu\text{s}$, a zatim 50 , 100 , 150 i $200 \mu\text{s}$. Drugim riječima bismo rekli da smo odabrali eksponencijalne naponske valove vrlo strma čela, a duljine hrpta im se do vrijednosti ($E/2$) mijenja u dosta širokim granicama od 30 do $200 \mu\text{s}$. Kao i svi drugi eksponencijalni valovi, tako se i posebno koncipirani valovi što se kreću kontaktnim vodovima elektrificiranih željeznica mogu općenito analitički opisati jednadžbom (8.38) iz poglavlja o putnim valovima, kojoj je oblik:

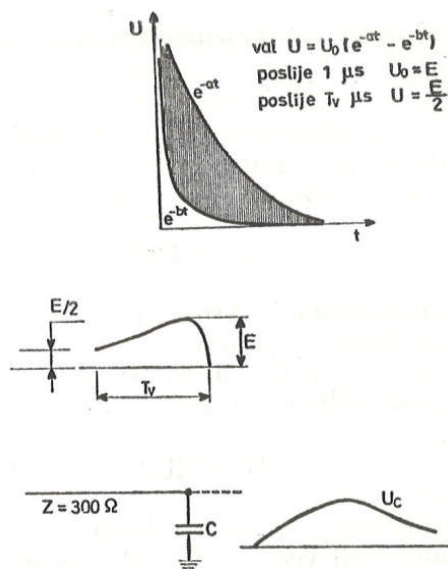
$$U = U_0 (e^{-(t/T_1)} - e^{-(t/T_2)}). \quad (16.1)$$

Radi lakše i zornije prilagodbe te opće jednadžbe zahtjevima koje smo malo prije spomenuli, za vrijednosti vremenskih konstanta pisat ćemo da je $\frac{1}{T_1} = a$ i $\frac{1}{T_2} = b$, pa tad jednadžbu (16.1) za napon vala koji nailazi na kondenzatorski odvodnik poprima oblik:

$$U = U_0 (e^{-at} - e^{-bt}). \quad (16.2)$$

Dalje, vrijednosti prolaznog napona vala $U_2 = U_c$ pokraj kondenzatora, odnosno na potrošaču, prihvaćajući promjene u oznakama vremenskih konstanta, možemo prema izrazu (8.39) iz poglavlja o putnim valovima napisati da one sad iznose:

$$U_0 = \frac{2U_0Z_2}{Z_1 + Z_2} (Ae^{-at} - Ae^{-(t/T)} - Be^{-bt} + Be^{-(t/T)}), \quad (16.3)$$



Sl. 16.1. Dimenzioniranje kondenzatorskih odvodnika

pri čemu smo označili $s A = \frac{T_1}{T_1 - T} = \frac{1}{1 - aT}$ i analogno tome $s B = \frac{1}{1 - bT}$.

Kondenzatorski se odvodnik može postaviti svugdje na kontaktnoj mreži, pa i tamo gdje nisu moguće refleksije valova, ali tad nemamo čvorne točke te je $Z_1 = Z_2$. Jednadžba (16.3) poprima oblik:

$$U_c = U_0(Ae^{-at} - Ae^{-(t/T)} - Be^{-bt} + Be^{-(t/T)}), \quad (16.4)$$

a konstanta je kruga $T = (ZC/2)$. Jednako tako kondenzatorski odvodnik daje se postaviti i na krajevima kontaktne mreže, gdje se pojavljuju refleksije valova, pa to stanje moramo zamisliti kao da je $Z_2 = \infty$ i jednadžba (16.3) prelazi u:

$$U_c = 2U_0(Ae^{-at} - Ae^{-(t/T)} - Be^{-bt} + Be^{-(t/T)}), \quad (16.5)$$

pri čemu je konstanta kruga $T = ZC$. Budući da je tu riječ o vrlo strmom valu, koji već u roku od $1 \mu s$ postizava maksimalnu vrijednost E , onda je utjecaj članova s faktorom B općenito vrlo malen (krivulja U_0e^{-bt} na slici 16.1) na oblikovanje takva ulaznog vala, osim u samom početku. Zato možemo približno uzeti da valovi što traju više od $20 \mu s$ imaju amplitudu $E \sim U_0$. Osim toga, ako je vremenska konstanta kruga $T = 20 \mu s$, faktor je $B \ll A$. Tad se, zanemarujući članove s faktorom B , jednadžba (16.4) pojednostavnjuje, pa možemo pisati da je napon na kondenzatoru, odnosno na potrošaču, kad se kondenzator nalazi uzduž mreže:

$$U_c = E(Ae^{-at} - Ae^{-(t/T)}). \quad (16.6)$$

Ako je kondenzator na kraju otvorene mreže, napon na njemu bit će:

$$U_c = 2E(Ae^{-at} - Ae^{-(t/T)}). \quad (16.7)$$

Najveća vrijednost prolaznog vala $(U_c)_{\max}$ ne nastupa u vremenu od $1 \mu s$, kao što smo to predvidjeli za ulazni val koji smo unaprijed odredili. To vrijeme kad nastupa maksimalna vrijednost napona na kondenzatoru izračunavamo iz izraza (16.6) i (16.7) tako da tražimo maksimum njihovih funkcija. Nakon provedenog računa uočavamo da u jednom i u drugom slučaju maksimalna vrijednost napona $(U_c)_{\max}$ na kondenzatoru nastupa u trenutku:

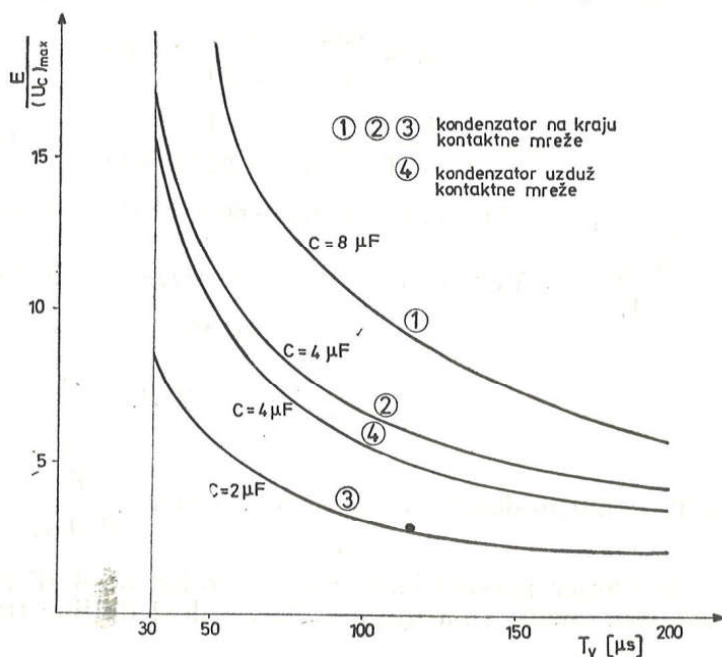
$$t_{\max} = -AT \ln(aT).$$

Tu se konstanta »a« za tako strme valove različita trajanja približno računa iz izraza $a = (\ln 2/T_v)$, jer je riječ o specijaliziranome eksponencijalnom valu.

Dade se odmah opaziti, prema izrazima (16.6) i (16.7), da je moguće za određeni oblik ulaznog vala mijenjati napon promjenom veličine kapaciteta. Ako priključimo kondenzator većeg kapaciteta, imat ćemo manji napon na kondenzatoru, i obrnuto, smanjimo li kapacitet konden-

zatora, bit će veći napon na kondenzatoru, odnosno na potrošaču. To je razumljivo kad se zna da se zbog promjene kapaciteta mijenja i konstanta kruga T , o kojoj ovisi veličina napona na kondenzatoru prema izrazima (16.6) i (16.7). Osim toga, iz izraza kojim određujemo konstantu »a« izlazi da je ona ovisna o duljini trajanja vala T_v , što govori o tome, a računom se dade provjeriti, da je za dulje valove napon na kondenzatoru veći. I to je razumljivo jer dulji valovi više vremena djeluju na naš kondenzator, i više ga ispune naboje. Na slici 16.2. krivuljama 1, 2 i 3 prikazane su sve maksimalne vrijednosti napona U_c (odnosno omjer $(E/(U_c)_{\max})$ koji će poprimiti kondenzatorski odvodnici različitih kapaciteta C (2, 4 i 8 μF) kad su priključeni na kraju kontaktne mreže. Pretpostavljamo da na njih djeluju valovi koji traju od 30 do 200 μs . Za kondenzatorski odvodnik od 4 μF na dijagramu su predložene maksimalne vrijednosti napona kad je on priključen, ne samo na kraju kontaktne mreže (krivulja 2) nego i bilo gdje drugdje uzduž nje (krivulja 4).

Iz ovih izlaganja vidi se da sve zaštitne osobine kondenzatorskog odvodnika ovise o odabranoj veličini kapaciteta. Ako je mali kapacitet, napon i strmina na potrošaču bit će veći, a ako uzmemo veći kapacitet, napon i strmina bit će manji. Ali, budući da je njegovo zaštitno djelovanje ovisno još o duljini trajanja prenapona, nije lako odabrati pravu veličinu kapaciteta nekoga kondenzatorskog odvodnika, jer prenaponi mogu biti različite duljine trajanja T_v . Sve to skupa otežava odabiranje odgovarajuće veličine kapaciteta kondenzatorskog odvodnika, koja bi bila dovoljna da najveću vrijednost naponskog vala i njegovu strminu smanji na neopasnu vrijednost. Moglo bi se zato općenito tvrditi da nikad točno ne možemo unaprijed znati kakav oblik i koliki napon će se na potrošaču pojaviti, jer zaštitna razina našeg aparata nije čvrsta, kao što je to kod ventilnih odvodnika. Međutim, na sreću, o upotrebi tih



Sl. 16.2. Omjer napona $[E/(U_c)_{\max}]$ na kondenzatorskim odvodnicima ovisno o trajanju vala koji nailazi

aparata koji imaju i svojih prednosti, ima dosad mnogo iskustva, pa se tom okolnosti danas koristi. Tako se na jugoslavenskim i talijanskim željeznicama napajanima istosmjernom strujom upotrebljavaju kondenzatorski odvodnici kapaciteta od $4 \mu\text{F}$, a kod belgijskih i nizozemskih oni su i do $9 \mu\text{F}$.

Primjer 16.1.

Kondenzatorski odvodnik kapaciteta $C = 4 \mu\text{F}$ je prema slici 16.1. priključen na kontaktnu mrežu valnog otpora $Z = 300 \Omega$. Jedanput je taj odvodnik priključen uzduž kontaktne mreže, a drugi put na kraju otvorene kontaktne mreže. Treba izračunati koliki je omjer $[E/(U_c)_{\max}]$ između tjemene vrijednosti prenaponskog vala koji nailazi i maksimalnog napona na kondenzatoru što će se tad pojaviti. Pretpostavljamo da na njega u oba slučaja nailaze naponski valovi kojima je duljina trajanja do njihove polovične vrijednosti $T_v = 30 \mu\text{s}$, a drugi put $T_v = 150 \mu\text{s}$. Taj omjer valja naći i ako kondenzatorski odvodnik na kraju mreže ima kapacitet od $8 \mu\text{F}$.

Rješenje:

a) Omjer napona kad je kondenzator kapaciteta od $4 \mu\text{F}$ priključen uzduž kontaktne mreže i na njega nailaze valovi duljine trajanja $T_v = 30 \mu\text{s}$ i $T_v = 150 \mu\text{s}$.

$$U_c = E[A(e^{-at} - e^{-(t/T)})]$$

$$T = \frac{CZ}{2} = \frac{4 \cdot 300}{2} = 600 \mu\text{s}$$

$$a = \frac{\ln 2}{T_v} = \frac{0,693}{30} = 0,0231$$

$$A = \frac{1}{1 - aT} = \frac{1}{1 - 0,0231 \cdot 600} = -0,0777$$

$$t_{\max} = -AT \ln aT = 0,0777 \cdot 600 \cdot \ln 0,0231 \cdot 600 = 122 \mu\text{s}$$

$$\frac{(U_c)_{\max}}{E} = A(e^{-at} - e^{-(t/T)}) = -0,0777 \cdot (e^{-0,0231 \cdot 122} - e^{-(122/600)}) = 0,0587$$

$$\frac{E}{(U_c)_{\max}} = 17,03.$$

Za $T_v = 150 \mu\text{s}$ dobili bismo traženi omjer $\frac{E}{(U_c)_{\max}} = 4,92$.

b) Omjer napona kad je kondenzator od $4 \mu\text{F}$ priključen na kraju kontaktne mreže i na njega nailaze valovi duljine trajanja $T_v = 30 \mu\text{s}$ i $T_v = 150 \mu\text{s}$.

$$U_c = 2E[A(e^{-at} - e^{-(t/T)})]$$

$$T = ZC = 300 \cdot 4 = 1\,200 \mu s$$

$$a = \frac{\ln 2}{T_v} = \frac{0,693}{30} = 0,0231$$

$$A = \frac{1}{1 - aT} = \frac{1}{1 - 0,0231 \cdot 1\,200} = -0,0374$$

$$t_{\max} = -AT \ln aT = 0,0374 \cdot 1\,200 \cdot \ln \cdot 0,0231 \cdot 1\,200 = 149 \mu s$$

$$\frac{(U_c)_{\max}}{E} = 2[A(e^{-at} - e^{-(t/T)})] = 2[-0,0374 \cdot (e^{-0,0231 \cdot 149} - e^{-(149/1\,200)})] = 0,03183 \cdot 2 = 0,0636$$

$$\frac{E}{(U_c)_{\max}} = 15,72.$$

Za $T_v = 150 \mu s$ dobili bismo traženi omjer $\frac{E}{(U_c)_{\max}} = 4,04$.

c) Povećajmo kapacitet kondenzatora od 4 na 8 μF i računajmo kad je on priključen samo na kraju kontaktne mreže uz trajanje vala $T_v = 30 \mu s$, pa izlazi:

$$U_c = 2E[A(e^{-at} - e^{-(t/T)})]$$

$$T = ZC = 300 \cdot 8 = 2\,400 \mu s$$

$$a = \frac{\ln 2}{T_v} = \frac{0,693}{30} = 0,0231$$

$$A = \frac{1}{1 - aT} = \frac{1}{1 - 0,0231 \cdot 2\,400} = -0,0184$$

$$t_{\max} = -AT \ln aT = 0,0184 \cdot 2\,400 \cdot \ln \cdot 0,0231 \cdot 2\,400 = 176,35 \mu s$$

$$\frac{(U_c)_{\max}}{E} = 2A(e^{-at} - e^{-(t/T)}) = 2 \cdot [-0,0184 \cdot (e^{-0,0231 \cdot 176} - e^{-(176/2\,400)})] = 0,0333$$

$$\frac{E}{(U_c)_{\max}} = 29,95.$$

Uz kapacitet kondenzatora od $8 \mu\text{F}$ i trajanje vala $T_v = 150 \mu\text{s}$ dobili bismo da omjer napona na kraju kontaktne mreže iznosi:

$$U_c = 2E[A \cdot (e^{-at} - e^{-(t/T)})]$$

$$T = ZC = 300 \cdot 8 = 2\,400 \mu\text{s}$$

$$a = \frac{\ln 2}{150} = 0,00462$$

$$A = \frac{1}{1 - aT} = \frac{1}{1 - 0,00462 \cdot 2\,400} = -0,0991$$

$$t_{\max} = -AT \ln aT = 0,0991 \cdot 2\,400 \cdot \ln 0,00462 \cdot 2\,400 = 572,2$$

$$\frac{(U_c)_{\max}}{E} = 2[A(e^{-at} - e^{-(t/T)})] = 2 \cdot [-0,0991 \cdot (e^{-0,00462 \cdot 572} - e^{-(572/2\,400)})] = 0,1420$$

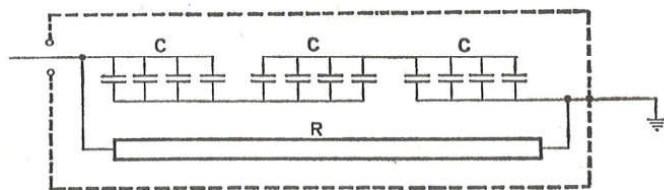
$$\frac{E}{(U_c)_{\max}} = 7,04.$$

16.1. Vrste kondenzatorskih odvodnika i njihove osobine

Kondenzatorskih odvodnika ima različitih konstrukcija, ali bismo ih po načinu djelovanja ipak mogli podijeliti u dvije skupine: obični kondenzatorski odvodnici i kombinirani kondenzatorski odvodnici. Obični se kondenzatorski odvodnici sastoje od više grupa kondenzatora spojenih međusobno paralelno, a zatim su pojedine grupe povezane serijski. Paralelno cijeloj kombinaciji kondenzatora priključen je visokonaponski otpor od otprilike $10 \text{ M}\Omega$. Cijeli je slog uronjen u posebno ulje i hermetički zatvoren (sl. 16.3).

Kondenzatorski odvodnici mogu imati različite vrijednosti ukupnog kapaciteta. No, približno, za one koji se upotrebljavaju na evropskim željeznicama možemo reći da imaju vrijednost kapaciteta između 4 i $10 \mu\text{F}$, a nazivni im je napon približno 4 kV. Paralelno priključen visokonaponski otpor treba da uspostavi što povoljniju raspodjelu napona po kondenzatorima.

Prednosti kondenzatorskih odvodnika pred ventilnim odvodnicima, koji se danas također upotrebljavaju za zaštitu na željeznicama, sastoje



Sl. 16.3. Osnovna shema običnoga kondenzatorskog odvodnika

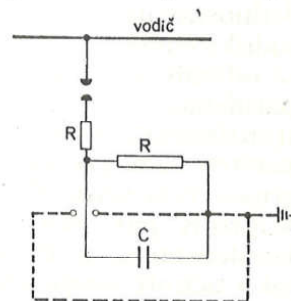
se u tome što oni vrlo sigurno reagiraju i na najmanje promjene napona, a kod ventilnih odvodnika proradni napon ovisi o razmaku iskrišta preko kojih je on priključen na mrežu. Osim toga, u radu kondenzatorskih odvodnika nema popratnih struja, pa se prilikom prorade ne oštećuju elementi od kojih je on sastavljen.

Kad bi se htjeli uočiti nedostaci kondenzatorskih odvodnika, treba ponovno napomenuti da im stupanj zaštite nije čvrst, odnosno da se nikad ne zna koliki će maksimalni napon nakon prorade kondenzatora poprimiti potrošač. Međutim, da bi oni dobro funkcionirali i da bi se taj nedostatak učinio što je moguće manjim, potrebno je dobro unaprijed proučiti prenapone koji se na nekoj mreži pojavljuju, zatim provesti mjerenja i snimanja kako bi se utvrdila njihova veličina i oblik, pa se onda odlučiti o tome koliku vrijednost treba da ima kapacitet upotrijebljenog kondenzatora. Što se tiče ublažavanja strmine naponskog vala, možemo općenito reći, da se upotrebom kondenzatorskih odvodnika postizavaju zadovoljavajući rezultati. To je neobično važno radi zaštite motora i drugih svitaka. Prije njihove upotrebe dobro se koristiti tuđim iskustvima.

U novije su vrijeme proizvedeni kombinirani kondenzatorski odvodnici, i prema tome oni nisu dugo u upotrebi, pa su iskustva o njihovu zaštitnom djelovanju i radu relativno mala. To su odvodnici prenapona koji osim kondenzatora i paralelnog otpora, o kojemu je malo prije bilo riječi, imaju još i jedan otpor u seriji, a priključuju se na kontaktnu mrežu preko iskrišta. Principna shema takva kombiniranog odvodnika prikazana je na slici 16.4.

Taj kombinirani kondenzatorski odvodnik ima tu prednost pred običnim kondenzatorskim odvodnikom što kroz njega ne teče stalno struja koju tjeraju viši harmonici iz kontaktne mreže. Dakle, on nije stalno opterećen kao obični kondenzatorski odvodnik. To je spriječeno upotrebom iskrišta preko kojeg je priključen na mrežu. Osim toga, na takav način, on neće reagirati na sve prenapone što se pojave na mreži, nego će proraditi samo na one prenapone koji su tako veliki da izazovu proboj na iskrištu. Za njega možemo reći da ima reguliran proradni napon, čega nije bilo kod običnoga kondenzatorskog odvodnika. Konstrukcijom kombiniranoga kondenzatorskog odvodnika pokušavaju se ujediniti sve dobre strane ventilnog i običnoga kondenzatorskog odvodnika. No, kondenzatorski odvodnici, bili oni obični ili kombinirani, imaju pred ventilnim odvodnicima tu prednost što vrlo djelotvorno prekidaju popratnu struju, koja poslije prorade bilo kakvog odvodnika može stvarati velike teškoće i za sam odvodnik i za pogon cijelog postrojenja. To se događa zbog toga što kondenzatori, po svojoj prirodi, ne propuštaju istosmjernu struju, te nakon prolaska prenaponskog vala, koji je impulsnog karaktera, oni istosmjernoj struji pružaju beskonačno veliki otpor, što nije tako kod ventilnih odvodnika. Zato se kondenzatorski odvodnici često i upotrebljavaju na željeznicama elektrificiranim istosmjernom strujom.

Ovdje je dobro upozoriti na to da valja biti osobito oprezan prilikom skidanja običnoga kon-



Sl. 16.4. Kombinirani kondenzatorski odvodnik

denzatorskog odvodnika s mreže. Tad se moraju obavezno kratko spojiti i uzemljiti stezaljke odvodnika, kako bi se eventualno preostali napon na pločama kondenzatora neopasno odveo u zemlju.

16.2. Druge mogućnosti zaštite pomoću kondenzatora

Kondenzatori općenito služe ne samo za to da se smanje prenaponi koji nastaju zbog udara groma nego i za smanjenje prenapona koji nastaju iz bilo kojih drugih razloga. Tako je poznato da u postrojenjima nastaju prenaponi zbog rada prekidača, odnosno zbog uključivanja i isključivanja strujnih krugova, a i nenamjerni kvar se zna odraziti kao prekid strujnog kruga. Čak rad nekog aparata koji nije sasvim ispravan može biti izvor nekim prenaponima. To su unutrašnji prenaponi, za razliku od onih što nastaju zbog udara groma pa ih nazivamo vanjskim prenaponima. Sama činjenica mehaničkog prekida strujnog kruga ne bi, sama po sebi, ništa značila kada se u tom času prekida nekoga strujnog kruga ne bi oslobodila magnetska energija prikupljena u induktivitetu tih strujnih krugova, a koja se može općenito izračunati iz izraza $A_m = (Li^2/2)$.

To može biti energija skupljena u induktivitetima prigušnica i transformatorskih namota, induktivitetima vodova, odnosno kod željeznica u induktivitetima kontaktne mreže itd. Ta energija, nakon prekidanja struje neće biti više u tome magnetskom obliku, nego se, po zakonu o održavanju energije, mora pretvoriti u nešto drugo. U našem primjeru ta magnetska energija pretvorit će se u električnu energiju, $A_e = (CU^2/2)$. Zato pišemo da za nastajanje svih prenapona prilikom prekidanja strujnih krugova koji imaju induktivitet, vrijedi idealno energetska jednadžba:

$$\frac{Li^2}{2} = \frac{CU^2}{2},$$

a odatle je:

$$U = i \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (16.8)$$

Jednostavnije i slobodnije možemo reći: kad se struja »i« što protječe induktivitetima naglo prekine, tad se oslobađa magnetska energija, ali se odmah pojavljuje napon U na kapacitetima koji su tu uvijek prisutni paralelno induktivitetima. Ti kapaciteti su u tim okolnostima kapaciteti transformatorskih svitaka, prigušnica, releja i sl. Međutim, takvi su kapaciteti sami po sebi vrlo maleni, pa je zato napon koji se na njima tad pojavi vrlo velik. To se vidi iz rješenja prije napisane jednadžbe (16.8). Naprotiv, pak, ako te kapacitete povećamo uključivanjem još paralelnih kondenzatora, može se napon »U« smanjiti na teorijski malu veličinu i tako učiniti neopasnim za aparate. Te dodatne kondenzatore, određena kapaciteta, koje paralelno uključujemo da bismo ukupni kapacitet tih strujnih krugova povećali i tako prenapon smanjili, nazivamo zaštitnim kondenzatorima. Oni se obično postavljaju na onom mjestu gdje se po-

javljaju takvi prenaponi, odnosno na samome njihovom izvoru. Da bi se spriječile oscilacije što prilikom tog procesa nastaju, u seriju sa zaštitnim kondenzatorom postavlja se još i omski otpor R , koji te oscilacije prigušuje. Takvi se sklopovi nazivaju RC-zaštita. (Radi orijentacije, pri nazivnoj struji anode jednog ispravljača od 200 A, uzima se $R = 5\text{--}10\ \Omega$, a $C = 1\text{--}2\ \mu\text{F}$.) Na osnovi iznesenih razmatranja tvrdimo, dalje, da i naši obični kondenzatorski odvodnici, postavljeni pred stanicama ili na samoj kontaktnoj mreži da bi smanjili atmosferske prenapone, imaju jednako tako korisno i zaštitno djelovanje kad je riječ o unutrašnjim prenaponima koji se mogu tamo pojaviti. Oni će te prenapone smanjiti i odvesti u zemlju, a sami neće biti oštećeni. Iako je to sekundarna i manje važna funkcija običnih kondenzatorskih odvodnika, ipak ju je dobro spomenuti jer oni svojom prisutnošću povećavaju općenito odvodnu moć nekog sistema na kojem se mogu pojaviti bilo kakvi prenaponi. Naprotiv, pak, ventilni odvodnici prenapona nemaju to svojstvo. Može se, naime, dogoditi da oni budu uništeni prilikom nailaska unutrašnjih prenapona ako nisu za takvo naprezanje posebno konstruirani.

17. Načela koordinacije izolacije

17.1. Koordinacija izolacije. Povijesni razvoj

Elektroenergetski sistem sastavljen je od strojeva, aparata, nadzemnih vodova, kabela itd. Svi elementi nekog sistema nemaju jednaku, a ni jednako otpornu izolaciju. Pa kad upotrebljavamo pojam »koordinacija izolacije«, onda tu razumijevamo vrlo složene postupke računanja i ispitivanja kako bismo otpornost izolacije svih tih dijelova nekog sistema međusobno uskladili da sistem u cjelini izdrži sva naprezanja kojima će biti podvrgnut u normalnom pogonu i za vrijeme djelovanja prenapona. Taj zahtjev da izolacija cijelog sistema bude usklađena ili koordinirana, postavlja se i zato što nam je tad lakše odrediti funkciju i karakteristike zaštitnih aparata koji moraju djelotvorno štititi taj sistem. Dakle, kad se jedanput uskladi i odredi ta izolacijska otpornost cijeloga elektroenergetskog sustava, onda se i postavljaju izolacijski zahtjevi na svaki aparat posebno. Projektant i konstruktor pojedinih elemenata postrojenja tad je obavezan da, poštujući ove opće zahtjeve, dimenzionira te elemente, svakoga posebno.

Dakle, mi bismo umjesto riječi »koordinacija izolacije« mogli upotrebljavati riječ »dimenzioniranje« izolacije, jer ona u biti najbolje tumači te postupke u povijesnom nastajanju. No, budući da se riječ »koordinacija izolacije« s vremenom i razvojem ove problematike sačuvala do dana današnjega, mi ćemo je i dalje upotrebljavati. Ali, s obzirom na neke nove poglede u tom području, i riječ »dimenzioniranje izolacije« bit će u ovim izlaganjima prisutna. Vratimo se malo prošlosti da vidimo kako se ovo područje elektroenergetike razvijalo.

Do 1920. godine izolacija se dimenzionirala samo ispitivanjem u laboratorijima, dakle isključivo eksperimentalnim putem. Proračuni ili druge metode nisu se upotrebljavali. Ta su se ispitivanja obavljala tako da se npr. na unutrašnju izolaciju narinuo napon industrijske frekvencije kojeg se visina određivala tako da se nazivni napon množio nekim koeficijentom sigurnosti, odabranim po volji. Taj je koeficijent za istu izolaciju često bio sasvim različit.

Vanjska izolacija, kao npr. zrak, dimenzionirala se tako da je vrijedilo neko pravilo: koliko centimetara zraka treba uzeti po jednom (kV) ili koliko izolatorskih članaka valja uzeti po jednom (kV).

Dakle, nije bilo zajedničkog kriterija u određivanju veličina faktora sigurnosti. To je dovelo do toga da su izolacije istoga nazivnog napona u nekom postrojenju bile jako različito dimenzionirane.

U tim godinama počeli su se pojavljivati i nazivni naponi viši od 100 kV, pa je ta neujednačenost kriterija u određivanju koeficijenata sigurnosti stvarala teškoće pri ekonomičnom dimenzioniranju izolacije. Zato je već tad trebalo prići sistematizaciji ove problematike, kako bi se te razlike, nastajale zbog pomanjkanja zajedničkog kriterija, što više smanjile. Dakle, pokušalo se uskladiti i stvoriti neki zajednički kriterij o sigurnosti postrojenja za iste izolacije istoga nazivnog napona s obzirom na prenapone koji su ih mogli oštetiti.

O prenaponima se u ono vrijeme nije mnogo znalo (o njihovu obliku, trajanju, čestoći pojavljivanja itd.), pa se prema njima nije ni mogla točno sistematizirati otpornost neke izolacije. Zato se, u to doba, prilazi stupnjevanju vrsta izolacije prema podnosivom naponu industrijske frekvencije. Već se tad zapazilo da neke izolacije izdrže viši, a neke niži napon. Izolacije koje su mogle podnijeti viši napon bile su tad postavljane na važnim dijelovima postrojenja, a one koje to nisu mogle, stavljane su na manje bitnim dijelovima. Tako bi pri nailasku prenapona izolacije s nižim podnosivim naponom bile oštećene, odnosno na njima bi nastajao proboj. Ali, budući da su one bile postavljene na mjestima manje važnim u postrojenju, tamo su nastajale i najmanje štete. Moglo bi se reći da su tad izolacije s najnižim podnosivim naponom služile kao neka vrsta zaštite cijelog postrojenja. Ta faza u razvoju ove problematike mogla bi se nazvati počecima razvoja pojma »koordinacije izolacije«, odnosno počecima usklađivanja različitih stupnjeva izolacije unutar jednog postrojenja. Naziv za taj pojam udomaćio se i ostao do dana današnjega.

Međutim, sistematizacija izolacija prema otpornosti što ih one pokazuju nakon ispitivanja izmjeničnim sinusoidnim naponom, nije mogla u potpunosti zadovoljiti. Naime, sinusoidnim izmjeničnim naponom ne možemo simulirati sva ona naprezanja izolacije koja nastaju u pogonu pri nailasku prenapona. To se već tad opazilo. Zato se, već u ono vrijeme, svaka izolacija koja je bila ispitana izmjeničnim naponom ispitivala još i jednim drugim oblikom napona, koji danas nazivamo udarnim naponom. Veličina toga udarnog napona određivala se tako da je kao mjerilo uzeta srednja veličina izdržljivosti kombinirane izolacije papira i ulja u transformatorima, prema visini upotrijebljenog udarnog napona. Svaka druga izolacija koja bi tu veličinu udarnog napona izdržala smatrala se dobrom. Dakle, bila je tad određena razina udarnog napona koji se počeo upotrebljavati. Izdržljivost izolacije prema tom naponu počela je vrijediti kao osnovni kriterij za koordinaciju i dimenzioniranje izolacije.

Već 1930. godine posao je na tom području unaprijeđen u tom smislu što je za svaki nazivni napon, uz ispitni napon industrijske frekvencije, bila pridružena i jedna razina udarnog napona koji je izolacija morala izdržati. U to se vrijeme uvode i pojmovi puni stupanj izolacije i smanjeni stupanj izolacije.

Već tad je bilo i jedno razumno pravilo kako se dolazi do izolacijske razine ili »nivoa« (U_i) nekog aparata zaštićenoga odvodnikom prenapona (to se najviše odnosilo na transformatore). Pravilo je otprilike sadržavalo

ovakav postupak. Počelo se tako da se najprije uzeo fazni napon sistema, pa se taj fazni napon množio nekim faktorom sigurnosti i tako se dobivao proradni napon, odnosno zaštitni napon odvodnika prenapona U_v .

A jedanput kad je bio ustanovljen zaštitni napon odvodnika, što je i glavna karakteristika odvodnika, množila se ta veličina još jednim faktorom sigurnosti kako bi se došlo do potrebne izolacijske čvrstoće (izolacijskog nivoa) U_i tog aparata. Taj postupak dimenzioniranja izolacije vrijedio je gotovo kao jedini važeći do početka 60-ih godina ovog stoljeća i mi bismo ga mogli nazvati klasičnim postupkom u dimenzioniranju izolacije. Postupak i kriteriji što su se dotad isključivo primjenjivali, a i danas se u najvećem broju slučajeva u praksi susreću, ostali su dosta neprecizni u formulacijama i još uvijek dosta proizvoljni u odabiranju veličina. Međutim, u takvoj situaciji razvoj elektroenergetskih sistema nije čekao. Počeli su se upotrebljavati najviši naponi za prijenosne vodove i aparate, već danas do 750 kV izmjenično, a u fazi su studije i viši naponi od toga.

Stručnjaci, potaknuti tom činjenicom, već su poslije 60-ih godina počeli razmatrati i tražiti točniji i ekonomičniji način dimenzioniranja izolacije, jer klasični postupak nije mogao zadovoljavati u potpunosti ni uskladiti sigurnost pogona, s jedne strane, s velikim troškovima za izolaciju, s druge strane. Zato je na tom području učinjen već tih godina korak naprijed. Osobiti napredak postignut je istraživanjima provedenima na pojavama unutrašnjih prenapona, a zatim i na problemima naprezanja različitih izolacija koje su bile tim prenaponima izložene. Utvrđeno je, naime, da se pojavi određene veličine prenapona i probojnoj vrijednosti nekih vrsta izolacije dadu pridruživati određene vjerojatnosti nastupa. Takve nove spoznaje dovele su najzad do toga da se preporuči, mogli bismo reći, novi način dimenzioniranja izolacije, i to koristeći se metodama statističke matematike. Međutim, nije studiran samo problem odnosa pojave prenapona prema jednoj vrsti izolacije nego je razmotren i odnos prenapona prema više izolacija paralelno postavljenih, pa je time obuhvaćen i problem zaštite nekog postrojenja.

Novi je pristup u fazi razvoja, ali i on ne rješava potpuno sve goruće probleme iz te problematike. O jednom i o drugom načinu koordinacije izolacije te njihovoj međusobnoj vezi bit će dalje još riječi.

17.2. Klasična metoda koordinacije izolacije

Najprije ćemo razmatrati konvencionalnu metodu koordinacije izolacije, onu koju smo u prethodnim izlaganjima nazvali klasičnom metodom. Ta se metoda još danas upotrebljava pa se pojmovi, definicije i dogovorene ispitne vrijednosti, koje su standardizirane, primjenjuju u svim zemljama svijeta s više ili manje odstupanja.

Kod nas su osnovna načela koordinacije izolacije sadržana u »Jugoslavenskim standardima«. Prema tamo utvrđenim općim formulacijama, pod koordinacijom izolacije smatra se više postupaka koje treba poduzeti da bi se spriječila šteta na opremi visokonaponskih postrojenja zbog djelovanja prenapona.

To se postizava, ne baš sasvim jednostavno, usklađivanjem izolacijske otpornosti postrojenja, s jedne strane, i visine prenapona, s druge strane, uz upotrebu karakterističnih zaštitnih aparata. Pri tome se vodi računa o mnoštvu drugih okolnosti, a posebno o udaljenosti zaštitnog aparata od objekta koji štitimo. Da bi neka izolacija izdržala prenapone, ona mora prije izdržati ispitivanje udarnim standardnim naponima od $1,2/50 \mu s$. Zato se otpornost izolacije, na neki način, ocjenjuje prema vrijednosti »podnosivoga udarnog napona izolacije«, a jednako tako i zaštitni aparat mora biti prije ispitan udarnim naponima, pa se njegove karakteristike ocjenjuju prema tzv. udarnoj razini zaštite.

Podnosivi udarni napon izolacije i udarna razina zaštite utvrđuju se prema propisima koji obuhvaćaju načine ispitivanja i karakteristične vrijednosti udarnog napona i struja što ih treba u tim ispitivanjima upotrijebiti.

Podnosivi udarni napon izolacije ustanovljuje se ispitivanjem izolacije udarnim naponom, kojeg se karakteristike, kao što su tjemena vrijednost, strmina itd., moraju uzeti iz važećih standarda. Zatim se tako odabrani udarni napon, koji je pet puta pozitivnog, a pet puta negativnog polariteta, primjenjuje na neku izolaciju ili već gotov proizvod. Ako ta izolacija ili proizvod izdrže tih deset udara bez ijednog preskoka, da je ta izolacija dobra, dakle ispravna, a vrijednost upotrijebljenog napona shvaćamo kao podnosivi udarni napon izolacije. Međutim, ako nam se dogodi da za vrijeme ispitivanja ipak jedanput nastane preskok, onda nastavljamo ispitivanje, ali s još deset udara, pa ako nam ta izolacija izdrži svih tih deset novih udara, smatramo da je ona ispravna. Nastupi li pri tome drugom ispitivanju još pokoji preskok, tad konačno smatramo da je izolacija neispravna, odnosno toj izolaciji nismo utvrdili podnosivi udarni napon. Ta se ispitivanja ne provode na svim izolacijama iste vrste, nego se uzima samo uzorak, tako da ne bismo ispitivanjem uništili mnogo tih komada izolacije ili proizvoda.

Vrijednostima podnosivoga udarnog napona pridružene su i vrijednosti sinusoidnog napona industrijske frekvencije kojim se te iste izolacije ispituju. Ispitivanje sinusoidnim naponom industrijske frekvencije obavlja se tako da se izolaciji narine sinusoidan napon i, ako u toku jedne minute na izolaciji ne bude preskoka i proboja, smatra se da je izolacija ispitana jednom minutnim podnosivim sinusoidnim naponom industrijske frekvencije.

Vrijednostima jednom minutnoga podnosivog napona industrijske frekvencije, sinusoidnog oblika, izražena je otpornost izolacije pretežno prema unutrašnjim prenaponima, a njezina se otpornost prema atmosferskim prenaponima ocjenjuje ispitivanjima koja su na njoj provedena udarnim naponima. U novije se vrijeme otpornost izolacije prema unutrašnjim prenaponima provjerava i ocjenjuje ispitivanjima pomoću udarnih napona što dugo traju (dugačkim valovima). Vrijednostima podnosivoga udarnog napona i podnosivog napona industrijske frekvencije zajedno definiran je stupanj izolacije nekog uređaja određenoga nazivnog napona. Ti stupnjevi izolacije su standardizirani i prema tom standardu postoji samo nazivni stupanj izolacije, te standardni stupnjevi izolacije za opremu područja A (iznad 1 kV do ispod 52 kV), područja B (od 52 kV do ispod 420 kV) i područja C (420 kV i više).

Standardni stupnjevi izolacije za opremu područja A i B predočeni su u tablici 17.1. S obzirom na različite mogućnosti kombiniranja najvišeg napona opreme s pripadnim podnosivim naponima, treba stupanj izolacije označiti najvišim naponom opreme, u kV, slovima Si i nazivnim podnosivim naponima, u kV. Na primjer, izolacija za opremu s najvišim naponom opreme 123 kV i s podnosivim naponima od 230 kV za 50 Hz i 550 kV za atmosferski udar 1,2/50 označava se s 123 Si 230/550.

Standardni stupnjevi izolacije za opremu najvišeg napona opreme od 420 kV predočeni u tablici 17.2. Izolacija za opremu s najvišim naponom opreme od 420 kV i s podnosivim naponima 1050 kV za sklopni udar 250/2500 i 1425 kV za atmosferski udar, 1,2/50 označava se s 420 Si 1050/1425.

Tablica 17.1.

Najviši napon opreme (efektivna vrijednost) kV	Nazivni kratkotrajni podnosivi napon industrijske frekvencije (efektivna vrijednost) kV	Nazivni podnosivi atmosferski udarni napon (tjemena vrijednost) kV
3,6	10	20 40
7,2	20	40 60
12	28	60 75
24	50	95 125
38	70	145 170
123	185 230	450 550
245	275 325 360 395 460	650 750 850 950 1050

Tablica 17.2.

Najviši napon opreme (efektivna vrijednost) kV	Nazivni podnosivi sklopni udarni napon (tjemena vrijednost) kV	Nazivni podnosivi atmosferski udarni napon (tjemena vrijednost) kV
420	950 1050	1050 1175 1175 1300 1425

Da bi se spriječilo prekoračenje naprežanja izolacije, dopušteno samo do onih vrijednosti koje su u ispitivanju utvrđene, upotrebljava se zaštita ventilnim odvodnicima. Zadatak je zaštite u tome da pri nailasku prenapona viših od dopuštenih vrijednosti, smanji njihovu amplitudu na razinu neopasnu za izolaciju, odnosno da tu amplitudu snizi na tzv. udarnu zaštitnu razinu.

Djelotvornost zaštite ventilnim odvodnikom uglavnom ovisi o tome koliko točno i pouzdano neki ventilni odvodnik smanjuje amplitudu nailazećeg vala na veličinu zaštitne razine. Kako smo već napomenuli u poglavlju o odvodnicima, zaštitna je razina određena iznosom tjemene vrijednosti napona koji nastaje nakon prorade odvodnika na njegovim stezaljkama, za struju odvođenja koja je jednaka njegovoj nazivnoj. Te su vrijednosti standardizirane, pa tako za mreže nazivnog napona od 30 (35) 110 i 220 kV, uz pretpostavku da su izvedene po najvišem stupnju izolacije, odgovarajuće su vrijednosti zaštitne udarne razine: 141, 420 i 800 kV.

Te vrijednosti mogu poslužiti pri dimenzioniranju izolacije, uz upotrebu zaštite, onda kad nam zaštitni aparati ili drugi uređaji, odnosno njihova izolacijska karakteristika i prorađni naponi, nisu unaprijed poznati. Tad su nam te vrijednosti osnovna orijentacija u koordiniranju izolacije nekoga elektroenergetskog sistema.

Ako su karakteristike zaštitnog aparata unaprijed poznate, tad se treba prilagoditi tim vrijednostima jer su one dobivene u tvorničkim laboratorijima za razne vrste zaštitnih aparata.

17.2.1. Usklađivanje otpornosti izolacije s veličinom prenapona i zaštitnim aparatima

Mjerama koje su sadržane u načelima »koordinacije izolacije« nastoji se uskladiti ispitana otpornost izolacije, s jedne strane, s prenaponima i zaštitom od njih, s druge strane.

Vidjeli smo da se otpornost izolacije utvrđuje ispitivanjem izolacije sinusoidnim i udarnim naponima.

Da bi se u praksi što jedinstvenije postupalo i bolje uskladila visina izolacijske razine opreme i visina zaštitne razine zaštitnog uređaja, odnosno da bi potrebna razlika između tih vrijednosti bila čvrsta i svugdje u praksi jednaka, uveden je u propise o koordinaciji izolacije i pojam »koeficijenta« koordinacije izolacije. Taj je koeficijent određen odnosom podnosivoga udarnog napona izolacije i zaštitne razine uređaja kojim štitimo opremu. Tako za koeficijent koordinacije izolacije možemo pisati da je:

$$f_k = \frac{\text{podnosivi udarni napon izolacije } (U_i)}{\text{zaštitna razina zaštitnog uređaja } (U_v)}$$

Prema međunarodnim preporukama minimalna vrijednost f_k iznosi:

- 1,4 — za najviši pogonski napon do 24 kV;
- 1,2 — za najviši pogonski napon od 24 kV i više (do 380 kV).

Ako je vrijednost koeficijenta koordinacije izolacije niža od navedenih, smatra se da nema dovoljne razlike između podnosivog udarnog napona izolacije (U_i) i udarne zaštite razine odvodnika U_v . Takva se okolnost rješava odabiranjem odvodnika »više« klase (jer za istu struju rasterećenja ti odvodnici imaju niži preostali napon » U_v « u usporedbi s odvodnicima »niže« klase). Ako to ne možemo postići promjenom odvodnika, mora se povećavati izolacijska otpornost opreme. Naprotiv, odvodnici nazivnog napona višega od minimalno potrebnoga uzimaju se pri velikoj vrijednosti faktora koordinacije, jer se time izbjegava opasnost od popratnih struja.

Uz poznate elemente postrojenja koje se štiti i uz odabrani odvodnik prenapona, sigurnost zaštite (odnosno i veličine f_k koeficijenta zaštite) ovisi mnogo o tome gdje smo odvodnik postavili, dakle ovisi o tome na kojoj je udaljenosti on postavljen od opreme koju moramo štititi.

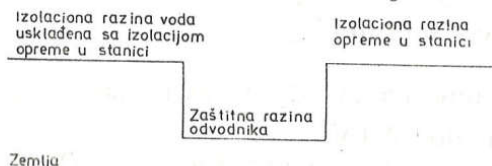
Pri usklađivanju otpornosti izolacije s prenaponima i zaštitom od njih, kao mjeru otpornosti izolacije uzimat ćemo onu otpornost koju ta izolacija ima prema udarnim naponima, odnosno odlučit ćemo se za veličinu podnosivoga udarnog napona U_i .

Obično se ta vrijednost navedena u prospektima, a nije li poznata, do nje se dolazi ispitivanjem na nekoliko komada izolacije ili proizvođa, što smo već opisivali. Međutim, visina udarne izolacijske razine može biti premašena ako na izolaciju u pogonu naiđe prenapon veće tjemene vrijednosti. Da toga ne bude postavljamo zaštitu koja pri nailasku prenapona smanjuje njegovu amplitudu na neopasnu vrijednost, na tzv. zaštitnu razinu ili na preostali napon odvodnika.

Danas se nastoji da sva oprema u stanici i na dalekovodu ima jednaku otpornost, odnosno da ima jednaku izolacijsku razinu, a radi njihove zaštite odvodnicima prenapona pripada onda najniži stupanj izolacije, dakle njima pripada zaštitna razina (sl. 17.1).

Područje na kojem je nakon prorade odvodnika napon što se pojavljuje manji od izolacijskog napona U_i , nazivamo zaštićeni prostor ili zaštitna zona odvodnika. Njezina je veličina ovisna o visini izolacijske i zaštitne razine, dakle o njihovoj razlici, zatim o konfiguraciji postrojenja i mreže, te o očekivanoj strmini nailazećega naponskog vala. Uz pretpostavku da je transformator na završetku voda i da mu je impedancija beskonačna, približnu veličinu zaštitne zone nekog odvodnika prenapona izračunavamo pomoću formule (14.10).

Za U_i i U_v uzimaju se podaci prema nazivnom naponu mreže, koji su standardizirani. Ovdje je dobro pripomenuti da su saznanja pokazala kako pri djelovanju odvodnika prenapona na štićenom objektu nastaju titrajući naponi viši od onih koje je odvodnik propustio. Oni se pojavljuju onda kad je odvodnik dosta udaljen od objekta koji štitimo, a po primaju najvišu tjemenu vrijednost u prvoj poluperiodi svoga oscilator-



Sl. 17.1. Odnos između razina izolacije i zaštitne razine odvodnika

nog kretanja. Zato stručnjaci misle da je opremu potrebno ispitivati i odrezanim valom koji se dobiva rezanjem na hrptu punog vala u trenutku $3 \mu s$. Taj bi odrezani val dovoljno realno nadomjestio titrajnu pojavu barem što se tiče naponskog naprezanja. Time bi izolacija u cjelini bila još realnije ispitana s obzirom na naprezanja koja se očekuju u pogonu, jer su naprezanja pri ispitivanju odrezanim valom kod izolacije veća nego što je to s punim valom. Tako bismo izolaciju dimenzionirali na osnovi izolacijske otpornosti koju ona pokazuje prema odrezanim valovima, a ona je oko 15% veća od one čvrstoće što je izolacija pokazuje kad je ispitujemo punim udarnim valovima. Međutim, o tome nema konačnih propisa.

Konvencionalna metoda koordinacije izolacije u određivanju udaljenosti odvodnika prenapona u postrojenjima služi se i točnijim matematičkim postupcima. Pri tome se uzimaju u obzir udarni kapaciteti objekta koji štitimo, induktiviteti priključka itd.

Primjer 17.1.

a) Kolika je zaštitna zona odvodnika prenapona postavljenoga u 220-kV-noj mreži da štiti transformator kojemu je puna udarna izolacijska razina $U_i = 1\,050$ kV, kad zaštitna razina postavljenog odvodnika prenapona iznosi 800 kV? Pretpostavljena strmina nailazećega naponskog vala neka bude $1\,500$ kV/ μs (25 m).

b) Izračunajte prema podacima iz prethodnog zadatka koeficijent zaštite i kontrolirajte premašuje li se minimalno dopuštena vrijednost ($f_k > 1,2$ zadovoljava).

c) Kolika bi morala biti zaštita razina odvodnika prenapona u 110 kV-noj mreži, kojoj je puna udarna izolacijska razina opreme $U_i = 550$ kV, ako je odvodnik postavljen 20 m od objekta koji štiti uz pretpostavljenu strminu nailazećeg vala od $1\,000$ kV/ μs ($U_v = 420$ kV)?

17.3. Dimenzioniranje izolacije primjenom statističko-matematičkih metoda

Klasične ili konvencionalne metode koordinacije izolacije nastale su nakon što je prihvaćeno mišljenje da izolacija mora izdržati najnepovoljnije naponske uvjete u pogonu. Pošlo se, naime, s gledišta da svaka izolacija mora izdržati najveću tjemenu vrijednost prenapona u svakoj kategoriji prenapona. Zato je za dimenzioniranje izolacije uzeta kao osnova ta najveća tjemena vrijednost očekivanog napona, koja je, radi sigurnosti, još povećana, odnosno pomnožena je nekim koeficijentom sigurnosti. Za taj način koordinacije izolacije potrebno je poznavati veličine svih mogućih vrsta prenapona, njihov oblik, pa zatim na osnovi iskustva odabrati najnepovoljnije uvjete.

Međutim, budući da su takve najnepovoljnije prilike vrlo rijetke, ovaj pristup ne pruža projektantu mogućnost da pronađe najekonomičniji način dimenzioniranja izolacije.

Novi pristup ovoj problematici ne polazi sa stajališta da izolacija mora izdržati najnepovoljnije uvjete, nego eventualno dopušta da ona bude i probijena pri nailasku nekih rijetko velikih vrijednosti prenapona. Naime, novijim metodama u dimenzioniranju izolacije dopušta se neki »riziko«. Veličina tog rizika ustanovljuje se statističko-matematičkim metodama.

Da bismo odredili tu veličinu valja temeljito izvršiti analizu pojave prenapona, a jednako tako i analizu otpornosti izolacije koju upotrebjavamo u nekome elektroenergetskom sistemu i za koju očekujemo da će biti napregnuta tim prenaponima.

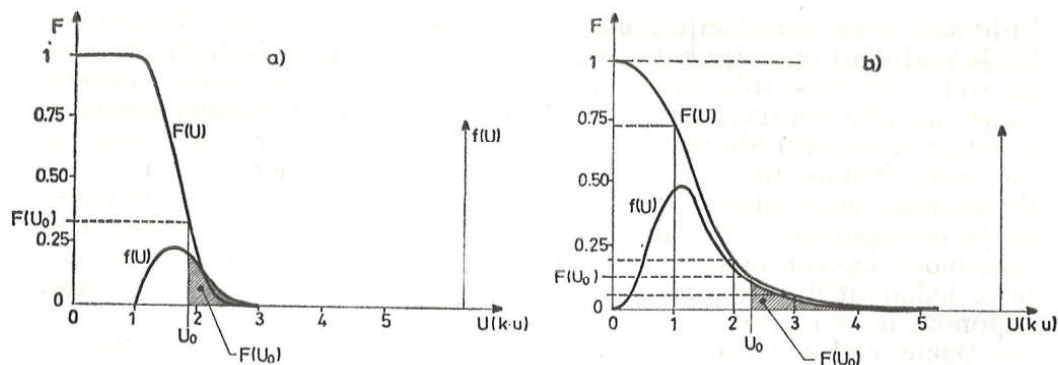
17.3.1. Slučajna priroda prenapona

Najprije, u analizi za svaki prenapon treba poznavati razlog zbog kojega je nastao i mjesto gdje se on pojavljuje, odnosno mjesto gdje se on utvrđuje npr. mjernim metodama. Tako se može govoriti o atmosferskom prenaponu na kraju otvorenog voda što ga je izazvao udar groma u vodiče, ili pak negdje drugdje. Može se dalje govoriti i o bilo kojoj vrsti pogonskog prenapona što je izmjeren jednako tako na kraju voda, a nastao je bog ukapčanja voda na početku itd.

Pažljivije su analize dalje pokazale da prenaponi uzrokovani atmosferskim smetnjama i mjereni na istome mjestu nemaju jednaku vrijednost jer jačina struje groma nije uvijek jednaka. Također se dade utvrditi da i unutrašnji (pogonski) prenaponi, opet mjereni na istome mjestu, nemaju uvijek jednake vrijednosti jer njihova veličina opet ovisi npr. o trenutku iskapčanja ili ukapčanja nekoga električnog kruga.

Dakle, prenaponi uzrokovani na jednak način i mjereni na istome mjestu nemaju svaki put kad se pojave jednaku vrijednost, nego se ona mijenja. Sve te vrijednosti prenapona iz istih razloga i mjerene na jednome mjestu čine jednu skupinu ili »familiju« prenapona (npr. familiju atmosferskih prenapona). Koja će se vrijednost prenapona iz te skupine pojaviti, to se ne može unaprijed znati, niti se to dade sa sigurnošću predvidjeti. Zato svakoj mogućoj veličini amplitude prenapona, unutar jedne skupine prenapona, pridružujemo neku vjerojatnost da će ona nastupiti. Dakle, veličinu amplitude nekog prenapona možemo kvalificirati u statističko-matematičkom smislu kao »slučajnu varijablu.« To praktički znači da prenapon neke amplitude može nastupiti, ali se to sigurno ne mora dogoditi, jer nastup prenapona određene veličine ovisio više činilaca koji se ne dade nekim matematičkim pravilom obuhvatiti. Na primjer, pri nekom iskapčanju ili udaru groma, amplituda prenapona može biti ili manja ili veća od očekivane iz mnogo različitih razloga.

No, budući da nas za naše razmatranje (dimenzioniranje izolacije) ne zanima nastup manjih vrijednosti prenapona od neke sigurnosne vrijednosti, npr. od neke vrijednosti što ćemo je ovdje označiti s U_0 , i koju izolacija može izdržati, razmatrat ćemo samo one vrijednosti koje premašuju tu sigurnosnu vrijednost U_0 . Da bismo našli tu vjerojatnost, morali smo na dijagramima na slikama 17.2.a i 17.2.b svim tim događajima, dakle svim mogućim vrijednostima prenapona U , pridružiti neku određenu vjerojatnost $F(U)$ da će ona biti premašena. Zato je na tim dijagra-



Sl. 17.2. a) Pogonski prenaponi na kraju otvorenog voda b) Atmosferski prenaponi na krajevima izolatorskog lanca na dalekovodu

mima među svim tim vjerojatnostima označena i vjerojatnost $F(U_0)$ da će prenapon veličine U_0 biti premašen. Na dijagramu na slici 17.2.a prikazana je raspodjela vjerojatnosti za veličine unutrašnjih prenapona koje se pojavljuju pri iskapčanju nekog voda u praznom hodu, a na dijagramu na slici 17.2.b raspodjela je vjerojatnosti veličine atmosferskih prenapona što nastaju na krajevima nekoga izolatorskog lanca.

Čitajući dijagram na slici 17.2.a uočavamo ove vjerojatnosti $F(U)$ da će biti premašen neki prenapon U :

$$F(0) = 100\%, \quad F(1) = 100\%, \quad F(2) = 20\%, \quad F(3) = 0\%.$$

Dakle, svi se mogući slučajevi prenapona prema dijagramu nalaze u intervalu između $U = 1$ u i $U = 3$ u, gdje je brojkama 0, 1, 2, 3, 4, ... označen faktor prenapona k , a s »u« je obilježen napon voda prema zemlji.

Kako vidimo, svi se mogući slučajevi amplituda prenapona i njihove pridružene vjerojatnosti nastoje zbiti u intervalu između 1 u i 3 u, pa tu funkciju nazivamo gustoćom vjerojatnosti, i nju smo na dijagramima na slikama 17.2.a i označili s $f(U)$. I dok nam funkcija $F(U)$ pokazuje na ordinati brojčano vjerojatnost da će nam neka vrijednost amplitude prenapona U_0 biti premašena, jednako tako nam funkcija $f(U)$ veličinom površine koju ona pod sobom zatvara otkriva kolika je vjerojatnost da će amplituda prenapona U_0 biti premašena (iscrtani dio površine). To su dva različita načina prikazivanja istih vrijednosti. Do toga drugog načina predočivanja odnosno do funkcije gustoće vjerojatnosti, došli bismo matematički ako bismo funkciju $F(U)$ derivirali. Za daljnja razmatranja praktičnija će biti upotreba drugog načina prikazivanja jer se bolje uočavaju odnosi između pojave prenapona i otpornosti izolacije.

17.3.2. Slučajna priroda otpornosti izolacije

Prije nego prijedemo na analizu otpornosti izolacije i prije nego utvrdimo prirodu te otpornosti prema naprezanjima koja se u njoj pojav-

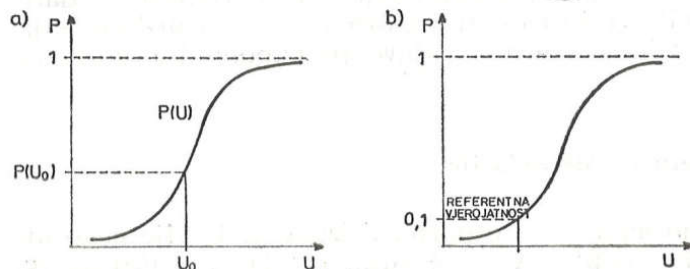
Ijuju kad se na tu izolaciju djeluje određenim naponom, potrebno je izolacije podijeliti na dvije kategorije. U prvu se ubrajaju izolacije kao što su zrak, plin, ulje itd., dakle one što se malo vremena nakon proboja same od sebe regeneriraju i poprimaju ubrzo svoja izvorna svojstva. U drugu kategoriju idu one izolacije, većinom unutrašnje, kao što su papir, razne tkanine itd., koje se nakon proboja ne regeneriraju i možemo ih smatrati uništenima u električnom smislu. Ako podvrgnemo ispitivanju na otpornost jedan uzorak iz prve skupine, uzimajući uvijek istu vrijednost napona, opazit ćemo da neće svaki put biti proboja. Izolacija će jedanput ili više puta taj napon izdržati, a više će puta pod istim naponom neće izdržati.

Dakle, kad djelujemo naponom određene veličine na neku izolaciju, mi ne možemo tvrditi sa sigurnošću da će na toj izolaciji nastati proboj. To se može dogoditi, ali i ne mora. Dakle, tim ćemo probojima koji ipak nastaju pridružiti samo neku vjerojatnost nastanka i govoriti da je proboj izolacije također slučajni događaj. Tako, ako smo na tu izolaciju djelovali »N« puta naponom U_0 (uvijek jednake amplitude i oblika) i ako zbrojimo za vrijeme tih pokusa broj proboja »n« koji se dogodio, onda možemo reći da je vjerojatnost za proboj pri tom naponu $P(U_0) = \frac{n}{N}$.

Promijenimo li napon na višu ili nižu vrijednost amplitude, promijenit će se i odnos $\frac{n}{N}$ na višu ili nižu vrijednost. Dakle, uz viši napon bit će više proboja, a niži će napon izazvati manje proboja, naravno u istom pokusu. Na takav način dolazimo do raspodjele vjerojatnosti proboja $P(U)$ za bilo koju vrstu regenerativne izolacije, što je prikazano na slikama 17.3.a i b.

Razumije se da je za razne oblike elektroda ili za drugi razmak elektroda ta funkcija raspodjele vjerojatnosti proboja različita. Međutim, za jedan oblik elektroda i za jedan čvrsti razmak između njih funkcija raspodjele vjerojatnosti proboja se ne mijenja. Rekli smo da pri tome vrijedi pravilo: veći napon i veća vjerojatnost proboja. Zato ćemo dalje reći da će onda sigurno biti neka vrijednost napona U pri kojem će nastati 50% proboja, a 50% ne. Takav napon označavamo s U_{50} . Krivulje na slikama 17.3.a i b su prilično simetrične prema toj vrijednosti napona, pa se ta vrijednost napona uzima kao čvrsti parametar u analitičkom izrazu koji vrijedi za te krivulje dobivene ispitivanjem, a glasi da je:

$$P(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot \delta}} \int e^{-\frac{(U - U_{50})^2}{2\delta^2}} du. \quad (17.1)$$



Sl. 17.3. a) Vjerojatnost da će izolacija biti probijena kod prenapona U_0 ; b) Odabrani podnosiivi statistički napon

Tu je s δ označena standardna devijacija definirana razlikom probojnih napona koji nastaju pri 50% i 16% vjerojatnosti. Na osnovi toga dobivamo:

$$\delta = U_{50} - U_{16} \text{ (kV)},$$

pa budući da je raspodjela simetrična, bit će također:

$$\delta = U_{84} - U_{50} \text{ (kV)}.$$

Dakle, možemo krivulje na slikama 17.3.a i b izračunati ako prethodno ispitivanjem doznamo ta dva parametra i nisu nam potrebni svi pokusi, nego samo oni kojima se utvrđuju vrijednosti napona U_{50} i U_{16} .

Treba, dalje, upozoriti na to da se izolacija ne mora i dimenzionirati na napon kod kojega vlada vjerojatnost da će biti 50% proboja na izolaciji, već se može uzeti i neka druga vrijednost napona pri kojem je vjerojatnost da će biti još manji broj proboja. Tako se preporučuje uzeti za dimenzioniranje izolacije onaj napon sa samo 10% proboja, odnosno pri kojem u ostalih 90% slučajeva neće doći do proboja. Taj napon nazvan je statistički podnosivi napon, a vjerojatnost proboja kod tog napona naziva se referentna vjerojatnost (sl. 17.3.b).

Vjerojatnost se proboja i kod regenerativnih izolacija ipak s vremenom nešto mijenja jer ovisi o prilikama u atmosferi, pa će se fizičko stanje izolacije ipak malo promijeniti. Na izolaciju, naime, utječe vlaga, tlak, temperatura itd.

No, kod kategorije regenerativnih izolacija moguće je ipak ustanoviti statistički podnosivi napon, pa se on s više ili manje odstupanja može odrediti i smatrati konstantnim.

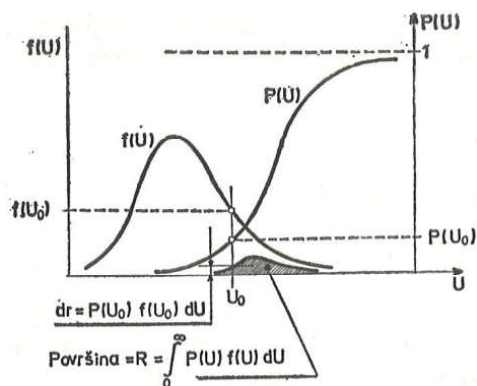
Naprotiv, kod neregenerativnih izolacija ne da se uopće naći statistički podnosivi napon, jer na tim izolacijama nije moguće bez trajnih oštećenja izvoditi pokuse. Tu se kao podnosivi napon uzima onaj pri kom izolacija izdrži 100% svih udara. Zato se statističko-matematička metoda u dimenzioniranju izolacije primjenjuje samo kad su u upotrebi regenerativne izolacije. Istraživanja ove problematike tek su u početku pa se i metode dadu upotrijebiti samo u jednostavnim primjerima kod regenerativnih izolacija što se susreću u praksi.

17.3.3. Dimenzioniranje izolacije s obzirom na prenapone

U prethodnim izlaganjima ustanovili smo kako se u klasičnom ili konvencionalnom načinu polazi sa stajališta da izolacija mora izdržati najnepovoljnije uvjete, odnosno maksimalnu tjemenu vrijednost u svakoj kategoriji prenapona koja je, radi veće sigurnosti, još nešto povećana.

Naprotiv, u dimenzioniranju izolacije na osnovi statističko-matematičkih metoda oslanjamo se na jednu drugu veličinu, na tzv. riziko proboja.

O riziku proboja možemo govoriti kad odaberemo neki skup prenapona ako mu poznamo bilo koju tjemenu vrijednost U_0 , koja može na-



Sl. 17.4. Proračun rizika proboja neke izolacije

je dalje diferencijalna vjerojatnost u okolišu vrijednosti U_0 da će se vrijednost U_0 pojaviti $f(U_0) dU$, onda se elementarni riziko proboja prema pravilima o složenoj vjerojatnosti može definirati da je $dr = P(U_0) \cdot f(U_0) \cdot dU$. Uzimajući i sve moguće vrijednosti prenapona U koje se mogu pojaviti, a ne samo vrijednosti U_0 , dobit ćemo ukupni riziko proboja ili riziko defekta. On se izračunava integriranjem svih tih elemenata rizika proboja u granicama od 0 do ∞ , pa je:

$$R = \int_0^{\infty} P(U) f(U) \cdot dU, \quad (17.2)$$

što je na slici 17.4. predloženo iscrtanom površinom. Za svaki događaj (grom, uklapanje, isklapanje nekog voda itd.) moguće je na taj način računati riziko proboja za neku određenu vrstu izolacije postavljenu negdje u postrojenju. Ako promijenimo vrstu izolacije, tj. uzmemo neku slabiju ili bolju, onda će nam se i riziko proboja mijenjati. On će za slabiju izolaciju biti veći, a za bolju manji.

Prema tome bi položaj krivulje raspodjele vjerojatnosti proboja izolacije $P(U)$ za manji ukupni riziko proboja bio više pomaknut prema desnoj strani slike, a za veći riziko proboja prema lijevoj strani od onoga položaja koji sad na slici 17.4. zauzima. Moguće je takav način odrediti riziko proboja da nam on bude manji od neke unaprijed dopuštene vrijednosti, pa tako dimenzionirati izolaciju što će se na konkretnom primjeru pokazati.

Što se tiče granica primjenjivosti prikazanih metoda već smo ustanovili da se one mogu primijeniti, za sada, samo kod regenerativnih izolacija, i to samo u jednostavnijim primjerima. Međutim, neki autori misle da bi one odgovarale i prilikom upotrebe neregenerativnih izolacija, npr. kod izolacije transformatora i kabela. Ali, kod neregenerativnih izolacija nije se dosad mogla utvrditi raspodjela vjerojatnosti proboja, pa je onda nemoguće pristupiti proračunu »rizika proboja.«

Iz dosadašnjih izlaganja razabire se da je važno projektantu nekog postrojenja odabrati pravu veličinu (vrijednost) rizika proboja jer se

stupiti, te kad se smatra vjerojatnim da će na odabranoj izolaciji pri toj veličini nastati proboj. Na primjer, moći će se govoriti o riziku proboja vanjske izolacije nakon nekoga mjernog transformatora koji se nalazi na kraju nekog dalekovoda kad taj dalekovod na početku ukapčamo u praznom hodu.

Da bismo izračunali riziko proboja, moraju nam biti unaprijed poznate statističke raspodjele prenapona i proboja izolacije, kako je to prikazano na slici 17.4.

Ako odaberemo na toj slici npr. vrijednost U_0 koja može probiti izolaciju uz vjerojatnost $P(U_0)$, pa ako

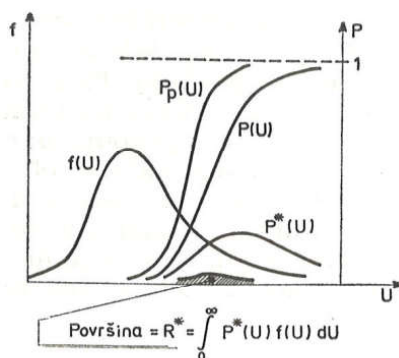
riziko može uzeti veći ili manji. Dobar će izbor te vrijednosti biti samo onda ako se dobro razmotre i ocijene ekonomske posljedice, bile one direktne ili indirektne, koje mogu nastupiti pri nekom probodu. Pa tako dolazimo do još jedne veličine, »cijene rizika«, koja se dobiva množeći »riziko proboda« »cijenom posljedica proboda.« Riziko se proboda prema tome može uzeti veliki ako je cijena posljedice proboda mala, ili obrnuto. Naravno da poslije računanja odabir veličine rizika proboda ostaje i dalje stvar subjektivne ocjene projektanta. Međutim, projektant koji je naviknut i ima iskustvo s proračunima rizika proboda zna da se može govoriti o većem ili manjem riziku proboda samo ako odnos između ta dva rizika iznosi približno 10.

17.3.4. Dimenzioniranje zaštićene izolacije

Dosad smo izračunavali riziko proboda koji se pojavljuju kad prenaponi bilo kakve veličine nailaze neposredno na neku izolaciju. Međutim, taj smo jednostavni primjer izložili samo zato da bi nam pojam i postupak računanja rizika proboda bio što jasniji. Prilike u praksi nisu takve. Sve izolacije, npr. kod transformatora, generatora, izolatorskih lanaca itd. zaštićene su bilo odvodnikom prenapona, bilo iskrištem i sl. Dakle, na izolaciju koju želimo štititi ne djeluju sve veličine prenapona, nego samo neke, i to određene vrijednosti. Prema tome, kao tipično za stvarne prilike treba razmatrati primjere izolacije štice nekim zaštitnim sredstvom. Možemo odmah reći da se i tu prilikom dimenzioniranja izolacije dosadašnji kriterij u primjeni statističko-matematičkih metoda u osnovi ne mijenjaju. Postupak, doduše postaje nešto složeniji jer sad osim glavne izolacije koju štitimo, imamo ispred nje paralelno priključen odvodnik ili iskrište, odnosno još neku slabiju izolaciju kojom štitimo glavnu izolaciju. Složenost tog postupka računanja rizika opravdava i dalje da se osim naziva dimenzioniranje izolacije upotrebljava i naziv za tu problematiku »koordinacija izolacije.« Prema klasičnoj metodi mi bismo jednostavno nastojali uskladiti najveću moguću amplitudu prenapona na štice na objektu što bi se mogao pojaviti nakon djelovanja zaštitnog aparata sa zaštitnom razinom samog aparata. Naime, nastojali bismo da nam zaštitni aparat, svojim osobinama i položajem u postrojenju, ne dopusti na štice na objektu napon viši od dopuštene podnosive naponske razine izolacije koju štitimo. Koristeći se statističko-matematičkim metodama postupak je nešto drukčiji.

Budući da smo ustanovili kako ni u tim okolnostima ne mijenjamo dosad iznešeni princip rješavanja problema pomoću statističko-matematičkih metoda, bit će dovoljno da za račun rizika proboda R krivulju raspodjele vjerojatnosti proboda izolacije koju želimo štititi $P(U)$ zamijenimo analognom krivuljom raspodjele vjerojatnosti proboda $P^*(U)$ koja vrijedi za izolaciju što pred sobom ima neki zaštitni aparat (sl. 17.5).

Zbog toga što se odvodnici ili iskrišta itd. mogu smatrati izolacijom, ali slabijom od one koju oni štite, krivulja će se raspodjele vjerojatnosti proboda $P_p(U)$ njihove izolacije nalaziti ispred krivulje raspodjele vjerojatnosti proboda izolacije $P(U)$ koju želimo štititi.



Sl. 17.5. Dimenzioniranje izolacije koja je štićena

Probojima paralelno postavljene izolacije zaštitnih aparata koji nastaju kod napona nižih od onih što bi izazivali proboje na izolaciji koju želimo štititi, dobiva se krivulja $P^*(U)$. Ona pokazuje da pri višim naponima izolacija koju štitimo neće tako lako probiti, što je i razum-

ljivo jer je već prije toga proradio odvodnik ili iskrište zbog djelovanja velikih prenapona obuhvaćenih krivuljom $f(U)$.

Vjerojatnost proboja $P^*(U)$ neke zaštićene izolacije, tj. vjerojatnost da se neka izolacija paralelna nekoj drugoj izolaciji probije, određuje se eksperimentalno, ispitivajući obadvije izolacije u paralelnom spoju. Ta se vjerojatnost daje izračunati poznavajući prije toga raspodjelu vjerojatnosti proboja za jednu i drugu izolaciju.

17.3.5. Dimenzioniranje zaštitnih aparata

Katkad valja dimenzionirati izolaciju zaštitnog aparata neovisno o objektu što će ga on štititi. Na primjer, recimo da moramo dimenzionirati izolaciju nekog iskrišta ili nekog odvodnika prenapona. Ako je to izolacija iskrišta, ona može biti dimenzionirana kao svaka druga s manjim ili većim rizikom proboja. Međutim, budući da će ono biti poslije paralelno vezano nekom objektu koji treba štititi, tad je dobro da se ta izolacija dimenzionira s većim rizikom proboja od onoga na koji je dimenzionirana izolacija tog objekta. Naravno da se mora pripaziti da to povećanje rizika proboja ne bude baš puno veće od rizika proboja izolacije koju štitimo, jer bi to, opet, uzrokovalo druge teškoće. Iskrište bi, naime, stvaralo svaki čas kratki spoj.

Ako je riječ o izolaciji odvodnika prenapona, tad se za njegovo statističko dimenzioniranje uzima kao osnova »riziko prskanja.« Pri tome riziko njegove normalne prorade nije potrebno ničim ograničavati kao kod iskrišta jer se tad ne očekuju nikakve smetnje ni štete.

U računanju »riziko prskanja« ili »riziko razaranja« moraju se razmotriti unutrašnji prenaponi koji imaju veliku energiju, dakle valja uzeti u obzir mogućnost da veličina unutrašnjeg prenapona visokog sadržaja energije nadvisi napon prorade ventilnog odvodnika, a da se istodobno odvodnik nađe i pod djelovanjem atmosferskog prenapona. Tad bi izolacija i promjenljivi otpori u odvodniku bili izloženi jakim naprezanjima.

Treba zato paziti da veličina unutrašnjeg prenapona nikad ne dosegne veličinu napona prorade nekog odvodnika ako on nije posebno za takva naprezanja konstruiran.

17.3.6. Usklađivanje izolacije u transformatorskoj stanici od 400 kV

Uzmimo konkretni primjer usklađivanja izolacije gdje ćemo primijeniti sve dosadašnje principe stupnjevanja izolacija pomoću statističko-matematičkih metoda. Budući da se 400 kV-na mreža sve više upotrebljava, odabrat ćemo primjer dimenzioniranja izolacije 400 kV-ne transformatorske stanice više ili manje tipične za evropske električne mreže. Jednopolnu shemu takve transformatorske stanice nalazimo na slici 17.6, gdje su odvodnici prenapona smješteni uz transformatore i čvrsto s njima povezani.

U takvim okolnostima se udomaćilo da od svih aparata u stanici samo izolacija transformatora bude dimenzionirana kao štice izolacija. Izolacije drugih aparata koji se nalaze u transformatorskom polju mogu se smatrati nezaštićenim pri nailasku prenapona u času kad je transformator iskopčan, jer odvodnik ne djeluje. Jednako tako izolacije ostalih aparata mogu se smatrati nezaštićenima od djelovanja prenapona i kad je transformator ukopčan, ali ako su ostali aparati relativno daleko ispred odvodnika prenapona (jer su onda izvan zaštitne zone odvodnika).



Sl. 17.6. Stupnjevanje izolacije u transformatorskoj stanici od 400 kV

Međutim, iako je izolacija transformatora štice odvodnicima i na nju ne mogu, redovito, djelovati nekontrolirani prenaponi, ipak se ona dimenzionira tako da izdrži i najveća naprezanja, koja su rijetka, ali se ipak mogu pojaviti. Dakle, ona se ipak jače dimenzionira od drugih izolacija u stanici.

To može izgledati apsurdno s obzirom na to da je ta izolacija štice odvodnikom prenapona, ali takav postupak opravdava činjenica što je transformator u sklopu jedne transformatorske stanice vrlo važan aparat. Osim toga potrebno je voditi računa i o tome da se mogu pojaviti i sasvim izuzetni i rijetki prenaponi koji se ne uzimaju u obzir pri dimenzioniranju izolacije na drugim aparatima. Takvi prenaponi npr. mogu nastati nepredvidivo onda kad ostali aparati u stanici zakažu ili kad sam odvodnik prenapona ne pruža sasvim sigurnu zaštitu.

Izolacija za koju smatramo da bi mogla biti nezaštićena odvodnikom prenapona može biti podijeljena, sa stajališta sigurnosti pogona, na neza-

štićenu izolaciju »koja je kritična« i na nezaštićenu izolaciju »koja nije kritična« (sl. 17.6). Na jednoj i drugoj normalno bi mogao nastati proboj, ali proboj na kritičnoj izolaciji izaziva kvar na vitalnim dijelovima stanice, kao što su to sabirnice, a na onoj što nije kritična kvar će se lako odstraniti otvaranjem samo prekidača (to je obično izolacija dalekovoda). Zbog toga se prilikom dimenzioniranja izolacije koja je kritična uzima manji riziko proboja, a za onu koja nije kritična dobro se odlučiti za veći riziko proboja.

Dalje, izolaciju koju smatramo da može biti nezaštićena odvodnikom prenapona podijelit ćemo, sa stajališta izloženosti nekom naprezanju, još na »izolaciju koja je izložena« i »izolaciju koja nije izložena«.

Izloženom izolacijom smatramo onu u polju nadzemnog voda. Jer ako je slučajno prekidač nadzemnog voda otvoren, nastupit će prilikom djelovanja unutrašnjih i vanjskih prenapona na tom mjestu visoke vrijednosti napona zbog refleksije valova.

Izolacijom koja nije izložena smatramo onu što je u blizini sabirnica pa i onu koja pripada sabirnicama. Ona je manje podvrgnuta naprezanjima koja izazivaju unutrašnji i vanjski prenaponi. Ti su prenaponi po vrijednosti ublaženi prigušenjem, a i zbog relativno manjega valnog otpora cijelog sklopa transformatorske stanice. Općenito bi se moglo reći da kritična izolacija nije izložena jakim prenaponima, a da na izolaciju koja nije kritična djeluju veće vrijednosti prenapona. Te povoljne okolnosti u kojima se nalazi nezaštićena izolacija dopuštaju da se ona uglavnom jednako dimenzionira.

Ovdje je dobro spomenuti da se izolacija u polju nadzemnog voda dimenzionira na unutrašnje prenapone, ali onda njezina otpornost prema atmosferskim prenaponima nije dovoljna i tu može biti neželjenih proboja. Zato je dobro na te ulaze postaviti zaštitno iskrište ili cijevne odvodnike, ali pri tome moramo paziti na to da nam iskrište ne reagira na unutrašnje prenapone, pa ga zato dimenzioniramo sa što manjim »rizikom proboja«.

17.4. Pojednostavljena metoda koordinacije izolacije

Kad bismo na osnovi prethodnih izlaganja pokušali izračunati u praksi neki konkretni primjer, naišli bismo na velike teškoće. Da se dobije krivulja raspodjele vjerojatnosti po kojoj se ravnaju proboji na nekoj izolaciji, a jednako tako i krivulja gustoće vjerojatnosti po kojoj se ravnaju prenaponi, morali bismo izvesti vrlo mnogo pokusa, bilo na izolaciji koju želimo upotrijebiti, bilo na nekom postrojenju. To nije tako lako ostvariti.

Zato se u pojednostavljenoj metodi koordinacije izolacije polazi sa stajališta da su nam i jedna i druga krivulja poznate. Odnosno da je već netko prije toga barem približno utvrdio osnovne podatke o raspodjela gustoće prenapona i o izolacijskoj otpornosti. Po toj pojednostavljenoj metodi ne promatramo i ne računamo, pa zato i ne usklađujemo međusobno cijele tokove jedne i druge pojave da bismo došli do veličine rizika proboja, nego uzimamo iz jedne i iz druge krivulje raspodjele samo pojedine referentne vrijednosti. Te dvije, sad nam poznate vrijednosti,

omogućuju da koristeći se pojmovima iz konvencionalne metode koordinacije izolacije, dođemo do rezultata.

— Prva vrijednost koju uzimamo iz raspodjele vjerojatnosti izolacijske otpornosti je sad statistički udarni podnosivi napon U_{10} . Njegovu tjemenu vrijednost odabiremo tako da nam na izolaciji, pri ispitivanju tom vrijednošću napona, samo u 10% slučajeva nastupi proboj ili preskok, a u 90% slučajeva izolacija taj napon mora izdržati [$P(U) = 10\%$, $Q(U) = 1 - P(U) = 90\%$].

— Druga vrijednost koju uzimamo iz raspodjele gustoće unutrašnjih ili vanjskih prenapona je statistički udarni unutrašnji ili vanjski prenapon U_0 . Njegovu tjemenu vrijednost odabiremo tako da bude velika, ali ne i najviša od svih tjemenuh vrijednosti prenapona koje se mogu pojaviti. Dakle, odabiremo takvu tjemenu vrijednost prenapona za koju ima vjerojatnosti (barem male) da će biti i premašena. Tu vrijednost prenapona tražimo samo među ograničenim brojem pojava u sistemu, npr. među prenaponima koji se stvaraju pri uklapanju dalekovoda, ili pri kvaru itd.

Ako dobro promatramo međusobni odnos jedne i druge krivulje, odnosno međusobni položaj krivulja raspodjele otpornosti izolacije i krivulja raspodjele gustoće prenapona, opazit ćemo da je ovisno o njihovu položaju definirana i vrijednost rizika defekta:

$$R = \int_0^{\infty} P(U) \cdot f(U) \cdot dU.$$

Budući da smo mi iz svake od tih krivulja kod pojednostavljene metode uzeli samo po jednu čvrstu vrijednost, reći ćemo da će se mijenjanjem vrijednosti odnosa tih veličina:

$$\gamma = \frac{U_{10}}{U_0} \quad (17.3)$$

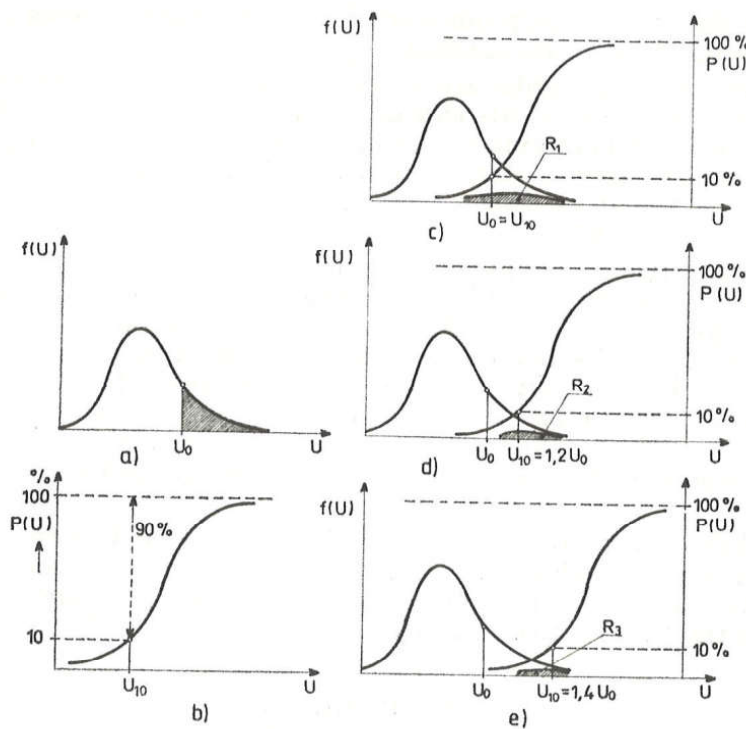
mijenjati i veličina rizika defekta R . Dakle, drugim riječima, iz veličine odnosa ocijenit ćemo riziko defekta R . Veličina γ zato je i dobila naziv faktor sigurnosti, što podsjeća na faktor zaštite u konvencionalnoj metodi koordinacije izolacije. Radi boljeg razumijevanja, na slikama od 17.7.a do 17.7.e samo je grafički kvalitativno prikazano kako se mijenja riziko defekta za vrijednost faktora sigurnosti $\gamma = \frac{U_{10}}{U_0} = 1,0, 1,2$ i $1,4$.

Oznake na pojedinim dijagramima imaju ovo značenje:

a) statistički prenapon U_0 na krivulji raspodjele gustoće prenapona za koji ima vjerojatnosti da će biti premašen samo u 2% slučajeva (iscrtkana površina);

b) statistički podnosivi napon izolacije U_{10} na krivulji raspodjele vjerojatnosti proboja kojemu odgovara 10% preskoka;

c) do e) rezultirajući riziko defekta R za sigurnosne faktore $\gamma = U_{10}/U_0 = 1,0, 1,2$ i $1,4$.



Sl. 17.7. Pojednostavnjena statistička metoda koordinacije izolacije

Na slici 17.8. potanje je izračunato i grafički prikazano kako se mijenja riziko proboja općenito ovisno o faktoru sigurnosti γ . Tok i položaj pravca na toj slici otkriva kako za veći faktor sigurnosti γ imamo manji riziko defekta (preskok, proboj). Taj dijagram vrijedi za računanje rizika defekta koji nastaje zbog unutrašnjih prenapona. Tako bi slično izgledao kad bi to bili vanjski prenaponi.

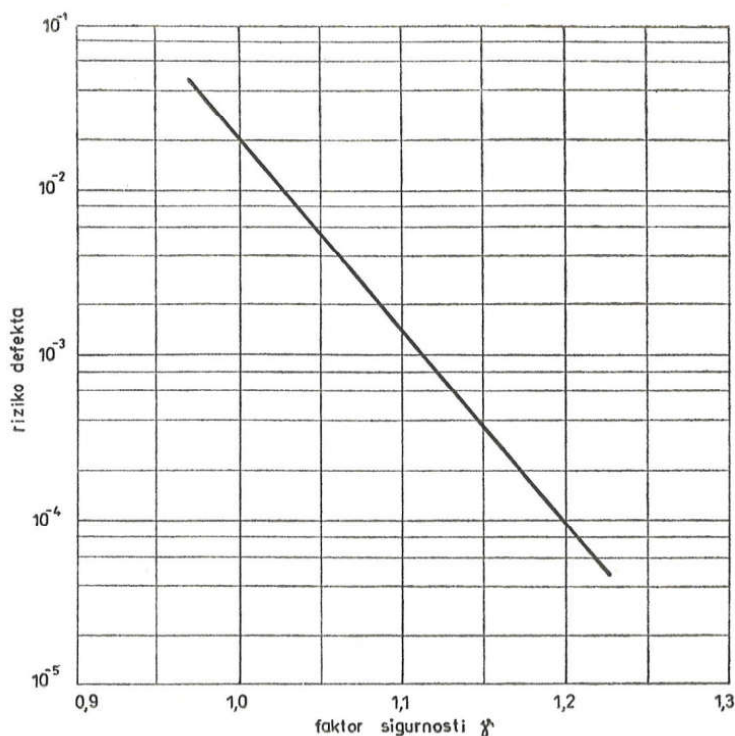
Vrijednosti rizika defekta ili rizika proboja mogu se očitati iz dijagrama, a mogu se i izračunavati, što će se pokazati na primjerima.

Primjer 17.2.

Na mreži nazivnog napona od 400 kV na mjestu gdje je ugrađen rastavljač može se, zbog djelovanja APU, pojaviti prema tlu prenapon tjemene vrijednosti $U_0 = 930$ kV. Taj će prenapon biti premašen samo u 2% svih slučajeva prenapona na mreži. Treba odrediti statistički podnosivi napon izolacije U_{10} uz najveći riziko defekta od $R = 10^{-3}$.

Rješenje:

Podnosivi napon izolacije je $U_{10} = \gamma U_0$. Iz dijagrama na slici 17.8. za $R = 10^{-3}$ dobivamo da je faktor sigurnosti $\gamma = 1,1135$, pa nam podnosivi napon izolacije mora biti $U_{10} = 930 \cdot 1,1135 = 1035,6$ kV.



Sl. 17.8. Riziko proboja ovisno o sigurnosnom faktoru γ

Primjer 17.3.

Na mreži nazivnog napona od 400 kV na mjestu ugradnje rastavljača statistički podnosivi napon neka bude $U_{10} = 950$ kV, a statistički prenapon koji se može pojaviti neka, kao u prošlom primjeru, iznosi 930 kV. Valja izračunati faktor sigurnosti i otčitati iz dijagrama riziko defekta R .

Rješenje:

Faktor sigurnosti je $\gamma = \frac{U_{10}}{U_0} = \frac{950}{930} = 1,02$. Iz dijagrama na slici 17.8. tom faktoru sigurnosti odgovara riziko proboja $R = 1,05 \cdot 10^{-2}$.

Primjer 17.4.

Statistički podnosivi napon U_{10} na mjestu ugradnje rastavljača iste mreže iznosi 1 050 kV, a prenapon U_0 koji se može pojaviti na tom mjestu neka, kao u prošlom primjeru, bude 930 kV. Izračunajte riziko defekta R i faktor sigurnosti.

Rješenje:

Faktor sigurnosti je $\gamma = \frac{U_{10}}{U_0} = \frac{1\,050}{930} = 1,129$. Iz dijagrama na slici 17.8. tom faktoru sigurnosti odgovara riziko defekta $R = 6,5 \cdot 10^{-4}$.



Literatura

1. Aperçu général des différents solutions de protection. Tendances d'avenir et questions non encore résolues, A 50/RP 12, O. R. E., Utrecht 1970.
2. Asea, Asea cink oksidni odvodnici prenapona tip XAP i XAM (prospekti), Zagreb 1981.
3. BABIKOV, M. A., KOMAROV, N. S., SERGEJEV, A. S.: Tehnika visokih napona, Štamparsko poduzeće Saveta za energetiku vlade FNRJ, Beograd 1952.
4. BAATZ, H.: Überspannungen in Energieversorgungsnetzen Springer-Verlag Berlin, (Göttingen), Heidelberg 1956.
5. BERGER, K.: Prikaz najznačajnijih karakterističnih podataka o stanju munje, Elektrotehnički vjesnik, 1973, 8—10, »Elektrotehnička zveza Slovenije« u Ljubljani, Ljubljana 1973.
6. BERGER, K.: Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955—1963 auf dem Monte San Salvatore, Bull. Sev 56 (1965), Zürich
7. Blitzschutz und Allgemeine Blitzschutz-Bestimmungen, Achte Auflage, VDE-Verlag GmbH — Berlin, 1971.
8. BOSSI, A., COPPI, E.: Impianti di terra di funzionamento e di protezione, Ulrico Hoepli, Milano 1964.
9. DMOHOVSKAT, L. F., LARIONOV, V. P., PINTALJ, Ju. S., RAZEVIĆ, D. V., RIBKOVA, E. Ja.: Tehnika visokih napravljenij, Energija, Moskva 1967.
10. Essais de parafoudres à résistance variable (courant continu 1500 V) e de parafoudres-condensateurs (courant continu 1500 V et 3000 V), A50/RP6, Office de Recherches et d'Essais de l'Union Internationale des Chemins de fer (O. R. E.), Utrecht 1970.
11. Essais en service de différents types des parafoudres, sous-stations, postes de mise en parallèle, véhicules 1500 et 3000 V, A 50/RP 11, O. R. E., Utrecht 1970.
12. FRÜHAUF, G.: Djelovanje munje u prirodi i pokusima, Elektrotehnički vjesnik, 1973, 8—10, »Elektrotehnička zveza Slovenije« u Ljubljani, Ljubljana 1973.
13. Godišnja izokeraunička karta SFRJ, Đukanović, D., Zajednica Jugoslavenske elektroprivrede Beograd, Beograd 1967.
14. GARY, G., CIMADOR, A., FIEUX, R.: Connaissance actuelle de la foudre et méthodes de calcul de la protection des lignes de transport, Revue Général d'électricité, tom 84 (N° 1), Paris 1975.
15. HÖFLER, E.: Koordinacija izolacije, osnove statistične obdelave koordinacije izolacije, Elektroinštitut »Milana Vidmarja«, Ljubljana 1972.
16. HRS, I.: Zaštita od prenapona 30 (35) i 10 kV zračnih mreža Elektroprivreda, Institut za elektroprivredu Zagreb, Zagreb 1968.
17. HRS, I.: Zaštita kabela, položenih u loše vodljivom tlu, od direktnih udara groma duž kabela trase, Energija 5—6, Elektroprivreda Hrvatske, Zagreb 1969.
18. HRS, I., MUŽNY, J.: Zaštita kabela na RTV Biokovo, Institut elektroprivrede Zagreb, Zagreb 1968.
19. KAISER, D.: Elektrotehnički priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb 1964.

20. KRANJC, F., ROSMAN, M.: Vrednotenje verjetnosti in zanesljivosti pri določevanju koordinacije izolacije I, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana 1972.
21. KRAMPEŠ, D.: Atmosferska izbijanja u Sloveniji, Elektrotehnički vjesnik, 1973, 8—10, »Elektrotehnička zveza Slovenije« u Ljubljani, Ljubljana 1973.
22. KRSTIĆ, M.: Postanak atmosferskog elektriciteta, Jugoslovenski komitet za geoelektricitet i gromobrane, bilten 1, Maribor
23. KRSTIĆ, M.: Gromobranske instalacije, Novinsko izdavačko poduzeće Tehnička knjiga, Beograd 1963.
24. MILANKOVIĆ, LJ.: O atmosferskom elektricitetu, Jugoslovenski komitet za geoelektricitet i gromobrane, bilten 5, Maribor 1976.
25. NICOTRA, G.: Criteri generali della protezione contro l'azione dei fulmini nella progettazione degli impianti per telecomunicazione in ponte radio, Alta frequenza, vol. XXXVII — N. 9, settembre 1969.
26. PARIS, L.: Coordinamento dell'isolamento, L'elettrotecnica Associazione elettrotecnica ed elettronica italiana, Vol. LVII — N. 10, Milano, ottobre 1970.
27. PAVIĆ, A.: Zaštita rasklopnih postrojenja, Elektrotehnički fakultet, Zagreb 1979.
28. PETROVIĆ, V.: Zaštita velikih postrojenja od udara groma, Elektrotehnički fakultet, Zagreb 1980.
29. PHILIPPOW, E.: Taschenbuch Elektrotechnik (Band 1), VEB Verlag Technik Berlin, 1966.
30. PHILIPPOW, E.: Taschenbuch Elektrotechnik (Band 2), VEB Verlag Technik Berlin, 1966.
31. PLAZINIĆ, S.: O munji i gromu, Jugoslovenski komitet za geoelektricitet i gromobrane, bilten 5, Maribor 1976.
32. PLAZINIĆ, S., MILJKOVIĆ, N.: Prilog proučavanju raspodele broja atmosferskih električnih pražnjenja na teritoriji SFR Jugoslavije, referat, XIII savjetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Bled 1977.
33. Prenos i distribucija električne energije (prijevod s engleskog), priručnik, Građevinska knjiga, Beograd 1964.
34. RIELLO, G.: Impianti di messa a terra in media e bassa tensione, Manuali tecnici del Bianco, Udine 1963.
35. Smernice za koordinaciju izolacije u visokonaponskim postrojenjima, JUS N.BO.031 III—1968, Jugoslavenski zavod za standardizaciju, Beograd 1968.
36. STEFANINI, B.: Tehnika visokog napona, svezak I, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb 1961.
37. STEFANINI, B.: Tehnika visokog napona, svezak II, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb 1964.
38. SZPOR, S., DZIERŻEK, H., WINIARSKI, W.: Technika wysokich Napiec, Wydawnictwa naukowo-techniczne, Warszawa 1967.
39. Tehnički priručnik, »Rade Končar«, Zagreb 1963.
40. TUK, V.: Studija sa idejnim rješenjem zaštite kontaktne mreže od atmosferskih prenapona na prugama Zagreb—Rijeka i Škrlevo—Bakar, Elektrotehnički fakultet, Zagreb 1977.
41. VDE-Bestimmung für Erdungen in Wechselstromanlagen für Nennspannungen über 1 kV, VDE 0141/7.76, VDE-Verlag, Berlin 1976.
42. VEM — Handbuch Energieversorgung elektrischer Bahnen, Veb Verlag Technik, Berlin 1975.
43. Ventilableiter-Handbuch, kombinat Web keramische Werke Hermsdorf — DDR-653 Hermsdorf/Thüringen, Ausgabe 1974/75.
44. VÖLCKER, O.: Gewittergefährdung und Überspannungsschutz von Mittelspannungslagen, Siemens-Zeitschrift 42 (1968) Heft 3, Siemens Aktiengesellschaft Berlin, München 1968.

45. VUKMIROVIĆ, D.: Mogućnosti meteorologije u praćenju grmljavinske aktivnosti, Jugoslovenski komitet za geoelektricitet i gromobrane, bilten 5, Maribor 1976.
46. WIESINGER, J.: Blitzforschung und Blitzschutz, Deutsches Museum Abhandlungen und Berichte, 40 Jahrgang 1972, Heft 1/2, Oldenbourg Verlag, München 1972.
47. WIESINGER, J., HASSE, P.: Handbuch für Blitzschutz und Erdung, VDE-VERLAG GMBH, Berlin 1977.
48. WIESINGER, J., Bestimmung der induzierten Spannungen in der Umgebung von Blitzableitern und hieraus abgeleitete Dimensionierungsrichtlinien, SEV 61 (1979) 15, Zürich
49. WIESINGER, J.: Zur Berechnung des Stosserdungswiderstandes von Tiefen- und Oberflächenenerdern, ETZ-a Bd 99 (1978) H. 11., VDE-Verlag, Berlin 1978.

KNJIŽNICA
Elektrotehnčkog fakulteta
ZAGREB

Izdavačka radna organizacija
ŠKOLSKA KNJIGA
Zagreb, Masarykova 28

Za izdavača
dr. JOSIP MALIĆ

Grafički urednik
JOSIP JELIĆ

Lektor
ANTUN ČESKO

Korektor
MILIVOJ PILJA

Naklada 1500 primjeraka

Tisak završen u rujnu 1987.

