

S V E U Č I L I Š T E U S P L I T U
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA
I BRODOGRADNJE U SPLITU

Dr MARIJA OŽEGOVIĆ

KARLO OŽEGOVIĆ

ELEKTRIČNE MREŽE

II



Split, 1980.

Stručna recenzija

Dr BOŽIDAR STEFANINI, dipl.inž.
red.prof. Sveučilišta u Zagrebu

i

ŽELJKO ZLATAR, dipl.ing.,
docent Sveučilišta u Zagrebu

PREDGOVOR

Osnovnu orijentaciju i pristup problematici električnih mreža autori su izložili već u predgovoru "Mreže I", pa predgovor drugog dijela predstavlja dopunu i komentar u odnosu na taj dio.

"Električne mreže II" najavili smo već u predgovoru prvog dijela. U interesu integriteta gradiva i logičnosti slijeda pojedinih poglavlja odstupili smo od tamo najavljenog sadržaja drugog dijela. Uvršteno je vrlo aktuelno poglavlje "Smetnje u stacionarnom pogonu", pa je stoga poglavlje o statičkoj i dinamičkoj stabilnosti ostavljeno za treći dio.

Dok "Mreže I" možemo shvatiti kao uvod u problematiku velikih električnih mreža, koji daje znanja potrebna za ispravno fizičko i računsko postavljanje zadataka, "Mreže II" daju prikaz nekih "pogonskih" problema postojeće, žive električne mreže. Naravno, takva podjela je samo načelna i nije moguće postaviti stroge granice. Takodjer se može reći, da "Mreže II" dobrim dijelom obrađuju pitanja iz područja kvalitete električne energije. Pojave i faktore, koji negativno djeluju na kvalitetu električne energije, možemo nazvati smetnjama. Smetnje se ne mogu potpuno izbjeći, a zbog velike rasprostranjenosti sistema dosta su brojne. Smetnje se moraju identificirati, kategorizirati i analitički valorizirati. Na temelju analize, a prema karakteru smetnje, treba poduzeti korake da se otkloni uzrok te smetnje ili da se ublaže njezine posljedice.

Prvo poglavlje obrađuje jedno od osnovnih mjerila kvalitete električne energije, naponske prilike. U složenoj mreži može se problem regulacije napona identificirati s regulacijom proizvodnje i tokova reaktivne snage, što je jedan od bitnih sadržaja rada sistema vođenja elektroenergetskog sistema (pod vođenjem se misli na upravljanje sistemom u najširem smislu i obuhvaća kontrolu i izmjene uklopnog stanja, regulaciju reaktivne snage i napona, regulaciju djelatne snage i frekvencije,

kontrolu pouzdanosti sistema, kratkoročno planiranje rada sistema i optimiranje svih funkcija; pošto se vođenje vrši daljinski, iz određenih centara upravljanja i dispečerskih centara, govorimo o "sistemu daljinskog vođenja", SDV). Problem održavanja napona svodi se na regulaciju napona u užem smislu samo na periferiji sistema, tj. u distributivnim mrežama, čemu se u našoj praksi posvećuje premalo pažnje.

Da bi se mogla vršiti uspješna regulacija napona, kao i ostali zadaci daljinskog vođenja sistema, centri moraju raspolagati informacijama o aktuelnim naponskim prilikama i tokovima snaga u svim čvorovima mreže, pa i onda, ako se mjerne vrijednosti ne prenose iz svih čvorova ili se prenose pogrešno. Zato je u tom poglavlju izložen i algoritam "estimacija stanja" kao tipični zadatak analize električnih mreža.

U drugom poglavlju obrađene su smetnje, koje se u pogonu trajno ispoljavaju, a rezultati su sve heterogenije tehnologije i sve veće složenosti uređaja kod potrošača električne energije. Ova-
mo su uvrštena brza kolebanja napona, pojava viših harmoničkih članova (izobličenje sinusoide) i nesimetrije zvijezde trofaznog napona.

Treće poglavlje obrađuje analizu mreže u režimu kratkog spoja i nekih drugih kvarova. Pri tome smo vodili računa o okolnosti, da se kratki spoj, makar je ta pojava po načinu analize tipičan problem električnih mreža, u srednjeevropskoj i našoj literaturi locira u problematiku rasklopnih postrojenja. Obim i razina ovog poglavlja prilagodjeni su toj okolnosti.

Time ni približno nisu iscrpljena sva pitanja kompleksne problematike elektroenergetskih mreža, pa ni na ovdje usvojenoj razini. Osim najavljenih poglavlja o statičkoj i dinamičkoj stabilnosti, o sredstvima i funkcioniranju podsistema zaštite mreže od posljedica kvarova i o prijenosu visokim istosmjernim naponom, preostaje da se obrade poglavlja o računu pouzdanosti, o optimiranju rada mreže, o osnivanju mreža, o gubicima u mreži, o regulaciji snage i tako dalje. Nadalje, tzv. razdjelne ili distributivne mreže po svojim specifičnostima i dalekosežnim mogućnostima ra-

cionalizacije zaslužuje veću pažnju (u distributivne mreže se ulaže oko 30% od ukupnih ulaganja u elektroenergetiku, a u nekim zemljama i više), makar ni ovdje nisu potpuno zanemarene. Ovdje spomenuta do sada neobrađena ili nedovoljno obrađena poglavlja, ili barem neka od njih, naći će svoje mjesto u trećem dijelu ("Mreže III").

Redoslijed izlaganja i obim izloženog gradiva u oba do sada izašla dijela nisu strogo prema nastavnom programu. Smatramo da su time "Mreže I", a pogotovo "Mreže II", postale interesantne i za širi krug stručnjaka, a studenti će selektivnim izborom gradiva lako uočiti, koja znanja moraju savladati u okviru predmeta "Električne mreže I" i "Električne mreže II", a koja u okviru izbornog predmeta "Električne mreže III". Smatramo, nadalje, da će ove "Električne mreže" korisno poslužiti i studentima na postdiplomskom studiju kao repetitorij osnovnih znanja i kao dopunska literatura.

Naročito zadovoljstvo i poticaj za daljnji rad predstavlja nam činjenica, da je nakon pojave "Mreže I" vidno porastao prosječni uspjeh studenata.

I ovom se prilikom srdačno zahvaljujemo drugarici Milki Radonić na vrlo urednom strojnom prijepisu, drugu Draganu Bijediću i njegovim suradnicima na pedantnoj izradi slika, radnicima tiskare i knjigovežnice, kao i svima ostalima koji su doprinjeli izlasku ovog sveska i njegovom konačnom liku.

Marija i Karlo Ožegović

Split, rujna 1979.

S A D R Ź A J

	str.
1. ODRŹAVANJE NAPONA U MREŹI	1
1.1. Nazivni napon i njegovo značenje	1
1.1.1. Nazivni napon i naponske prilike kod potrošača	7
1.1.2. Nazivni napon i naponske prilike u mreži	9
1.1.3. Pad napona i reaktivna snaga	11
1.2. Mjere i sredstva za smanjenje pada napona	14
1.2.1. Izbor višeg naponskog nivoa	14
1.2.2. Smanjenje reaktancije	15
1.2.3. Smanjenje reaktivne snage u mreži	19
1.2.4. Sredstva za kompenzaciju padova napona	31
1.2.5. Regulacija napona	37
1.2.5.1. Regulacija napona u distributivnim mrežama	63
1.2.5.2. Regulacija napona i reaktivne snage u mrežama visokog napona	79
1.2.6. Regulacija napona i reaktivne snage kao pod- sistem velikih zamkastih mreža	94
1.2.7. Regulacioni transformator u proračunu	97
1.3. Računanje tokova snaga i napona na premalom računalu	117
1.3.1. Prebacivanje tereta	117
1.3.2. Dijakoptika	122
1.3.3. Algoritam bez prethodnog računanja matrice ...	136
1.4. Proračun tokova snaga i napona u realnom vremenu	138
1.4.1. Općenito o estimaciji stanja	138
1.4.2. Metoda najmanjih vaganih kvadrata (WLS)	143
1.4.2.1. Linearna estimacija stanja po metodi WLS ...	147
1.4.2.2. Nelinearna estimacija stanja po metodi WLS ..	156
1.4.3. Metoda mjerenja snaga grane (LO)	159
1.4.4. Primjena estimacije stanja u realnom vremenu ..	167
1.4.5. Prilog objašnjenja metode najmanjih kvadrata ..	173
2. SMETNJE U STACIONARNOM POGONU	177
2.1. Izobličenje krivulje struje i napona	180
2.1.1. Nastanak viših harmonika struje	183

2.1.2. Izračunavanje viših harmonika napona	188
2.1.3. Rezonantne pojave	196
2.1.4. Zaštita kondenzatora od rezonancije	199
2.1.5. Suzbijanje viših harmonika u mreži	203
2.1.6. Posljedice postojanja viših harmonika struje i napona u mreži	209
2.2. Brza kolebanja napona	210
2.2.1. Nastanak brzo promjenjivih struja	211
2.2.2. Izračunavanje kolebanja napona	213
2.2.3. Suzbijanje kolebanja napona u mreži	220
2.2.4. Posljedice brzih kolebanja napona u mreži	233
2.3. Nesimetrije struje i napona	237
2.3.1. Računanje nesimetrija uslijed nesimetričnog potrošača	238
2.3.2. Nesimetrija prouzrokovana neprepletenim nadzemnim vodovima	248
2.3.3. Posljedice nesimetrija u mreži	259
2.4. Zaključni komentar o smetnjama u stacionarnom pogonu	261
3. KRATKI SPOJ I OSTALI KVAROVI U MREŽI	263
3.1. Kratki spoj, uzroci i posljedice	264
3.1.1. Tretman zvjezdišta trofazne mreže	269
3.1.2. Smanjenje struja kratkog spoja	298
3.1.2.1. Povećanje reaktancije mreže	299
3.1.2.2. Posebne mjere za smanjenje struja kratkog spoja	304
3.1.2.3. Smanjenje nulte komponente struje kratkog spoja	307
3.1.3. Utjecaj struja kratkog spoja visokonaponskih vodova na vodove telekomunikacija	308
3.1.4. Račun kratkog spoja	320
3.1.4.1. Mogućnosti i metode računa kratkog spoja	322
3.1.4.2. Struje i snage kratkog spoja	334
3.1.4.3. Matematički model računa kratkog spoja za elektroničko računalo	336
3.1.4.3.1. Trofazni kratki spoj	339

3.1.4.3.2. Jednopolni kratki spoj	341
3.1.4.3.3. Dvopolni kratki spoj	344
3.1.4.3.4. Dvopolni kratki spoj i spoj sa zemljom ...	348
3.1.5. Program "UKSX"	352
3.1.5.1. Organizacija proračuna	352
3.1.5.2. Pripremni dio programa	356
3.1.5.3. Računanje kratkog spoja	370
3.1.6. Račun kratkog spoja na istosmjernom mrežnom analizatoru	389
3.1.7. Kratki spoj na dvostrukom vođu	411
3.1.7.1. Primjena p,q transformacije	411
3.1.7.2. Program "KSDV"	427
3.2. Zemljospoj	447
3.2.1. Nultočka sistema	448
3.2.2. Mreža sa izoliranim zvjezdištem	452
3.2.2.1. Dozemni spoj jedne faze sa zemljom - zemljospoj	455
3.2.2.2. Dozemni spoj dviju faza - dvostruki zemljospoj	463
3.2.3. Mreža uzemljena preko petersenke	471
3.3. Nesimetrični prekidi	475
3.3.1. Prekid faze	475
3.3.2. Prekid dvaju faza	484
3.3.3. Iskapčanje jedne faze vođa	490
3.3.4. Posljedice nesimetričnog prekida	497

1. ODRŽAVANJE NAPONA U MREŽI

1.1 NAZIVNI NAPON I NJEGOVO ZNAČENJE

Nazivnim naponom može se definirati onaj napon, za koji je određeni element mreže u širem smislu (generator, transformator, vod, kondenzator, trošilo, ...) konstruiran i gradjen. Gradnja elementa mreže za određeni nazivni napon pretpostavlja uvažavanje niza tehno-ekonomskih parametara s konačnim ciljem da element bude jeftin, ekonomičan u pogonu, pouzdan i trajan. U pogledu zahtjevane trajnosti djeluju i drugi brojni faktori, kao što su korozija, zastarjevanje tehnologije, itd. Očigledno je, da će svaki element mreže, stroj, aparat ... imati neki svoj konstruktivni "interni" optimalni nazivni napon, kod kojeg će dotični element imati najpovoljnije karakteristike. Tako bi npr. za trofazni asinhroni motor snage 1 kW optimalni napon bio negdje oko 100 V, a kod snage 100 kW već oko 1000 V. Optimalni naponi sijalica sa žarnom niti ovisno o snazi kreću se u granicama od 12 V do 220 V.

Ako prilagodjenost nekom nazivnom naponu shvatimo prvenstveno kao pitanje izvedbe izolacionog sistema tog elementa, moraju biti uzeta u obzir i druga, nenormalna naponska naprezanja izolacije, do kojih može doći tokom eksploatacije tog elementa.

Nazivni napon, u načelu, osigurava optimalne uvjete rada elementa mreže, aparata itd. Napon ne utječe samo na naprezanje izolacije. Ovisno o fizikalnim osnovama, na kojima element mreže počiva, napon može utjecati na magnetski tok u magnetskim krugovima, na gubitke u dielektriku, na struju kroz element, zagrijavanje itd. To ujedno znači, da odstupanje od nazivnog napona istovremeno predstavlja odstupanje od optimalnih uvjeta rada, kao što je npr. umanjeni radni učinak, smanjenje pouzdanosti i trajnosti, povećavanje pogonskih troškova itd. Iz izloženog proizlazi generalni zaključak, da u svim točkama elektroenergetskog sistema, od stezaljki generatora do krajnjeg trošila, napon mora

biti jednak nazivnom naponu. Smetnje u pogonu žive mreže, prvenstveno padovi napona na uzdužnim impedancijama, koji se uz to tokom vremena još i mijenjaju, zahtjevale bi poduzimanje takvih mjera, uz odgovarajuće investicione i eksploatacione troškove, da bi cijeli sistem vođen u nazivnom naponskom režimu bio neekonomičan. S druge strane, spomenuti optimumi nisu toliko oštro izraženi, da ne bi bila dopuštena i izvjesna odstupanja od nazivnog napona. U nekim slučajevima ne bi se nazivni napon mogao osigurati nikakvim sredstvima. Tako npr. kod dugih vodova visokog i vrlo visokog napona, napon duž voda odstupa od nazivnog i u onim slučajevima, kada na krajevima voda imamo nazivni napon. Osim toga, nazivni napon elementa mreže se u pravilu ne podudara s konstruktivno optimalnim naponom. Dosljedna gradnja elemenata mreže za njihov individualni interni optimalni nazivni napon dovela bi do tolikog broja naponskih razina u mreži, da bi investicioni i eksploatacioni troškovi takve mreže došli na apsurdne iznose. Zato se, iz tehno-ekonomskih razloga, dakle u interesu optimuma sistema kao cjeline, vrši standardizacija nazivnih napona na način, da se propisuje niz ograničenog broja napona (vidi "Mreže I" 1.4.4).

Ograničavanje broja standardiziranih naponskih nivoa smanjuje investicione i eksploatacione troškove sistema, omogućuje standardizaciju opreme i aparata i djelova i donosi niz drugih pogodnosti, a da pri tome optimalni uvjeti rada trošila, prilagodjenih za odabrani standardni napon, nisu ugroženi.

Ipak ćemo spomenuti neke slučajeve, kada se nazivni (radni) napon potrošačkog i drugog uređaja precizno prilagođava vlastitom internom optimumu. To su npr. nazivni naponi velikih generatora, zatim naponi specijalnih trošila, kao što su elektrolučne peći, uređaji za elektrolizu, motori za električne lokomotive itd. Slične primjere naći ćemo i kod niza malih trošila (svi elektronski uređaji). Lako ćemo utvrditi, da kod većine tih specifičnih uređaja takvo prilagođenje optimalnom naponu ne izaziva dodatne troškove, jer se oni obično i onako ne priključuju neposredno na električnu mrežu.

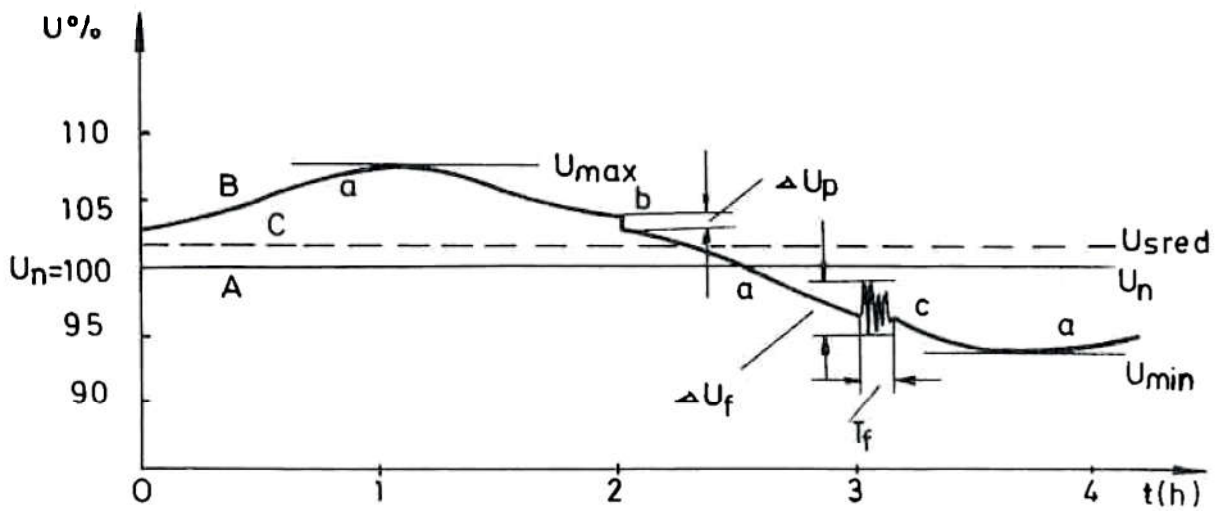
Ako smo utvrdili da je trajno precizno održavanje nazivnog napona neekonomično, pa i nemoguće, a osim toga nepotrebno, moramo ipak razmotriti kakva sve odstupanja od nazivnog napona možemo očekivati po vrsti i za svaku vrstu odstupanja utvrditi podnosivu gornju i donju granicu. U tom smislu ćemo za sada uzeti, a tokom izlaganja i potvrditi, da su zahtjevi na strani potrošača i zahtjevi u samoj mreži različiti. Ako te razlike nemaju međusobnog utjecaja, mogu se zasebno razmatrati, a tamo gdje utjecaj postoji, moraju se uskladiti.

Promatramo li promjene (varijacije) napona tokom vremena, možemo govoriti od dva tipična slučaja:

- a) Polagane, spore varijacije napona. Dok su ove varijacije uvjetovane predvidivim promjenama opterećenja, npr. tokom jednog dana, onda su i varijacije predvidive. Do nepredvidivih sporih varijacija napona može doći, ako dodje do poremećaja regulacije napona u cijeloj mreži ili njenom većem dijelu.
- b) Nagle promjene napona. Do njih dolazi uslijed naglih promjena opterećenja. Na strani potrošača uzrok može biti uključivanje i isključivanje trošila relativno značajne snage, pokretanje motora, pogon trošila s promjenjivim opterećenjem, kratki spojevi u razdjelnoj mreži i sl. Na strani mreže nagle promjene napona mogu izazvati kratki spojevi, ispad generatora značajne snage, neuredna sinhronizacija generatora, uključivanje i isključivanje kondenzatorskih baterija i prigušnica, uključivanje i isključivanje jako opterećenih vodova i sl. Ovisno o uzroku smetnje, nagle promjene napona mogu biti rijetke, a mogu biti i učestale s određenom periodičnošću. Učestale promjene napona ("flickeri") biti će posebno obrađeni u poglavlju 2.2.

U pogledu varijacija napona zgodno je usvojiti neke definicije (slika 1).

Srednji napon U_{sred} može se definirati na više načina, koji se razlikuju po složenosti postupka i potrebnom broju podataka. Najjednostavnija i ujedno najmanje indikativna je definicija



- A - linija nazivnog napona (U_n)
- B - krivulja napona ($U = u(t)$)
- C - linija srednjeg napona ($U_{\text{sred.}}$)
- a - spora promjena napona
- b - pojedinačna nagla promjena napona
- c - učestala promjena napona
- U_{max} - najviši (linijski) napon tokom promatranog razdoblja
- U_{min} - najniži napon tokom promatranog razdoblja
- ΔU_p - apsolutna nagla promjena napona
- ΔU_f - maksimalna apsolutna učestala promjena napona tokom T_f
- T_f - trajne pojave učestalih promjena napona

Slika 1 - Promjena napona tokom vremena

$$U'_{\text{sred}} = \frac{U_{\text{max}} + U_{\text{min}}}{2} |V| \quad 1-1$$

koja uvažava samo U_{max} i U_{min} , dakle vrijednosti koje ništa ne govore o samom toku krivulje napona.

Bolja je definicija aritmetički srednji napon kroz razdoblje promatranja $T = t_2 - t_1$:

$$U_{\text{sred}} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} u(t) dt |V| \quad 1-2$$

Definicija do koje se dolazi preko energije linearnog trošila priključenog na promjenjivi napon, a utrošene u promatranom razdoblju T , glasi:

$$U''_{\text{sred}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} u^2(t) dt} |V| \quad 1-3$$

Posljednja definicija ima smisla samo neposredno na stezaljkama linearnih trošila, tj. onih, kojima je ekvivalentni R $|\Omega|$ konstantan i ne ovisi o naponu. Pošto su trošila samo iznimno linearna, služit ćemo se definicijom 1-1 ako nije poznata, odnosno definicijom 1-2 ako je poznata krivulja napona.

Srednji napon možemo izraziti i u postocima od nazivnog napona:

$$U_{\text{sred}} \% = \frac{U_{\text{sred}}}{U_n} 100 \quad 1-4$$

ili kao odstupanje srednjeg napona od nazivnog u postocima:

$$\Delta U_{\text{sred}} = \frac{U_{\text{sred}} - U_n}{U_n} 100 \quad 1-5$$

Odstupanje može biti pozitivno ili negativno.

Dalje možemo definirati:

- maksimalna procentualna varijacija napona

$$\Delta U_{\max} \% = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_n} 100 \quad 1-6$$

- maksimalno procentualno odstupanje napona na gore

$$\Delta U_{+} \% = \frac{U_{\max} - U_n}{U_n} 100 \quad 1-7$$

- maksimalno procentualno odstupanje napona na dolje

$$\Delta U_{-} \% = \frac{U_{\min} - U_n}{U_n} 100 \quad 1-8$$

Ako je $U_{\max} > U_n$ i $U_{\min} < U_n$ (normalni slučaj), U_{+} je pozitivan broj, a U_{-} negativan broj. Ako napon nikada ne pada ispod U_n odnosno nikad ne raste iznad U_n , obadvije vrijednosti U_{+} i U_{-} će biti pozitivne odnosno negativne.

Razdoblje promatranja T može biti različito, ali mora biti navedeno uz izneseni podatak. Sa stanovišta mreže T će biti uzet 24 sata za neki tipični dan (radna srijeda, nedjelja) ili sedmica, dekada, mjesec (kišni, sušni, hladni, topli) ili sezona (sezona velikih voda, sezona malih voda). Sa stanovišta potrošača, vrijeme promatranja T može biti odabrano i kraće, npr. jedan sat, jedan tehnološki ciklus, jedna smjena.

Nagle promjene napona se mogu, osim u apsolutnim iznosima (Voltima), preglednije izraziti u postocima od nazivnog napona:

$$\Delta U_p \% = \frac{\Delta U}{U_n} 100 \quad 1-9$$

i

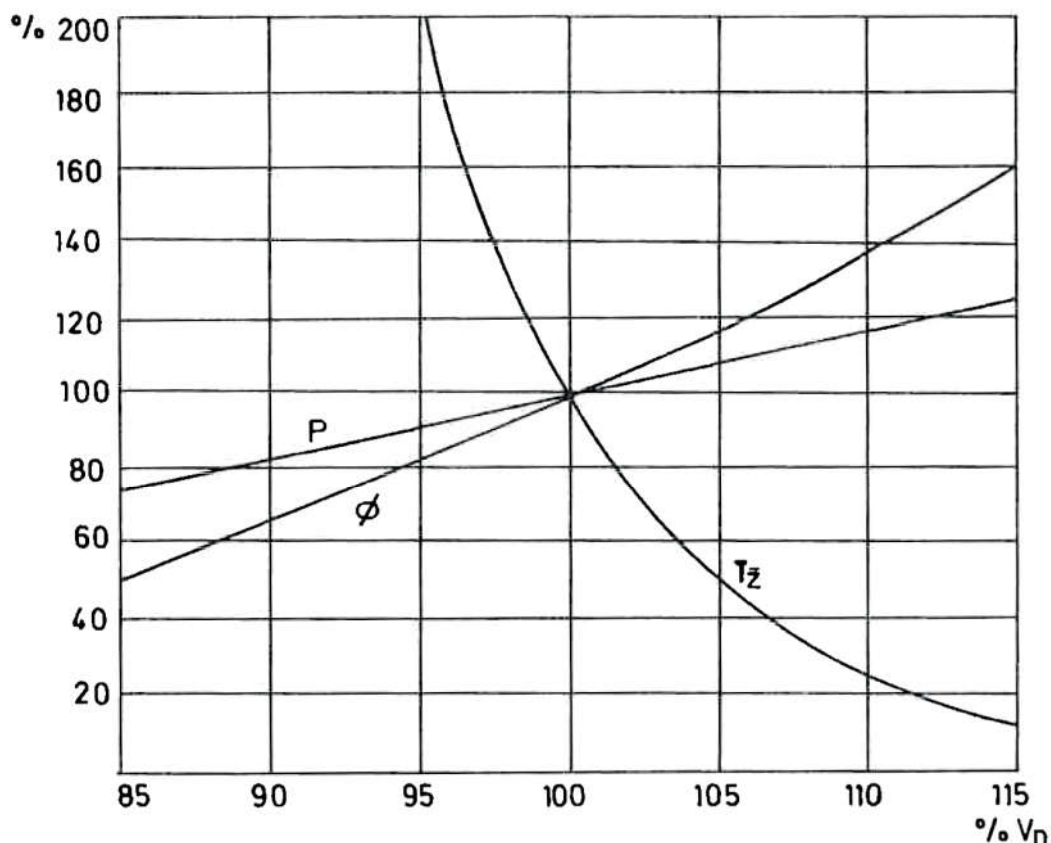
$$\Delta U_f \% = \frac{\Delta U_f}{U_n} 100 \quad 1-10$$

Kod navodjenja ovih vrijednosti nema potrebe, osim kod sasvim specijalnih analiza, navoditi predznak ili trend promjene.

1.1.1 Nazivni napon i naponske prilike kod potrošača

Utjecaj odstupanja napona na stezaljkama trošila od nazivne vrijednosti je jako različit, ovisno o vrsti trošila. Utjecaj može biti tehnološki (poteškoće u funkcioniranju aparata ili nemoguć rad, opasnost od kvara aparata) ekonomski (povećani ili smanjeni specifični potrošak energije po jedinici proizvoda, skraćena životna dob aparata) i fiziološki (titranje svjetla, promjena spektra svjetla, promjena zvuka stroja u radu). Navedeni utjecaji se skoro uvijek javljaju istovremeno.

Kod trošila s magnetskim krugovima u željezu (motori) promjena napona izaziva promjenu gubitaka i promjenu radnih karakteristika. Ponašanje motora ovisi o vrsti motora, te o karakteristikama pogonjenog stroja (ovisnost zakretnog momenta od brzine vrtnje). Ako snaga stroja ostaje konstantna (tipično za sinhronne motore), smanjenje napona će izazvati porast struje, a time i povećane gubitke u bakru i jače zagrijavanje stroja. Kod termičkih trošila sa konstantnim otporom proizvedena toplina se mijenja s kvadratom napona. Kod fluorescentne rasvjete je svjetlosni tok približno proporcionalan naponu; kod preniskog napona nemoguće je paljenje fluorescentnih cijevi, a ranije uključene cijevi se gasu. Varijacije napona imaju velik utjecaj na rad sijalica sa žarnom niti, pa su na slici 2 prikazane karakteristike sijalice. Svjetlosni tok raste približno s trećom potencijom napona.



Slika 2 - Karakteristike sijalice sa žarnom niti u ovisnosti o naponu. P - snaga; ϕ - svjetlosni tok; T_z - životna dob.

Kondenzatorima za kompenzaciju reaktivne snage proizvedena snaga raste s kvadratom napona, što može izazvati odstupanje od optimalno potrebne snage kompenzacije, a osim toga s kvadratom napona rastu i gubici u dielektriku, što može dovesti do toplinskog razaranja kondenzatora.

Generalno se tipična trošila redom po osjetljivosti, počam od najosjetljivijih, mogu svrstati ovako: sijalice sa žarnom niti, kondenzatori, kuhala i otporne peći, elektromotori, fluorescentne lampe.

Nadalje treba imati na umu, da svako povećanje napona predstavlja povećani rizik za izolaciju.

Sa stanovišta potrošača mogu se, dakle, zahtjevi u pogledu napona sažeti ovako:

- varijacije napona (izraz 1-6) moraju biti što manje; drugim riječima: napon mora biti, što je moguće više, konstantan;
- srednji napon (izraz 1-2) mora biti što bliži ili jednak nazivnom naponu.

Prema jugoslavenskom standardu (JUS N.A2. 001) dozvoljene su u mreži niskog napona (na koju je priključen najveći broj pojedinačnih trošila) odstupanja od nazivnog napona $\pm 5\%$ (preporučena maksimalna odstupanja) i $\pm 10\%$ (najveća dopuštena odstupanja). Odstupanja veća od dopuštenih česta su pojava u našim distributivnim mrežama, čak i u gradovima. To je uglavnom posljedica nagle elektrifikacije domaćinstava u poslijeratnom razdoblju, izazvane porastom životnog standarda stanovništva, ali i naglim razvojem kućanskih aparata i dobrom snabdjevenošću tržišta tim aparatima.

1.1.2 Nazivni napon i naponske prilike u mreži

Početna razmatranja o naponskim prilikama u mreži vršit ćemo uz pretpostavku, da te prilike nemaju utjecaja na napon na stezaljkama potrošača. Kasnije ćemo vidjeti, da ta pretpostavka u visokonaponskoj prijenosnoj mreži vrijedi u cijelosti, dok će u distributivnoj mreži srednjeg i nižeg napona, što se više približujemo potrošačima, dominirati zahtjevi potrošača odnosno trošila.

U mreži ponovno susrećemo element, koji smo kao trošilo uvrstili među osjetljive. To je paralelni (poprečni) kondenzator, čija proizvedena reaktivna snaga raste s kvadratom rastućeg napona, a isto tako gubici u dielektriku, koji kod viših napona mogu postati nedozvoljeno veliki. Pravilnim dimenzioniranjem možemo kondenzatorsku bateriju učiniti neosjetljivom i na ekstremne slučajeve naponskih naprezanja, do kojih na mjestu postavljanja može doći. Promjenom napona uvjetovane promjene pro-

izvedene reaktivne snage mogu se prebroditi smišljenom regulacijom snage kompenzacije ili pak izborom takvog pogodnog mjesta priključka kondenzatora, gdje se varijacije napona iz drugih razloga drže u užim granicama. Isto razmatranje vrijedi i za paralelne (poprečne) prigušnice, s time da su one manje osjetljive na porast napona pod uvjetom da im je magnetski krug prilagodjen tim naprezanjima.

Drugi element kod kojeg odstupanje napona na stezaljkama od nazivnog može imati jači utjecaj, je sinhroni generator. Ovdje napon utječe na pogonske karakteristike stroja. Pravilnim izborom prijenosnog omjera transformatora bloka ili čak, u spornim slučajevima, izvedba tog transformatorima sa otcjepima za regulaciju u beznaponskom stanju, može se generator optimalno prilagoditi naponskim prilikama u čvoru na koji je priključen.

Ostali elementi mreže, vodovi, transformatori i rasklopna postrojenja, u širokim su granicama neovisni od kolebanja napona.

Iz navedenog slijedi, da će se napon mreže moći kretati u dosta širokim granicama. Radi toga se u mreži ne teži ka održavanju nazivnog napona, a u literaturi se taj napon sve manje spominje. Nasuprot tome, mnogo je korisniji podatak o maksimalnom pogonskom naponu.

Maksimalnim pogonskim pogonom definiran je izolacioni nivo elemenata mreže i sredstava za zaštitu od prenapona.

Nazivni napon	3	6	10	20	35	60	110	120	380 kV
Maksimalni pogonski napon	3,6	7,2	12	24	38	72,5	123	245	420 kV

U pogledu naprezanja izolacije, za mrežu vrijedi zahtjev, da ni u jednoj točki mreže u normalnom (neporemećenom) pogonu ne smije biti prekoračen maksimalni pogonski napon. Drugim riječima, dozvoljena odstupanja od nazivnog napona na gore su +20% za napone 3-60 kV, a oko +11% za napone od 110 kV na više. Iznimku predstavlja napon 35 kV (maksimalni pogonski napon $35 + 8,6\% = 38$ kV) radi uskladjjenja sa standardom SSSR u poslijeratnim godinama (po IEC odgovarajući nazivni napon je 30 i 33 kV, a maksimalni pogonski napon 36 kV).

Prema dolje je napon ograničen samo pogonskim razlozima, a to su:

- radne karakteristike nekih elemenata mreže kod bitno smanjenog napona (generatori, rasklopne snage prekidača);
- regulacioni opseg transformatora putem kojih se napaja distributivna mreža odnosno potrošači;
- ekonomski razlozi (gubici).

Pošto je zadatak mreže da prenosi određenu snagu, kod prosječno nižih napona će struje biti veće. Uslijed većih struja će, uz inače istu snagu koja se prenosi, biti veći gubici i veći padovi napona.

Generalno, za mrežu vrijedi, da će optimalni napon biti u blizini maksimalnog pogonskog napona, s time da se ovaj ni u jednoj točki mreže ne prekorači na duže vrijeme (nekoliko minuta). Ovakav pogonski režim blizak je ekonomskom optimumu pogona visokonaponske mreže, koji je definiran minimumom djelatnih gubitaka.

U slučajevima gdje napon mreže direktno utječe na napon potrošača, naponske prilike u mreži će se morati prilagoditi zahtjevima potrošača. To vrijedi prvenstveno za distributivne mreže.

Brze promjene napona u mreži ograničene su samo osjetljivošću priključenih potrošača na takve promjene.

1.1.3 Pad napona i reaktivna snaga

Prolaz struje odnosno snage izaziva padove napona u uzdužnim impedancijama elemenata mreže. Promjena struje (snage) izaziva promjenu padova napona i tako dolazi do kolebanja napona u mreži. Da bi se pokazalo koji faktor utječe više, a koji manje na padove napona, provesti ćemo slijedeće razmatranje:

Trofaznu snagu na kraju uzdužne impedancije $\bar{Z} = R + jX$ definiramo sa

$$S_2 = P_2 + jX_2 = U_2 I^* \sqrt{3}$$

pri čemu linijski napon U_2 na kraju impedancije uzimamo kao referentni.

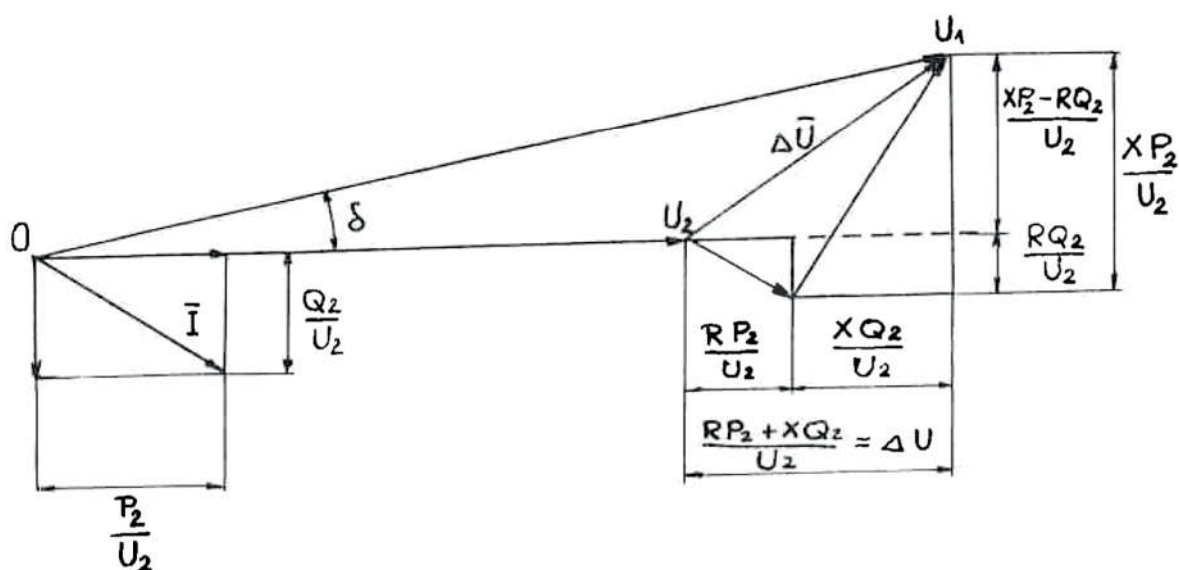
Struja kroz impedanciju je

$$\bar{I} = \frac{P_2 - jQ_2}{3U_2} \quad 1-12$$

a pad napona će biti

$$\Delta \bar{U} = \bar{Z} \bar{I} \sqrt{3} = \frac{RP_2 + XQ_2}{U_2} + j \frac{XP_2 - RQ_2}{U_2} \quad 1-13$$

Ovaj proračun ilustriran je na slici 3.



Slika 3 - Pad linijskog napona razložen na komponente.

Suštinu pada napona na impedanciji (npr. na vodu) lakše ćemo uočiti uz neka ranemarenja, koja kod manjih impedancija (kraćih vodova) ne dovode do odviše velikih grešaka.

Uzmimo da je:

$$U_1 \doteq U_2 = U$$

$$P_1 \doteq P_2 = P$$

$$Q_1 \doteq Q_2 = Q$$

Relativni uzdužni pad napona (razlika apsolutne vrijednosti napona) iznositi će:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{RP + XQ}{U^2} \quad 1-14$$

a relativni poprečni pad napona možemo definirati kutem fazne razlike

$$\delta \doteq \sin \delta = \frac{XP - RQ}{U^2} \quad 1-15$$

U distributivnoj mreži će X i R biti veličine istoga reda, a jednako tako P i Q, pa će kut δ u tim mrežama biti jednak nuli ili zanemarivo malen, a u padu napona sudjelovati će podjednako P i Q.

U visokonaponskoj mreži je R vodova malen, pa ako još tome uzmemo da će snaga teći i kroz transformatore kojima je R praktički jednak nuli, vrijedit će

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{XQ}{U^2} \quad 1-16$$

$$\delta = \frac{XP}{U^2} \text{ (rad)} \quad 1-17$$

Ovi izrazi, bez obzira na pretpostavke i zanemarenja, dozvoljavaju da se zaključi slijedeće:

- a) Tokovi reaktivnih snaga izazivat će padove napona u mreži. Promjene reaktivnih snaga izazivat će varijacije napona.
- b) Tokovi aktivnih snaga izazivat će fazne razlike napona u mreži. Promjene djelatnih snaga izazivat će varijacije faznih kuteva.

Iz zaključka a) slijedi, dakle, da se u visokonaponskim mrežama problem održavanja urednih naponskih prilika može svesti na problem tokova i regulacije reaktivnih snaga.

1.2 MJERE I SREDSTVA ZA SMANJENJE PADA NAPONA

Izraz 1-16 neposredno i jasno pokazuje, u kojem smislu se mogu i trebaju poduzeti mjere s ciljem da se smanje padovi napona u mreži. Na padove napona može se utjecati djelovanjem na sve tri veličine, koje se pojavljuju na desnoj strani izraza.

Pad napona, odnosno vrijednost lijeve strane izraza će se smanjiti, ako se:

- poveća napon U ,
- smanji reaktancija X ,
- smanji reaktivna snaga Q .

Pošto navedene mjere neće biti moguće dosljedno i u svakom pogonskom režimu sprovesti iz raznih pogonskih i ekonomskih razloga, u mreži će i dalje postojati, makar umanjeni, vremenski promjenjivi padovi napona. Te preostale padove napona možemo još dalje umanjiti, ako se dodatno provede:

- kompenzacija padova napona.

Neke od mogućih navedenih mjera su statičke naravi, bez mogućnosti bržeg ili sporijeg prilagodjenja pogonskom stanju (opterećenju, uklopnom stanju), dok će druge mjere, korištenjem adekvatnih sredstava, imati mogućnost prilagodjenja. Sredstva, koja posjeduju takvo svojstvo, uključuju se u podsistem regulacije napona. Slijedeće stranice će biti posvećene ovim pitanjima.

1.2.1 Izbor višeg naponskog nivoa

Ova mjera se može provesti, u principu, na dva načina:

- a) vodjenjem napona u već izgrađenoj mreži na gornjoj dozvoljenoj granici, tj. u blizini maksimalnog pogonskog napona;
- b) izgradnjom mreže slijedećeg višeg ili općenito višeg iz ni-

za standardiziranih napona.

Mjera navedena pod a) već je utvrđena u poglavlju 1.1.2.

Mjera navedena pod b) neće se moći primjeniti bez opsežnih tehno-ekonomskih razmatranja, jer izaziva značajne investicijske troškove. Primjena te mjere će biti opravdana, kada se pojave i drugi razlozi, kao što su porast potrošnje, izgradnja izvora velike pojedinačne snage, povećanje udaljenosti na koju se energija prenosi, zahtjev da se poveća stabilnost prijenosa itd.

1.2.2 Smanjenje reaktancije

Smanjenje reaktancije se može provoditi upravo na elementu mreže (npr. vodu) gdje postoji ili se očekuje značajni pad napona, ili pak u mreži u cijelini.

Kod vodova se smanjenje reaktancije, bez potrebe dodatnog objašnjenja na ovom mjestu, može postići:

- a) Izgradnjom voda paralelnog postojećem. Ukupna reaktancija te grane će se smanjiti na polovicu uz povećanje investicije 100%;
- b) Izgradnjom dvostrukog voda umjesto jednostrukog. Ukupna reaktancija te grane će se smanjiti na polovicu uz povećanje investicije oko 70%;
- c) Izgradnjom voda s vodičima u snopu umjesto s jednostavnim vodičima. Reaktancija se smanjuje za oko 25%, povećanje investicije je oko 20%;
- d) Postavljanjem kabela umjesto zračnog voda. Smanjenje reaktancije je na četvrtinu, povećanje investicije je najmanje 200%.
- e) Kompenzacijom reaktancije X djelomično ili u cjelosti (vidi i "Mreže I", 3.2.5).

Mjere navedene pod a), b) i c), kao što je i naznačeno, izazivaju značajna investicijska ulaganja i primjenjivat će se samo onda, ako za to postoje i drugi razlozi, npr. sigurnost pogona (pod a) i b)) ili povećanje prijenosne moći (kod a), b) i c)). Mjera na-

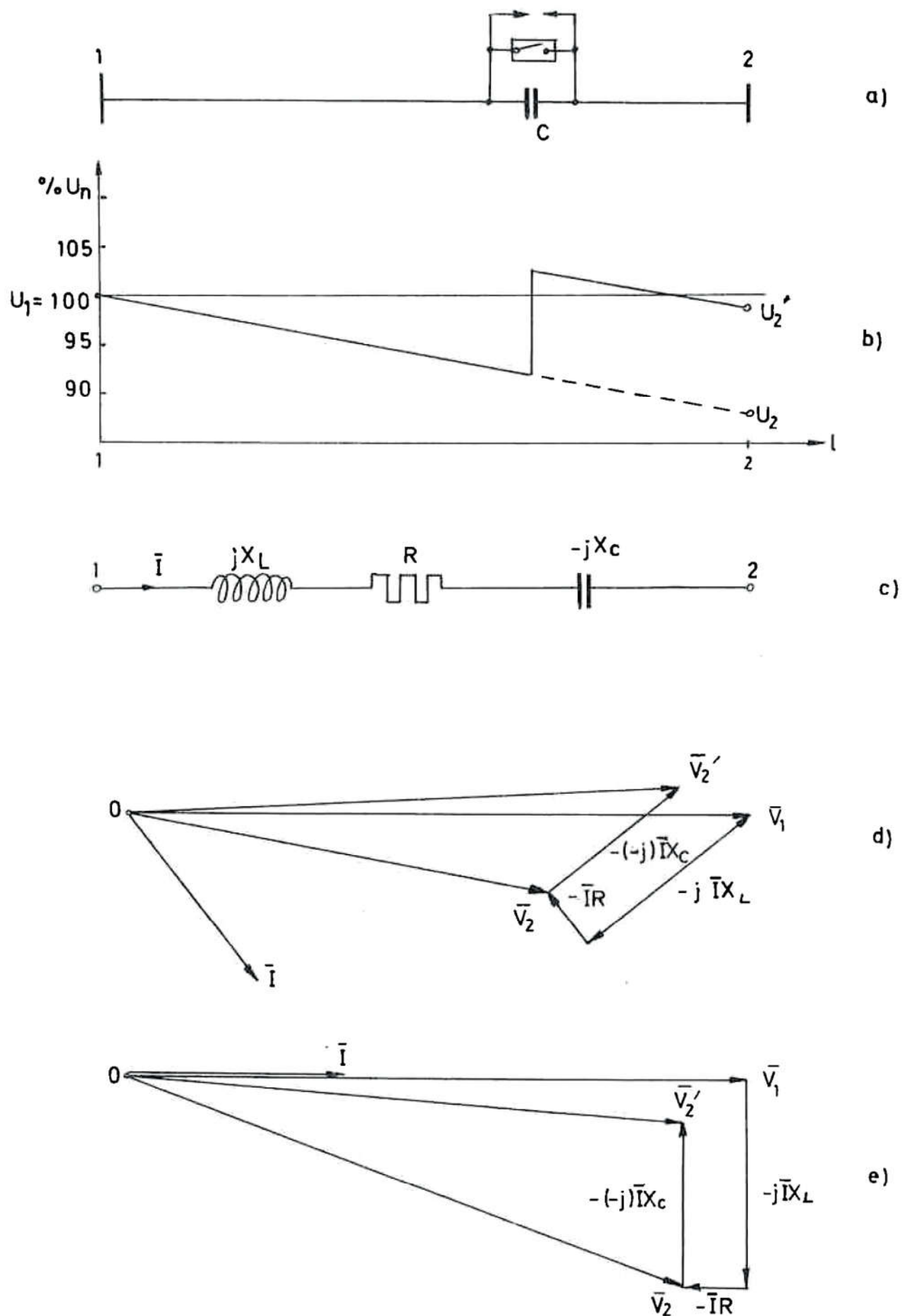
vedena pod d) će se primjenjivati samo onda, ako to izričito zahtijevaju drugi razlozi (vidi "Mreže I", 1.3.5).

Mjera navedena pod e) može, pod stanovitim okolnostima, predstavljati racionalno rješenje, a svodi se na primjenu serijskih kondenzatora. Područje primjene je kod vodova najviših napona kod prijenosa na velike udaljenosti. Prvi u svijetu prijenosni sistem napona 400 kV, kojim se prenosi energija sa sjevera na jug Švedske, ima u vodove uključene serijske kondenzatore. Drugo područje primjene su srazmjerno dugi radijalni vodovi srednjeg napona (10 ... 60 kV), koji napajaju ograničeno konzumno područje, kod kojeg se kroz duže razdoblje ne očekuje značajniji porast potrošnje.

Serijski uzdužni kondenzator uključen u vod prikazan je na slici 4a. Optimalno mjesto smještaja serijskog kondenzatora je na oko 2/3 dužine voda gledano iz točke napajanja 1. Na slici 4b prikazana je približna krivulja napona duž voda. Uočljiv je oko-miti skok napona na mjestu, gdje se nalazi serijski kondenzator. Prikazani skok predstavlja komponentu pada napona na kondenzatoru, koja je u smjeru vektora napona $\vec{U}$ na tom mjestu. Zahvaljujući serijskom kondenzatoru, napon kod potrošača (čvor 2) biti će U_2' umjesto U_2 , koji bi vladao bez serijskog kondenzatora. Ekvivalentna shema grane 1-2, pod pretpostavkom da se radi o vodu srednjeg napona, prikazana je na slici 4c. Pretpostavit ćemo, dalje, da promjena napona U_2 kod potrošača neće izazvati promjenu snage $\bar{S}_2$, niti promjenu struje $\bar{I}$. Ovo zanemarenje nema značaja za prikaz principa djelovanja serijskog kondenzatora.

Na slici 4d prikazan je vektorski dijagram napona za slučaj, kada je struja opterećenja $\bar{I}$ djelomično induktivna. Bez serijskog kondenzatora će napon u čvoru 2 biti $\bar{U}_2 = \bar{V}_2 \sqrt{3}$, a sa serijskim kondenzatorom $\bar{U}_2'$. Vidimo, da serijski kondenzator bitno poboljšava naponske prilike kod potrošača.

Na slici 4e prikazan je slučaj, kada je struja $\bar{I}$ u fazi s naponom $\bar{U}_1$. Vidimo da serijski kondenzator ne poboljšava naponske prilike kod potrošača. To nije ni potrebno, jer je u ovom slučaju razlika između U_1 i U_2 znatno manja nego u slučaju na slici



Slika 4 - Serijski kondenzator i njegovo djelovanje

4d. Slijedi zaključak, da će serijski kondenzator biti efikasan, ako struja opterećenja $\bar{I}$ sadrži značajnu induktivnu komponentu. To ograničava efikasnu primjenu serijskog kondenzatora na vodove, putem kojih se snabdijevaju potrošačka područja sa stalnom ili povremeno niskim (lošim) faktorom snage ($\cos \varphi$).

Ovdje ćemo skrenuti pažnju i na činjenicu, da je pad napona na serijskom kondenzatoru proporcionalan struji $\bar{I}$. To znači, da će kondenzator kod kratkog spoja desno od C (slika 4a) biti opterećen naponom višestruko većim od napona u normalnom radu. To zahtijeva primjenu zaštitnog iskrišta (Odvodnik prenapona ne bi izdržao energiju pražnjenja kondenzatora), brzog prekidača za kratko spajanje kondenzatora, te pripadne mjerne uređaje i zaštitne releje (slika 4a).

Pobližim razmatranjem ćemo ustanoviti, da će kondenzator sa većim X_C , a to znači s manjim kapacitetom C, imati jače djelovanje. U konkretnom slučaju primjene će pad napona na kondenzatoru s manjim C odnosno većim X_C biti veći, pa će ga u skladu s time trebati izolaciono dimenzionirati za viši nazivni napon.

Kod transformatora će se smanjenje reaktancije moći postići na tri načina:

- a) Konstruiranjem i postavljanjem transformatora s manjim naponom kratkog spoja (e_k).
- b) Postavljanjem transformatora veće snage.
- c) Postavljanjem više paralelnih transformatora.

Mjera pod a) izaziva najmanje investicione troškove i nikakve dodatne pogonske troškove, ali može biti nepoželjna kod tipizacije transformatora u mreži (potrebno je osigurati rezervu upravo takvih transformatora).

Mjera pod b) izaziva dodatne investicione troškove, ali istovremeno osigurava snagu transformacije za duže razdoblje (ako se očekuje porast potrošnje).

Mjera pod c) izaziva najveće dodatne investicione i pogonske troškove, ali kao dodatni efekt donosi povećanje pogonske sigurnosti.

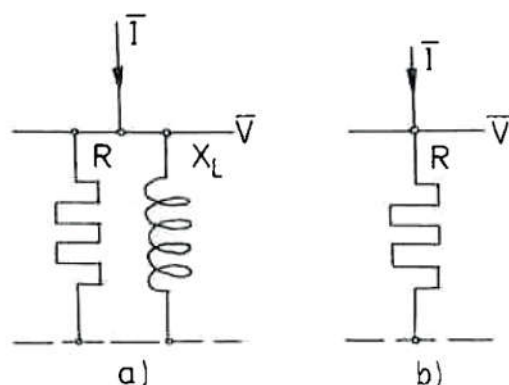
Poglavljje o mogućnostima za smanjenje reaktancija u mreži zavr-

šit ćemo upozorenjem, da smanjenje reaktancija dovodi do porasta snaga kratkog spoja, što može biti limitirajući faktor za primjenu tih mjera (vidi poglavlje 3.1.2.).

Trajna nastojanja da se smanje uzdužne reaktancije dovela bi konačno do pojave krute mreže.

1.2.3 Smanjenje reaktivne snage u mreži

Ne ulazeći u detaljnija fizikalna razmatranja, lako ćemo utvrditi da mnoge vrste trošila za svoje pravilno funkcioniranje moraju iz mreže, uz djelatnu, uzimati i reaktivnu snagu. Takvi potrošači se bez iznimke ponašaju kao poprečna grana, kojoj je ekvivalent pokazan na slici 5a., dakle kao paralelno spojen omski otpor R i induktivna reaktancija X_L . Struja $\bar{I}$ će zaostajati u fazi



Slika 5 - Osnovni tipovi trošila (ekvivalenti)

za (faznim) naponom $\bar{V}$. Za tipična manja trošila prirodni faktor snage (bez kompenzacije) je slijedeći, ovisno o snazi i izvedbi:

Trošilo	Opterećenje	$\cos \varphi$
Univerzalni motor	P_n	0,85 - 0,95
Asinhroni motor jednofazni	P_n	0,6 - 0,75
Asinhroni motor trofazni	P_n	0,7 - 0,9
Asinhroni motor trofazni	$0,25 P_n$	0,3 - 0,6
Fluorescentna svjetiljka		0,45 - 0,55
Živina svjetiljka		0,5 - 0,6
Natrijeva svjetiljka		0,2 - 0,35

Skup potrošača sastavljen iz gore navedenih i sličnih trošila ne bi mogao imati faktor snage bolji od 0,7 , tj. imali bi $Q_{ind} \geq P$.

Uredjaji za otporno grijanje (električne otporne peći i kuhala) i sijalice sa žarnom niti imaju $\cos \varphi = 1$.

Sinhroni motori kao i sinhroni strojevi uopće, mogu promjenom uzbude mijenjati faktor snage u širokom rasponu od induktivnog do kapacitivnog područja, pa će o njima još biti govora u vezi sa smanjenjem reaktivne snage u mreži i u vezi s regulacijom napona.

Ispravljači i elektrolučne peći su takodjer potrošači sa $\cos \varphi < 1$ u induktivnom području. Pobliza svojstva su im opisana u poglavljima 2.1.3. i 2.2.1.

I sami elementi mreže (vodovi, transformatori) doprinose bilanci reaktivnih snaga, i to u poprečnim granama ovisno o naponu, a u uzdužnim granama ovisno o struji. Tipične trofazne reaktivne snage u poprečnim granama elemenata mreže su slijedeće:

Elementi mreže	U (kV)	Reaktivna snaga	
Zračni vod	10	kap.	0,25 kVAr/km
	20		1
	35		3,4
	110		33
	220		134
	400		500
Kabel (maseni)	10		12,5
	20		43
	35		115
Kabel (uljni)	110		950
Transformator		ind.	0,01-0,025 S _n

Usvojimo li za kompleksnu trofaznu snagu izraz (vidi "Mreže I", 2.1.3, 2.1.4):

$$\bar{S} = 3 \bar{V} \bar{I}^* \quad 1-18$$

možemo konstantirati, da će trošila i transformatori za svoj rad trebati znatne količine induktivne reaktivne snage, a vodovi će svojim pogonskim kapacitetima generirati upravo takovu snagu. To, međjutim, ne znači, da će se na taj način postići ravnoteža. Uz konstantni napon (a taj je uvijek uglavnom zadovoljen), vodovi će generirati konstantnu induktivnu reaktivnu snagu, a potrošači će, u skladu s dnevnim dijagramom opterećenja, trošiti tokom vremena vrlo različitu reaktivnu snagu.

Nadalje, prolaz struje kroz uzdužne induktivne reaktancije vodova također će izazvati tokom vremena promjenjive gubitke induktivne reaktivne snage.

$$Q_V = 3 I^2 X_L = 3 I^2 \omega L \quad 1-19a$$

Analogno tome, gubitke induktivne reaktivne snage izazvat će i prolaz struje opterećenja kroz transformator. Ako je poznata prividna snaga kroz transformator, reaktivne gubitke, umjesto pomoću izraza 1-19a, možemo udobnije izračunati iz

$$Q_{TR} = \frac{e_k}{S_n} S^2 \quad 1-19b$$

što kod nazivnog opterećenja transformatora daje

$$Q_{TRn} = e_k S_n \quad 1-19c$$

Kod određene struje I kroz vod, induktivna reaktivna snaga Q_V će biti jednaka kapacitivnoj reaktivnoj snazi uslijed pogonskog (poprečnog) kapaciteta

$$Q_C = \frac{U^2}{X_C} = U^2 \omega C \quad 1-20$$

Ako se prenosi samo djelatna snaga, slučaj $Q_V = Q_C$ odgovara prijenosu "prirodne snage" ("Mreže I" 3.2.5).

Općenito, ako za određeni vod po definiciji 1-18 $Q_V < Q_C$ (manje opterećenje), taj će vod generirati induktivnu snagu (dominantna komponenta je kapacitet), a kod $Q_V > Q_C$ (veće opterećenje) trošit će induktivnu snagu (dominantna komponenta je induktivitet). Ponašanje voda u tom pogledu dobro ilustrira kružni pogonski dijagram ("Mreže I", 5.4.5 i primjer 5.2).

Na temelju ovog i prethodnih razmatranja lako se može zaključiti, da će u mreži u cijelini postojati tokom vremena promjenjivi manjak reaktivne snage. Ovaj manjak pokrivaju generatori u elektranama. Generalno je, dakle, smjer kretanja reaktivne snage, po definiciji 1-18, od izvora u smjeru potrošača. Kako upravo takvi tokovi izazivaju padove napona, imat ćemo u "primitivnoj mreži" (u mreži, u kojoj se ne poduzimaju usmjereni koraci za smanjenje reaktivne snage) najniže napone upravo kod potrošača, gdje bi na-

pon trebao biti konstantan i jednak nazivnom. Tokove reaktivne snage treba, dakle, smanjiti na najmanju moguću mjeru. To će se postići tako, da se reaktivna energija pogodnim sredstvima odnosno uređajima generira neposredno u onoj točki mreže gdje je potrebna, i to upravo u potrebnoj količini. Imali bi slučaj totalne kompenzacije reaktivne snage. Ovaj idealni pogonski princip nije moguće ostvariti zbog niza razloga tehničke i ekonomske naravi, ali će sva nastojanja biti usmjerena ka tom cilju.

Ranije iznesena tvrdnja da u mreži kao cijelini vlada manjak reaktivne snage zaslužuje da se kritički razmotri. Javljaju se pogonski slučajevi, kada u nekim djelovima mreže postoji višak reaktivne snage, makar potrošači trajno zahtijevaju reaktivnu snagu. To će se dogoditi, ako je gubitak reaktivne snage u uzdužnim reaktancijama vodova (1-19) manji od reaktivne snage, koju daju poprečne kapacitivne grane. Ako preostala mreža zajedno s potrošačima ne može apsorbirati tako nastale viškove, javljaju se tokovi reaktivnih snaga u obrnutom smjeru, prema bliže lociranim generatorima. Generatori dolaze u "kapacitivno (poduzbudjeno)" područje rada, pri čemu se smanjuje stabilnost sistema, a mogu se javiti i smetnje u radu samih generatora.

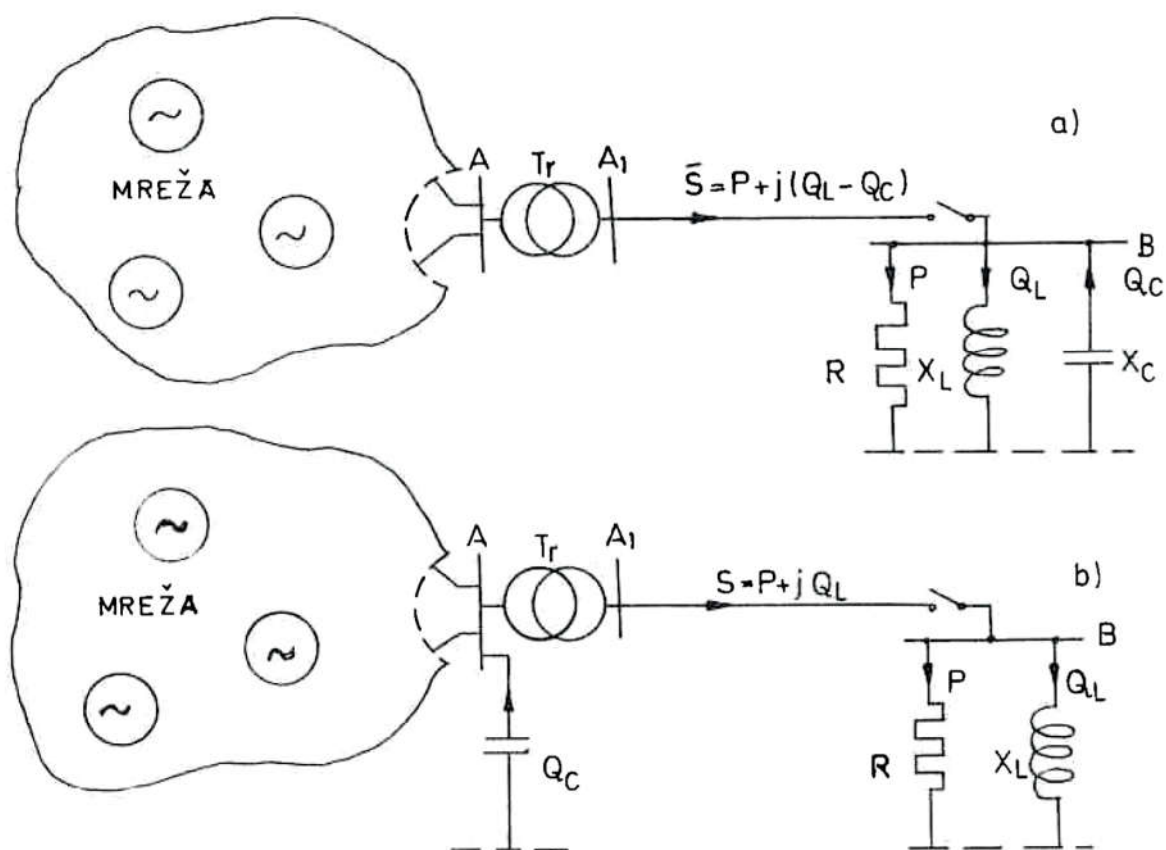
Opisano pogonsko stanje nastupa utjecajem izvjesnih međusobno povezanih okolnosti, a to su:

- malo opterećenje mreže i stoga mala potražnja reaktivne snage (rad noću),
- usljed male potražnje reaktivne snage, mala opterećenost grana mreže,
- zbog malog opterećenja grana mreže, neznatni gubici reaktivne snage u uzdužnim reaktancijama,
- zbog malo opterećenih grana mreže mali padovi napona, usljed toga napon u mreži visok, što izaziva generiranje još većih reaktivnih snaga Q_C u poprečnim kapacitetima.

Takvo pogonsko stanje je tipično u novoizgrađenoj, pa stoga i još malo opterećenoj superponiranoj mreži, pogotovo noću. Nastaje obrnuti problem od prijašnjega: kako apsorbirati višak reaktivne snage. Tehnička smjernica za rješenje problema je ista kao

već ranije utvrđjena: kompenzirati reaktivnu snagu, bilo induktivnu bilo kapacitivnu, na mjestu gdje nastaje.

Paralelni (poprečni) kondenzatori su pogodno i ekonomično sredstvo za kompenzaciju reaktivne snage induktivnih potrošača odnosno trošila. Na sl.6 je prikazan slučaj kompenzacije reaktivne snage trošila priključenog u B. Ako $Q_L = Q_C$, kompenzacija je potpuna.



Slika 6 - Kompenzacija reaktivne snage trošila

Dvije prikazane varijante su sa stanovišta mreže istovjetne. Razlikuju se po mjestu priključenja kondenzatorske baterije. Na slici 6a je kondenzatorska baterija priključena uz samo trošilo, a na slici 6b udaljeno od trošila. Slučaj a odgovara ranije posta-

vljenom idealnom principu, jer je ne samo mreža, već i grana A-B rasterećena većeg dijela ili čak cjelokupne reaktivne snage Q_L . Isključenjem trošila isključuje se i kondenzator, pa neće biti opasnosti od prekompenzacije. Ovaj način smještaja kondenzatora će biti pogodan za trošila, koja imaju izuzetno loš faktor snage (fluorescentne, živine i natrijeve svjetiljke) i kojima je, osim toga, reaktivna snaga konstantna (električne pumpe s približno konstantnom visinom pumpanja, ventilatori u jednolikom režimu rada). Mana ovog načina je veliki ukupni instalirani kapacitet kondenzatora, neaktivan dok je trošilo isključeno. Ako je Q_L promjenljivo, a to je čest slučaj, uz konstantni Q_C dolazi privremeno do podkompenzacije (razdoblja, kad je $Q_L > Q_C$) i do nadkompenzacije (razdoblje kada je $Q_L < Q_C$). Kada su te razlike velike, treba poduzeti mjere da se Q_C prilagodi Q_L , tj. da se Q_C regulira po unaprijed zadanom kriteriju. O tome kasnije.

Na slici 6b prikazan je slučaj grupne kompenzacije, za razliku od individualne kompenzacije svakog trošila prema slici 6a. Pretpostavlja se, da se iz čvora A_1 napaja veći broj trošila. Kod takve grupne kompenzacije je potreban manji ukupni kapacitet kondenzatora (faktor istodobnosti), pa je rješenje jeftinije, a pogotovo ako se predviđa i regulacija odnosno prilagođjenje trenutnim zahtjevima potrošnje. Mana je ovog rješenja:

- prijenosni sistem A-B opterećen je punom reaktivnom snagom Q_L uz odgovarajući pad napona,
- prijenosni sistem A-B mora biti strujno dimenzioniran za prijenos ukupne prividne snage $|\bar{S}| > P$.

Za trošilo ili grupu trošila se obično navodi trofazna djelatna snaga P i faktor snage $\cos \varphi$. Za popunu kompenzaciju mora biti

$$Q_C = Q_L = P \operatorname{tg} \varphi \quad 1-21$$

Kapacitet C jedne faze u zvijezdu spojene trofazne kondenzatorske baterije snage Q_C možemo izračunati koristeći izraz 1-20. Kapacitet C jedne faze kondenzatorske baterije spojene u trokut je $1/3$ prethodno izračunatog kapaciteta, ali kondenzator mora biti izolaciono dimenzioniran za linijski umjesto fazni napon.

Do sada smo paralelnu kondenzatorsku bateriju promatrali samo kao sredstvo za rasterećenje mreže od reaktivne snage, s ciljem da se eliminiraju padovi napona. Navesti ćemo još tri značajna motiva, kojima se može opravdati instaliranje kondenzatorske baterije.

- Preko termičke granice opterećeni vodovi i transformatori u distributivnim i industrijskim mrežama mogu se rasteretiti kompenzacijom reaktivne snage na kraju tih vodova i tako odgoditi ili izbjeći investiranje u nove električne instalacije.
- Za određene kategorije potrošača elektroprivreda naplaćuje utrošenu reaktivnu energiju, pa takvi potrošači na temelju ekonomske računice mogu doći do zaključka, da se isplati postavljanje uređaja za kompenzaciju reaktivne snage. Po tarifi elektroprivreda obično ne naplaćuje svu utrošenu reaktivnu energiju, već samo onu koja se ostvaruje ispod određenog faktora snage $\cos \varphi_0$, npr. 0,9. U tom slučaju je po kriteriju uštede na računu za električnu energiju potrebno kompenzirati samo $\Delta Q_C = Q - Q_0 = P(\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_0)$. 1-22
- Ako se elementi mreže rasterete prijenosa reaktivne snage, može se u visoko opterećenim mrežama postići značajno smanjenje gubitaka radne energije, zahvaljujući kvadratnoj ovisnosti tih gubitaka od struje. Ako pri prijenosu prividne snage S uz faktor snage $\cos \varphi$ imamo djelatne gubitke ΔP_S , a nakon potpune kompenzacije uz prijenos samo djelatne snage $P = S \cos \varphi$ djelatne gubitke ΔP_P , onda će relativno smanjenje gubitaka biti

$$\frac{\Delta P_P}{\Delta P_S} = \cos^2 \varphi \quad 1-23$$

Ako je faktor snage prije potpune kompenzacije bio 0,7, gubici se smanjuju na polovinu.

Ako kompenzacija nije potpuna, imati ćemo, uz prijenos konstantne djelatne snage P , prije kompenzacije prijenos prividne snage S_1 uz $\cos \varphi_1$ i djelatne gubitke ΔP_{S1} , a nakon djelomične kompenzacije prijenos prividne snage S_2 uz poboljšani $\cos \varphi_2$ i djela-

tne gubitke ΔP_{S2} . Relativno smanjenje gubitaka u tom slučaju iznosi

$$\frac{\Delta P_{S2}}{\Delta P_{S1}} = \left(\frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} \right)^2 \quad 1-24$$

Ako kompenzacijom povećamo faktor snage od 0,7 na 0,9, gubici će opasti na 60% prvobitne vrijednosti (kod potpune kompenzacije na 50%).

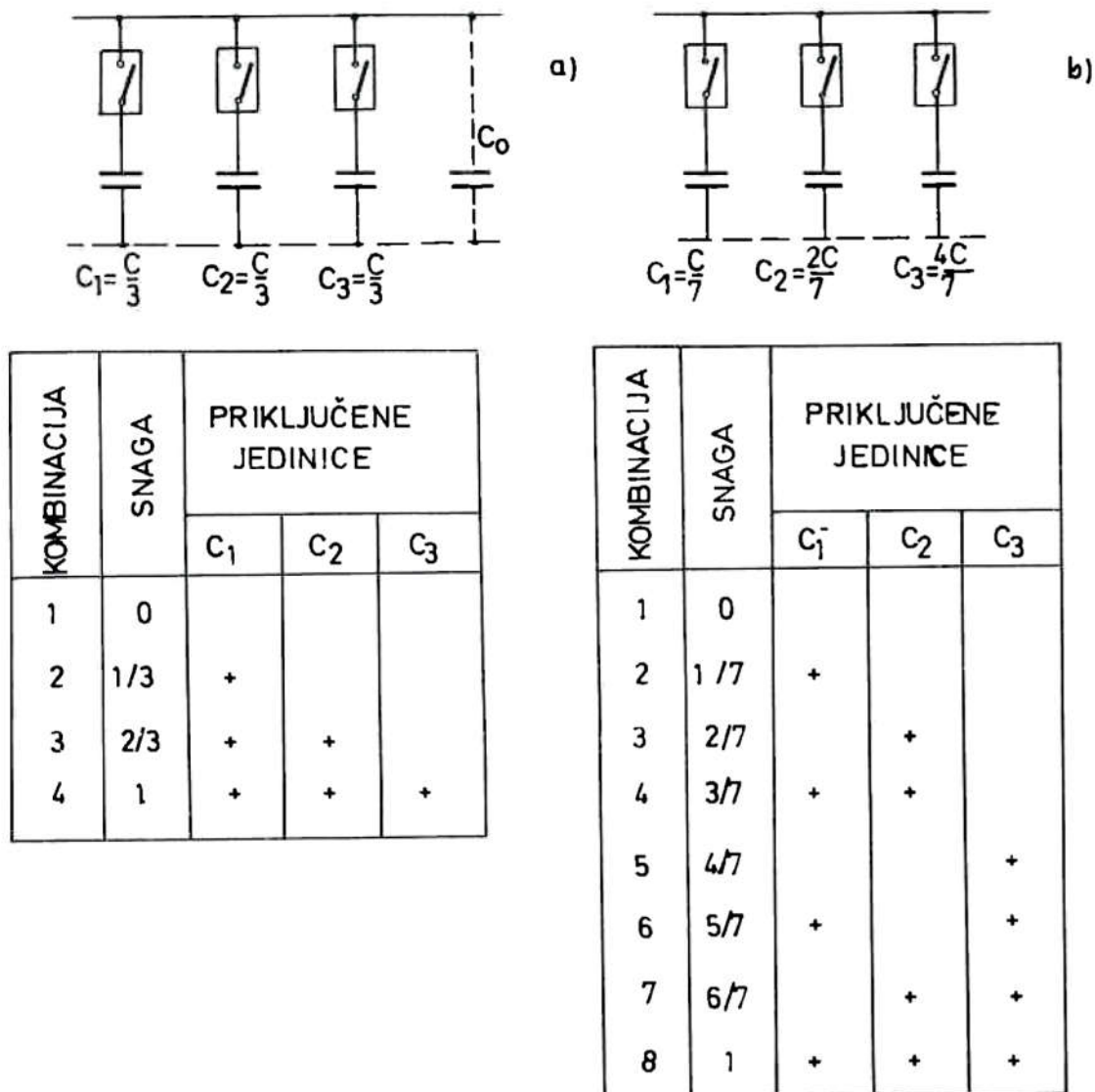
Ako izraze 1-23 i 1-24, primijenjene na pripadne primjere (kompenzacija u prvom slučaju $0,7 \rightarrow 1$, a u drugom $0,7 \rightarrow 0,9$), razmotrimo u svjetlu izraza 1-21 i 1-22, ustanovit ćemo, da je za smanjenje gubitaka za 50% potrebna snaga kompenzacije Q_C , a za smanjenje gubitaka za 40% samo snaga $Q_C/2$.

Već smo ranije ustanovili da će u mnogim slučajevima biti potrebno snagu kompenzacije Q_C prilagoditi trenutnim zahtjevima promjenjive potrošnje. Kod velikog broja individualno kompenziranih trošila prema sl. 6a prilagođjivanje snage Q_C neće biti racionalno. Kod grupe kompenzacije (sl.6b) prilagođjenje se može izvesti racionalno.

"Regulacija" reaktivne snage kondenzatorskim baterijama moguća je jedino u skokovima, na način da se cijela kondenzatorska instalacija podijeli u nekoliko jedinica, od kojih se po potrebi veći ili manji broj priključuje na mrežu. Veći broj manjih jedinica poskupljuje instalaciju, ali omogućuje finije prilagođjenje. Sa stanovišta bilanse reaktivne snage neće biti potrebno fino prilagođjenje, ali u slabim mrežama uključenje odviše velikih kondenzatorskih jedinica može izazvati nedopustive trenutne promjene napona.

Na sl.7 prikazane su kondenzatorske instalacije sa po 3 jedinice, koje omogućuju prilagođjenje potrošnji u 4 (sl.7a), odnosno 8 (sl.7b) regulacijskih stupnjeva do pune snage Q_C .

Ako reaktivna snaga kompenzacije nikako ne pada ispod neke određene vrijednosti Q_{Co} , među kondenzatorskim jedinicama nalazi se i jedna stalno priključena jedinica za temeljnu ili osnovnu kompenzaciju snage. Na sl. 7a takva jedinica označena je sa C_o . Kondenzatorska baterija može tada dobiti maksimalnu reaktivnu snagu $Q_{Co} + Q_C$.



Slika 7 - Kondenzatorska baterija s mogućnošću prilagodjenja

Na sl. 7b prikazana je kondenzatorska grupa sa 3 jedinice takve međusobno različite pojedinačne snage, da se postiže znatno finija regulacija unutar iste ukupne snage, nego kod tri jednake jedinice na sl. 7a. Ovakva podjela, međutim, zahtijeva znatno veći broj uključivanja i isključivanja. Da bi se kod grupe prema sl. 7b prešlo sa regulacionog stupnja 4 na stupanj 5, potrebno je isključiti dvije i uključiti treću jedinicu. To je mana te varijante, jer isključivanje i uključivanje kondenzatora izaziva ve-

lika naprezanja prekidača zbog jakih struja uključivanja i teških uvjeta gašenja električnog luka. Nastaju i komutacioni prenaponi, pa sve to može ograničiti elastičnost kod takve regulacije reaktivne snage.

Kondenzatorske baterije se izvode iz pojedinih uglavnom standardiziranih jedinica. Potrebna snaga i nazivni napon baterije dobiva se serijskim i paralelnim spajanjem takvih jedinica u grupe.

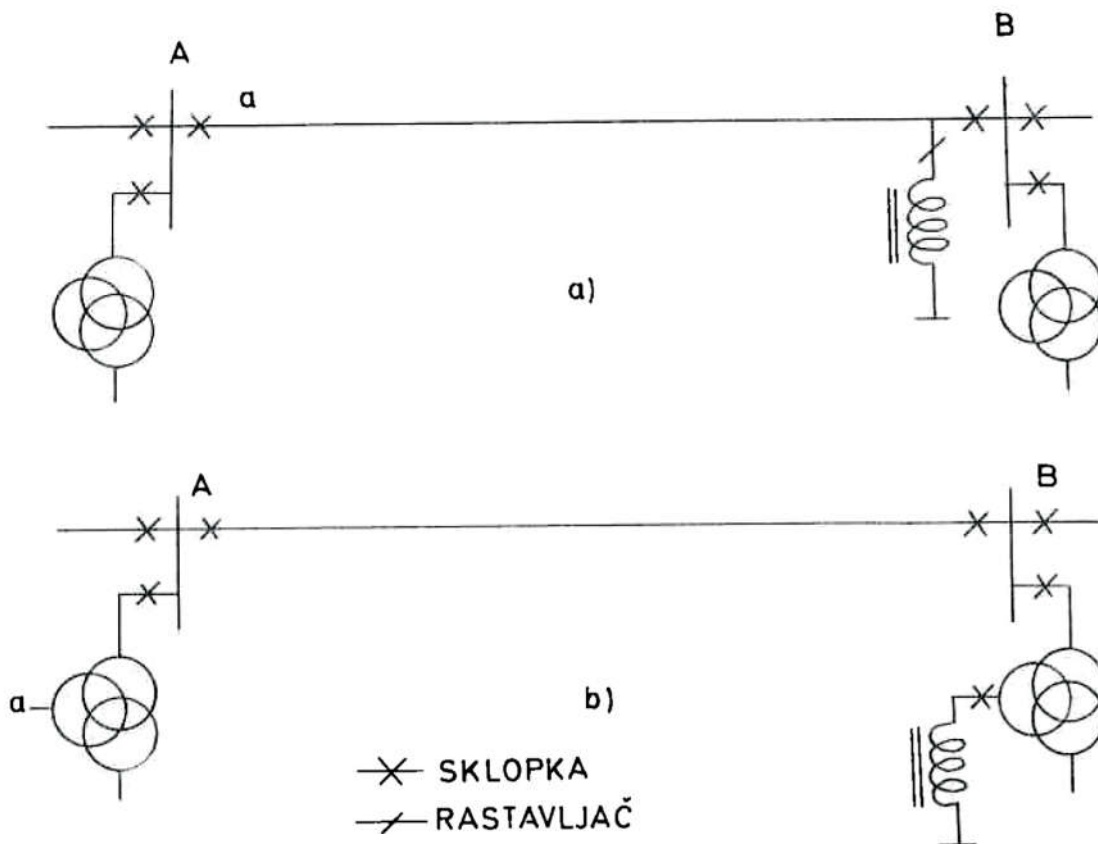
Ako saberemo ova razmatranja, možemo zaključiti, da u nekim slučajevima regulacija reaktivne snage za kompenzaciju neće biti potrebna, a u velikom broju drugih slučajeva će zadovoljiti gruba regulacija u grubim stupnjevima.

Ukoliko je ipak potrebna finija ili vrlo brza regulacija, primjenjuju se statički uređjaji opisani u 2.2.3 ili sinhroni kompenzator.

Sinhroni kompenzator je u principu standardni sinhroni stroj, kojemu je jedini zadatak da proizvodi reaktivnu snagu, pa nema ni pogonskog stroja kao generator, niti radnog stroja kao motor. Proizvodnja reaktivne snage se može kontinuirano prilagoditi potrebama promjenom uzbudne struje. Rad mu je moguć u induktivnom području (generator reaktivne snage poput kondenzatora), a jednako i u kapacitivnom području (potrošač reaktivne snage poput induktiviteta). Sinhroni kompenzator je ekonomičan samo ako ima veću jediničnu snagu, pa mu je mjesto primjene u većim čvorištima mreže za grupnu kompenzaciju reaktivne snage. Sinhroni kompenzator je u usporedbi s kondenzatorskom baterijom znatno skuplji, složeniji za održavanje (brojni pomoćni uređjaji za hlađenje, podmazivanje, pokretanje, sinhronizaciju, itd.), bučniji i ima veće gubitke. Zbog toga se u novije vrijeme umjesto sinhronog kompenzatora sve više koriste velike kondenzatorske baterije. Sinhroni kompenzatori, međutim, imaju određena specifična svojstva, zbog kojih u nekim slučajevima za njih neće biti zamjene. Sinhroni strojevi, pa tako i sinhroni kompenzatori, su sijelo aktivne elektromotorne sile i dinamički se različito ponašaju od svih drugih uređjaja za kompenzaciju reaktivne snage. Kao i sinhronim generatorima i velikim strojevima uopće, odabire im se nazivni napon prema internom optimumu (3-16 kV), pa obično moraju biti priključeni na mrežu pre-

ko posebnog blok-transformatora ili pak na tercijarni namotaj mrežnog transformatora dovoljne snage.

Paralelna (poprečna) prigušnica primjenjuje se za kompenzaciju kapacitivne reaktivne snage dugih nisko opterećenih vodova vrlo visokog napona. Prigušnica može biti priključena neposredno na vod (sl.8a) ili na tercijarni namotaj transformatora u istom čvoru (sl.8b).



Slika 8 - Kompenzaciona prigušnica

a) priključena neposredno na vod i

b) priključena na tercijar transformatora

Ako se prigušnica postavlja samo na jednom kraju voda, onda treba odabrati suprotnu stranu od one, koja se u većini slučajeva prva uključuje. Kod kompenzacije na oba kraja voda, na sl.8 treba dodati prigušnicu i na mjestu označenom sa a. Prigušnice se dimenzioniraju na temelju analize mreže u raznim režimima pogona,

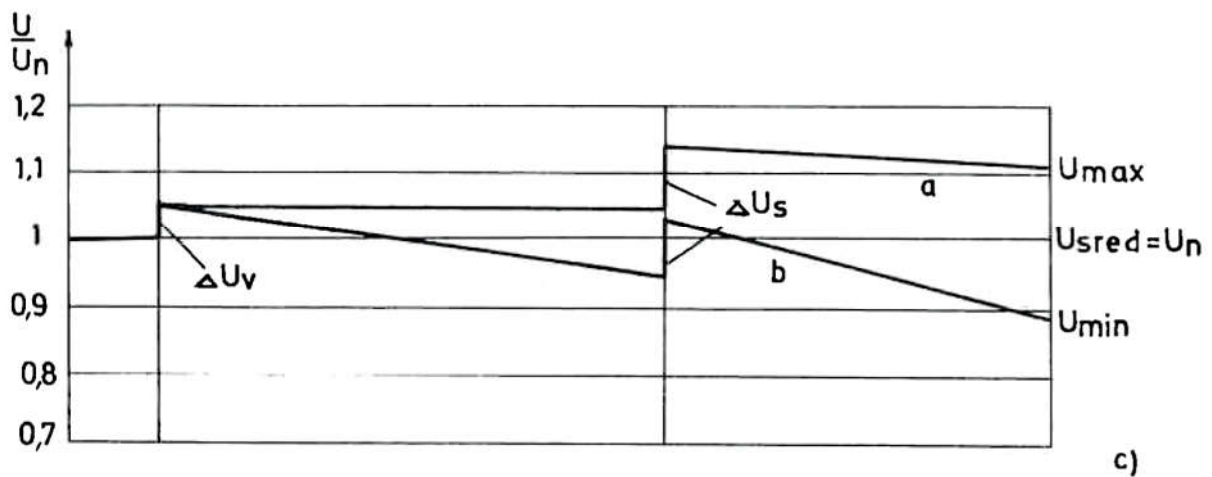
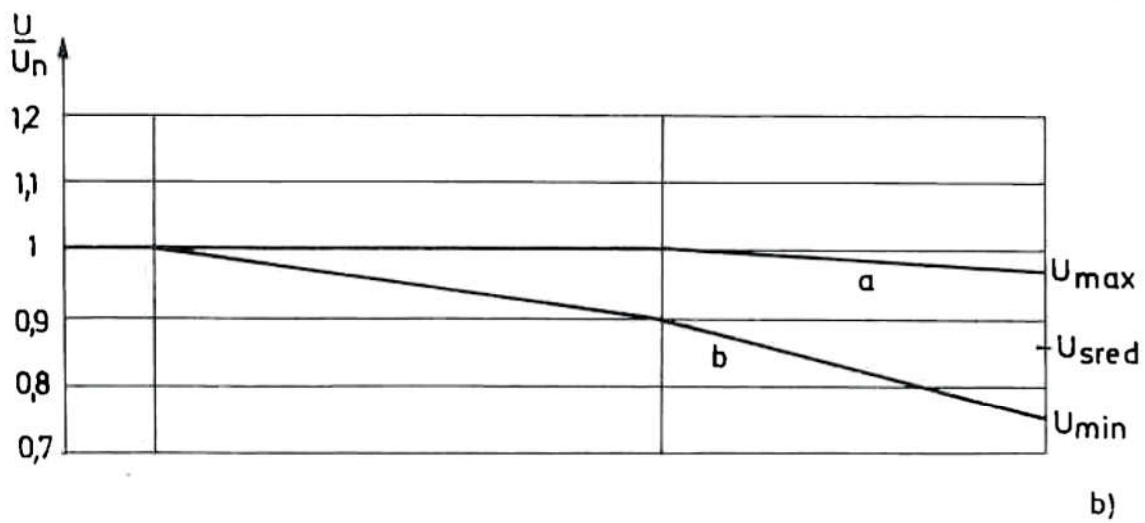
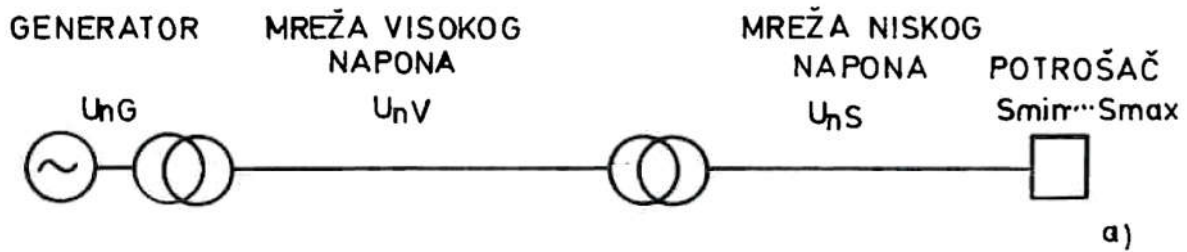
a obično se kompenzira manje od jedne polovine "snage nabijanja" voda.

Prigušnice se izvode sa željeznom jezgrom. Zasićenje, do kojeg može doći kod povišenih napona, izaziva izobličenje struje kompenzacije, što se u velikoj mjeri može otkloniti tercijarnim namotajem ili ekvivalentnim tehničkim zahvatom.

1.2.4 Sredstva za kompenzaciju padova napona

Primjenom mjera i sredstava za smanjenje padova napona, nabrojanih u uvodu poglavlja 1.2. i pobliže opisanih u poglavljima 1.2.1, 1.2.2 i 1.2.3, moći će se do neke izvjesne mjere poboljšati naponske prilike u mreži, ali ni izdaleka u punoj mjeri, pogotovo ako ta sredstva promatramo statički, što je, za sada, i namjera ovog prikaza. Primjena tih sredstava je, naime, iz tehničkih i ekonomskih razloga ograničena. Osim toga, makar su reaktivne snage u granama osnovni razlog za pojavu padova napona, do padova napona dolazi i uslijed tokova djelatne snage (izraz 1-14). Dodatni padovi napona uslijed tokova djelatne snage najmanji su u dijelu mreže najvišeg napona, ali postaju značajniji što se, preko sve nižih naponskih nivoa, približujemo potrošačima. U mreži niskog napona ta komponenta pada napona će biti apsolutno dominantna.

Moramo, dakle, potražiti sredstva za kompenzaciju padova napona "preostalih" nakon do sada poduzetih mjera. Kao dodatnu, u tom smislu usmjerenu mjeru, koristit ćemo odstupanje od nazivnih odnosa kod onih elemenata mreže, gdje je to moguće, a to su transformatori. Pri tome ćemo, za sada, i te mjere promatrati statički, makar smo već najavili, da postoji i dinamička strana problema, koja će nas dovesti do pojma "regulacije napona" (kod nekih od do sada spomenutih i opisanih sredstava za smanjenje padova napona već smo mogli ustanoviti sposobnost prilagodjenja trenutnom pogonskom stanju, pa ćemo ta sredstva kasnije moći uključiti u "sistem regulacije"). Pojavu odstupanja od nazivnih odnosa objasniti ćemo pomoću sl.9. Na sl.9a je mreža svedena na jednostavni prijenosni



Slika 9 - Kompenzacija (preostalog) pada napona nazivnim omjerom transformacije.

sistem, kojim se potrošaču dovodi potrebna djelatna i nekompenzirani ostatak reaktivne snage, pri čemu se ukupna (prividna) snaga mijenja od $S_{\min}$ do $S_{\max}$. Snaga prolazi kroz dva stupnja transformacije, i to kroz transformator bloka generatora i transformator koji povezuje mrežu visokog napona i mrežu srednjeg napona. Nazivni naponi pojedinih dijelova sistema označeni su na sl.9 sa U_{nG} , U_{nV} i U_{nS} .

Na sl.9b prikazana je linija napona duž prijenosnog sistema, i to za slučaj malog opterećenja $S_{\min}$ (linija a) i za slučaj jakog opterećenja $S_{\max}$ (linija b). Transformatori imaju nazivni (nominalni) prijenosni omjer (U_{nG}/U_{nV} i U_{nV}/U_{nS}). Generator će pomoću vlastite uzbude uvijek imati na stezaljkama nazivni napon i time optimalne uvjete rada. Pretpostavljeno je, da u vrijeme malog opterećenja u mreži visokog napona neće biti padova napona. Vidimo, da će naponi kod potrošača u svim slučajevima biti ispod nazivnog, pa tako i srednji napon U_{sred} po definiciji 1-1. Na temelju dobivenog podatka o srednjem naponu možemo reći da su naponske prilike kod potrošača loše, dok ćemo varijacije napona moći suzbiti tek "pravom" regulacijom napona.

Na sl.9c je prikazan isti slučaj, ali uz primjenu transformatora sa nenazivnim (nenominalnim) prijenosnim omjerom. Transformator bloka, koji povezuje generator s mrežom, ima na strani višeg napona (gledano u smjeru toka snage na sekundarnoj strani) povećani broj zavoja u odnosu na slučaj nominalnog prijenosnog omjera. Transformator, koji povezuje mrežu visokog s mrežom srednjeg napona ima povećan broj zavoja na mreži nižeg napona (gledano u smjeru toka snage također na sekundarnoj strani). Tako svi transformatori u slučaju c) na sekundarnoj strani imaju viši napon, nego u slučaju b). To povišenje napona označeno je sa ΔU_V (za transformator bloka) i sa ΔU_S (za mrežni transformator). Time smo postigli da je srednji napon potrošača jednak nazivnom.

Ova se mjera u praksi primjenjuje uvijek i bez iznimke, ako je tok snage kroz transformator uvijek ili skoro uvijek u istom smjeru. Tako kod transformatora bloka umjesto nazivnog omjera, npr. 16/220, odabire se 16/231, kod mrežnog transformatora umjesto 220/110 odabire se 220/115,5, odnosno umjesto 110/35 odabire se

110/36,75 itd. Isto tako se i kod distributivnih transformatora (nazivni naponi 35, 10 i 0,38 kV) odabiru na primjer prijenosni omjeri 35/10,5 i 10/0,4.

Vidimo, da je u svim slučajevima napon sekundarne strane (u praznom hodu) povećan za 5%. Toliko povećanje se u pravilu standardno primjenjuje. Kako prilike u svim mrežama odnosno djelovima mreže nisu iste, nisu rijetki slučajevi, da je za optimalno rješenje potreban neki drugi prijenosni omjer. Tada se transformatori izvođe s tzv. otcjepima za regulaciju u beznaponskom stanju, dakle s mogućnošću prilagodjenja prijenosnog omjera prosječnim prilikama u mreži. Takvo prilagodjenje vrši se za neko duže razdoblje (ne kraće od nekoliko mjeseci ili prilikom izrazitih promjena u konfiguraciji mreže), jer zahtijeva isključenje transformatora iz pogona. Prilagodjenje broja zavoja vrši se na onoj strani transformatora, gdje se očekuju veće varijacije napona, a to je u pravilu strana gornjeg napona. Izbor prijenosnih omjera ograničen je obično na tri, a najviše na pet. Navodimo nekoliko tipičnih mogućnosti regulacije (navedeni naponi vrijede za prazni hod):

10 ± 2,5 i 5%/0,4, mogući omjeri :

10,5/0,4
10,25/0,4
10/0,4
9,75/0,4
9,5 /0,4

10 ± 4%/0,4, mogući omjeri :

10,4/0,4
10/0,4
9,6/0,4

35 ± 5%/10,5, mogući omjeri :

36,75/10,5
35/10,5
33,25/10,5

Za transformatore jugoslavenske mreže 400 kV odabran je prijenosni omjer

$400 \pm 5\%/231/31,5,$ mogući omjeri :

$420/231/31,5$

$400/231/31,5$

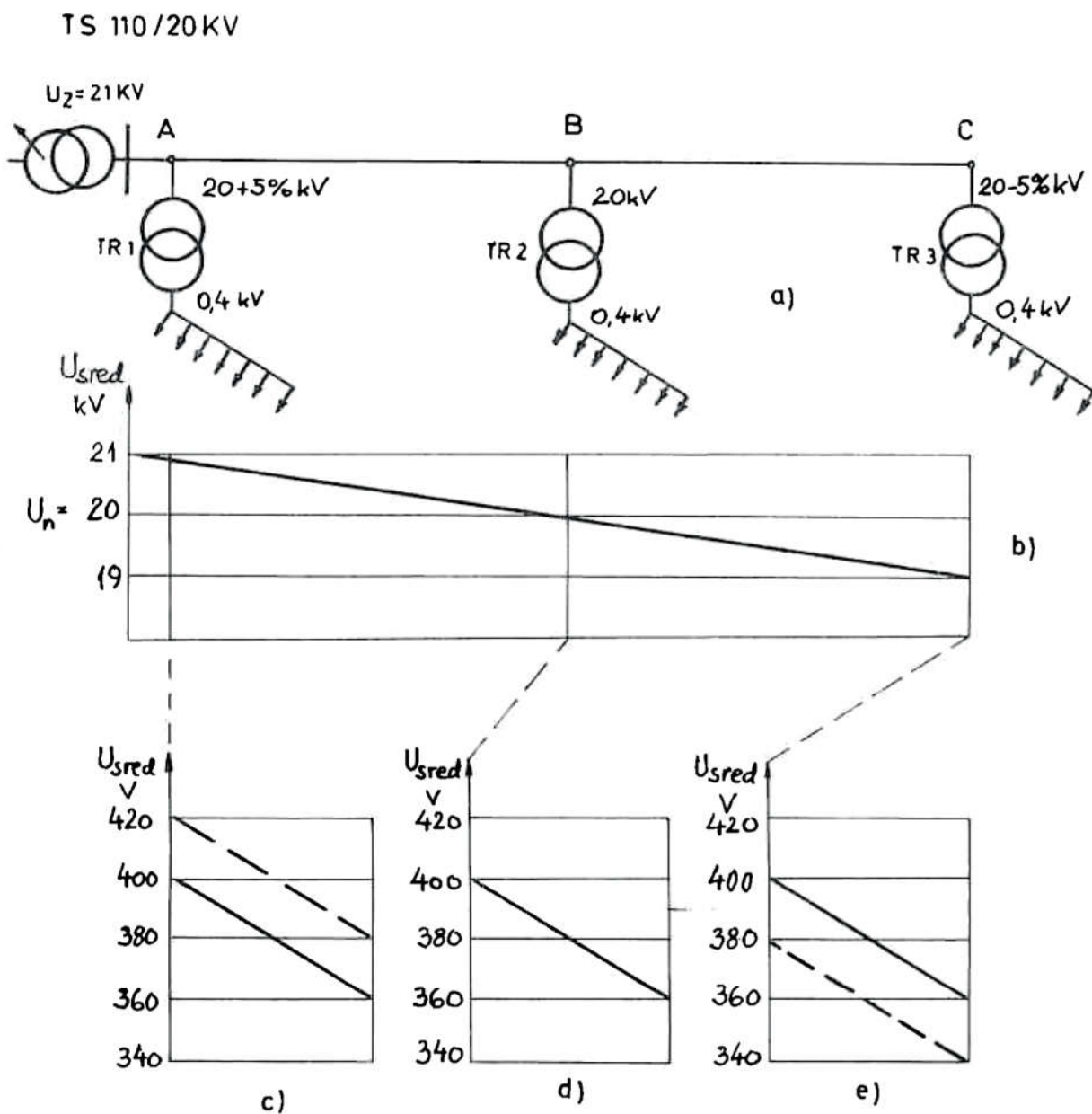
$380/231/31,5$

Analogno tome, može transformator bloka imati mogućnost prilagodjenja u beznaponskom stanju, npr.:

$16/231 \pm 3\%$

Na sl.10 prikazani su, u principu, uz stanovita zanemarenja (pad napona u samom transformatoru uslijed prolaza reaktivne snage), efekti prilagodjenja prijenosnog omjera transformatora položaju u mreži. Odabran je primjer radijalnog voda nazivnog napona 20kV, na koji su priključene 3 transformatorske stanice A,B,C za snabdjevanje potrošača na niskom naponu. Vod se napaja iz TS 110/20kV, koja na sekundarnoj strani ima konstantan napon $20 + 5\% = 21$ kV, zahvaljujući regulacionom transformatoru (sl.10a). Na sl.10b prikazan je opadajući napon duž voda kod srednjeg opterećenja. Tako ćemo u stanici A neposredno uz TS 110/20 kV imati srednji napon 21 kV, u stanici B 20 kV, a u stanici C 19 kV. Tom srednjem naponu prilagodimo transformatore $20 \pm 5\%/0,4$ izborom odgovarajućeg otcjepa na strani gornjeg napona. Pošto su i naponi sekundarne strane tih transformatora povišeni (400 umjesto 380 V), imati ćemo kod srednjeg opterećenja na strani niskog napona svih distributivnih transformatora srednji napon 400 V. To je ujedno napon potrošača bliskih transformatoru. U mreži niskog napona će postojati padovi napona, i to sve veći što je potrošač priključen dalje od transformatora. Te prilike ilustrirane su na slikama 10c), d) i e) za stanice A,B i C punom linijom. Svi potrošači na niskom naponu imati će dakle srednji napon između 400 i 360 V, dakle u prosjeku $380 \text{ V} = U_n$. Kad ne bi imali prilagodjenje prijenosnog omjera transformatora TR 1,2 i 3 u stanicama A, B i C, varijacije srednjeg napona kod potrošača bile bi između 430 i 340 V.

Možemo, uslijed odstupanja opterećenja od srednjeg, očekivati takodjer daljnja odstupanja od srednjih napona prikazanih na sl.10c), d) i e). Ta odstupanja su nepovoljna, ako su kod po-



Slika 10 - Statičko prilagodjenje prijenosnog omjera transformatora u mreži: naponske prilike kod srednjeg opterećenja.

trošača sa $U_{\text{sred}} > U_n$ na gore, a kod potrošača sa $U_{\text{sred}} < U_n$ na dolje.

Takva neminovna dodatna ustupanja ne možemo do sada prikazanim sredstvima potpuno otkloniti, osim povećanjem presjeka voda 20 kV i niskonaponskih vodova, a ta mjera ima svoje ekonomske granice. Dodatna kolebanja napona oko U_{sred} , koja nastaju promjenom opterećenja, mogu se kompenzirati programiranom regulacijom napona u TS 110/20 kV, o čemu će biti govora u slijedećem poglavlju.

1.2.5 Regulacija napona

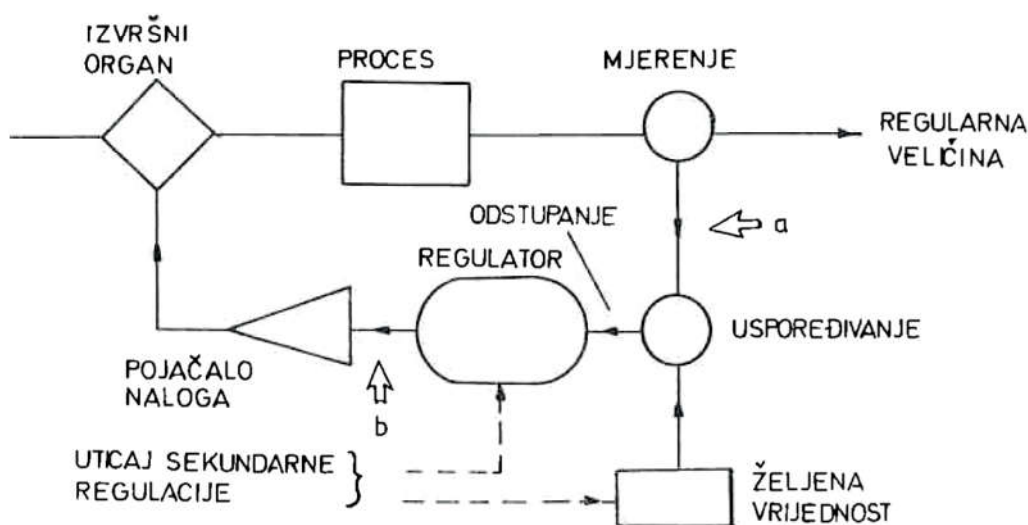
U dosadašnjim razmatranjima opisana su nastojanja, da se primjenom određenih sredstava i mjera savladaju padovi napona u mreži, a s namjerom da se približimo zahtjevima potrošača i mreže u pogledu naponskih prilika. Opisane mjere su bile statičke, pa i onda, ako su postignute uvrštavanjem uređaja, koji u sebi sadrže prirodnu ili prigradnjenu mogućnost dinamičkog djelovanja na naponske prilike.

Pozitivni rezultati primjene statičkih sredstava su ograničeni, naročito kada se suočavamo s problemom kolebanja napona uslijed promjene opterećenja tokom vremena. Pošto su kolebanja napona dinamički proces, potrebno je i zadatak shvatiti dinamički, te pronaći tehnička sredstva koja će biti u stanju da u tom smislu djeluju. Tako dolazimo do pojma regulacije napona, tj. do trajnog svjesnog reagiranja na promjene po unaprijed zadanom kriteriju. Regulacija napona u mreži je složen zadatak, prvenstveno iz tri razloga:

- a) Regulacioni zahvat na jednom mjestu u mreži odraziti će se, u većini slučajeva, i na ostale djelove mreže. Ova interaktivnost zahtijeva da se regulacija napona u mreži osnuje kao podsistem, vodjen iz određenog centra. S veličinom mreže raste i složenost zadatka;
- b) Pokušaj regulacije napona u visokonaponskoj mreži dovodi do promjene tokova reaktivne snage. Dapače, u jakim (krutim ili skoro krutim) mrežama regulacija napona se praktički isključivo svodi na regulaciju reaktivne snage (vidi i "Mreže I", 1.1.5);
- c) Zahtjevi u pogledu napona nisu jednaki u raznim djelovima mreže. Iz prethodnih razmatranja već smo zaključili, da napon u distri-

butivnoj mreži mora biti prilagodjen zahtjevima potrošača, a u mreži visokog napona je podredjen zahtjevu minimalnih djelatnih gubitaka.

Reguliranje i vođenje procesa, naročito automatsko reguliranje i vođenje, predmet su posebnog područja znanosti i tehnike, pa ćemo ovdje spomenuti samo najnužnije osnovne postavke. Na sl.11 prikazan je osnovni zatvoreni regulacioni krug s osnovnim elementima. Regu-



Slika 11 - Regulacioni krug

lirana veličina se mjeri i uspoređuje sa željenom vrijednošću, utvrđeno odstupanje se obrađuje u regulatoru, koji izdaje odgovarajući nalog izvršnom organu. Nalog se u pravilu mora pojačati. Ako regulacionim zahvatom regulirana veličina nije postigla željenu vrijednost, proces reguliranja se nastavlja.

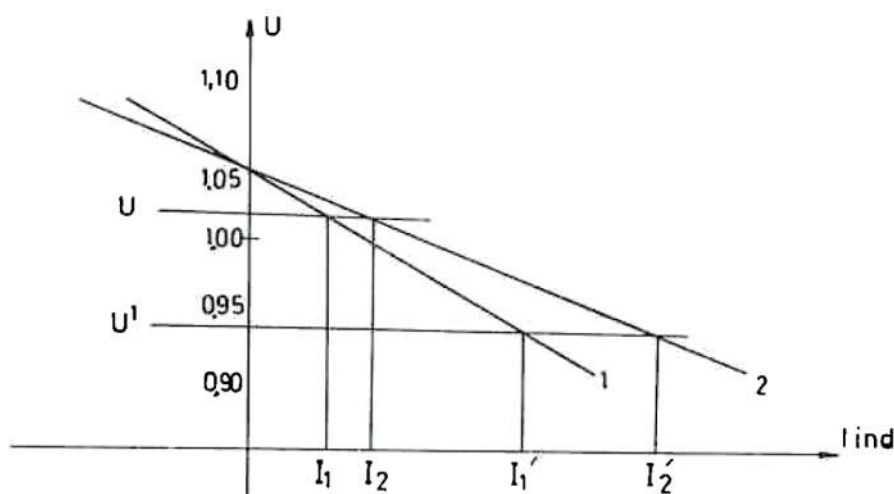
Regulacija može biti ručna. U tom slučaju je čovjek uključen u regulacioni krug. Pri tome čovjek može biti uključen na mjestu a (sl.11), pa tada unosi mjerene vrijednosti u regulator. Ako je čovjek uključen na mjestu b, tada prosljeđuje nalog izvršnom organu. Potpuno ručnu regulaciju imamo, ako čovjek vrši sve funkcije između a i b.

Ako je regulacioni krug zatvoren preko svih uređaja prikazanih na sl.11, regulacija je automatska. Uloga čovjeka se u tom sluča-

ju svodi na udešavanje željene vrijednosti, i to samo povremeno i po potrebi.

Na sl.11 prikazani regulacioni krug je krug primarne regulacije. Ako je udešavanje željene vrijednosti i karakteristike regulatora povjereno nadređenoj hijerarhijskoj razini vođenja, koja raspolaže sa podacima sa većeg područja, govorimo o sekundarnoj regulaciji, koja je u principu takodjer automatska.

U slučajevima, kada je regulacioni zahvat interaktivan s drugim sličnim uređajima, tj. ako isto odstupanje djeluje na više odvojenih regulacionih krugova istog procesa i ako regulacioni zahvat izaziva odstupanje na drugom mjestu, mora već u primarnom krugu postojati mogućnost suradnje bez posebnog povezivanja srodnih regulacionih krugova neposredno (ili preko sekundarnog kruga). Povezivanje je u tom slučaju preko samog procesa, a povezuje se statikom regulacionog kruga. Zgodan je primjer regulacija uzbude dvaju generatora sa nezavisnim regulacionim krugovima (sl.12).

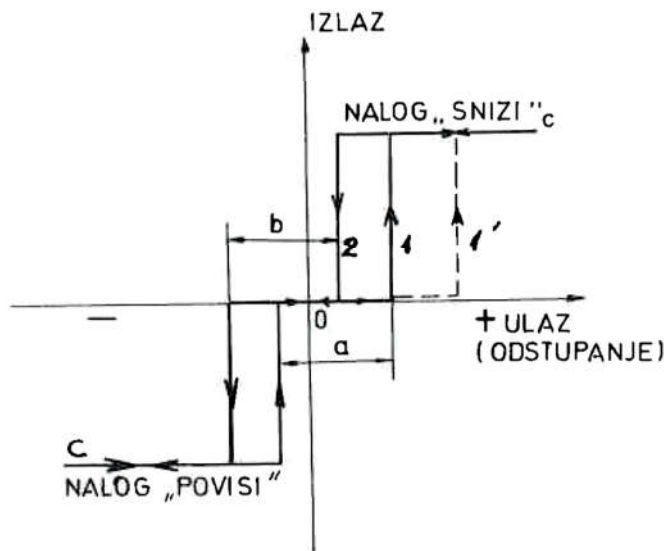


Slika 12 - Statika regulatora

Statika se ispoljava nagibom regulacione karakteristike. Raspodjela reaktivne struje na generator 1 i 2 vrši se, npr., uvijek u omjeru nazivnih struja generatora, bez obzira da li je napon mreže U ili U' . Kad bi karakteristike bile horizontalne (astatične), raspodjela struje na ta dva generatora bi bila neodređena. U ovom

primjeru se može odmah ilustrirati i uloga sekundarne regulacije. Nalogom sekundarne regulacije mogao bi se npr. kod promjene napona od U na U' izvršiti paralelni pomak karakteristike svih regulatora na gore promjenom željene vrijednosti.

Za regulatore su svojstvena i "trenja", koja se ispoljavaju u vidu mrtve zone i histereze. Kada izvršni organ djeluje u stupnjevima, diskontinuirano (tipično kod regulacionog transformatora) ili ako se žele izbjeći odviše česta reagiranja izvršnog organa radi manjeg trošenja uređaja (npr. izgaranje kontakata), takva se trenja namjerno ugrađuju u regulacioni krug. Na sl.13 pokazana je karakteristika regulatora sa ugrađenim trenjima.



Slika 13 - "Trenja" regulatora

Mogu se razlučiti slijedeći pojmovi: sa a (kada se na ulazu javlja rastuća veličina) i sa b (kada se na ulazu javlja opadajuća veličina) označena je "mrtva zona" (neosjetljivost) regulatora. U toj zoni postoji odstupanje od željene vrijednosti, ali regulator još ne izdaje izvršni nalog. U prikazanoj karakteristici postoji "histereza", koja se ispoljava tako, da kod rastućeg odstupanja do regulacionog naloga dolazi kod odstupanja 1, a kada se potom odstupanje smanjuje, do nestanka naloga dolazi tek u 2.

Kad ne bi bilo histereze, mrtve zone a i b bi se međusobno po-

klapale, odnosno parovi vertikalnih linija u području "povisi" odnosno "snizi" stopile bi se u jednu liniju. Osim mrtve zone i histereze u prikazani regulator je ugrađeno još i "zasićenje", koje se ispoljava u konstantnom intezitetu naloga, bez obzira na veličinu odstupanja (linije c horizontalne).

U regulator može, osim opisanih karakterističnih svojstava, biti ugrađeno još i zavisno ili nezavisno "vremensko zatezanje" davanja naloga. Može biti npr. primijenjen slijedeći kriterij (primjer zavisnog vremenskog zatezanja): kod sporog pozitivnog porasta odstupanja, doći će do davanja naloga kod odstupanja 1. Ako je taj porast brz, do naloga će doći tek u 1', dakle kasnije, nego što diktira osnovna karakteristika regulatora. Takvo zatezanje opravdano je kod inače po prirodi spore regulacije regulacionih transformatora, kako ne bi došlo do nepotrebnog davanja naloga pri naglim prolaznim odstupanjima. Ovdje opisana dodatna svojstva regulatora moraju biti optimalno prilagođena karakteristikama izvršnog organa i cilju regulacije. Zakonitost, po kojoj odstupanje regulirane veličine od željene vrijednosti putem regulacionog kruga utječe na izvršnim organom izazvane posljedice, naziva se "odziv" regulacionog kruga odnosno sistema.

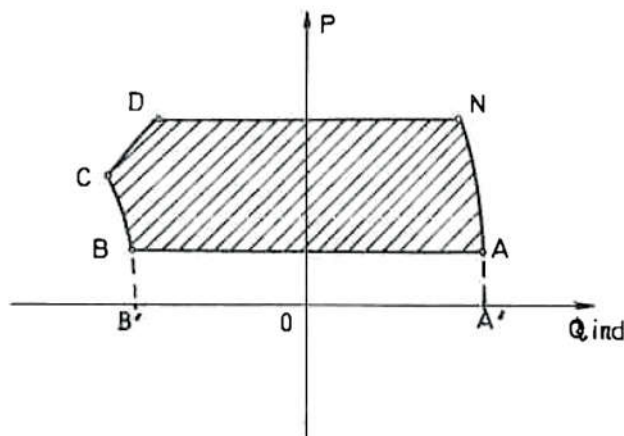
Regulaciono djelovanje ili ponašanje u elektroenergetskom sistemu mogu imati i neki elementi, kojima nije prigradjen regulacioni uređaj. Za takve elemente možemo kazati, da imaju prirodnu ili spontanu regulaciju. Ako promatramo već spomenute elemente, za koje smo utvrdili da utječu na tokove reaktivne snage, pa time i na naponske prilike, možemo ustanoviti, da neki od njih spontano reaguju. Tako npr. reaktivna struja i snaga kroz poprečno spojene kondenzatore i prigušnice ovise o naponu na njihovim stezaljkama, a da nikakav regulator ili izvršni organ na to ne utječe. Pri tome ne možemo utjecati na karakteristiku odziva, ona je prirodna. Na nju možemo ograničeno utjecati samo prilikom izbora uređaja.

Prije nego predjemo na sintezu problema, spomenut ćemo još dva elementa, koji su važni, a u nekim mrežama i jedini sudionici u regulaciji napona.

Sinhroni stroj kao praktički jedini aktivni element mreže igra odlučujuću ulogu u regulaciji napona. Sinhroni stroj susrećemo u mreži u tri funkcije.

Generator pokretan pogonskim strojem (parna ili vodena turbina, plinska turbina) ima ulogu da mehaničku snagu pogonskog stroja pretvori u djelatnu električnu snagu potrebnu mreži za snabdijevanje potrošača i pokrivanje djelatnih gubitaka. Jedinična snaga sinhronog generatora može biti vrlo različita. U industrijskim termoelektranama (energanama) ona se kreće između 1 MW i nekih 25 MW. Kod hidroelektrana je snaga generatora prilagodjena vodotoku i ulozi elektrane u mreži (akumulaciona, protočna), pa može biti vrlo različita, s time da su jedinične snage preko 200 MW iznimne. U elektroprivrednim termoelektranama teži se za što većim jediničnim snagama. Tehnička granica snage turbogeneratora približava se danas vrijednostima od 2000 MW, ali su maksimalne jedinične snage ograničene i mrežom (mogućnost prijenosa, stabilnost, energetske posljedice ispada generatora ...). Najveća jedinična snaga turboagregata u SFRJ (u gradnji) je 600 MW.

Generiranje prividne snage ograničeno je zagrijavanjem statora, snagom i svojstvima pogonskog stroja, te granicama uzbude. Na sl.14 prikazane su spomenute granice za turbogenerator, čime je definirano šrafirano područje rada. Točka N predstavlja nazivnu



Slika 14 - Područje rada turbogeneratora
(pogonska karta za $U_G = \text{konst.}$)

snagu S_n generatora uz pripadni P_n , Q_n i φ_n . Šrafirana površina ograničena je na slijedeći način:

N-A maksimalna uzbuda

A-B tehnički minimum parne turbine (kod hidrogeneratora A'-B')

B-C minimalna uzbuda

C-D zagrijavanje statora

D-N snaga turbine

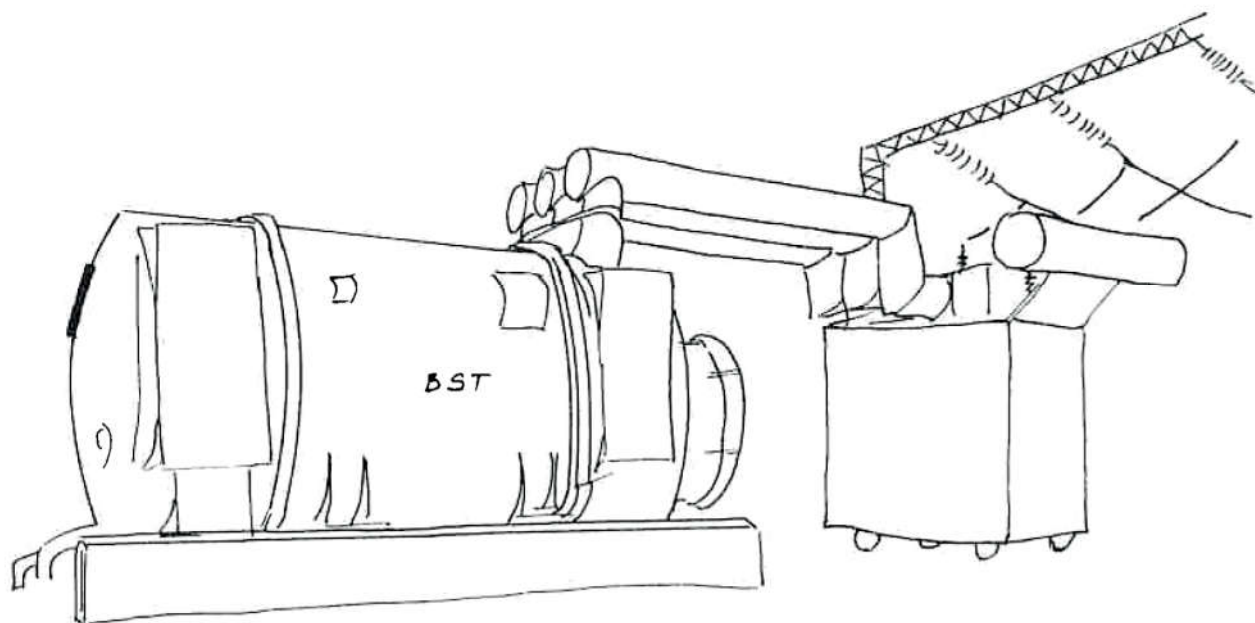
U kapacitivnom području moguća su još i daljnja ograničenja zbog stabilnosti. Ta ograničenja uvjetuje sistem.

Suvremeni veliki sinhroni strojevi grade se za $\cos \varphi$ blizu jedinici, polazeći od realne pretpostavke, da se reaktivna snaga proizvodi bliže potrošačima, dok mreža vrlo visokog napona obično nema manjak reaktivne snage.

Sinhroni motori se koriste za pogon radnih strojeva i to onda, ako se ne zahtijeva regulacija broja okretaja i gdje se regulacija snage (ako je potrebna) može vršiti na strani radnog stroja. Jedinične snage su vrlo različite, ali obično ne prekoračuju nekih 10 MW. Iznimka u pogledu jedinične snage su sinhroni strojevi u reverzibilnim (pumpnim) hidroelektranama, kada su u pumpnom radu. Slično kao i generatori, imaju definirano područje rada u sustavu P-Q.

Sinhroni kompenzatori imaju isključivi zadatak da proizvode reaktivnu snagu za sistem (ili da je crpe iz sistema). Nemaju pogonskog stroja (osim za upućivanje u rad), a iz mreže uzimaju samo onoliko djelatne snage, koliko je potrebno za hlađenje, podmazivanje i pokrivanje gubitaka. Snaga im nije manja od nekih 10 MVar, a gornja granica je oko 300 MVar. Sinhroni kompenzatori u pogonu u SFRJ su snage 50 MVar. Nazivna snaga je definirana za induktivni rad (proizvodnja induktivne reaktivne snage, analogno kondenzatoru, naduzbudjeno područje), a u kapacitivnom radu (apsorpcija induktivne reaktivne snage, analogno prigušnici, poduzbudjeno područje) maksimalna snaga im je obično manja ($Q_{nkap} = 0,5 \dots 0,8 Q_{nind}$).

Sl.15 prikazuje skicu sinhronog kompenzatora uobičajene vanjske montaže s priključnim transformatorom.



Slika 15 - Skica tipičnog sinhronog kompenzatora s priključnim transformatorom

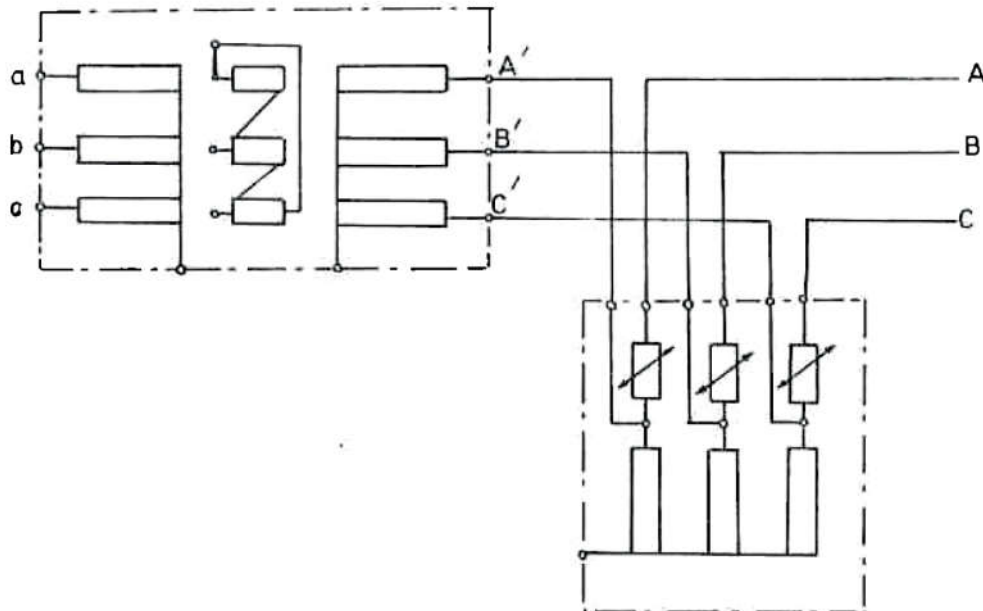
Mnoge vršne hidroelektrane, kojima je broj sati rada tokom dana ili godine malen, imaju generatore i njihove pomoćne uređaje (hladjenje, podmazivanje, ispumpavanje vode iz kućišta turbine) prilagodjene za kompenzatorski rad (dužina A'-B' na sl.14).

Svi sinhroni strojevi, bez obzira na namjenu, u stanju su kontinuirano regulirati proizvodnju reaktivne snage u širokim granicama, i to razmjerno brzo. Bez dodatnih uređaja moguće je "proći" opseg uzbuđe za nekoliko sekundi, a uz primjenu moćnih uzbuđnih uređaja za cca 1 s i manje.

Transformatore smo do sada, u vezi s naponskim prilikama, u više navrata spominjali. Već primjenom transformatora sa nenazivnim prijenosnim omjerom, pogotovo ako postoji mogućnost prilagodjenja

tog omjera, postižu se pozitivni rezultati, praktički bez dodatnih investicija. Ta mjera, međjutim, djeluje samo statički. Transformator se može uključiti u dinamičku regulaciju, ako je izveden kao regulacioni transformator. Takav transformator ima veći broj izvoda na namotaju, i to na onom gdje se očekuju veće varijacije napona. Prijelaz s jednog izvoda na drugi, susjedni izvod, dovodi do promjene prijenosnog omjera i to pod opterećenjem. U tu svrhu je regulacioni transformator opremljen učinskom regulacionom sklopkom. Regulacija je stepenasta, ali su odcjepi na dovoljno malom razmaku, tako da se regulacioni zahvat ne zamjećuje kao nagla promjena napona, pa je možemo smatrati kontinuiranom. U izvedbu regulacionog dijela ovdje nećemo ulaziti. Opseg regulacije obično nije manji od $\pm 15\%$.

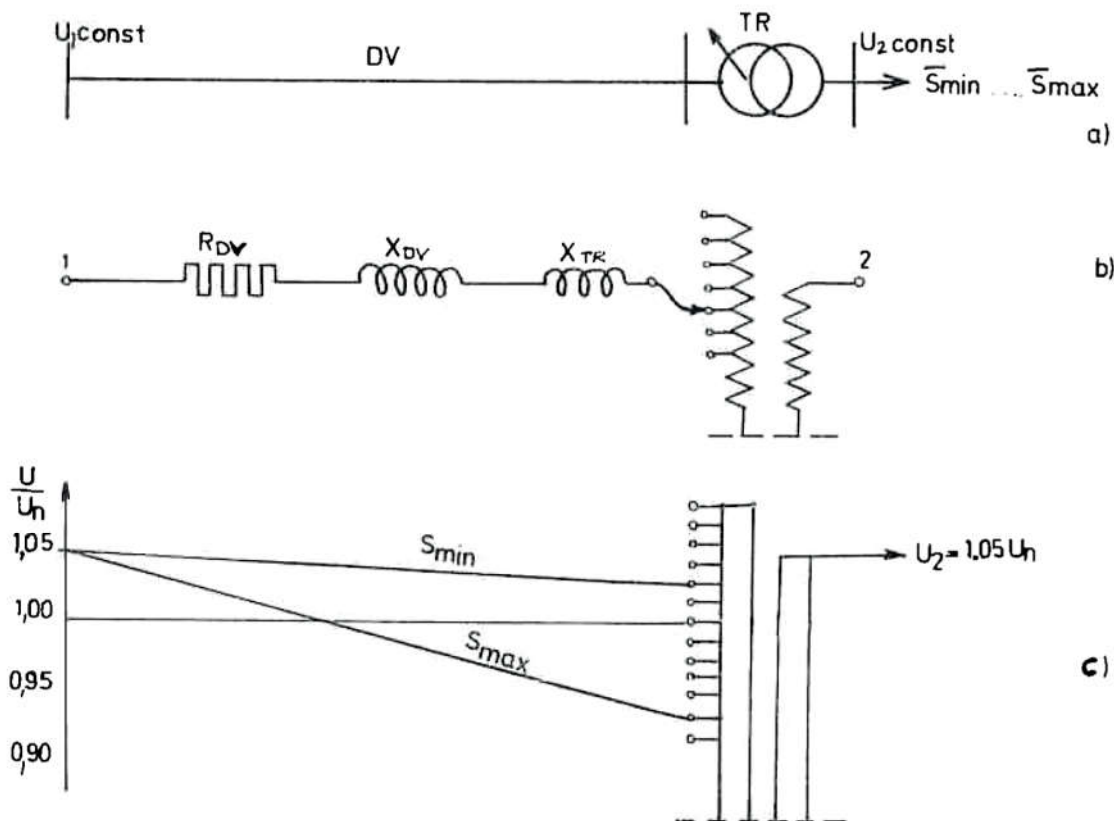
Ako se prilikom regulacije u praznom hodu ne mijenja fazni kut između primarnog i sekundarnog napona, govorimo o uzdužnoj regulaciji napona regulacionim transformatorom. Pri tome se mijenja samo apsolutni iznos napona. To je ujedno najčešća izvedba regulacionog transformatora.



Slika 16 - Uzdužna regulacija napona putem dodatnog regulacionog transformatora.

U slučaju kada transformator nije izveden kao regulacioni, a postoji potreba regulacije napona, regulacija je moguća i dodatnim regulacionim transformatorom. Prolazna snaga ovog transformatora mora biti ista kao i snaga glavnog transformatora, ali tipska snaga je znatno manja, jer ovaj transformator dobavlja samo snagu $\sqrt{3} \Delta U I_n$ (sl.16).

Regulacionim transformatorom možemo regulaciju napona u pravom smislu riječi vršiti na granici prijenosne i distributivne mreže (kod nas primarni napon 110 kV, sekundarni napon 35, 20 ili 10 kV). Na sl.17a se iz čvora 1 sa čvrstim naponom $U_1 = 1,05 U_n$ napaja udaljena transformatorska stanica, na primjer 110/20 kV. Snaga konzumnog područja koleba između $\bar{S}_{min}$ i $\bar{S}_{max}$, pa će i na-



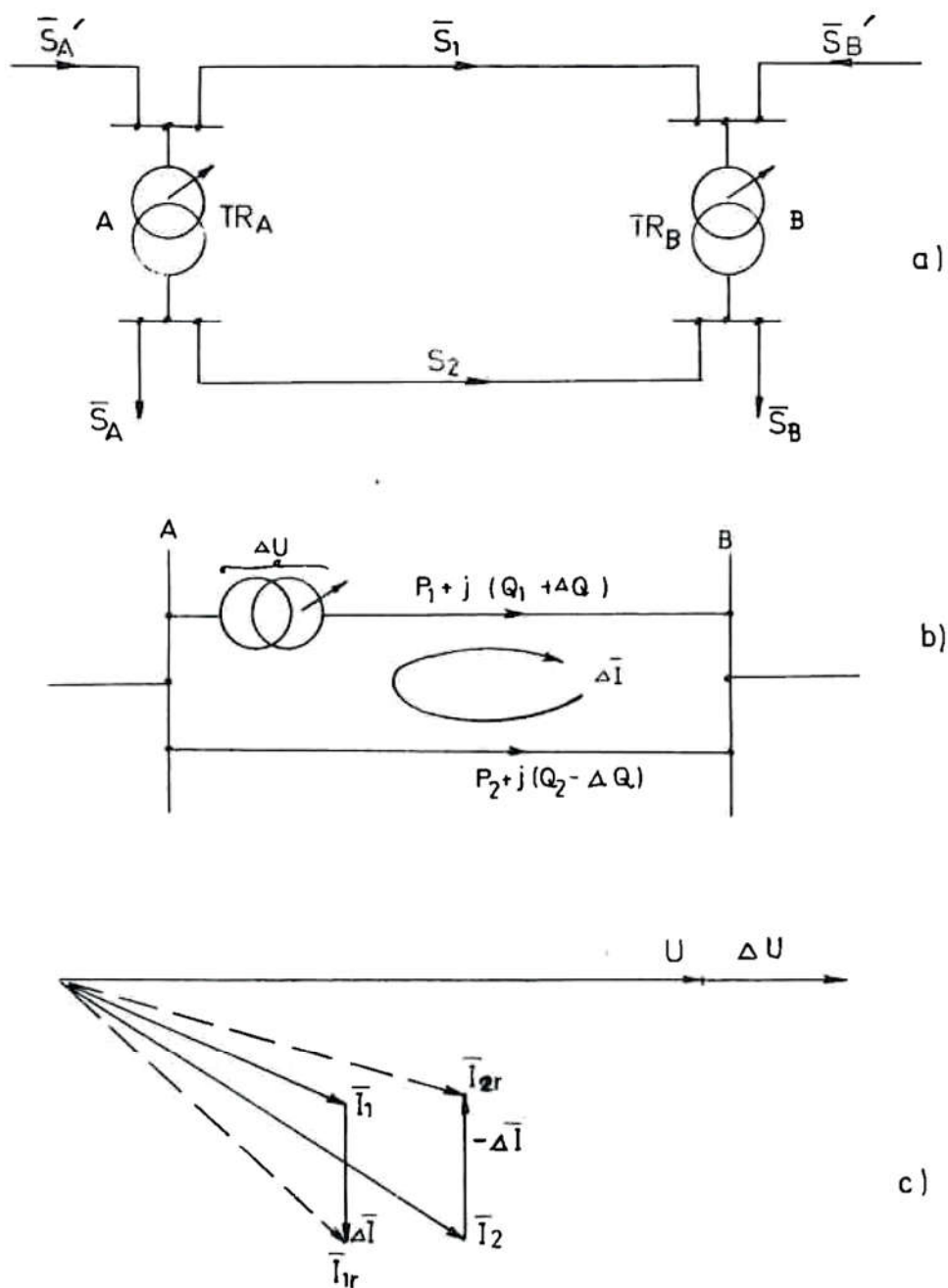
Slika 17 - Uzdužna regulacija napona na granici prijenosne i distributivne mreže

ponske prilike u čvoru 2 kolebat. Ta kolebanja se ispravljaju regulacionim transformatorom TR, i to tako, da napon u čvoru 2 bude konstantan. Na sl.17b prikazana je ekvivalentna shema tog prijenosnog sistema. Regulaciono svojstvo transformatora je prikazano idelanom transformatorom s promjenjivim prijenosnim omjerom. Na sl.17c, koristeći isti način prikazivanja kao na sl.9, prikazan je pad napona na Z_{DV} i X_{TR} kod S_{min} i S_{max} . Izborom odgovarajućeg izvoda na regulacionom namotaju transformatora kompenzira se pad napona, pa je napon U_2 konstantan.

Pošto kod nas dublje u distributivnoj mreži više nema mogućnosti regulacije napona, oportuno je napon regulirati tako, da U_2 bude viši kod S_{max} , a niži kod S_{min} , kako bi se kompenzirala još i promjena padova napona u distributivnoj mreži. O tome će biti više riječi u 1.2.5.2.

Problem "regulacije napona" je znatno složeniji u zamkastoj mreži, bez obzira da li se zamka zatvara preko distributivne mreže (sl. 26 lijevo) ili unutar prijenosne mreže.

Na sl.18a prikazana je povezana distributivna mreža, koja se iz povezane prijenosne mreže napaja iz dvaju transformatorskih stanica A i B, pa je time formirana zamka. Radi jednostavnosti ćemo pretpostaviti, da su stanice A i B spojene jedino preko voda-va prikazanih na sl.17a. Zamka je svedena na sl.18b, pri čemu će dodatni napon ΔU uslijed različitog prijenosnog omjera transformatora TR_A i TR_B izazvati strujno izjednačenje ΔI . Ova struja izjednačenja će biti okomita na napon U , a time i na osnovni napon U (uzdužna regulacija), jer su omski otpori unutar zamke zanemarivi. Struja izjednačenja ΔI i pripadna reaktivna snaga izjednačenja ΔQ superponirati će se osnovnim tokovima snaga. Na sl.18c prikazana je vektorska slika, iz koje se vidi, kako se djelatne komponente struja u granama zamke ne mijenjaju, za razliku od reaktivnih komponentata. Regulacioni zahvat na TR_A ili TR_B dovodi do preraspodjele reaktivnih snaga u zamki. Utjecaj se reflektira i na šire područje mreže, ako su TS A i TS B višestruko povezane (vidi "Mreže I", 6.1.1).



Slika 18 - Utjecaj uzdužne regulacije napona na tokove reaktivnih snaga u zamki

U vezi s razmatranjem regulacionih transformatora i njihove uloge u mreži spomenut ćemo ovdje i transformatore za poprečnu regulaciju napona, koji u suštini ne doprinose regulaciji napona i stanju naponskih prilika u mreži. Promatrajući transformator u praznom hodu, ustanovit ćemo da je, uz primarni napon $\bar{U}_1$, sekundarni napon $\bar{U}_2$. Prijenosni omjer definiramo sa

$$\frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2} = \frac{U_1 / \varphi_1}{U_2 / \varphi_2} = \bar{r}_{12} = r_{12} \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi} = r_{12} \angle \varphi \quad 1-25$$

U općem slučaju, prijenosni omjer može dakle biti kompleksan. Argument ρ će uvijek biti različit od nule, ako grupa spoja transformatora izaziva vektorski pomak među naponima, koji je višekratnik od 30° . Takve ćemo vektorske pomake, međjutim, ignorirati u većini analiza mreže. Nas zanimaju slučajevi, kada prijenosni omjer ostaje kompleksan, nakon što isključimo utjecaj grupe spoja.

Kod uzdužne regulacije napona prijenosni omjer je realan u cijelom regulacionom opsegu. r_{12} se dakle mijenja uz $\rho = 0$.

Kod transformatora s poprečnom regulacijom modul r_{12} prijenosnog omjera ostaje konstantan, a argument ρ se, ovisno o regulacionom opsegu, mijenja u rasponu $-\rho_{\max} \dots 0 \dots \rho_{\max}$ (u srednjem položaju je prijenosni odnos realan).

Na sl.19a prikazan je unutarnji spoj transformatora s poprečnom regulacijom, u spoju Yy s tercijarom. Fazni pomak ρ postiže se tako, da se osnovnom naponu faze a (analogno i za ostale faze) $A' = A_{0-1}$ pribrajaaju relativno mali naponi 2-3 i 4-5, koji imaju fazni pomak 120° prema osnovnom naponu, jer se uzimaju s dodatnih (regulacionih) namotaja faze b i c. Rezultirajući dodatni napon je okomit na osnovni napon A' , pa je

$$\bar{A} = A' \pm j \Delta V = A' \pm (\bar{C}_{3-2} + \bar{B}_{4-5}) \quad 1-26$$

što je vidljivo na sl.19b. Pri tome je

$$\rho = \pm \arctg \left(\frac{\Delta V}{A} \right)$$

1-27

Regulacioni namotaji su na sl.19a označeni dvostrukom strelicom, čime je naznačeno, da:

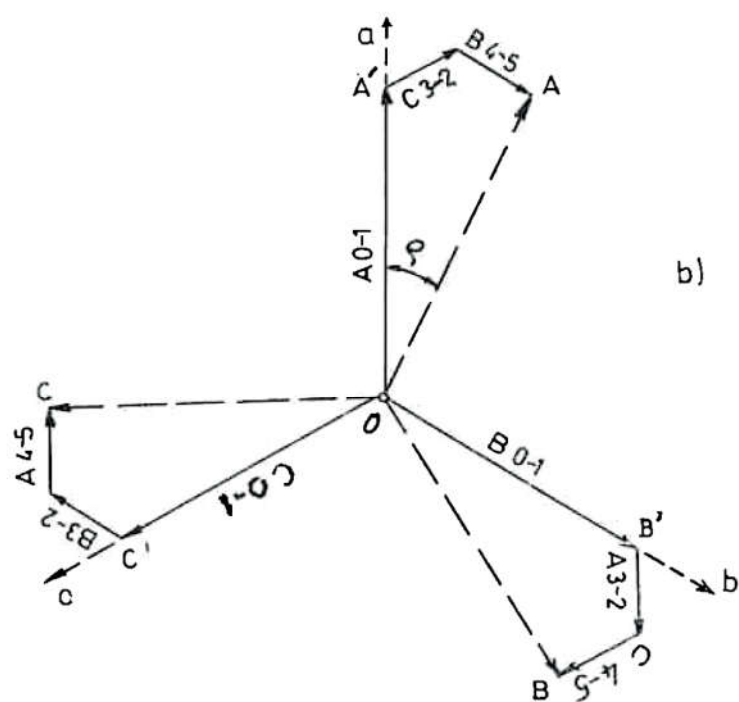
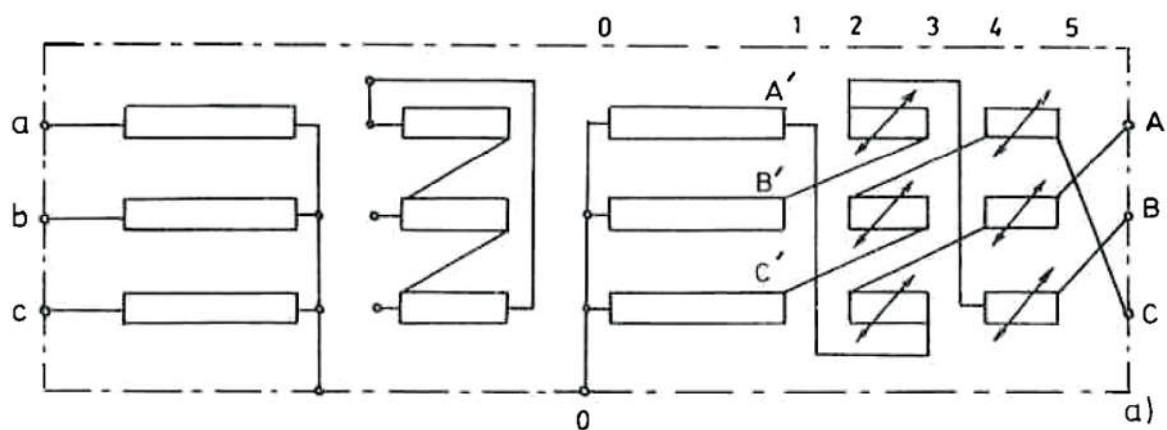
- a) regulacioni namotaji imaju promjenjiv broj zavoja (odcjepe), što omogućuje regulaciju, i
- b) regulacioni namotaji mogu zamjenom krajeva mijenjati smjer dodatnog napona, pa se isti u jednom slučaju pribraja osnovnom naponu, a u drugom slučaju se od njega odbija, što je i naznačeno dvojnim predznakom u 1-26 i 1-27.

Poprečna regulacija se u mreži rijetko upotrebljava, pa je takvu regulaciju racionalnije ostvariti dodatnim regulacionim dijelom, koji se postavlja uz normalni transformator (sl.20a). Pošto je "uzbudni" namotaj dodatnog transformatora spojen u trokut, a pripadni namotaj 0-1 glavnog transformatora u zvijezdu, potreban je samo jedan dodatni regulacioni namotaj 2-3 po fazi. Napon tog dodatnog namotaja je okomit na jedan od napona glavnog transformatora. Vektorski prikaz dat je na sl.20b. I ovdje se preokretanjem dodatnog (regulacionog) namotaja (crtkana veza na sl.20a) dodatni napon može zbrajati ili odbijati od glavnog.

U ovom slučaju vrijedi isto razmatranje u pogledu prolazne i tipske snage kao kod dodatnog transformatora s uzdužnom regulacijom (sl.16).

Dodatni transformator za poprečnu regulaciju (dio A'-A na sl.20a se može primijeniti i bez glavnog transformatora, s time da se, na primjer, ugradi u vod i tako postane njegov sastavni dio.

Kod idealne poprečne regulacije napona mijenja se argument, ali ne i modul prijenosnog omjera. Izvedbe prikazane na sl.19 i 20 ne zadovoljavaju u cijelosti taj zahtijev, pa je $A > A'$ ako $\rho \neq 0$. Na sl.21, krivulja I, prikazano je relativno odstupanje modula od idealne jedinice za razne ρ . Radi usporedbe, krivulja II prikazuje odstupanje za slučaj koji bi nastao, ako bi u rješenju prema sl.19a eliminirali dodatni namotaj 2-3. Time bi se izraz 1-26 transformirao u



Slika 19 - Transformator s poprečnom regulacijom

a-b-c primarni priključak

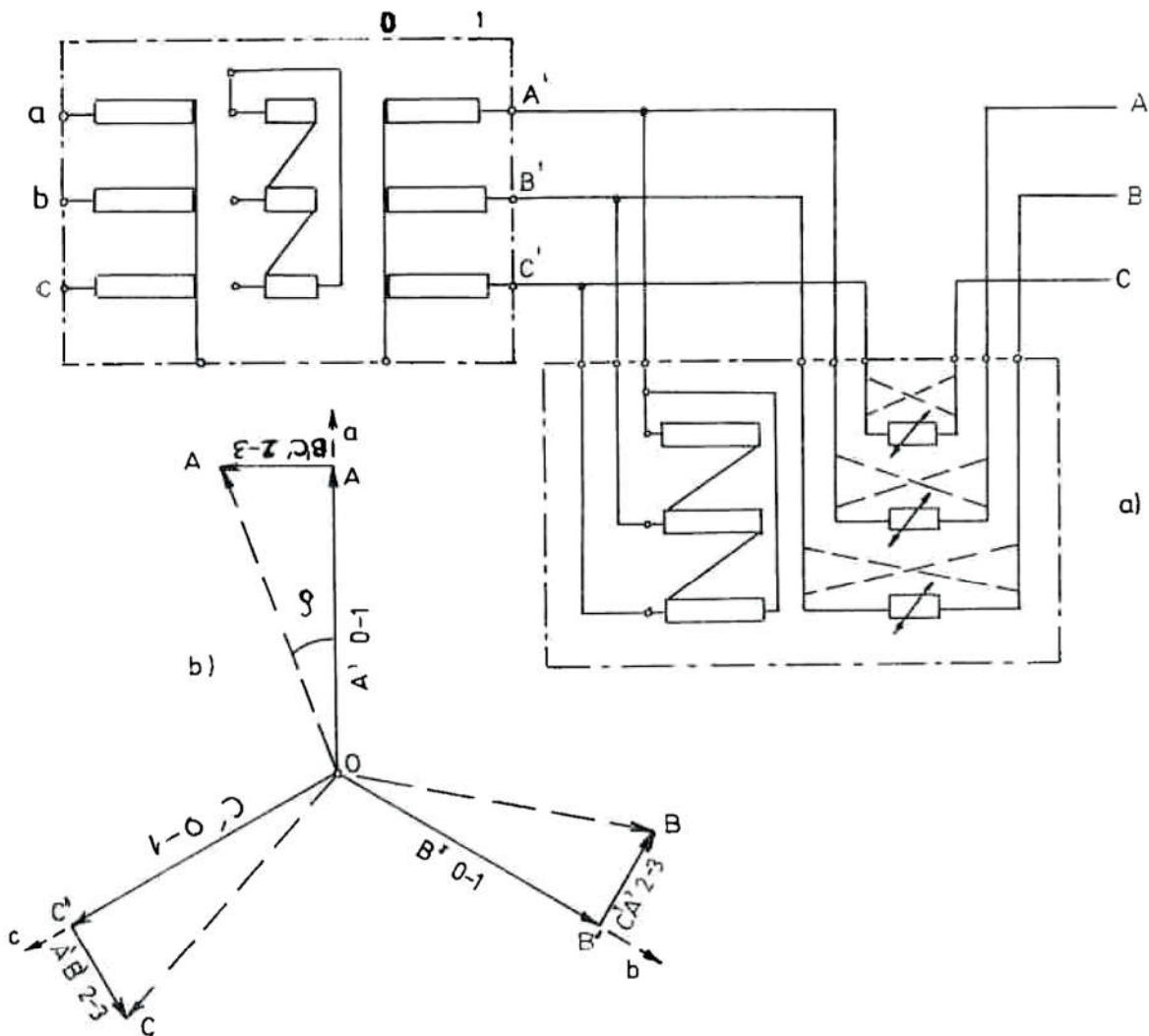
A-B-C sekundarni priključak

0-1 }
2-3 } sekundarni namotaji
4-5 }

$$\bar{A} = A' \pm \bar{B}_{4-5}$$

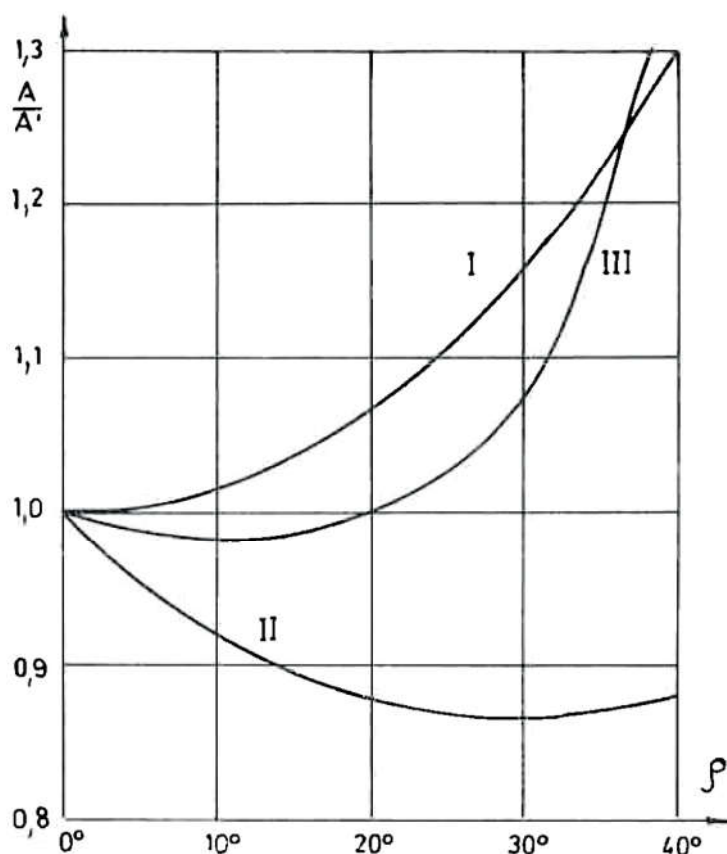
1-28

(usporedi i sl.19b). Odstupanja modula su u ovom slučaju znatno veća.



Slika 20 - Poprečna regulacija s dodatnim transformatorom

Krivulja III na sl.21 prikazuje slučaj, kada dodatni namotaji 4-5 imaju dvostruki broj zavoja od namotaja 2-3 (na sl.19b $|\bar{B}_{4-5}| = 2|\bar{C}_{3-2}|$). U ovom slučaju su odstupanja za $\rho < \pm 30^\circ$ najmanja.

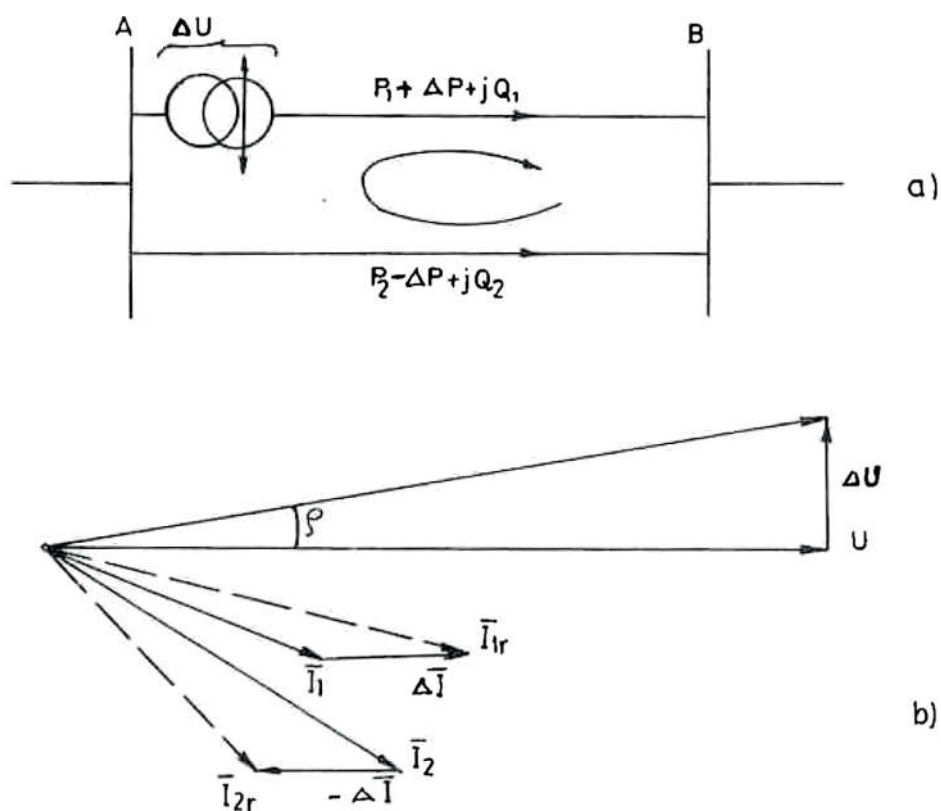


Slika 21 - Utjecaj tipova poprečne regulacije na uzdužni prijenosni omjer

Razmotrit ćemo utjecaj poprečne regulacije u zamci na sl.22a, koja je analogna onoj na sl.18b.

Dodatni napon ΔU , okomit na osnovni napon, izazvati će struju izjednačenja u fazi s osnovnim naponom, dakle uspostaviti će se kružni tok djelatne snage ΔP , koji će se superponirati osnovnim tokovima snaga. Vektorski prikaz dan je na sl.22b.

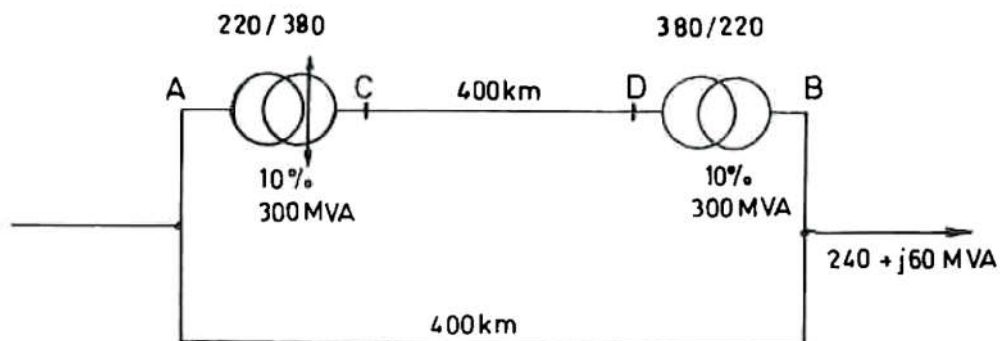
Poprečna regulacija napona primjenjuje se samo u zamkastim mrežama s ciljem da se postigne preraspodjela djelatne snage. Tipični slučaj primjene su paralelni vodovi različitog presjeka ili različitog nazivnog napona, kada po prirodnoj raspodjeli tokova jedan vod ostane nedovoljno opterećen, a drugi je preopterećen. Poprečnom regulacijom se može postići da se obadvije paralelne grane opterete razmjerno njihovoj prijenosnoj moći.



Slika 22 - Utjecaj poprečne regulacije napona na tokove djelatnih snaga u zamki

Primjer 1.1

Vod 220 kV, 400 km povezuje dvije mreže. Paralelno ovom vodu gradi se 380 kV vod. S oba voda će se prenositi snaga $240 + j60$ MVA uz konstantni napon na kraju u apsolutnom iznosu 225 kV. Kakav mora biti prijenosni odnos regulacionog transformatora, ako želimo da novi vod preuzme 75% djelatne snage. Podaci prijenosa nalaze se na slici 23.



Slika 23 - Primjer primjene poprečne regulacije

Rješenje:

Provest ćemo proračun u metodi jediničnih vrijednosti. Odabiremo $S_B = 300$ MVA, $U_{B1} = 380$ kV. Slijedi:

$$x_{TA} = x_{TB} = \frac{10}{100} \frac{380^2}{300} \frac{300}{380^2} = 0,1$$

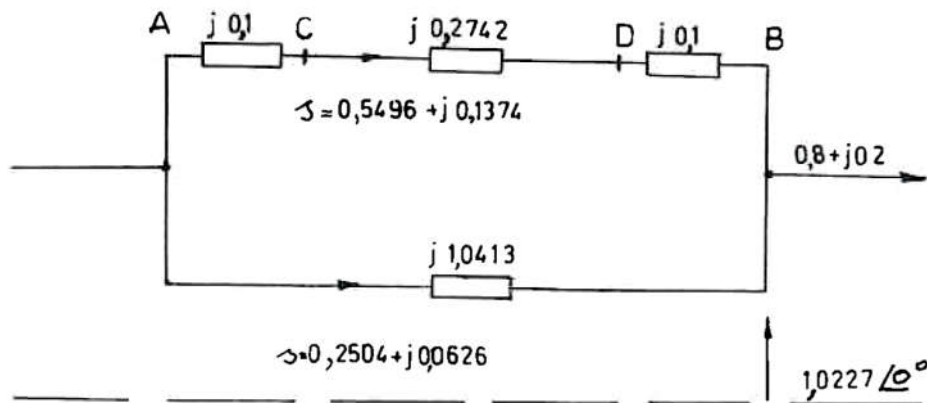
$$x_{C-D} = 0,33 \cdot 400 \frac{300}{380^2} = 0,2742$$

$$x_{A-B} = 0,42 \cdot 400 \frac{300}{220^2} = 1,0413$$

$$s_p = \frac{240 + j60}{300} = 0,8 + j0,2$$

$$\bar{v}_B = \frac{225}{220} = 1,0227 \angle 0^\circ$$

Izračunate vrijednosti unesene su u ekvivalentnu shemu na sl.24.



Slika 24 - Ekvivalentna shema uz primjer 1-1.

Računamo raspodjelu snaga na vodove, kada je regulaciona sklopka transformatora A na srednjem položaju, odnosno kada je prijenosni omjer ovog transformatora 220 : 380.

Vod I (380 kV):

$$\bar{i}_I = (0,7822 - j 0,1956) \frac{1,0413}{1,5155} = 0,5375 - j 0,1344$$

$$\bar{s}_I = 1,0227 (0,5375 + j 0,1344) = 0,5496 + j 0,1374$$

Vod II (220 kV):

$$\bar{i}_{II} = (0,7822 - j 0,1956) \frac{0,4742}{1,5155} = 0,2448 - j 0,0612$$

$$\bar{s}_{II} = 1,0227 (0,2448 + j 0,0612) = 0,2504 + j 0,0626$$

Na novi vod otpada djelatne snage:

$$p_T \% = \frac{0,5496}{0,8} 100 = 68,7 \%$$

Želimo da 380 kV vod preuzme 75 % djelatne snage uz nepromijenjenu raspodjelu jalove snage, što znači slijedeći prijenos:

$$\bar{s}'_I = 0,6 + j 0,1374$$

$$\bar{s}'_{II} = 0,2 + j 0,0626$$

odnosno kroz vodove moraju teći slijedeće struje:

$$\bar{i}_I' = \frac{0,6 - j 0,1374}{1,0227} = 0,5867 - j 0,1344$$

$$\bar{i}_{II}' = \frac{0,2 - j 0,0626}{1,0227} = 0,1956 - j 0,0612$$

Da se to ostvari, kroz petlju mora poteći djelatna struja izjednačenja:

$$i_{\Delta} = 0,5867 - 0,5374 = 0,0493$$

Ova struja izaziva u petlji induktivni pad napona (u petlji su zanemareni djelatni otpori):

$$\Delta \bar{v} = 0,0493 \cdot j 1,5155 = j 0,0747$$

koji pokriva regulacioni transformator A.

Novi napon u A iznosi (uz nepromijenjen napon u B):

$$\begin{aligned}\bar{v}_A' &= 1,0227 + (0,1956 - j 0,0612) j 1,0413 = \\ &= 1,0904 + j 0,2037 = 1,1093 \angle 10,58^\circ\end{aligned}$$

Da bi odredili prijenosni odnos regulacionog transformatora moramo izračunati napon točke A'.

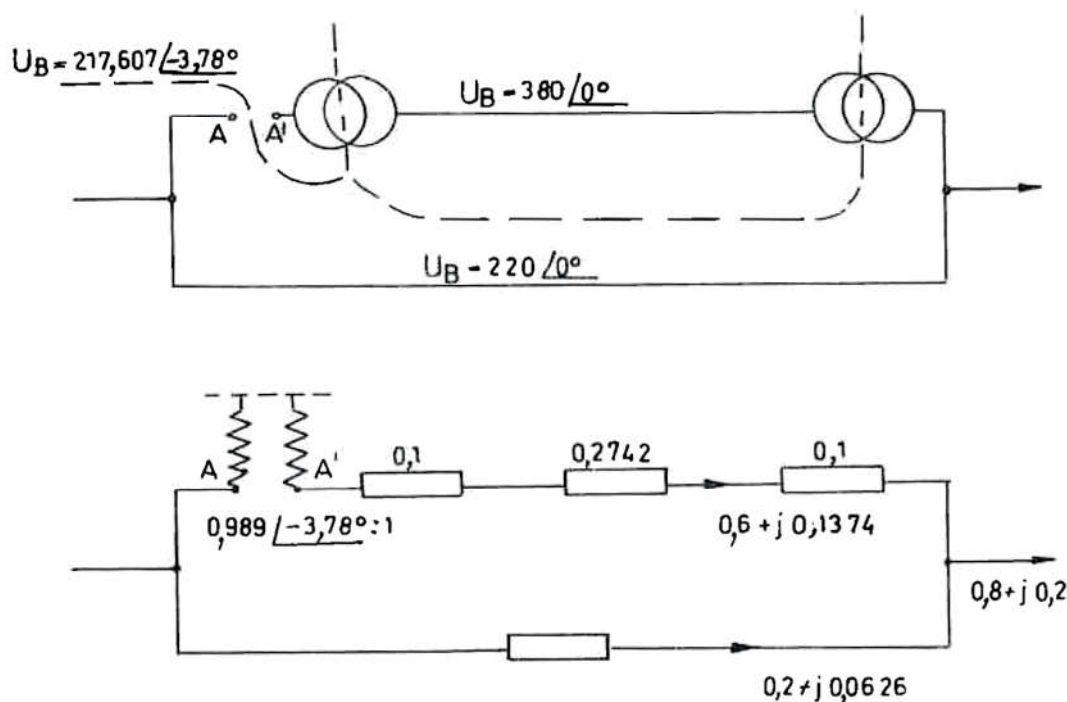
$$\begin{aligned}\bar{v}_{A'}' &= 1,0227 + (0,5867 - j 0,1344) j 0,4742 = \\ &= 1,0864 + j 0,2782 = 1,1215 \angle 14,36^\circ\end{aligned}$$

Potrebni prijenosni odnos transformatora je:

$$\begin{aligned}\bar{r} &= 1,1093 \cdot 220 \angle 10,58^\circ : 1,1215 \cdot 380 \angle 14,36^\circ = \\ &= 244,046 \angle 10,58^\circ : 426,17 \angle 14,36^\circ = \\ &= 244,046 : 426,17 \angle 3,78^\circ\end{aligned}$$

Provest ćemo kontrolu otvarajući petlju u A. Lako se možemo uvjeriti, da je (sl.25):

$$\frac{220 \angle 0^\circ}{217,607 \angle 3,78^\circ} = \frac{0,989 \angle -3,78^\circ}{1} = \frac{1,1093 \angle 10,58^\circ}{1,1215 \angle 14,36^\circ}$$



Slika 25 - Rezultati primjene poprečne regulacije

Za dinamičku regulaciju napona mogu se primijeniti i statički kompenzatori, koji se prilagođuju stanju u mreži spontano (zasićene poprečne prigušnice u kombinaciji s kondenzatorima) ili zahvaljujući pridodanim regulacionim napravama (tiristorski upravljane kondenzatorske baterije i prigušnice). Ovi uređaji su pobliže opisani u 2.2.3.

Ako se možemo zadovoljiti sporom regulacijom u grubim stupnjevima, uz uvjet da se regulacija i ovakvih uređaja vrši u skladu sa zahtijevima vođenja napona, možemo prihvatiti i kondenza-

torske baterije kao sudionike u regulaciji napona (sl.7).

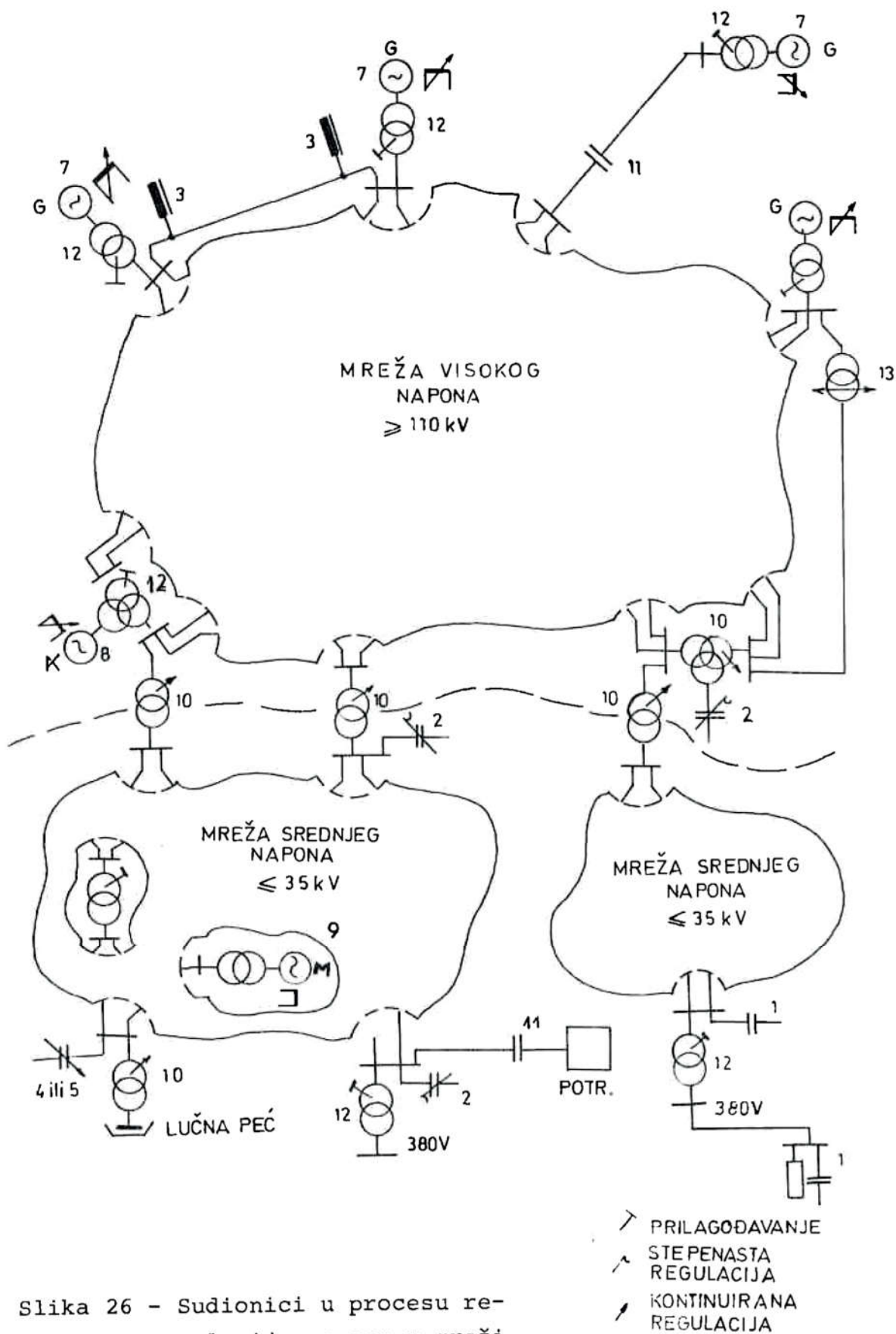
Na sl.26 prikazani su u obliku principjelne sheme jednog velikog elektroenergetskog sistema svi bitni sudionici u procesu regulacije napona i reaktivne snage u mreži. U pratećoj tablici nabrojeni su ranije opisani najvažniji uređaji, a redni im brojevi odgovaraju brojevima kojima su označeni u shemi na sl.26. Na toj shemi oni su postavljeni na uobičajenim mjestima primjene.

U tablici su naznačena i osnovna svojstva nabrojenih uređaja, kao i pripadni $U-I_{ind}$ karakteristika. Te podatke treba shvatiti uvjetno, jer su uređaji vrlo heterogeni, a i ponašanje im ovisi o pridodanim regulacionim uređajima, kao i o konačnom cilju kojem su namijenjeni.

U mrežama srednjeg napona po jugoslavenskoj praksi praktički nijedan uređaj neće biti uključen u dinamičku regulaciju napona, osim, možda, u specijalnim slučajevima. Takvu specijalnu namjenu u našoj oglednoj shemi ima serijski kondenzator 11 da bi poboljšao naponske prilike priključenom potrošaču na srednjem naponu, ali bez utjecaja na prilike u ostaloj mreži. Kondenzatorska baterija s brzom tiristorskom regulacijom (4,5) primijenjena je uz elektrolučnu peć sa zadatkom da spriječi nastanak flickera u distributivnoj mreži.

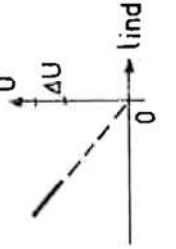
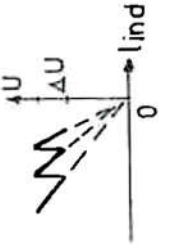
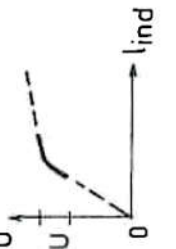
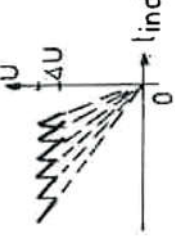
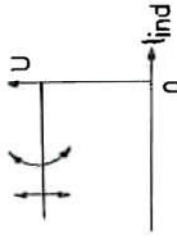
U mrežama srednjeg i niskog napona primjenjuju se kod nas samo transformatori s mogućnošću prilagodjenja, tj. sa izrazito statičkim djelovanjem na prosječne naponske prilike (sl.10). Kondenzatori će se primjenjivati za otklanjanje lokalnih uskih grla i za kompenzaciju reaktivne snage po kriteriju ušteda na troškovima za jalovu energiju, tj. za poboljšanje faktora snage, većinom također samo statički.

U razvijenim zemljama primjenjuju se i u distributivnim mrežama uređaji za dinamičku regulaciju napona, no kod nas je to područje potpuno zanemareno. U tim uvjetima praktički jedinu mogućnost dinamičke regulacije napona u distributivnim mrežama pružaju regulacioni transformatori gornjeg napona 110 kV. Oni tvore granicu, koja je na našoj shemi naznačena crtkanom lini-

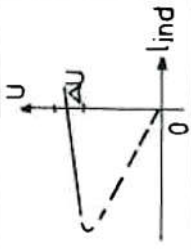
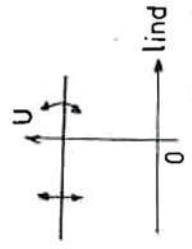


Slika 26 - Sudionici u procesu regulacije napona u mreži

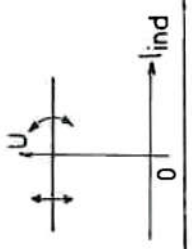
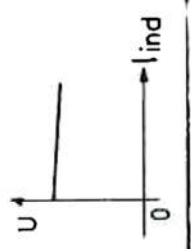
PREGLED SUDIONIKA U REGULACIJI U I Q (POPREČNI)

	NAZIV	REGULACIJA	PRIRODNI OD- ZIV NA PROMJE- NU NAPONA	BRZINA ODZIVA	STATIKA	KARAKTERISTIKA U - I _{ind}
1.	POPREČNI KONDENZATOR ZA TEMELJNU KOMPENZACIJU	-	NEGATIVAN	TRENUTNO	PRIFODNA	
2.	POPREČNI KONDENZATOR SA STEPENASTOM REGULACIJOM	STEPENASTA	BEZ REGULATO- RA NEGATIVAN (SA REGULACIJOM POZITIVAN)	TRENUTNO	UVJETNO PODESIVA	
3.	POPREČNA PRIGUŠNICA ZA TEMELJNU KOMPENZACIJU	-	POZITIVAN	TRENUTNO	PRIRODNA	
4.	POPREČNI KONDENZATOR SA STEPENASTOM TIRI- STORSKOM REGULACI- JOM	STEPENASTA	BEZ REGULACI- JE NEGATIVAN (SA REGULACIJOM POZITIVAN)	TRENUTNO	UVJETNO PODESIVA	
5.	POPREČNI KONDENZATOR SA KONTINUIRANOM TI- RISTORSKOM REGULACI- JOM	KONTINUIRANA	SA REGULATO- ROM POZITIVAN	TRENUTNO	PODESIVA	

PREGLED SUDIONIKA U REGULACIJI U I Q (POPREČNI) - nastavak

	NAZIV	REGULACIJA	PRIRODNI ODZIV NA PROMJENU NA- PONE	BRZINA ODZIVA	STATIKA	KARAKTERISTIKA U - I _{ind}
6.	KONDENZATORSKA BATERIJA SA ZASIĆENOM PRIGUŠNICOM	KONTINUIRANA	POZITIVAN	TREKUTNO	PRIRODNA	
7. 8. 9.	SINHRONI STROJ GENERATOR KOMPENZATOR MOTOR	KONTINUIRANA	POZITIVAN	BRZO	PODESIVA	

PREGLED SUDIONIKA U REGULACIJI U I Q (UZDUŽNI)

10.	REGULACIONI TRANSFORMATOR SA UZDUŽNOM REGULACIJOM	PRAKTIČKI KONTINUIRANA	BEZ REGULACIJE SA NEUTRALAN KONTINUIRANOM POSRO	SPORO	PODESIVA	
11.	SERIJSKI KONDENZATOR	KONTINUIRANA	UVJETNO POZITIVAN	TREKUTNO	PRIRODNA	
12.	TRANSFORMATOR SA PRILAGODJENJEM OMJERA					
13.	TRANSFORMATOR S POPREČNOM REGULACIJOM					

jom. U dva tako odvojena područja vrši se regulacija napona po različitim kriterijima, kako je to već bilo konstatirano u 1.1.1 i 1.1.2. Ta spoznaja će nam omogućiti da problem regulacije napona odvojeno promatramo u mreži visokog napona, a posebno u mreži srednjeg i niskog napona.

1.2.5.1 Regulacija napona u distributivnim mrežama

Polazimo od činjenice, da se u našoj praksi, za sada, napon u distributivnim mrežama, tj. u mrežama srednjeg i niskog napona, regulira samo regulacionim transformatorima, kojima je gornji napon 110 kV, a donji napon 35, 20 ili 10 kV. Regulacija se dakle vrši na graničnoj liniji, označenoj crtkano na sl. 26, odnosno u napojnim točkama mreže srednjeg napona. Zadatak je, da se regulacija vrši tako, da se kod krajnjih potrošača (trošila), uglavnom na niskom naponu, postignu najbolje moguće naponske prilike. Ciljeve, a odnose se na napon trošila, možemo definirati ovako:

- a) srednji napon U_{sred} (definicija po izrazu 1-1 ili 1-2) treba da je blizak ili jednak nazivnom naponu U_n ,
- b) odstupanja od nazivnog napona (definicije 1-7 i 1-8) treba da su što manja, a svakako u granicama određenim standardima ili propisima.

Promatrat ćemo radijalni vod napona 20 kV sa sl.10a. U skladu sa saznanjima i mogućnostima izloženim u 1.2.4 već je izvršeno prilagodjenje prijenosnog omjera transformatora A, B i C položaju na vođu. Pripadni grafovi 10b prikazuju naponske prilike kod srednjeg opterećenja duž voda 20 kV, a grafovi 10c, d i e duž vodova niskog napona, također kod srednjeg opterećenja. Kod opterećenja, koje se mijenja od neke minimalne do neke maksimalne vrijednosti, mijenjati će se i padovi napona, kako na vođu 20 kV, tako i na vodovima niskog napona. Umjesto linija na sl.10b-e, koje su odgovarale jednom, i to srednjem opterećenju, dobit ćemo područje ograničeno linijama "min" i "max" (sl.27). Sve veće varijacije napona kod sve udaljenijih TS 20/0,38 na strani 20 kV odraziti će se i na naponu u mreži niskog napona.

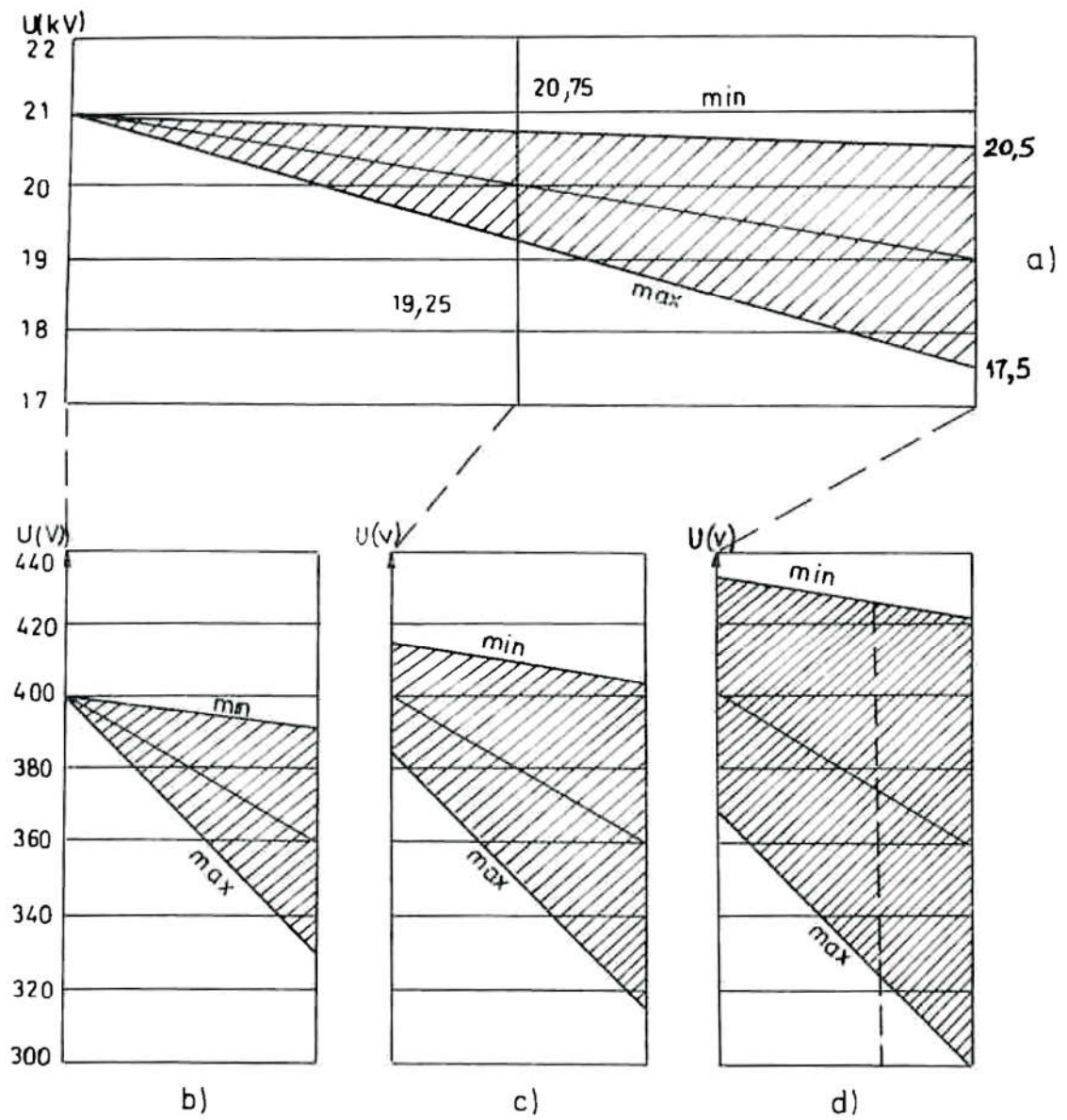
Prije nego nastavimo započeto razmatranje, potrebno je navesti,

da je radi lakšeg prikaza suštine problema uzet najjednostavniji slučaj i to uz niz pretpostavki i zanemarenja. U tom svijetlu treba prihvatiti i kasnije izložene rezultate. Pretpostavke i zanemarenja su slijedeća:

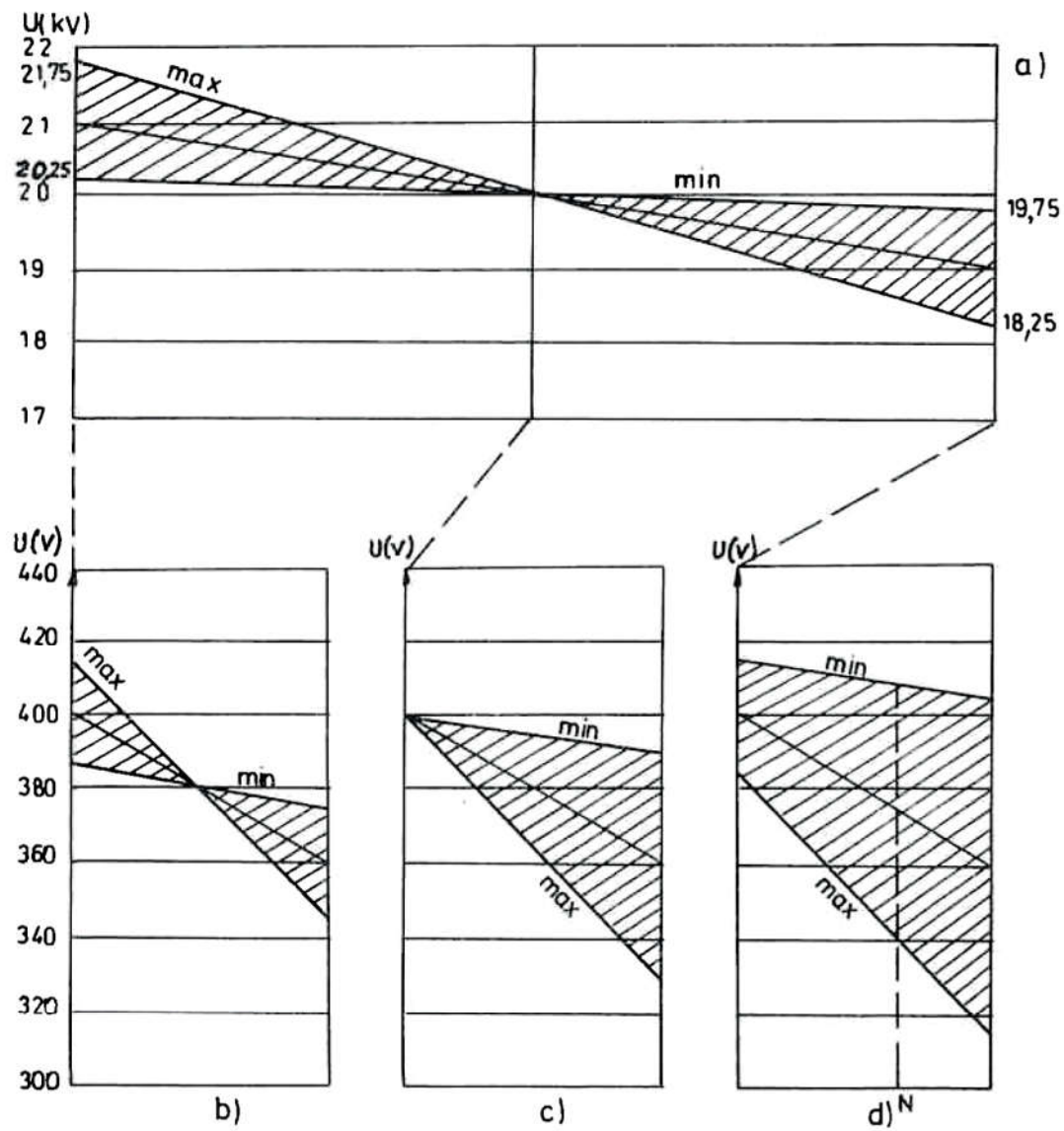
- a) Konfiguracija mreže svedena je na jedan radijalni vod, dok ćemo u stvarnoj mreži imati veći broj vodova raznih dužina, a često i zamke.
- b) Padovi napona prikazani su linearno, što bi se moglo približno postići jedino prilagodjenjem presjeka vodova na svakoj dionici posebno, a to u praksi sigurno neće biti slučaj. Nadalje je zanemaren pad napona u transformatorima 20/0,38.
- c) Pretpostavljen je najjednostavniji slučaj sa dvije naponske razine, 20 i 0,38 kV, umjesto npr. tri razine (35, 10 i 0,38 kV).
- d) U realnim slučajevima će opterećenje po jedinici površine područja biti neujednačeno. U našem smo slučaju, nadalje, pretpostavili da su svi potrošači priključeni na niski napon, što ne mora biti slučaj, i da svi potrošači imaju isti dnevni dijagram opterećenja.
- e) Zanemarena je pogonska karakteristika potrošača, tj. ovisnost snage potrošača o naponu.

Bez obzira na navedena zanemarenja i pretpostavke, razmatrani primjer će nas dovoljno jasno uputiti na način rješavanja i složenijih slučajeva.

Slika 27 nam pokazuje, da će npr. kod potrošača N napon varirati između 428 V kod minimalnog opterećenja i 324 V kod maksimalnog opterećenja. Ove očigledno prevelike varijacije napona kod ovog i drugih potrošača smanjiti će se, ako se odabere drugi kriterij za regulaciju napona u TS 110/20 kV pomoću tamo smještenog regulacionog transformatora. Da se zaista radi o primjeni kriterija za regulaciju, a ne o uvođenju regulacije tek u ovom trenutku, vidimo po tome, što smo i do sada regulirali napon pomoću istog transformatora, ali tako, da je napon na sekundarnoj strani bio konstantno 21 kV (sl.10), bez obzira na varijacije napona na



Slika 27 - Naponske prilike kod potrošača niskog napona bez regulacije 110/20



Slika 28 - Naponske prilike kod potrošača niskog napona uz regulaciju 110/20 po kriteriju konstantnog niskog napona u "tipičnoj" TS 20/0,38

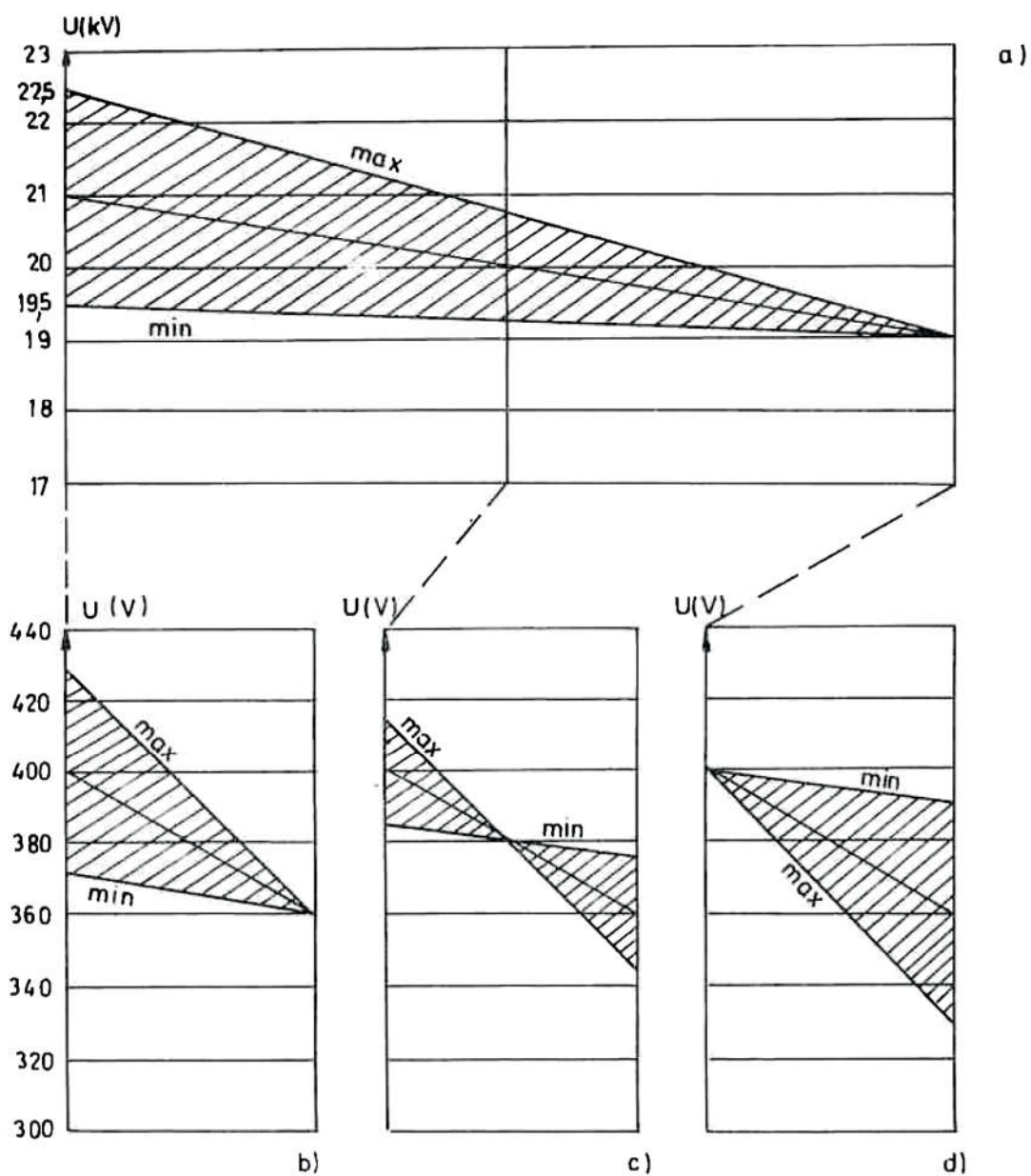
110 kV strani. Promjena kriterija se sastoji u tome, da ćemo napon na strani 20 kV učiniti ovisnim o opterećenju, i to tako, da će kod opterećenja većeg od srednjeg napona biti iznad 21 kV, a kod opterećenja manjeg od srednjeg ispod 21 kV. Pitanje je samo kako taj kriterij definirati.

Kao prvo, već smo ustanovili, da kriterij konstantnog napona na sekundarnoj strani transformatora 110/20 ne zadovoljava, a što je još važnije, očigledno je da će neki drugi kriterij dovesti do poboljšanja naponskih prilika u "našoj" mreži. Pokušati ćemo odrediti neku drugu točku u mreži, kojoj ćemo smišljenom regulacijom napona osigurati konstantni napon. Možemo govoriti o metodi pronalaženja tipičnog potrošača.

U prvom pokušaju, ilustracije radi, regulirati ćemo napon tako, da napon na sekundarnoj strani srednjeg transformatora 20/0,38 (B na sl.10) bude konstantan i to upravo 400 V. Dobivamo naponske prilike prikazane na sl.28. Napon potrošača N kreće se sada između 408 i 340 V, što je znatno poboljšanje prema ranijem stanju. Pogledamo li slike b, c i d, te ako ih usporedimo sa analognim slikama na sl.27, vidimo da su se naponske prilike poboljšale svim potrošačima izuzev malom broju potrošača na početku niskonaponskog voda prve (lijeve) TS 20/0,38.

Pri tome zaključujemo, da napon sekundarne strane transformatora 110/20 mora kod maksimalnog opterećenja biti 21,75 kV, a kod minimalnog opterećenja 20,25 kV.

U slijedećem pokušaju odabrat ćemo tipičnog potrošača na sredini voda niskog napona, koji je priključen na srednju TS 20/0,38 kV. Regulaciju napona vršit ćemo tako, da kod tog potrošača uvijek vlada nazivni napon, tj. 380 V. Na sl.29 prikazane su naponske prilike za taj slučaj. Za veći broj potrošača naponske prilike su dalje poboljšane, a za manji broj pogoršane; odmah se uočava da se pojavljuje dodatni kriterij, a to je konstantan napon na kraju voda 20 kV. Ova pojava nije slučajna, ali je rezultat prije nabrojenih pretpostavki i zanemarenja, pa se iz toga može izvesti samo orijentacioni, ali ne i generalni zaključak.



Slika 29 - Naponske prilike kod potrošača niskog napona uz regulaciju 110/20 po kriteriju konstantnog niskog napona kod "tipičnog" potrošača "tipične" TS 20/0,38

Napon sekundarne strane transformatora 110/20 treba regulirati tako, da kod maksimalnog opterećenja bude 22,5 kV, a kod minimalnog opterećenja 19,5 kV.

Šrafirane površine na slikama 27, 28 i 29 ilustriraju varijacije napona, pa ćemo te površine uzeti kao jedan od parametara za ocjenu uspješnosti regulacije napona. U tu svrhu ćemo zbrojiti šrafirane površine na sl.27b, c i d, a isto tako na sl.28b, c i d i na sl. 29b, c i d, te dobivene površine usporediti. Sve usporedjene veličine unijeti ćemo u tablicu.

Sl.	A	B	C	D	E	F	G
27	2,47	49%	19%	33%	48%	11%	22%
28	1,4	68%	38%	24%	38%	9,2%	17%
29	1	79%	57%	21,5%	21,5%	13%	13%

Kolone redom znače:

- A - relativni odnos sume šrafiranih površina na niskom naponu,
- B - postotak od ukupne površine, koja se nalazi u pojasu $U_n \pm 5\%$, tj. između 360 i 400 V,
- C - postotak od ukupnog broja potrošača, kojima se napon kreće unutar granica $U_n \pm 5\%$,
- D - postotak od ukupnog broja potrošača, kojima napon odstupa više od $\pm 5\%$, i to više na gore, nego na dole,
- E - postotak od ukupnog broja potrošača, kojima napon odstupa više od $\pm 5\%$, i to više na dole, nego na gore ($C + D + E = 100$),
- F - maksimalna odstupanja ΔU_+ (definicija 1-7), koja se pojavljuju,
- G - maksimalna odstupanja ΔU_- (definicija 1-8), koja se pojavljuju.

Svi navedeni pokazatelji dokazuju, da su u slučaju na sl.29 postignute najbolje naponske prilike. Daljnji pokušaj u istom smjeru (daljnje povećanje opsega regulacije TR 110/20) pokazao bi, da se prilike opet pogoršavaju, pa se rješenje na sl.29, uvaživši sve pretpostavke i zanemarenja, može smatrati optimalnim.

Ako podjemo od uvjeta, da napon ni kod jednog potrošača ne smije izići iz raspona od 360 do 400 V ($U_n \pm 5\%$), vidimo da unatoč uspješnom rješenju problema, kod više od 40% potrošača taj uvjet nije zadovoljen. To znači, da sama mreža (vod 20 kV i vodovi niskog napona) nije dovoljno dimenzionirana za pretpostavljenu potrošnju i da mora biti pojačana. Ukoliko potrošači imaju niski faktor snage, može se poboljšanje prilika očekivati i od kompenzacije reaktivne snage kod samih potrošača.

Preslikavanje izloženog problema i njegovog rješenja na realnu, u svakom pogledu složeniju mrežu, dovodi do velikih poteškoća, ako se želi naći rješenje blisko apsolutnom optimumu. Pri tome je najlakše, npr., uzeti u račun padove napona u transformatorima 20/0,38, koje je lako ustanoviti pomoću izraza 1-16 i dodati prikazanim padovima napona. Uzimanje u obzir svih ostalih okolnosti, koje smo lakoće radi zanemarili, umnogostručuje složenost zadatka. Prema raspoloživim mogućnostima i složenosti problema mogu se u principu primijeniti slijedeće metode:

Analitička metoda pretpostavlja niz proračuna tokova snaga i naponskih prilika (na računaru ili analizatoru) za tipična pogonska stanja, uz nužna pojednostavljenja, te iterativno približavanje optimalnom rješenju.

Statistička metoda vodi do optimuma odabiranjem i eliminacijom uzoraka potrošača, pri čemu su prateće analize mreže svedene na bitno jednostavnije konfiguracije.

Eksperimentalna metoda pretpostavlja niz mjernih mjesta u mreži, pri čemu se režim regulacije podešava prema iskustveno odabranim tipičnim potrošačima, a efekti prate i na periferiji mreže i blizu napojnog čvora, sve dok se ne utvrdi prihvatljivi režim regulacije.

Navedene tri metode se ne mogu strogo razgraničiti, jer se u znatnoj mjeri poklapaju, pogotovo u fazi pripreme podataka o mreži i o potrošačima i u fazi provjere rezultata mjerenjima u stvarnoj mreži. Ovom pitanju se u našoj praksi nažalost posvećuje malo pažnje, što je nemoguće opravdati, jer regulacioni transformatori na granici prijenosne i distributivne mreže omogućuju, da se izborom regu-

lacionog kriterija poboljšaju naponske prilike potrošačima bez ikakvih investicija.

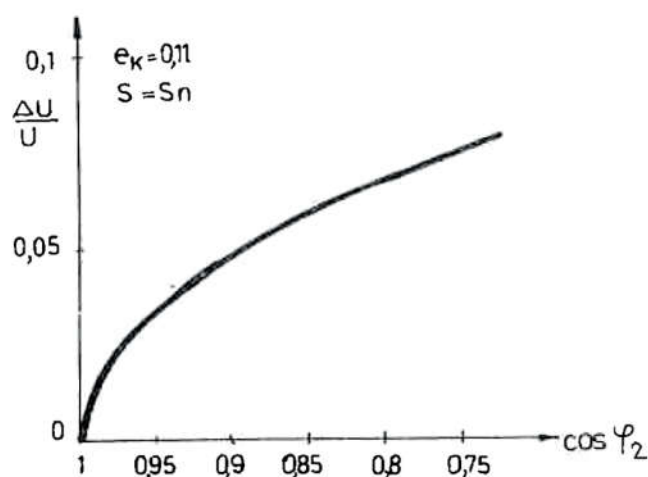
Već u prethodnom razmatranju smo ustanovili, da ni uz optimalni režim regulacije ne možemo potrošačima osigurati napon u dopuštenom rasponu, ako distributivna mreža nije dovoljno dimenzionirana. Dimenzioniranje distributivne mreže je dakle neizbježivi uvjet za uredno održavanje napona i u slučajevima, kada se provodi programirana regulacija napona putem regulacionog transformatora na granici prijenosne i distributivne mreže.

Međutim, za uspješnu regulaciju napona u distributivnoj mreži postoje i druga ograničenja. To su:

- pad napona na samom regulacionom transformatoru,
- regulacioni opseg regulacionog transformatora,
- varijacije napona u prijenosnoj mreži (kod nas 110 kV).

U daljnjem tekstu razmotrit ćemo regulacioni transformator, kao vezni element prijenosne mreže (mreže visokog napona) sa distributivnom mrežom (mrežom srednjeg i niskog napona), u svijetlu tih ograničenja.

Pad napona u transformatoru, zahvaljujući zanemarivo malom omskom otporu, moći ćemo ustanoviti pomoću izraza 1-16, s time da se reaktancija transformatora izračuna iz



Slika 30 - Relativni pad napona na transformatoru kod nazivnog opterećenja za razne $\cos \varphi_2$.

$$x = e_k \frac{U_n^2}{S_n} \quad 1-28$$

pa za relativni pad napona na transformatoru kod nazivnog opterećenja dobivamo

$$\frac{\Delta U}{U} = e_k \sin \varphi_2 \quad 1-29$$

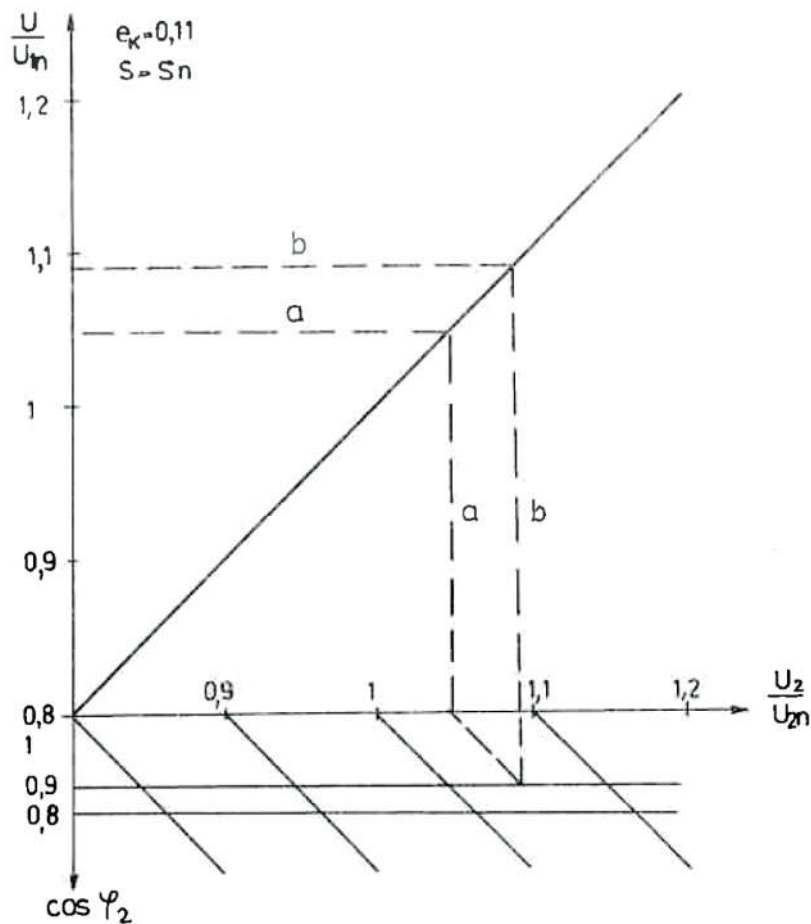
gdje je φ_2 faktor snage na sekundarnoj strani transformatora. Ujedno vidimo, da će pad napona kod $\cos \varphi_2 = 0$ (prijenos samo reaktivne snage uz puno opterećenje transformatora) biti jednak naponu kratkog spoja transformatora.

Na sl.30 pokazan je relativni pad napona na transformatoru kod punog opterećenja uz razne $\cos \varphi_2$, ako se pretpostavi uobičajeni e_k takvih transformatora od 11%.

U gornjem dijelu slike 31 prikazana je prijenosna karakteristika transformatora u praznom hodu. Na osima su uneseni relativni naponi U_1/U_{1n} i U_2/U_{2n} . Ista karakteristika vrijedi i za puno opterećenje djelatnom snagom (S_n uz $\cos \varphi_2 = 1$), jer u tom slučaju nema uzdužnog pada napona. Kad se pojavi reaktivna komponenta snage, dolazi do pada napona, pa će uz konstantni napon na primarnoj strani (U_1) napon na sekundarnoj strani (U_2) opasti, ili pak, da bi zadržali konstantan U_2 , za čim težimo, napon U_1 bi morao porasti. Za promatranje tih okolnosti možemo karakteristici dodati donji graf, pri čemu se služimo slikom 30. Crtkane linije pokazuju slijedeće:

U praznom hodu, ili pak kod nazivnog (ili bilo kojeg drugog) opterećenja uz $\cos \varphi_2 = 1$, linije a pokazuju, da će uz $U_2 = 1,05 U_{2n}$ na primarnoj strani morati biti $U_1 = 1,05 U_{1n}$. Ako je transformator opterećen nazivnom snagom, ali uz $\cos \varphi_2 = 0,9$, za $U_2 = 1,05 U_{2n}$ morati ćemo na primarnoj strani imati cca $1,095 U_{1n}$. Ako taj uvjet na primarnoj strani nije ispunjen, morati ćemo razliku kompenzirati regulacijom.

Na sl.32 pokazane su prijenosne karakteristike za regulacioni transformator uobičajene izvedbe sa slijedećim karakteristikama:



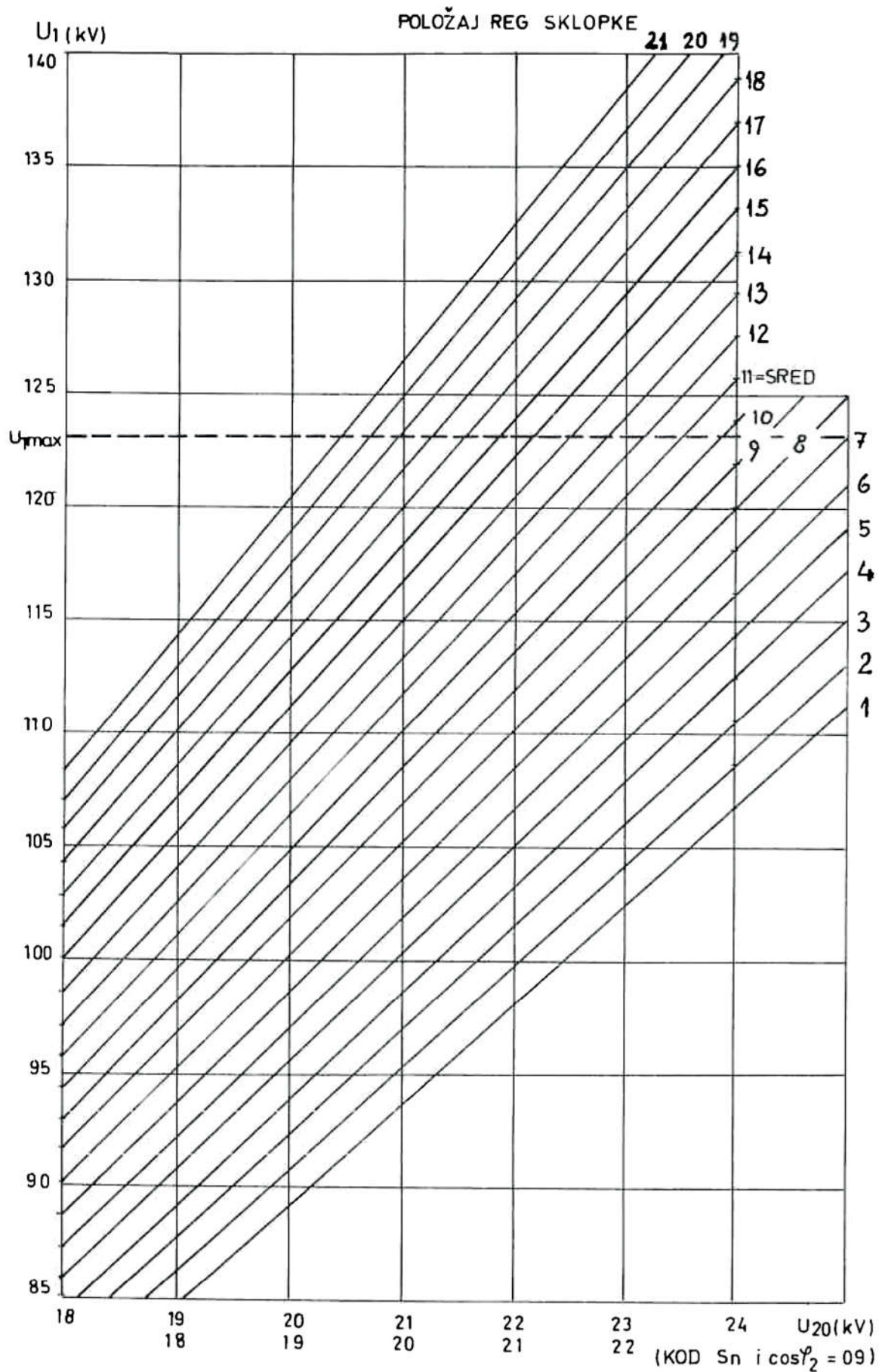
Slika 31 - Prijenosne karakteristike transformatora
kod S_n

Primarni nazivni napon	$110 \pm 10 \times 1,5 \text{ [kV]}$
Sekundarni nazivni napon	21 [kV]
Napon kratkog spoja	11%

Regulaciona sklopka ima, prema tome, ukupno 21 položaj (uključujući i srednji 110/21), a svakom položaju (prijenosnom omjeru) odgovara pripadna karakteristika.

Gornja skala sekundarnog napona (U_{20}) odgovara praznom hodu odnosno bilo kojem opterećenju uz $\cos \varphi_2 = 1$. Kod S_n uz $\cos \varphi_2 = 0,9$ imamo prema 1-29

$$\Delta U_2 = 21 \cdot 0,11 \cdot 0,436 = 1 \text{ [kV]}$$



Slika 32 - Prijenosne karakteristike regulacionog transformatora za prazni hod i puno opterećenje uz $\cos \varphi_2 = 0,9$

Uz isti primarni napon, sekundarni napon se kod takvog opterećenja (S_n uz $\cos \varphi_2 = 0,9$) snizi za 1 kV, pa to možemo obuhvatiti pomakom skale U_2 na sl.32 u desno upravo za 1 kV (donja skala U_2).

Horizontalna crtkana linija na sl. 32 odgovara maksimalnom pogonskom naponu u mreži 110 kV, koji ne smije biti prekoračen.

Pomoću slike 32 ispitati ćemo, koje naponske prilike moraju vladati u mreži 110 kV, a da bi mogli održavati željeni napon na strani 20 kV, koristeći regulaciju i to za dva tipična pogonska slučaja:

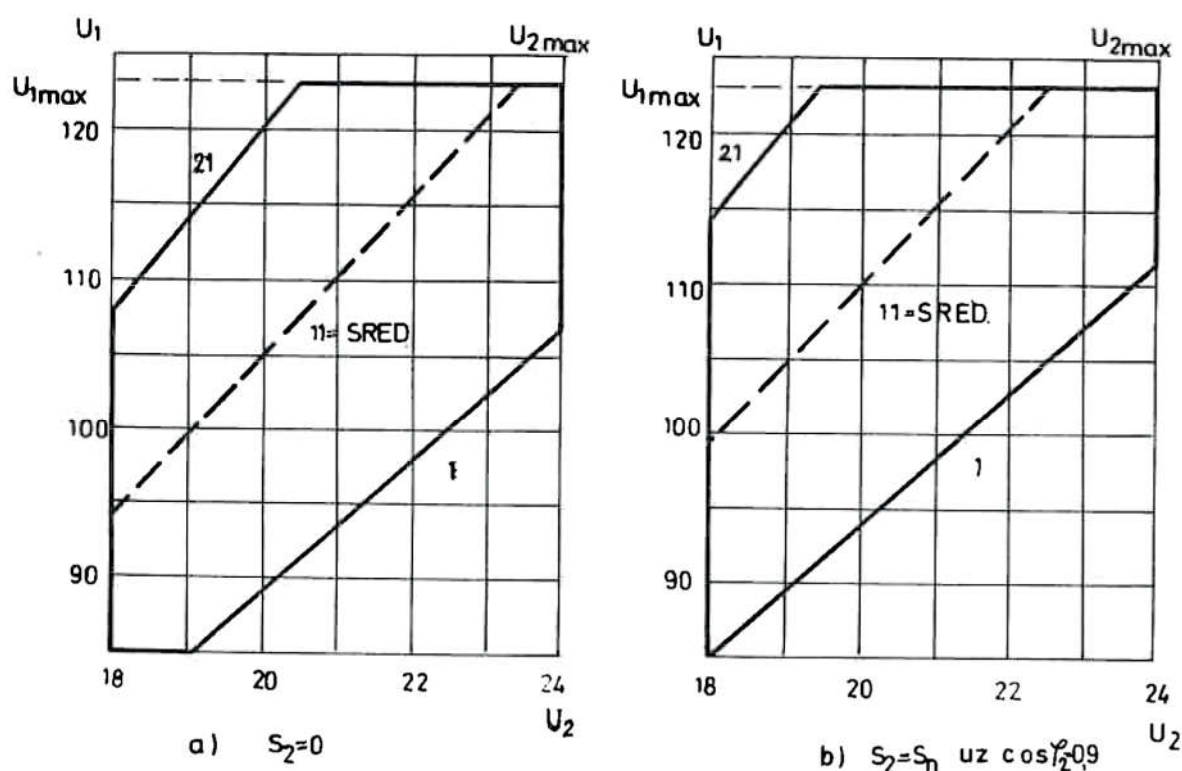
- a) u praznom hodu
- b) kod S_n uz $\cos \varphi_2 = 0,9$

Iz slike 32 izvedena je za pogonski slučaj a slika 33a. Moguća su samo pogonska stanja, koja se nalaze unutar puno izvučenog poligona. On je ograničen:

- na strani 110 kV (horizontalne linije):
 - maksimalnim pogonskim naponom (123 kV)
 - najnižim očekivanim pogonskim naponom (ovdje 85 kV)
- na strani 20 kV (vertikalne linije) :
 - maksimalnim pogonskim naponom (24 kV)
 - najnižim naponom koji se pojavljuje u programu regulacije (ovdje 18 kV)
- regulacionim opsegom transformacije (kose linije):
 - graničnim položajem 1
 - graničnim položajem 21.

Sl.33a dopušta nam da izvedemo, npr., slijedeće zaključke:

- da bi postigli $U_2 = 24$ kV, primarni napon U_1 ne smije biti niži od 107 kV,
- da bi postigli 22 kV, primarni napon ne smije biti niži od 98 kV, itd.
- da bi postigli napon 18 kV, primarni napon ne smije biti viši od 108 kV,
- da bi postigli napon 20 kV, primarni napon ne smije biti viši od 120 kV, itd.



Slika 33 - Ograničenja regulacije napona pomoću regulacionog transformatora

Slika 33b izvedena je na isti način, ali za pogonski slučaj b. Možemo npr. zaključiti slijedeće:

- da bi postigli $U_2 = 24$ kV, primarni napon U_1 ne smije biti niži od 111 kV,
- da bi postigli $U_2 = 22$ kV, napon U_1 ne smije biti niži od 102,5 kV, itd.
- da bi postigli $U_2 = 18$ kV, napon U_1 ne smije biti viši od 114 kV, itd.

Vidimo da za neki propisani režim napona na sekundarnoj strani, uvažavajući i trenutno opterećenje, moramo zadovoljiti i sasvim određene granične uvjete na 110 kV strani, odnosno nećemo moći dozvoliti proizvoljne varijacije napona u mreži 110 kV. U tom pogledu važi:

- kod malih opterećenja treba paziti da napon na 110 kV strani ne bude previsok,
- kod vršnog opterećenja treba paziti, da napon na 110 kV strani ne bude prenizak.

Navedeni zahtjevi su upravo suprotni prirodnom ponašanju mreže, jer kod niskog opterećenja i u prijenosnoj mreži vlada tendencija povećanja napona, a kod visokih opterećenja naponi se smanjuju.

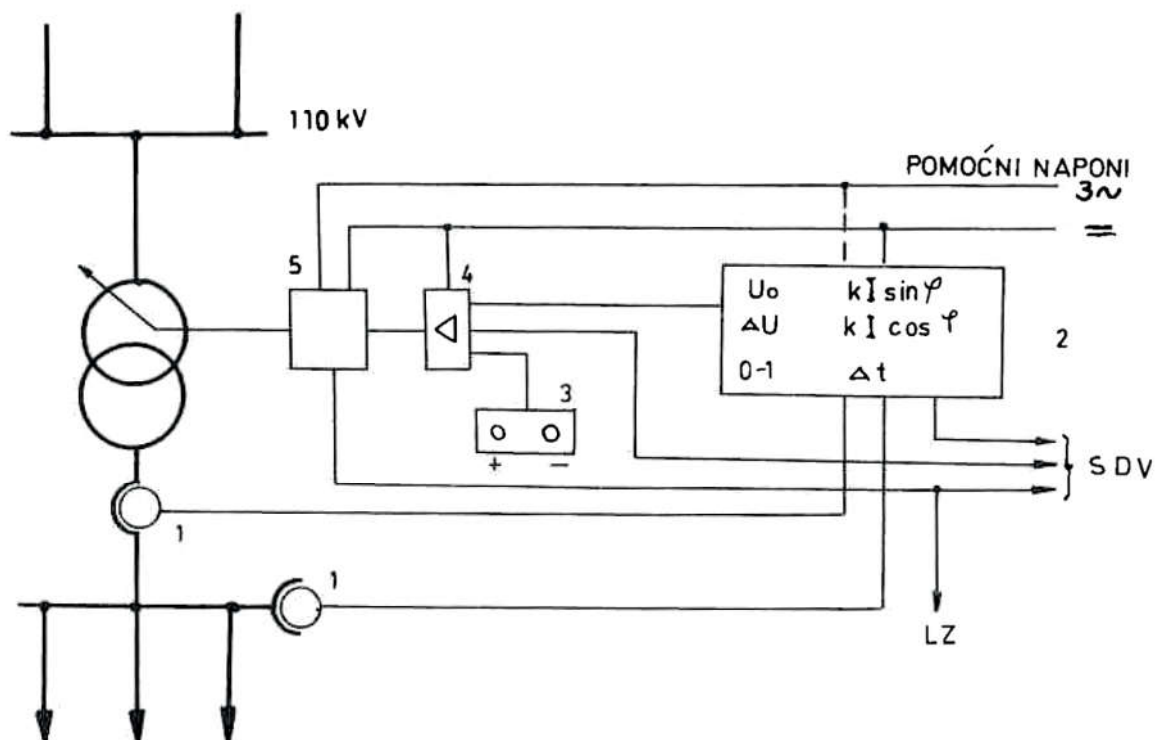
Opisana ograničenja u praksi obično neće doći do izražaja, osim možda povremeno u slučaju poremećaja u mreži (oslabljena mreža). Ako bi ta ograničenja ipak trajno ometala regulaciju napona u distributivnoj mreži, mogu se poduzeti slijedeće mjere:

- kompenzirati reaktivnu snagu u distributivnoj mreži;
- primijeniti transformator s većim opsegom regulacije;
- pojačati mrežu srednjeg i niskog napona i time smanjiti raspon regulacije napona u pojnoj točki;
- pojačati mrežu visokog napona i time smanjiti padove napona u njoj;
- prilagoditi regulaciju napona u visokonaponskoj mreži zahtjevima distributivne mreže.

Kriteriji za regulaciju napona mogu biti slijedeći:

- a) konstantan napon na sekundarnoj strani transformatora;
- b) vremenski programirana regulacija sekundarnog napona bez obzira na stvarno opterećenje, pri čemu je program utvrđen na osnovu statističkog dijagrama opterećenja;
- c) regulacija ovisna o prividnoj struji opterećenja;
- d) regulacija ovisna o reaktivnoj komponenti struje opterećenja;
- e) regulacija ovisna o djelatnoj komponenti struje opterećenja;
- f) regulacija ovisna kombinirano od d) i e).

Regulacija je obično automatska, makar su promjene relativno spore. Na sl.34 prikazana je blok-shema automatske regulacije. Po kriteriju a) i b) nepotreban je priključak na strujni transformator, po kriteriju a) utjecaj struje opterećenja se ne uzima u obzir, a po kriteriju b) taj utjecaj je nadomješten programatorom.



Slika 34 - Blok-shema automatske regulacije transformatora

- 1 - mjerni transformatori
- 2 - automatski regulator napona sa elementima za podešavanje
- 3 - tipkala za ručnu regulaciju
- 4 - pojačalo naloga
- 5 - servomotor regulacione sklopke
- SDV - sistem daljinskog vođenja
- LZ - lokalni zapis događaja
- U_0 - osnovni željeni napon
- ΔU - neosjetljivost
- $kI \sin \varphi$ - utjecaj reaktivne komponente
- $kI \cos \varphi$ - utjecaj djelatne komponente
- Δt - vremenski parametri
- 0-1 - regulator isključen - uključen

Dobro udešen regulator po kriteriju c) (strujno kompaundirana regulacija) zadovoljiti će u gotovo svim slučajevima, a rješenje je jednostavnije od onog za d), e) ili f).

Koncepcija regulatora i njegovo podešavanje mora zadovoljiti niz zahtjeva, koji omogućuju da se približno postignu željene naponske prilike kod potrošača uz minimalni broj regulacionih zahvata regulacione sklopke transformatora, kako ne bi došlo do prekomjernog trošenja kontakata i ostalih mehaničkih dijelova. Nadalje, mora biti predviđeno, da se rad regulatora i izvršnih organa blokira za vrijeme trajanja kratkog spoja, kod nestanka mjernog napona i slično.

Shema automatske regulacije postaje složenija, ako su u stanici paralelno postavljena dva ili više regulaciona transformatora. Pri tome shema ovisi i o broju sabirnica na strani nižeg i višeg napona, o ograničenjima koja se postavljaju u pogledu mogućih uklopnih stanja i tome slično. Sistem automatske regulacije napona mora nadzirati da li su svi transformatori izvršili zadani regulacioni hod. Obično se nalog za reguliranje ne daje svim servomotorima odjednom, već uzastopno, kako bi se izbjeglo preopterećenje izvora pomoćnog napona.

1.2.5.2 Regulacija napona i reaktivne snage u mrežama visokog napona

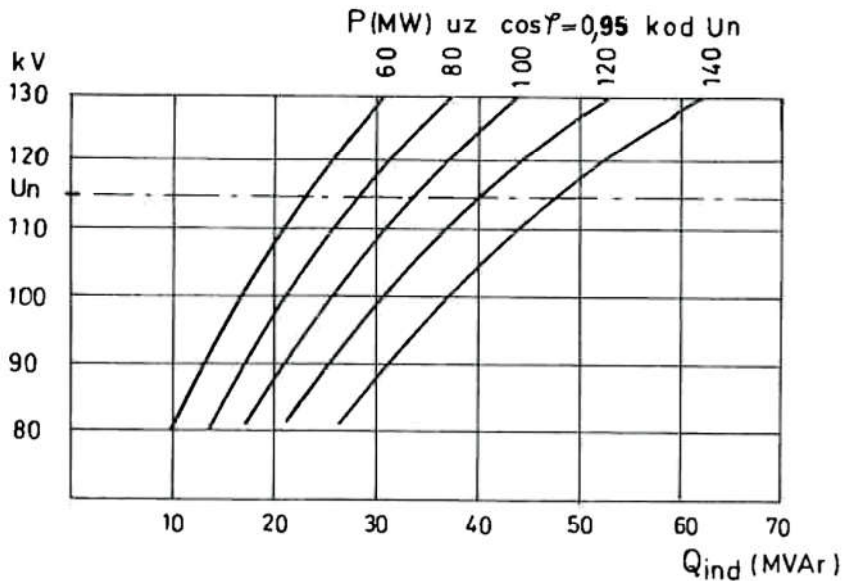
U većini normalnih slučajeva moći ćemo naponske prilike u visokonaponskoj mreži promatrati ne vodeći računa o prilikama u priključenim mrežama srednjeg napona, makar smo u prethodnom poglavlju (1.2.5.1) ustanovili da su moguća ograničenja s te strane.

Osnovne zaključke moći ćemo izvesti promatrajući ponašanje tipičnih prijenosnih sistema, koje onda možemo proširiti i na mrežu visokog napona u cjelini. Pri tome će nam pomoći poznavanje naponskih karakteristika.

Sl. 36 pokazuje naponske karakteristike jednog konzumnog područja za niz djelatnih snaga ($P_{\min} = 60 \text{ MW}$, $P_{\max} = 140 \text{ MW}$). Svaka karakteristika pokazuje, kako promjena napona uz konstantnu djelatnu snagu utječe na promjenu reaktivne snage (vidi "Mreže I",

5.4).

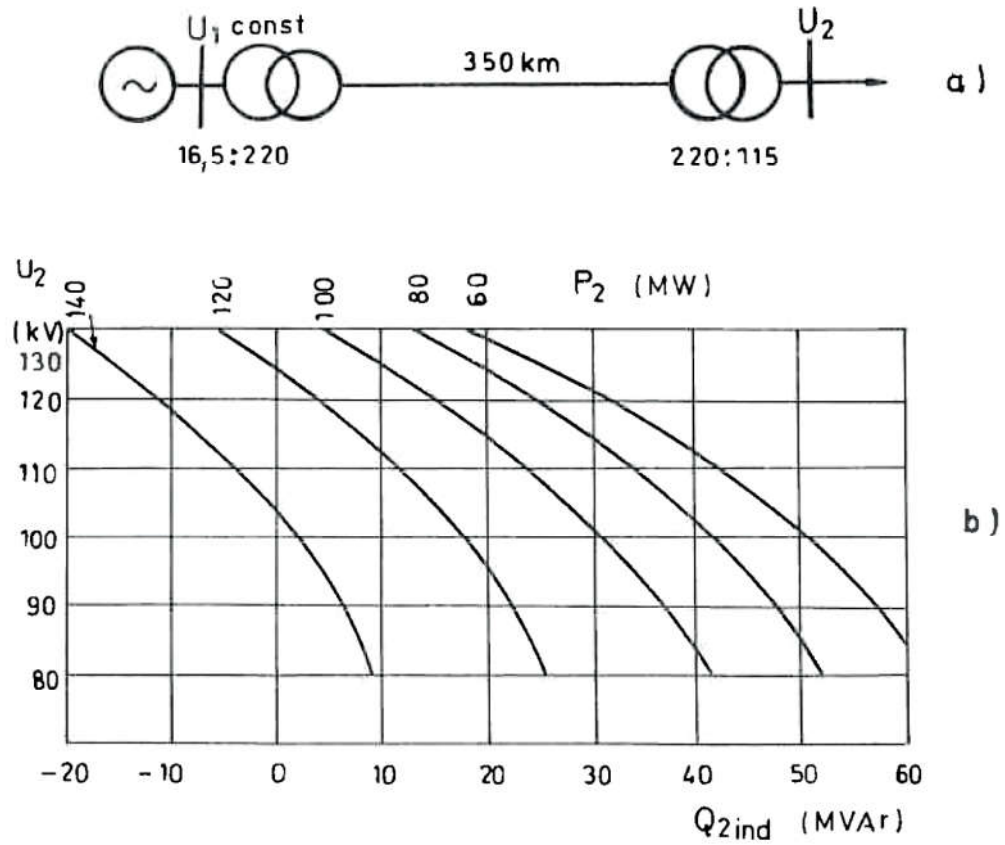
Sl.37b prikazuje naponske karakteristike dugog prijenosnog sistema prema sl.37, a uz konstantni napon U_1 na početku. Te karakteristike možemo, npr., konstruirati pomoću kružnog podonskog dijagrama prijenosnog sistema. Ako sl.37 usporedimo sa sl.12, možemo



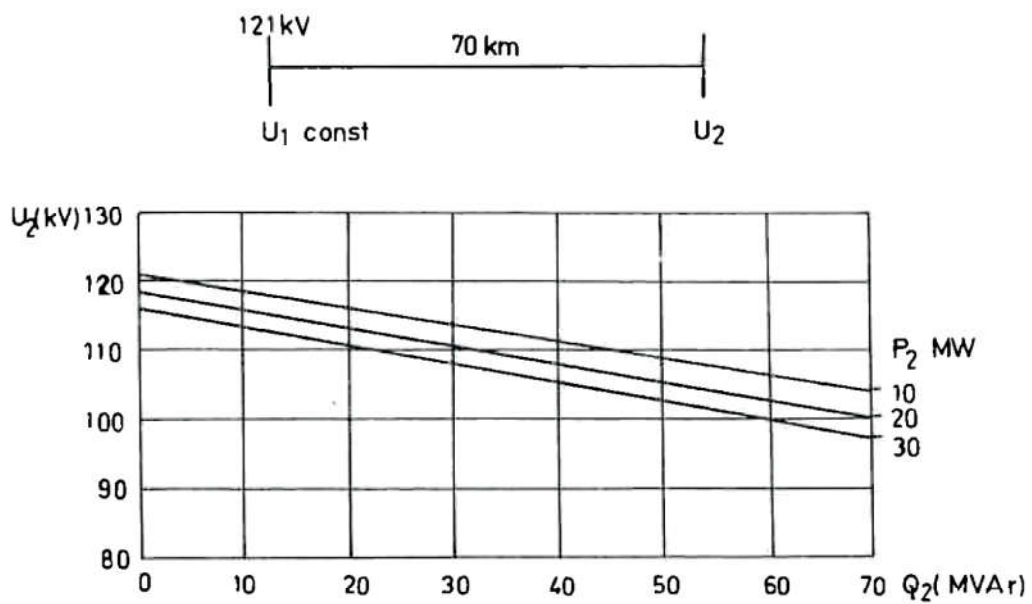
Slika 36 - Naponske karakteristike
konzumnog područja

ustanoviti, da naponske karakteristike prijenosnog sistema imaju određenu statiku, definiranu parametrima prijenosnog sistema. Kod kratkih vodova uglavnom samo reaktancija X utječe na statiku, pa će naponske karakteristike u tom slučaju biti gotovo pravci (sl.38).

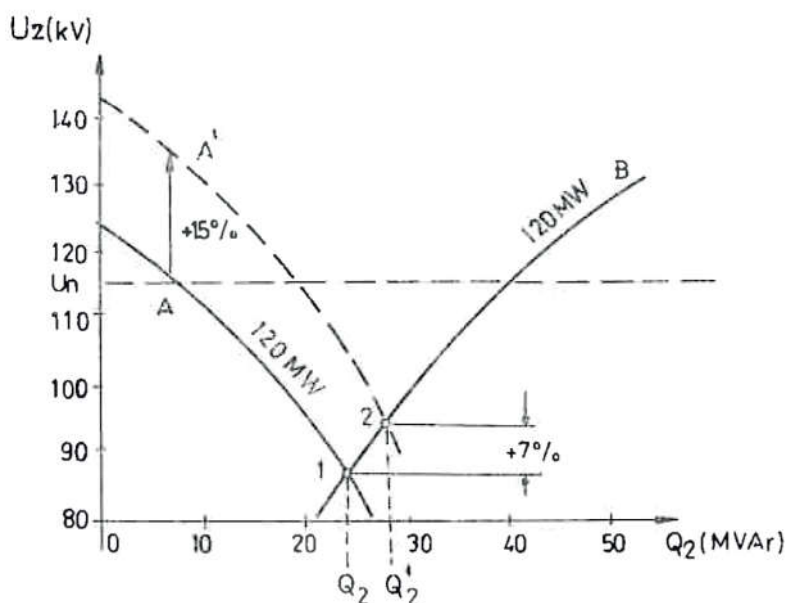
Potrošačko područje, koje se ponaša po sl.36, možemo napajati prijenosnim sistemom, koji se ponaša prema sl.37. Odabrati ćemo trenutak, kada je djelatno opterećenje 120 MW, pa ćemo iz snopa krivulja odabrati upravo te krivulje i prenijeti ih u isti koordinatni sustav, što je prikazano na sl.39. Krivulja A je karakteristika prijenosnog sistema, a krivulja B je karakteristika potrošačkog područja kod 120 MW. Stanje ravnoteže može se uspostaviti jedino u radnoj točki 1, gdje se obadvije krivulje sijeku.



Slika 37 - Naponske karakteristike dugog prijenosnog sistema za $U_1 = \text{konst.}$



Slika 38 - Naponske karakteristike kratkog prijenosnog sistema za $U_1 = \text{konst.}$



Slika 39 - Napajanje potrošačkog područja putem dugog prijenosnog sistema

Područje uzima, a sistem daje reaktivnu snagu Q_2 . Napon U_2 ne zadovoljava, pa se moraju poduzeti regulacione mjere.

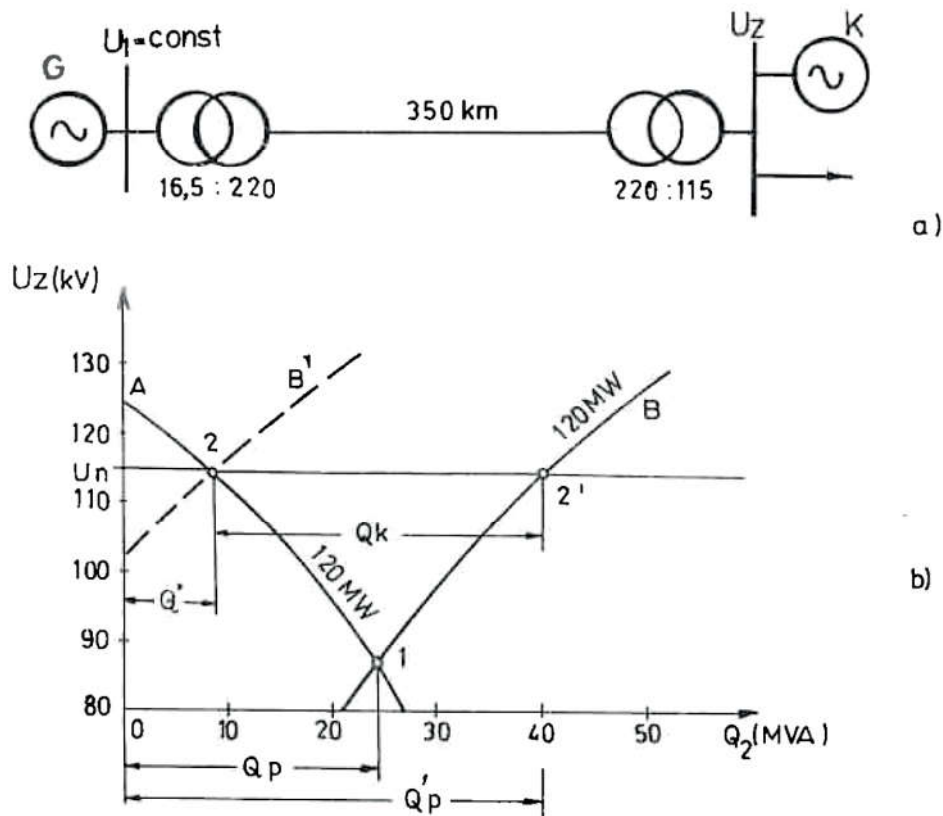
Prvi pokušaj ćemo izvršiti tako, da pretpostavimo mogućnost regulacije transformatora 220/115 (sl.37a), i to u rasponu $\pm 15\%$. Ako napon U_2 na taj način povisimo za puni opseg regulacije, dakle za 15%, to će se na naponskoj karakteristici prijenosnog sistema odraziti kao paralelni pomak krivulje A za 15% prema gore, čime se dobiva krivulja A' (sl.39). Dobiva se nova radna točka 2. Možemo ustanoviti, da je napon U_2 kod potrošača porastao za svega 7%. Ostatak regulacionog zahvata od $15 - 7 = 8\%$ poništen je uslijed porasta prijenosa reaktivne snage od Q_2 na Q'_2 .

Podizanje napona može se, umjesto regulacionim transformatorom, postići i podizanjem uzbude generatora na sl.37a ili pak kombiniranjem dizanja uzbude i reguliranjem na transformatoru, ali s istim rezultatom.

Iz ovog prikaza možemo zaključiti, da u slučajevima prijenosa drugim prijenosnim sistemom, regulacija napona ne daje zadovoljavajuće rezultate.

Drugi pokušaj dovodjenja napona na nazivnu vrijednost kod prijenosa

dugim prijenosnim sistemom izvršit ćemo primjenom sinhronog kompenzatora, sl.40a. Krivulje A i B, te radna točka 1 na sl.40b odgovaraju sl.39. Zadatak je, kao i ondje, potrošačkom području dovesti 120 MW djelatne snage uz $U_2 = 115$ kV. Promatrajući samo naponsku karakteristiku prijenosnog sistema, to je pogonsko stanje moguće samo u radnoj točki 2. Potrebno je, dakle, i karakteristiku potrošačkog područja "dovesti" u tu točku.

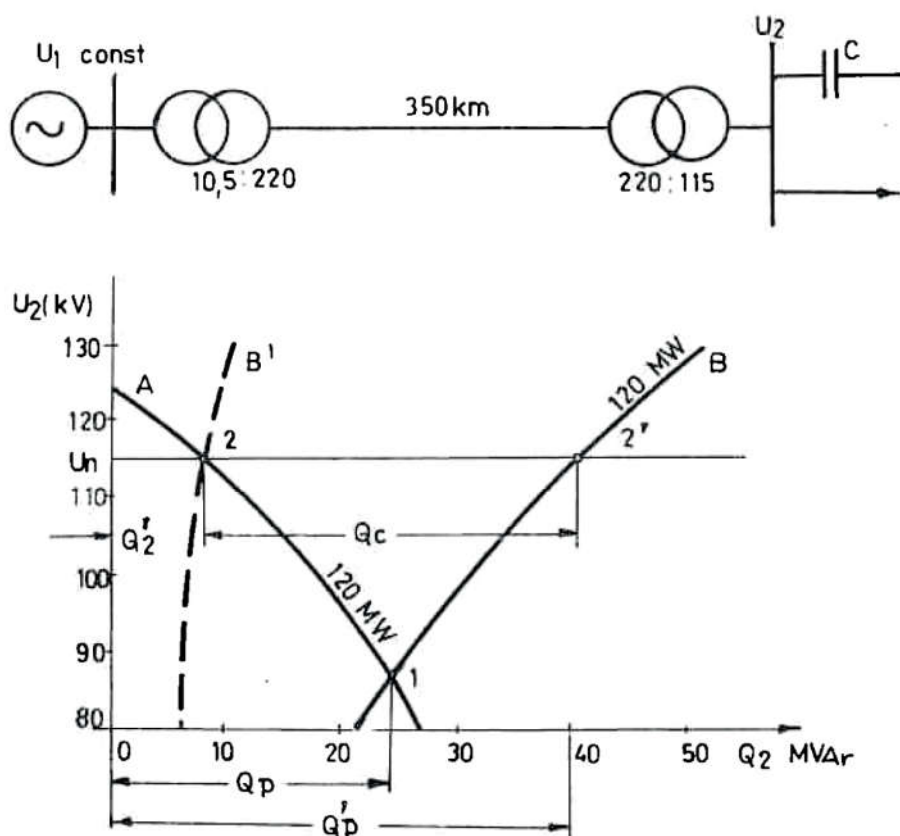


Slika 40 - Sinhroni kompenzator primijenjen kod prijenosa na velike udaljenosti

Vidimo, da kod napona $U_2 = 115$ kV i $P_2 = 120$ MW prijenosni sistem može dati reaktivnu snagu Q' , a potrošačko područje zahtijeva Q'_p . Razliku $Q'_p - Q' = Q_K$ namirit ćemo iz sinhronog kompenzatora K. Možemo zaključiti, da će, kod prijenosa energije na veće udaljenosti, primjena sinhronih kompenzatora biti efikasna, za razliku od regulacionih transformatora.

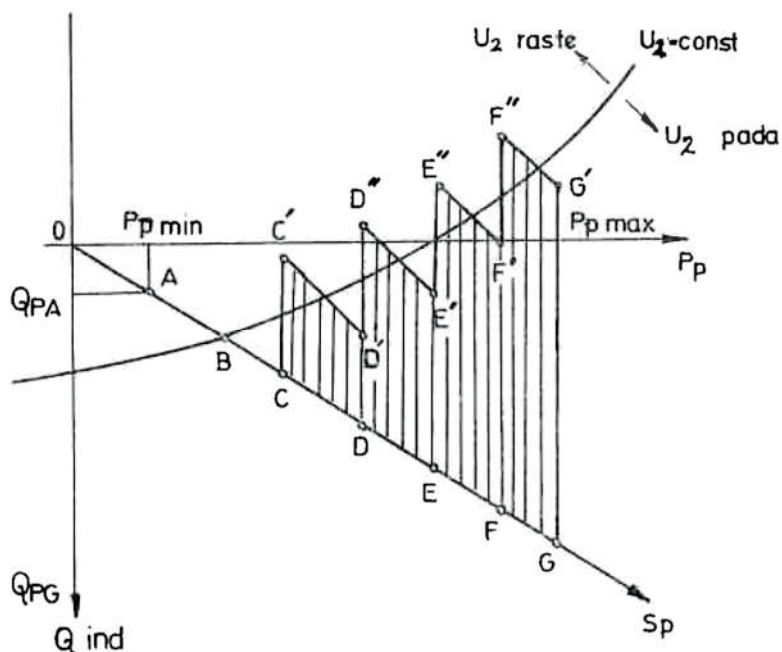
$Q_K = 0$. Kod opterećenja $S_P < S_{PB}$ sinhroni kompenzator mora apsorbirati višak reaktivne snage iz prijenosnog sistema, dakle raditi u pouzbudjenom području. ($Q_K = Q_{Pmin} - Q_{2A}$). U protivnom slučaju, kod P_{Pmin} bi napon U_2 bio viši od zadanog. Kod opterećenja $S_P > S_{PB}$ kompenzator mora namiriti pozitivnu razliku $Q_K = Q_P - Q_2$. Ako se djelatna potrošnja mijenja od P_{Pmin} do P_{Pmax} , sinhroni kompenzator će morati raditi od $A' - A$ "kapacitivno" preko $Q_{KB} = 0$ do $C' - C$ "induktivno".

Isti rezultat kao na sl.40 možemo postići i pomoću kondenzatorske baterije (sl.42), koja mora imati takav kapacitet da kod 115 kV daje (induktivnu) reaktivnu snagu Q_C . Karakteristika B' je dobivena tako, da je od karakteristike B odbijena reaktivna snaga koju dobavlja kondenzator C kod odgovarajućeg napona (kvadratna ovisnost).



Slika 42 - Kondenzatorska baterija primijenjena kod prijenosa na velike udaljenosti

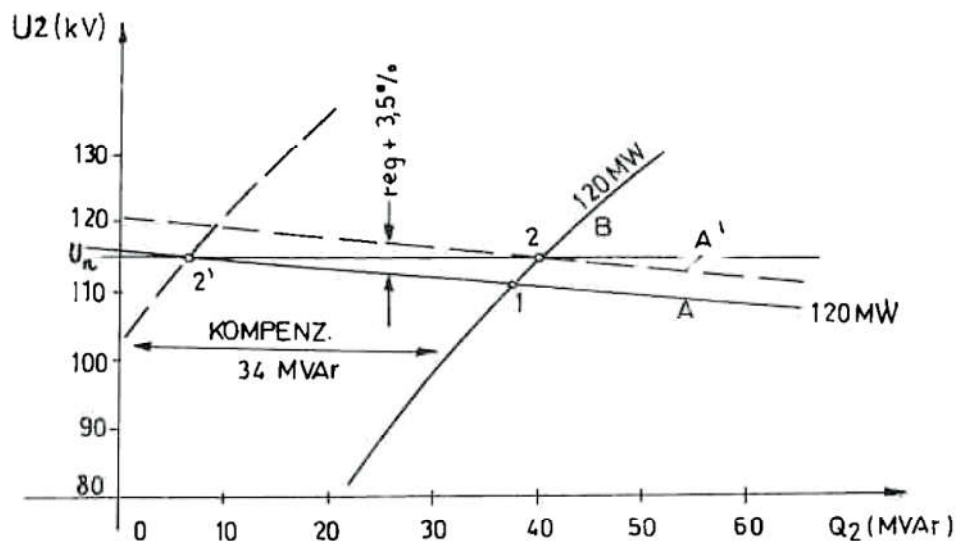
Dok je sinhroni kompenzator (sl.41) mogao odgovoriti na regulacioni zahtjev, kondenzatorska baterija neće moći, jer je obično podijeljena na mali broj grupa, pa će regulacija biti u skokovima. Ako je kondenzatorska baterija podijeljena u 4 grupe, moći ćemo regulacioni zahtjev ustanoviti pomoću sl. 43. Ponajprije vidimo, da u području A-B, koje se odnosi na nisko opterećenje potrošačkog područja, nećemo imati mogućnost regulacije. Priključenje prve grupe kondenzatora odgoditi ćemo sve do C, kada će prijenosni sistem biti rasterećen prijenosa reaktivne snage $Q_{CI} = C - C'$. Po kriteriju najmanjih odstupanja od zahtjeva $U_2 = \text{const}$, dodavati ćemo daljnje grupe kondenzatora $Q_{CII} = D' - D''$, $Q_{CIII} = E' - E''$ i $Q_{CIV} = F' - F''$. U intervalima $C' - D'$, $D'' - E'$, $E'' - F'$ i $F'' - G'$ priključeni kapaciteti će biti konstantni, a napon će s porastom potrošnje u tim intervalima opadati. Zbog opadanja napona opadati će i reaktivna snaga trenutno priključenih kondenzatorskih baterija (kvadratna ovisnost). Regulacija pomoću kondenzatorske baterije biti će dakle u stupnjevima, "gruba". Radi toga napon U_2 neće moći



Slika 43 - Rad kondenzatorske baterije sa 4 grupe uz uvjet $U_1 = \text{const}$ i $U_2 \neq \text{const}$

biti konstantan, već promjenjiv u granicama, koje diktiraju karakteristike prijenosnog sistema, promjena opterećenja i broj grupa na koje je podijeljena kondenzatorska baterija (vidi i sl.7).

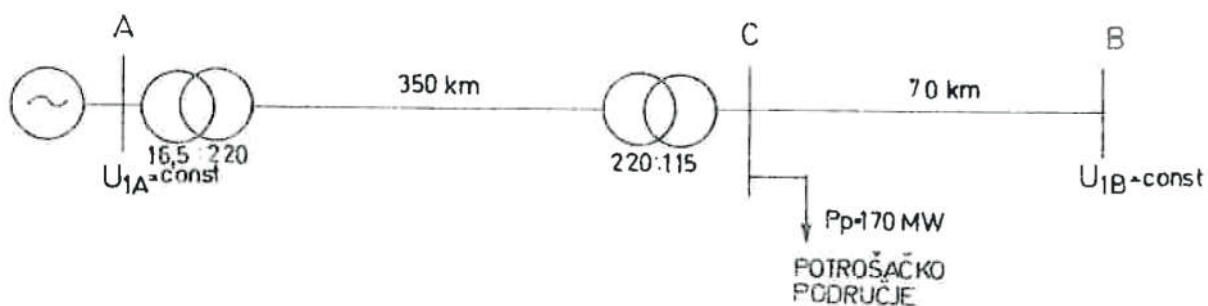
Do posve drugih rezultata ćemo doći, ako isto potrošačko područje snabdijevamo putem kratkog prijenosnog sistema, sličnog onom na sl.38, a uz inače iste uvjete. Okolnosti su prikazane na sl.44.



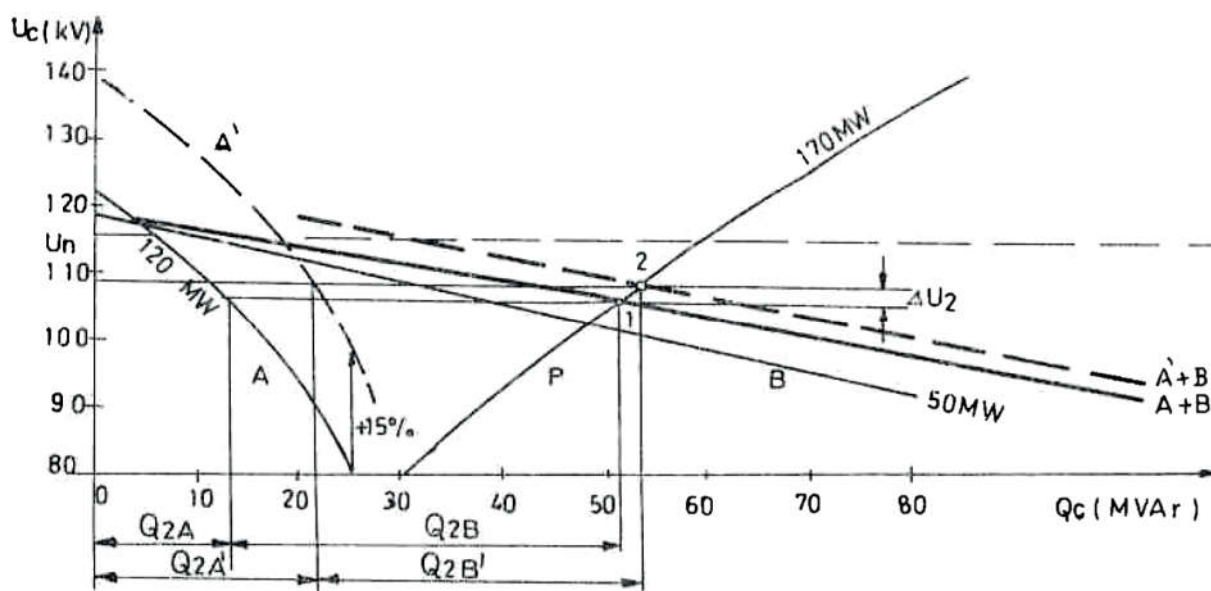
Slika 44 - Napajanje potrošačkog područja putem kratkog prijenosnog sistema

Lako možemo ustanoviti, da napon od 115 kV u napojnoj točki potrošačkog područja možemo jednako uspješno postići regulacionim transformatorom (potrebno povišenje napona od 3,5 %), ili pak sinhronim kompenzatorom (potrebno kompenzirati 34 MVar). Regulacija na transformatoru će ovdje biti efikasna, a osim toga i neusporedivo jeftinija nego kompenzacija.

Prilikama u složenoj visokonaponskoj mreži približit će nas slučaj dvostranog napajanja potrošačkog područja, koje zahtijeva djelatnu snagu 170 MW. Područje napajaju dva prijenosna sistema, jedan dugi i jedan kratki (sl.45a). Regulacijom snage u elektrani A postići ćemo, da iz A prema C teče djelatna snaga od 120 MW, a ostatak od 50 MW dobavlja čvor B.

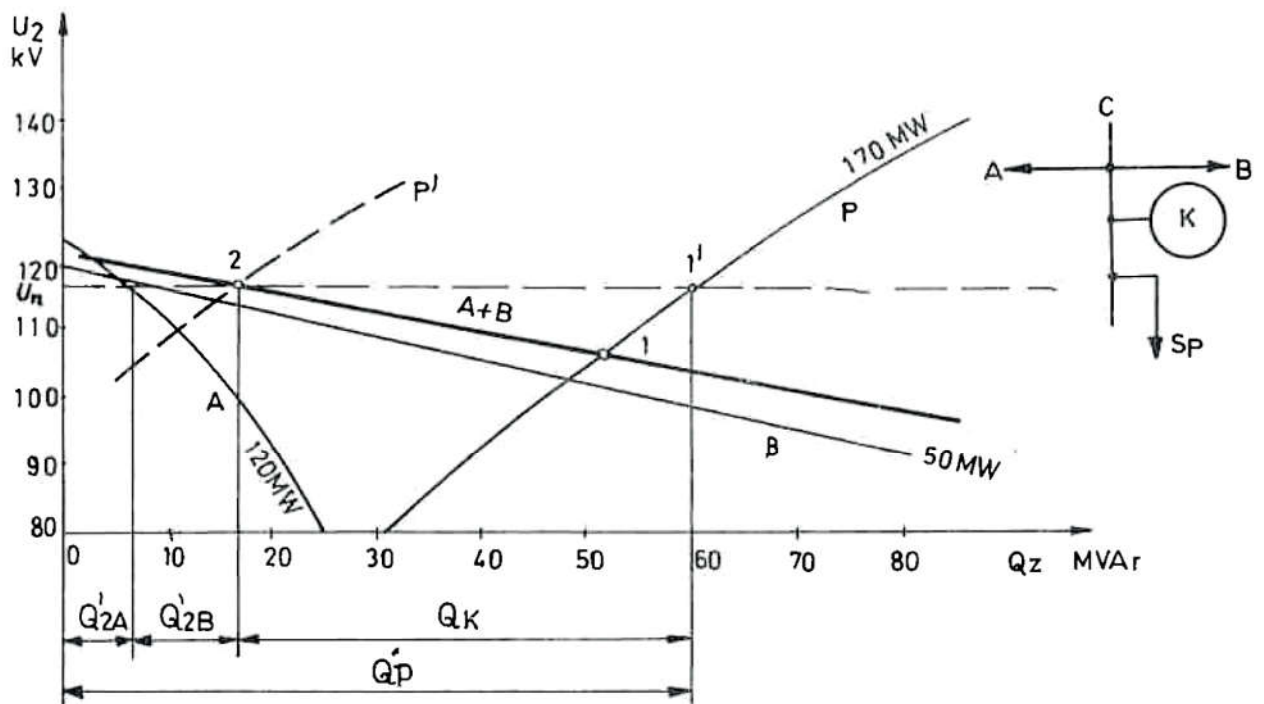


Slika 45a - Potrošačko područje napajano jednim dugim i jednim kratkim prijenosnim sistemom



- Sl. 45b - Naponske karakteristike sistema sa sl.45a,
 kod $P_p = 170 \text{ MW}$ sa regulacionim transformatorom
- P - naponska karakteristika potrošača kod 170 MW,
 - A - naponska karakteristika sistema A kod 120 MW,
 - B - naponska karakteristika sistema B kod 50 MW,
 - A+B - sumarna krivulja sistema A i B - horizontalno zbrojene,
 - 1 - sjecište krivulje A+B sa P (napon potrošača je 106 kV, bez regulacije),
 - Q_{2A} i Q_{2B} - jalove snage, koje potrošaču dobavljaju sistemi A i B bez regulacije,

- A' - naponska karakteristika sistema A s regulacijom +15% (A pomaknuta gore 15%),
- $A'+B$ - sumarna krivulja karakteristika A' i B - horizontalno zbrojeno,
- 2 - sjecište krivulja $A'+B$ i P' - novo pogonsko stanje sa regulacijom; napon potrošača 109 kV, povećanje 3 kV (2,6%),
- Q'_{2A} i Q'_{2B} - jalove snage koje potrošaču dobavljaju sistemi A i B uz regulaciju na kraju sistema A od +15%.



Sl. 45c - Naponske karakteristike sistema A sa Sl.45a kod

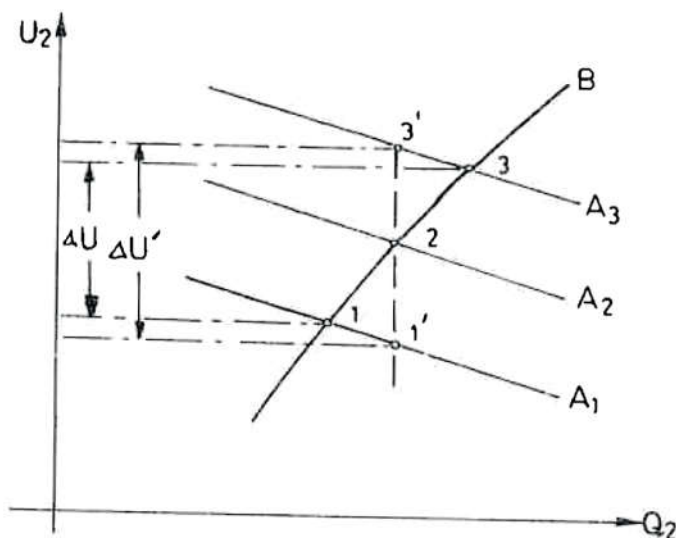
$P_P = 170$ MW i sa sinhronim kompenzatorom u C

- A - naponska karakteristika sistema A,
- B - naponska karakteristika sistema B,
- $A+B$ - sumarna karakteristika sistema A i B (horizontalno zbrojene),
- P - naponska karakteristika potrošača,
- 1 - radna točka bez kompenzacije; napon potrošača 106 kV,
- P' - naponska karakteristika potrošača horizontalno pomaknuta do točke 2,
- 2 - sjecište krivulje $A+B$ s horizontalom $U_2 = U_n = 115$ kV.

Na sl.45b su prikazane prilike i opisan postupak pod pretpostavkom, da se čvorištu C nastoji osigurati napon od 115 kV. Prikaz pokazuje, da se tom zahtjevu ne može udovoljiti regulacijom napona na regulacionom transformatoru, kao ni u slučaju prikazanom na sl.39.

U istom slučaju, ali pomoću sinhronog kompenzatora, osiguran je u čvoru C željeni napon od 115 kV. Prikaz i opis postupka prikazan je u sl.45c. Na dnu slike se vidi, kako je reaktivna snaga Q_p' potrebna potrošaču raspoređena na izvor A, na izvor B i na sinhroni kompenzator K.

Kod ovog razmatranja su okolnosti idealizirane utoliko, što je uzeto da nema regulacije 110/35(10,20), a što ne odgovara stvarnosti. Međutim, zaključci su ipak ispravni, tim više što kompenzator ujedno proizvodi veći dio potrebne reaktivne snage u centru potrošnje, rasterećuje prijenosne sisteme od prijenosa reaktivne snage i time smanjuje gubitke u prijenosu.



Slika 46 - Samoregulacija napona u mreži

Iz slučajeva razmatranih uz sl.39 i sl.45b možemo zaključiti na fenomen samoregulacije u visokonaponskoj mreži i sistemu uopće. Na sl.46 je prikazana karakteristika potrošača B. Karakteristika prijenosnog sistema prikazana je u tri varijante, A1, A2 i A3, od kojih svaka slijedeća odgovara višem naponu U_1 od prethodnog. Pri tome nije važno, kako i zbog čega je došlo do povećanja napona. Kada

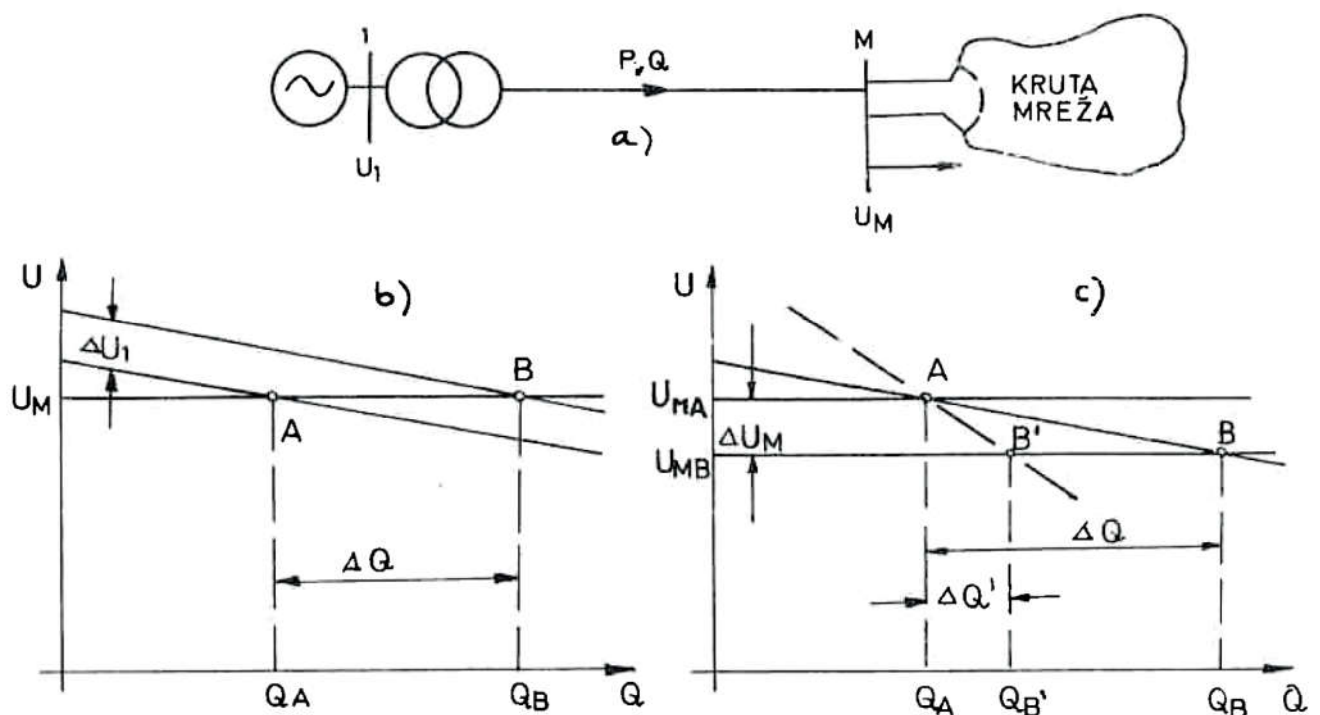
reaktivna snaga potrošača ne bi ovisila o naponu (karakteristika B bi bila vertikalna linija 1'-2-3'), varijacije napona $\Delta U'$ bi se neposredno odrazile kod potrošača. Zahvaljujući nagibu karakteristike potrošača B, varijacije napona će biti samo $\Delta U < \Delta U'$. Ovo svoj-

stvo sprege mreža-potrošač je posebno interesantno kod brzih promjena napona, koje tromi regulacioni uređaji (npr. regulacija na transformatoru 110/35) ne mogu pratiti.

Suprotno dosadašnjim razmatranjima prijenosnih sistema s 1 ili 2 generatora, možemo razmatrati i u praksi realniji slučaj napajanja krute mreže iz udaljene elektane (sl.47a).

Razlikujemo dva tipična pogonska slučaja. U slučaju prikazanom na sl.47b je napon krute mreže U_M čvrst i konstantan, ali se uzbuda generatora u 1 poveća tako, da napon U_1 poraste za ΔU_1 . Ta promjena ne može utjecati na napon krute mreže, pa se porast napona mora poništiti padom napona u prijenosnom sistemu 1-M, i to jedino tako, da se poveća prijenos reaktivne snage od Q_A na Q_B . Promjena ΔQ će ovisiti o statički sprege prijenosnog sistema 1-M i regulatora napona generatora.

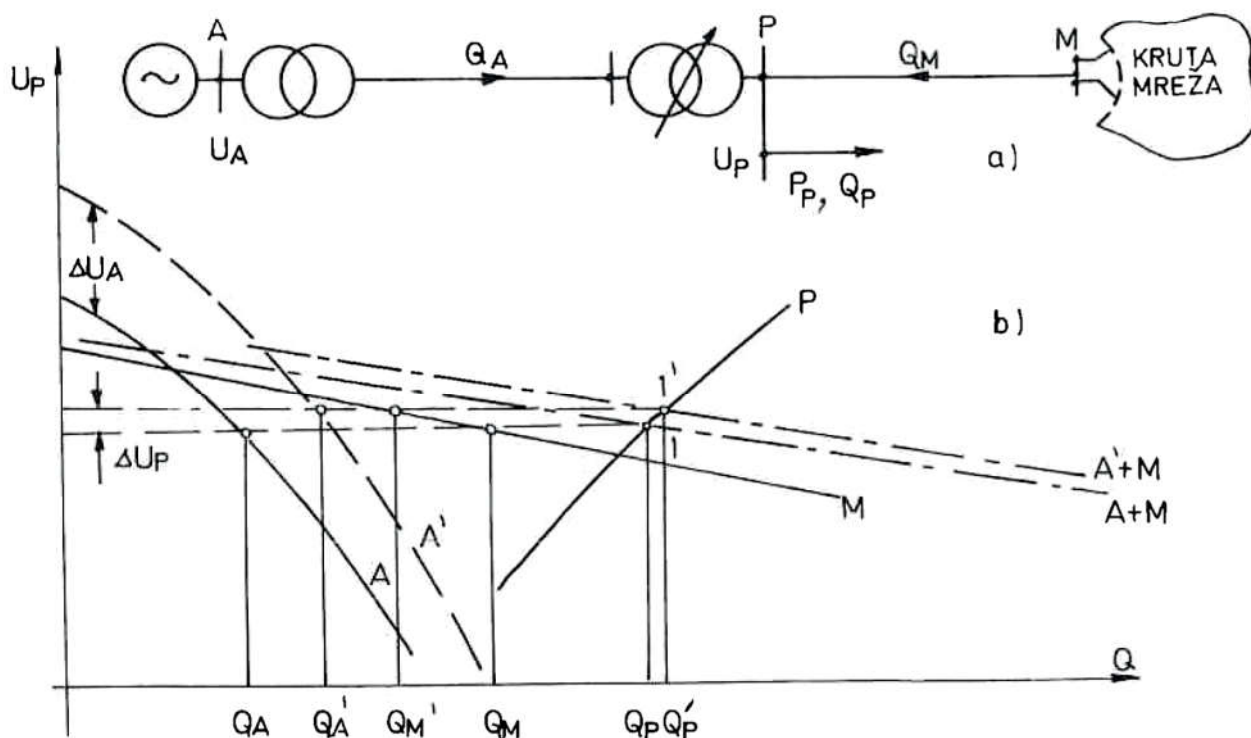
U drugom slučaju (sl.47c) dolazi do smanjenja napona krute mreže od U_{MA} na U_{MB} , dakle za ΔU_M . Ova promjena izazvati će povećanje reaktivne snage, koju generator dobavlja krutoj mreži od Q_A na Q_B .



Slika 47 - Generator napaja krutu mrežu

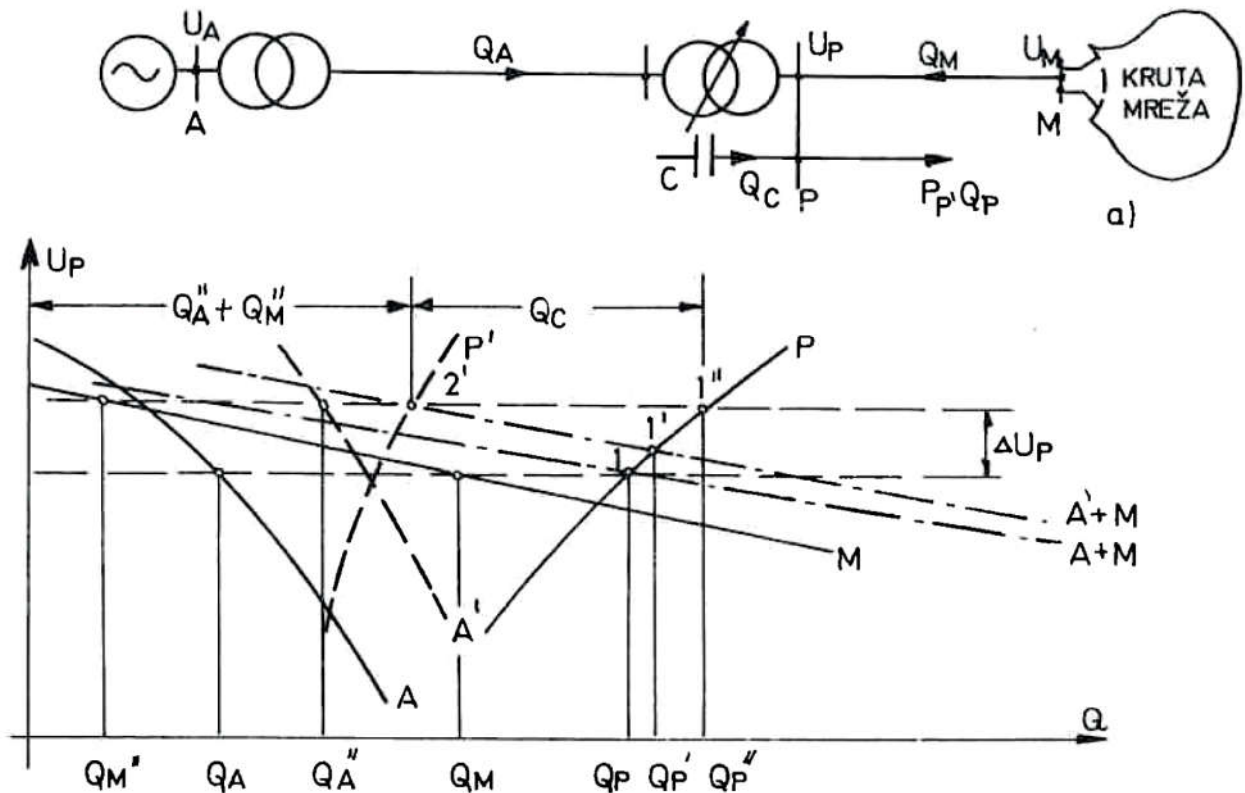
tj. za ΔQ . Ovo povećanje može dovesti do strujnog preopterećenja generatora i uslijed toga do njegovog ispada iz pogona. Ako takva opasnost postoji, potrebno je promijeniti statiku (nagib) karakteristike regulatora uzbude tako, da ukupna karakteristika generatora i prijenosnog sistema bude, npr. A-B' umjesto A-B. Sada će povećanje reaktivne snage generatora uslijed sniženja napona krute mreže biti samo $\Delta Q'$.

Na sl.48a prikazan je prijenosni sistem od elektrane A do krute mreže M sa usputno priključenim potrošačem djelatne snage P_P i reaktivne snage Q_P . Na sl.48b su prikazane i na već poznati način interpretirane naponska karakteristika potrošača P, karakteristika A sistema A-P i karakteristika M sistema M-P, iz kojih se izvodi sumarna karakteristika A+M. Reaktivna snaga potrošača Q_P namiruje se iz M u iznosu Q_M i iz A u iznosu Q_A . Porast napona u A za ΔU_A , izazvan bilo uzbudom generatora, bilo regulacijom na tran-



Slika 48 - Potrošač na vođu između elektrane i krute mreže

sformatoru, dovodi do promjene karakteristike A u A', a zbirnu karakteristiku A+M u A'+M. Ova promjena izaziva kod potrošača neznatan porast napona ΔU_P , jer je veza M-P relativno čvrsta (kratka) u odnosu na vezu A-P. Ujedno će reaktivna snaga potrošača neznatno porasti od Q_P na Q_P' . Znatno se, međutim, povećava reaktivna snaga koju dobavlja čvor A (Q_A na Q_A'), dok se reaktivna snaga, koju dobavlja kruta mreža M, smanjuje od Q_M na Q_M' . Na pragu smo važnog zaključka, da namjeravane promjene napona u jakoj mreži ne utječu bitno na naponski nivo, ali tim više utječu na tokove reaktivnih snaga.



Slika 49 - Kombinirano djelovanje regulacije napona i kompenzacije reaktivne snage

Na sl.49 je prikazan slučaj, koji se od prethodnog razlikuje utoliko, što se u potrošačkom čvoru P još kompenzira reaktivna snaga. Gradnju stanja možemo pratiti postepeno: regulacijom napona u A dolazi potrošač P iz radne točke 1 u 1', analogno prethodnom slu-

čaju. Priključivanje kondenzatorske baterije (ili kompenzatora) C dovodi do pomaka karakteristike potrošača P u P', pa se, gledano iz A i iz M, uspostavlja radna točka 2. Prema početnom stanju (radna točka 1) nastala je preraspodjela reaktivnih snaga $Q_M \rightarrow Q_M''$ i $Q_A \rightarrow Q_A''$, dok razliku $Q_C = Q_P'' - Q_M'' - Q_A''$ namiruje kondenzator C. Napon čvora P porastao je za ΔU_P .

1.2.6 Regulacija napona i reaktivne snage kao podsistem velikih zamkastih mreža

Već u izloženim jednostavnim primjerima mogli smo uočiti, da će u visokonaponskim mrežama regulacija napona, uz vršenje osnovne funkcije, neminovno dovesti do preraspodjele tokova reaktivne snage. U veoma velikim, gotovo krutim mrežama, s vrlo jakim izvorima i prijenosnim sistemima, odvojene regulacione intervencije ostati će gotovo potpuno bez upliva na napon čvorišta, pa će se rezultat ograničiti na preraspodjelu tokova reaktivne snage. Tako će elektrana, koja poveća uzbudu generatora, povećati proizvodnju reaktivne snage, a da bitno neće utjecati na nivo napona, pogotovo ne u udaljenim čvorištima.

Može se dogoditi da se sporim procesom naponski nivo neke velike mreže postepeno snizi. Kad u nekim čvorištima napon postane toliko nizak, da regulacioni opseg transformacije 110/35 kV postaje nedovoljan, dolazi osim povećanja gubitaka i do pogonskih teškoća. I u tim slučajevima dizanje uzbuđe generatorima nekih elektrana ne dovodi do popravljavanja stanja, već samo do preraspodjele jalove snage. Može se reći, da je energetska sistem obolio od niskog napona. Samo kolektivna, dobro organizirana akcija podizanja napona svih izvora, uz istovremeno reguliranje napona na nivou 35 kV, može dovesti do popravljavanja stanja. Pri tome mora u sistemu postojati dovoljna rezerva, pa su noćni sati najpovoljniji za takove akcije.

Iz navedenoga se zaključuje, da kriteriji regulacije napona u krutim mrežama nisu sasvim određeni. S obzirom na veoma mala kolebanja napona u krutim mrežama, napon nije najpovoljniji kriterij za upravljanje regulacionim napravama (uzbuda generatora,

regulacija transformatora, itd.). Moguće je usvajanje slijedećih kriterija:

- konstantan napon potrošača; vrijedi za mreže nižih i srednjih napona (regulacija 110/35);
- napon svih čvorišta konstantan i jednak po modulu, bez obzira na tokove jalove snage; ugodno za pogon, gubici veći od minimalnih, primjenjuje se u USA;
- konstantni $\cos \varphi$ potrošača ili konstantni tokovi reaktivne snage; moguće je postići minimum gubitaka u prijenosu.

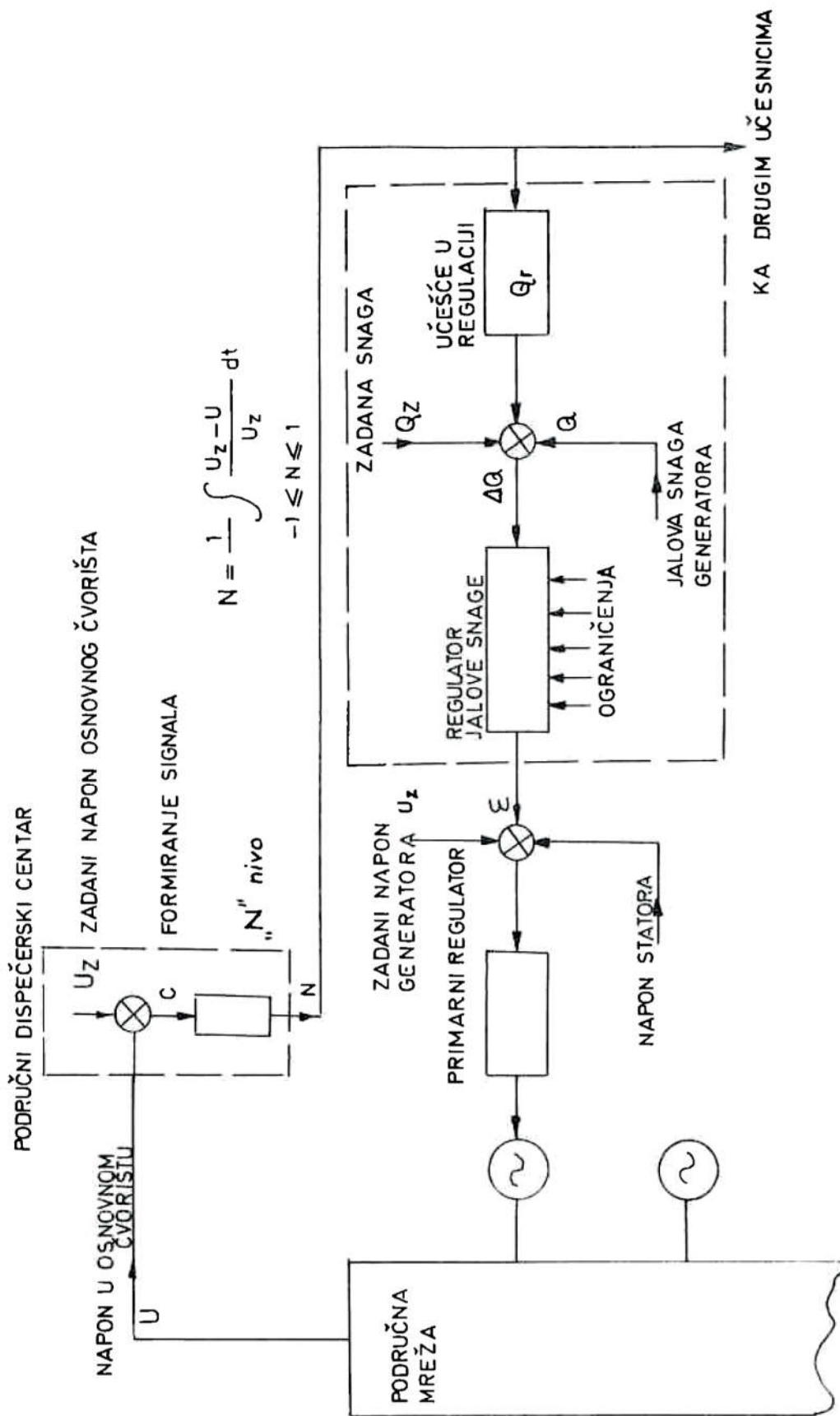
U velikom elektroenergetskom sistemu nije moguće ostvariti zadovoljavajući kvalitet regulacije napona jedino primjenom automatske regulacije svih elemenata, koji učestvuju u regulaciji napona (generatora, kondenzatora, itd.). Dotjerivanje proizvodnje i tokova jalove snage na takav nivo, da napon ima planiranu vrijednost, može se postići ručnim dotjerivanjem karakteristika individualnih automatskih regulatora. To je ručna sekundarna regulacija napona.

Za automatsku sekundarnu regulaciju treba takodjer odabrati kriterije za održavanje napona. Dolazi u obzir:

- održavati konstantni modul napona u svakom čvorištu područja,
- održavati konstantni napon u jednom odabranom čvoru područja,
- održavati napon u zadanim granicama (zadanom rasponu) u svim čvorovima područja.

Prvi način zahtijeva u svakom čvoru izvore jalove snage. Drugi način je najjeftiniji i uz dobar izbor tipičnog čvora može pružiti zadovoljavajuće rezultate. Treći način je najsloženiji, ali zato pruža najbolje rezultate, ne samo u pogledu napona, nego i u pogledu optimalne proizvodnje i raspodjele jalove snage radi minimizacije gubitaka u mreži područja.

Na slici 50 pokazana je shema sekundarne regulacije napona. Generator je snabdjeven sekundarnim regulatorom jalove snage uporedo s primarnim regulatorom napona. Iz područne mreže dolazi u područni dispečerski centar informacija o nivou napona odredjenih



Slika 50 - Shema sekundarne regulacije napona područja.

čvorova. Ovisno o odstupanju formiraju se signali, koji se iz dispečerskog centra upućuju sekundarnim regulatorima napona. Sekundarnom regulacijom napona opremaju se značajni izvori jalove snage. Učešće pojedinih agregata elektrane u sekundarnoj regulaciji također se može riješiti na više načina.

Povezivanjem područnih centara dobijemo automatsku tercijalnu regulaciju napona, s kojom se može postići optimalan režim rada sistema kao cjeline (npr. više međusobno povezanih država) u pogledu jalovih snaga i napona.

1.2.7 Regulacioni transformator u proračunu

Promjena prijenosnog omjera jednog transformatora izaziva, prema njegovom položaju u mreži, promjene baznih napona. Promjena baznih napona izaziva promjene parametara mreže itd. Kako se tokom jednog proračuna u mreži stalno mijenjaju prijenosni omjeri regulacionih transformatora, bilo bi vrlo komplicirano na ovaj način analizirati mrežu.

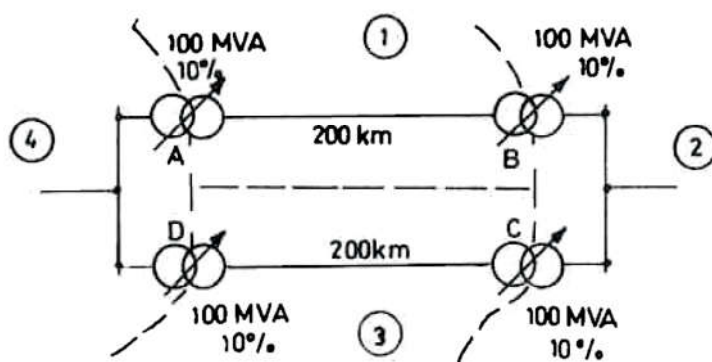
Račun postaje jednostavniji, ako mrežu otvorimo uz svaki transformator koji je na nenominalnom odnosu transformacije, odnosno svakom takvom transformatoru u ekvivalentnoj shemi pridružimo idealni transformator na način, da bazni naponi svih elemenata mreža ostanu nepromijenjeni.

Uvodimo relativni prijenosni omjer p

$$p = \frac{U_{1T} / U_{2T}}{U_{1B} / U_{2B}} \quad 1-30$$

Relativni prijenosni omjer je omjer stvarnog prijenosnog omjera prema omjeru baznih napona mreža koje transformator povezuje.

Promatrajmo zamku sa sl.51. Sva 4 transformatora su regulaciona, a regulaciona sklopka je na strani višeg napona. Razlikujemo dva pogonska slučaja koje ćemo odmah ilustrirati primjerom:



Slika 51 - Regulacioni transformator u mreži (zamka se zaključuje)

1. slučaj: transformatori su na nominalnom odnosu transformacije, a zamka se zaključuje (sl.52). Računamo bazne napone i jedinične reaktancije:

$$U_{B1} = 220 \text{ kV}, S_B = 100 \text{ MVA}$$

$$U_{B2} = 110 \text{ kV}$$

$$Z_{B1} = Z_{B3} = 484 \text{ } \Omega$$

$$U_{B3} = 220 \text{ kV}$$

$$x_{TA} = x_{TD} = 0,105$$

$$U_{B4} = 107,5 \text{ kV}$$

$$x_{TB} = x_{TC} = 0,1$$

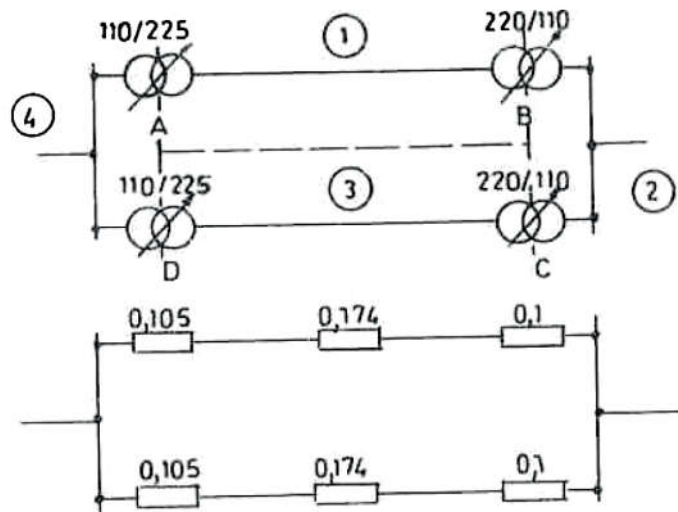
$$P_A = P_B = P_C = P_D = 1$$

$$Z_{B2} = 121 \text{ } \Omega$$

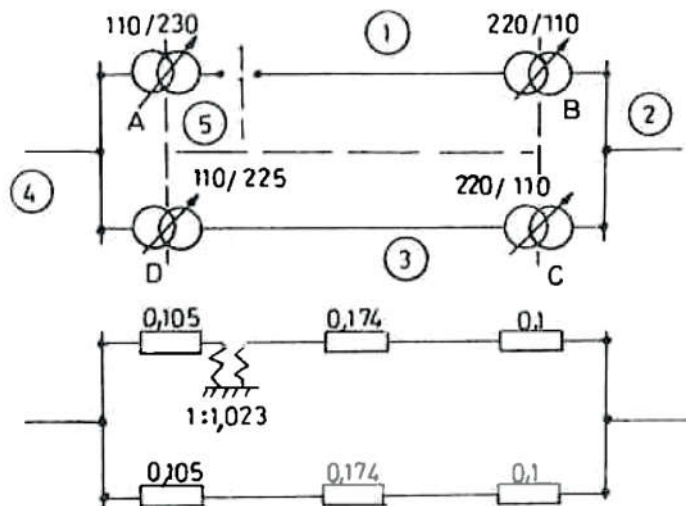
$$Z_{B3} = 115,5 \text{ } \Omega$$

Neka sada dodje do promjene prijenosnog omjera transformatora A, i to na 110/230. Zamka se sada ne zaključuje. Možemo je otvoriti na bilo kojem mjestu. Međutim, ako je otvorimo uz transformator A na strani višeg napona, mogu stari bazni naponi ostati nepromijenjeni, a time i reaktancije vodova i transformatora (sl.53). Pojavljuje se novi naponski nivo, čiji je bazni napon:

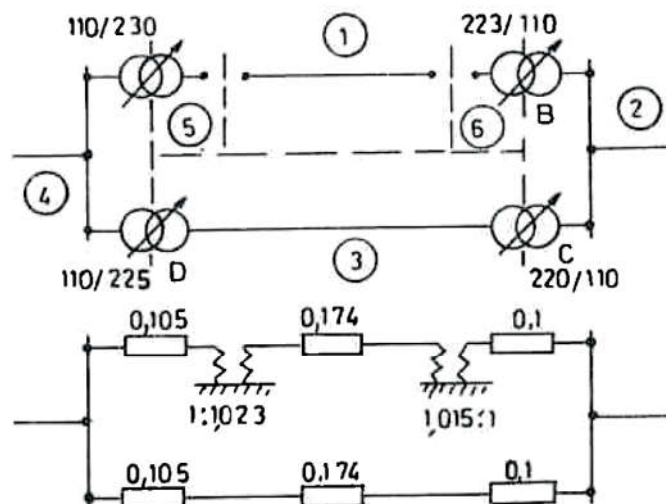
$$U_{B5} = 107,5 \frac{230}{110} = 225 \text{ kV}$$



Slika 52 - Transformatori na nominalnom odnosu transformacije



Slika 53 - Promjena prijenosnog omjera transformatora A



Slika 54 - Promjena prijenosnog omjera transformatora A i B

dok je relativni prijenosni omjer transformatora:

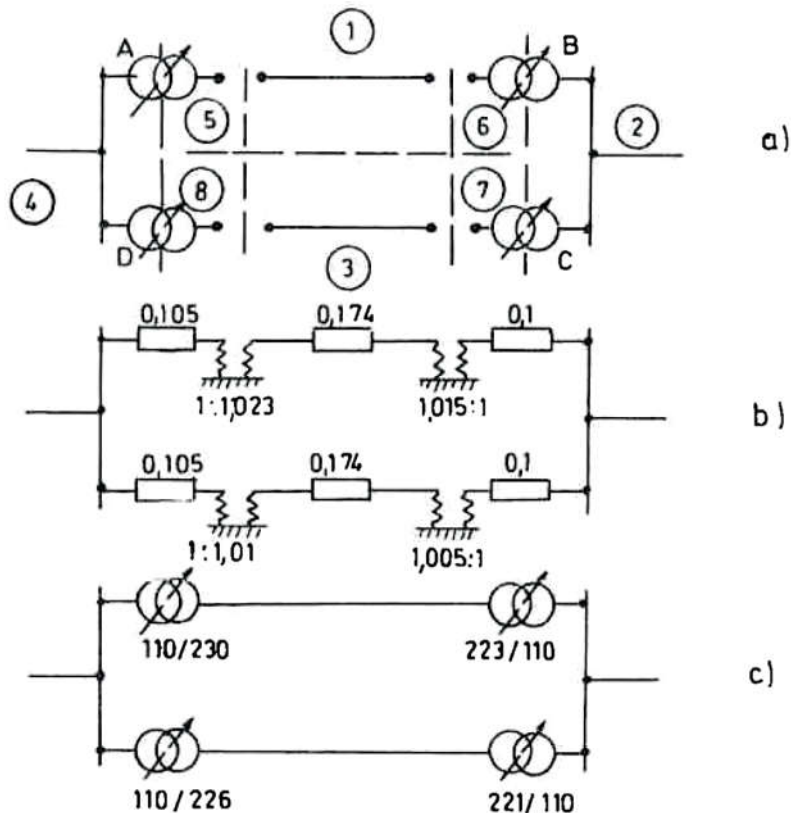
$$P_A = \frac{230 \cdot 107,5}{110 \cdot 220} = 1,023$$

Neka sada dodje do promjene prijenosnog omjera transformatora u B, i to na 223/110. Postupamo kao i prije, tj. otvaramo zamku na strani višeg napona transformatora B. Pojavljuje se novi bazni napon, a stari bazni naponi ostaju nepromijenjeni (sl.54).

$$U_{B6} = 110 \frac{223}{110} = 223 \text{ [kV]}$$

$$P_B = \frac{223 \cdot 110}{110 \cdot 220} = 1,015$$

Nastavimo ovako dalje promjenom prijenosnog omjera transformatora C na 221/110 i nakon toga promjenom prijenosnog omjera transformatora D na 110/226. Sada imamo 8 baznih napona. Stari bazni naponi



Slika 55 - Promjena prijenosnog omjera svih transformatora

ostali su isti, a isto tako i reaktancije (sl.55).

$$U_{B7} = 110 \frac{221}{110} = 221 \text{ kV}$$

$$P_C = \frac{221}{110} \frac{110}{220} = 1,005$$

$$U_{BS} = 107,5 \frac{226}{110} = 220,8 \text{ kV}$$

$$P_D = \frac{226}{110} \frac{107,5}{220} = 1,01$$

umnožak je prijenosnih omjera duž petlje:

$$r = \frac{110}{230} \frac{223}{110} \frac{110}{221} \frac{226}{110} = 0,9915 \neq 1$$

(zamka se ne zaključuje)

U zamci će teći struja izjednačenja. Kada je $r=1$, nema struje izjednačenja, iako su svi transformatori na nenominalnom prijenosnom odnosu.

2. slučaj: transformatori su na nominalnom odnosu transformacije, a zamka se ne zaključuje. Računamo bazne napone i jedinične reaktancije. Zamku otvaramo na proizvoljnom mjestu E (sl.56). Jedinične reaktancije kao i bazne vrijednosti ovise o izboru mjesta E. Rezultati za tri razna mjesta otvaranja zamke uneseni su u ekvivalentne sheme (sl.56b,c i d).

Čim se sistem ne zaključuje, potrebno je otvoriti zamku, odnosno u ekvivalentnoj shemi uključiti idealni transformator. Ukoliko ne želimo da specijalno zadajemo idealni transformator, najbolje je jedan od transformatora proglasiti transformatorom sa nenominalnim odnosom transformacije i zadati stanje zamke s njegovim prijenosnim omjerom. Ovom transformatoru moramo, naravno, postaviti nove granice regulacije.

Npr. ako je regulacija $\pm 15\%$, to znači da se p može mijenjati od $p = 0,85$ do $1,15$. Kada ovakav transformator prihvati ulogu nenominalnog sa $p = 1,1$, a stvarno se nalazi na nominalnom odnosu transformacije, onda su nove granice regulacije od $p = 0,935$ do $1,265$. Cijeli daljnji postupak odvija se kao u prethodnom slučaju.

Rezultat postupka je opet ekvivalentna shema sa maksimalno 8 baznih napona, ukoliko su sva 4 transformatora na nenominalnom odnosu transformacije i to bez obzira da li se zamka zaključuje ili ne, jer smo postepenim prijelazom transformatora sa nominalnog na nenominalni prijenosni odnos mogli doći na bilo koji r , jednak ili različit od jedan.

Prema tome u mreži s regulacionim transformatorima možemo odrediti bazne napone po volji, a stvarno stanje mreže zadati relativnim prijenosnim omjerima transformatora, pa je najlogičnije da odabrani bazni naponi budu nazivni naponi mreže. Ova olakšica redovito se plaća nesporazumom oko određivanja granica regulacije i slično. Na slici 57 prikazan je primjer, koji pokazuje koje vrijednosti treba unijeti u ekvivalentnu shemu.

Računamo stvarne reaktancije:

Transformatori

$$X_A = X_D = \frac{10}{100} \frac{110^2}{100} = 12,1 \quad [\Omega]$$

$$X_B = X_C = \frac{10}{100} \frac{115^2}{100} = 13,225 \quad [\Omega]$$

Vodovi

$$X_{A-B} = X_{CD} = 0,42 \cdot 200 = 84 \quad [\Omega]$$

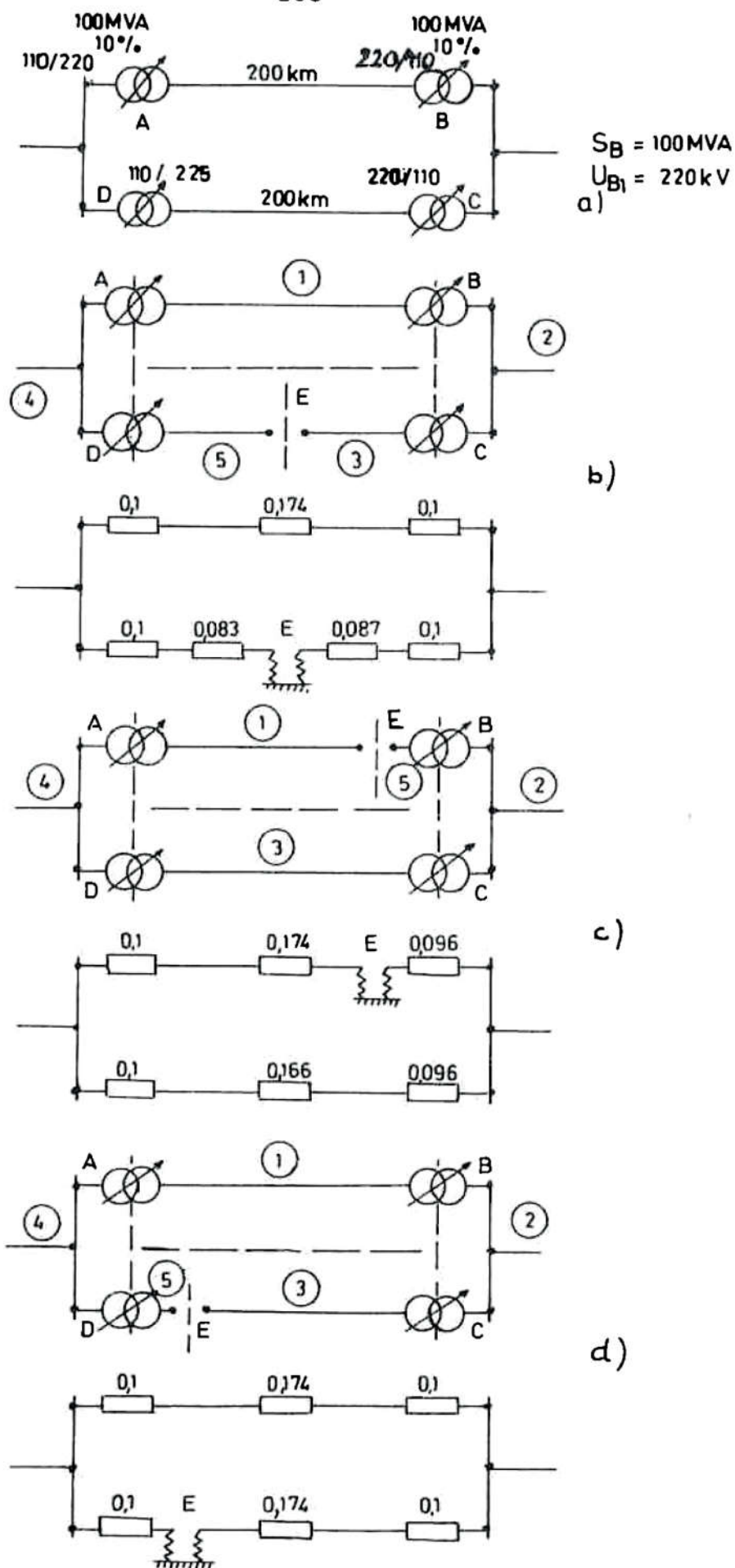
Računamo bazne vrijednosti:

$$S_B = 100 \text{ MVA} \quad U_{B1} = 220 \text{ [kV]}$$

$$U_{B2} = U_{B4} = 110 \text{ [kV]}$$

$$U_{B3} = 220 \text{ [kV]}$$

$$Z_{B1} = Z_{B3} = \frac{220^2}{100} = 484 \quad [\Omega]$$



Slika 56 - Regulacioni transformator u mreži (zamka se ne zaključuje)

$$Z_{B2} = Z_{B4} = \frac{110^2}{100} = 121 \text{ } (\Omega)$$

Računamo jedinične reaktancije:

Transformatori

$$x_A = x_D = \frac{12,1}{121} = 0,1$$

$$x_B = x_C = \frac{13,225}{121} = 0,109$$

Vodovi

$$x_{A-B} = x_{C-D} = \frac{84}{484} = 0,174$$

Ove vrijednosti unosimo u ekvivalentnu shemu.

Računamo relativni nominalni prijenosni odnos transformatora:

$$P_{An} = P_{Dn} = \frac{110/225}{110/220} = 0,978$$

$$P_{Bn} = P_{Cn} = \frac{220/115}{220/110} = 0,957$$

Računamo nove granice regulacije:

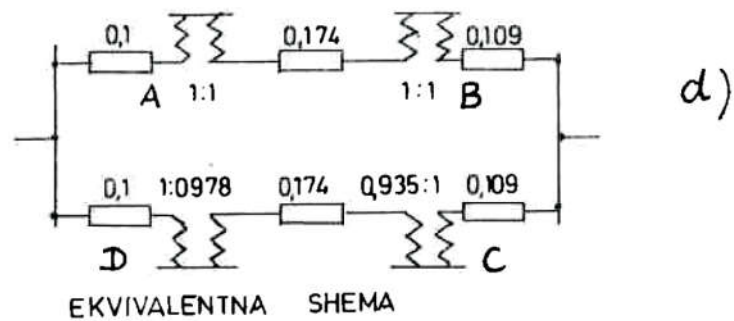
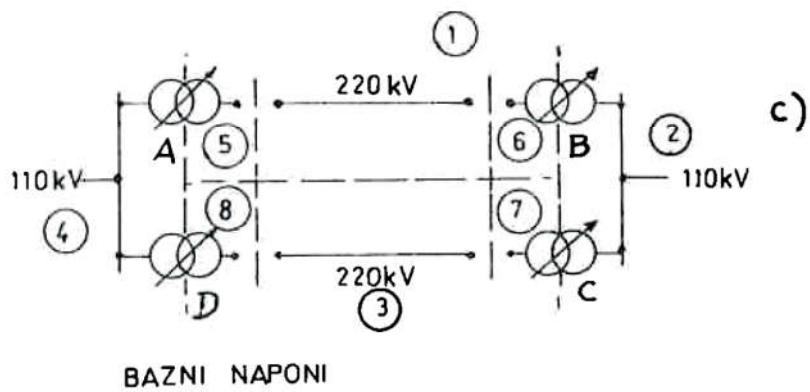
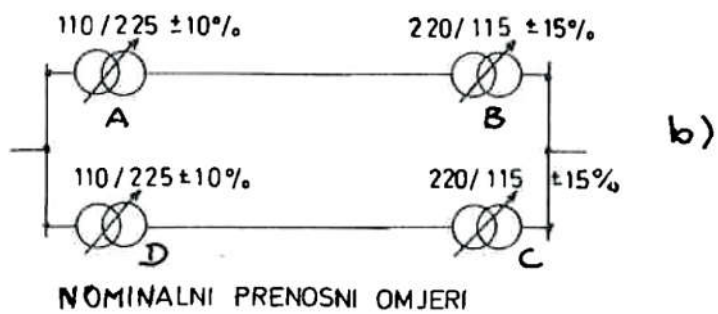
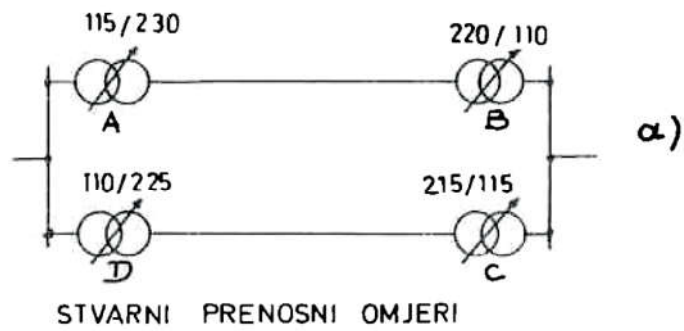
$$P_{Amin} = P_{Dmin} = 0,9 \cdot 0,978 = 0,88$$

$$P_{Amax} = P_{Dmax} = 1,1 \cdot 0,978 = 1,075$$

$$P_{Bmin} = P_{Cmin} = 0,85 \cdot 0,957 = 0,813$$

$$P_{Bmax} = P_{Cmax} = 1,15 \cdot 0,957 = 1,1$$

Računamo stvarni relativni prijenosni omjer transformatora:



Slika 57 - Formiranje ekvivalentne sheme - bazni naponi jednaki nazivnima

$$P_A = \frac{115/230}{110/220} = 1,0$$

$$P_B = \frac{220/110}{220/110} = 1,0$$

$$P_C = \frac{215/115}{220/110} = 0,935$$

$$P_D = \frac{110/225}{110/220} = 0,978$$

Stvarni relativni prijenosni omjer transformatora i nove granice regulacije su veličine s kojima ulazimo u proračun. Kod ovoga treba još paziti na pravila, po kojima se zadaju ulazni podaci, a specifična su za svaki program.

Prijenosni odnos transformatora može da bude kompleksan, pa realni prijenosni omjer možemo smatrati samo specijalnim slučajem kompleksnog. Da proračun mreže, u kojoj su transformatori sa kompleksnim odnosom transformacije, ne bi stvarao velike poteškoće, moramo čvrsto ostati na tome da prijenosni omjeri transformatora, kroz koje se reducira mreža u metodi otpora ili bazne veličine, u bilo kojem dijelu mreže budu realni brojevi. Da bi to postigli, tretirat ćemo transformator sa kompleksnim prijenosnim odnosom kao transformator sa nenominalnim odnosom transformacije. Dakle, ovakvom transformatoru pridružiti ćemo u ekvivalentnoj shemi idealni transformator relativnog prijenosnog omjera

$$\bar{p} = a + jb = p \angle \theta \quad 1-31$$

Ako je $p = 1$ nema uzdužne regulacije, a ako je $\theta = 0$ nema poprečne regulacije. Položaj idealnog transformatora mora biti takav, da ne dodje do promjene odabranih baznih napona. Kao i prije, položaj idealnog transformatora je na strani koja se regulira. Kada ne želimo idealni transformator u ekvivalentnoj shemi, omjeri baznih napona moraju biti jednaki stvarnim prijenosnim omjerima transformatora. Ako su bazni naponi proizvoljno odabrani, pojaviti će se idealni transformator ondje, gdje se omjeri baznih napona razlikuju od stvarnog prijenosnog odnosa,

transformatora bilo po iznosu bilo po fazi.

Sada tek dolazi na red pitanje kako mreži, u kojoj se nalaze idealni transformatori, odrediti matricu vlastitih i međusobnih admintacija čvora odnosno impedancija čvora, kao i naći najprikladniji način da se promjena prijenosnog omjera transformatora prilikom regulacije unese u matrične jednadžbe mreže.

Relativni prijenosni odnos transformatora $\bar{p}$ može se u matričnim jednadžbama čvora

$$[\bar{E}] = [\bar{Z}] [\bar{I}]$$

$$[\bar{I}] = [\bar{Y}] [\bar{E}]$$

pojaviti na dva načina:

a) u matricama $[\bar{Z}]$ odnosno $[\bar{Y}]$, ili

b) u stupčanom vektoru $[\bar{I}]$.

Matricu $[\bar{Y}]$ odredit ćemo na poznati način. U općem slučaju neka grana mreže između čvorova p i q sadrži idealni transformator uz čvor p relativnog prijenosnog omjera $\bar{p}(q)$, admintaciju $\bar{y}_{p-q}$ i idealni transformator uz čvor q relativnog prenosnog omjera $\bar{q}(p)$ (sl.58).

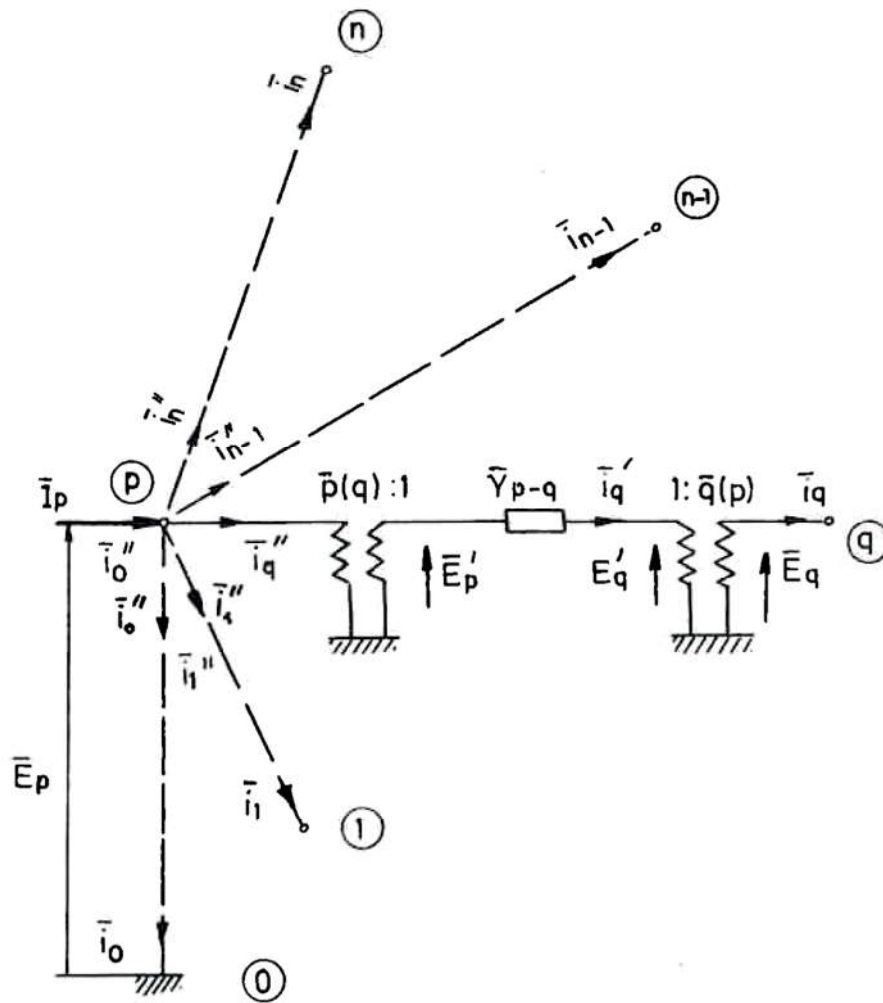
$$\bar{I}_p = \bar{I}_0'' + \bar{I}_1'' + \dots + \bar{I}_q'' + \dots + \bar{I}_{n-1}'' + \bar{I}_n'' \quad 1-32$$

$$\bar{I}_q' = (\bar{E}_p' - \bar{E}_q') \bar{Y}_{p-q} = (\bar{E}_p / \bar{p}(q) - \bar{E}_q / \bar{q}(p)) \bar{Y}_{p-q} \quad 1-33$$

$$\bar{I}_q'' = \bar{I}_q' / \bar{p}(q) \quad 1-34$$

Kako je

$$\bar{I}_p = \bar{Y}_{p1} \bar{E}_1 + \bar{Y}_{p2} \bar{E}_2 + \dots + \bar{Y}_{pp} \bar{E}_p + \dots + \bar{Y}_{pn} \bar{E}_n \quad 1-35$$



Slika 58 - Određjivanje matrice $[\bar{Y}]$ u mreži sa idealnim transformatorima

slijedi

$$\bar{Y}_{pp} = \sum_{q=0}^n \frac{\bar{Y}_{p-q}}{|\bar{p}(q)|^2}, q \neq p, q = 0, 1, 2 \dots n \quad 1-36$$

$$\bar{Y}_{pq} = - \frac{\bar{Y}_{p-q}}{\bar{q}(p)\bar{p}^*(q)}, q \neq p \quad 1-37$$

$$\bar{Y}_{qp} = - \frac{\bar{Y}_{p-q}}{\bar{q}(p) * \bar{p}(q)}, q \neq p \quad 1-38$$

Matrica je nesimetrična, jer je $\bar{Y}_{pq} \neq \bar{Y}_{qp}$. Matrica je simetrična kada su $\bar{q}(p)$ i $\bar{p}(q)$ realni brojevi. Tada je moguće shemu grane sa idealnim transformatorima nadomjestiti ekvivalentnom shemom bez idealnih transformatora. Matrica je simetrična i za slučaj kada $\bar{p}(q) = \bar{q}(p)$, što znači da se regulacija ne prenosi izvan grane. Ovdje je potrebno istaknuti da reguliranje jednog transformatora u mreži izaziva potrebu za promjenom matrice na tri mjesta. Provedemo li regulaciju sukcesivno po transformatorima, sukcesivna promjena matrice može biti sasvim udobna.

Matricu impedancija $[\bar{Z}]$ formirat ćemo metodom korak po korak. Grana između čvorova p i q neka je zavisna grana. Naponske prilike u mreži sa slike 59a) bit će jednake onima u mreži sa slike 59b), ako je struja $\bar{I}_q'' = \bar{I}_p$. Kako je k tome

$$\bar{E}_i = \bar{Z}_{ip} \bar{I}_p = \bar{Z}_{iq} \bar{I}_q \quad i = 1 \dots n \quad 1-39$$

$$\bar{I}_q'' = \left(\frac{\bar{q}(p)}{\bar{p}(q)} \right)^* \bar{I}_q \quad 1-40$$

slijedi

$$\bar{Z}_{iq} = \bar{Z}_{ip} \left(\frac{\bar{q}(p)}{\bar{p}(q)} \right)^* \quad i = 1 \dots n \quad 1-41$$

Ako sada mreži sa sl. 59a i 59b narinemo u bilo kojem čvoru, koji nije čvor, q, jednaku struju, napon čvora p bit će u obje mreže jednak. Napon čvora q možemo izraziti naponom čvora p, jer kroz granu $\bar{Z}_{p-q}$ nema struje

$$\bar{E}_q = \frac{\bar{q}(p)}{\bar{p}(q)} \bar{E}_p \quad 1-42$$

$$\bar{Z}_{qj} \bar{I}_j = \frac{\bar{q}(p)}{\bar{p}(q)} \bar{Z}_{pj} \bar{I}_j \quad 1-43$$

zato je

$$\bar{z}_{qj} = \bar{z}_{pj} \frac{\bar{q}(p)}{\bar{p}(q)} \quad j = 1 \dots n \quad 1-44$$

Dijagonalni član jednak je omjeru napona $\bar{E}_q$ i struje $\bar{I}_q$ prema shemi na slici 59c. Lako je ustanoviti da je:

$$\bar{z}_{qq} = |\bar{q}(p)|^2 \left[\frac{\bar{z}_{pp}}{|\bar{p}(q)|^2} + \bar{z}_{p-q} \right] \quad 1-45$$

Uključivanje nezavisne grane traži određivanje privremenog retka i privremenog stupca po nešto složenijim formulama. Zatim se blok transformacijom rješavamo privremenog retka i stupca. Utjecaj regulacije pojavit će se u cijeloj matrici, što stvara nepremostive poteškoće.

Privremeni je redak i stupac kod uključivanja grane između čvorova p i q:

$$\bar{z}_{iz} = \frac{\bar{z}_{ip}}{\bar{p}(q)^*} - \frac{\bar{z}_{iq}}{\bar{q}(p)^*} \quad i = 1 \dots n \quad 1-46$$

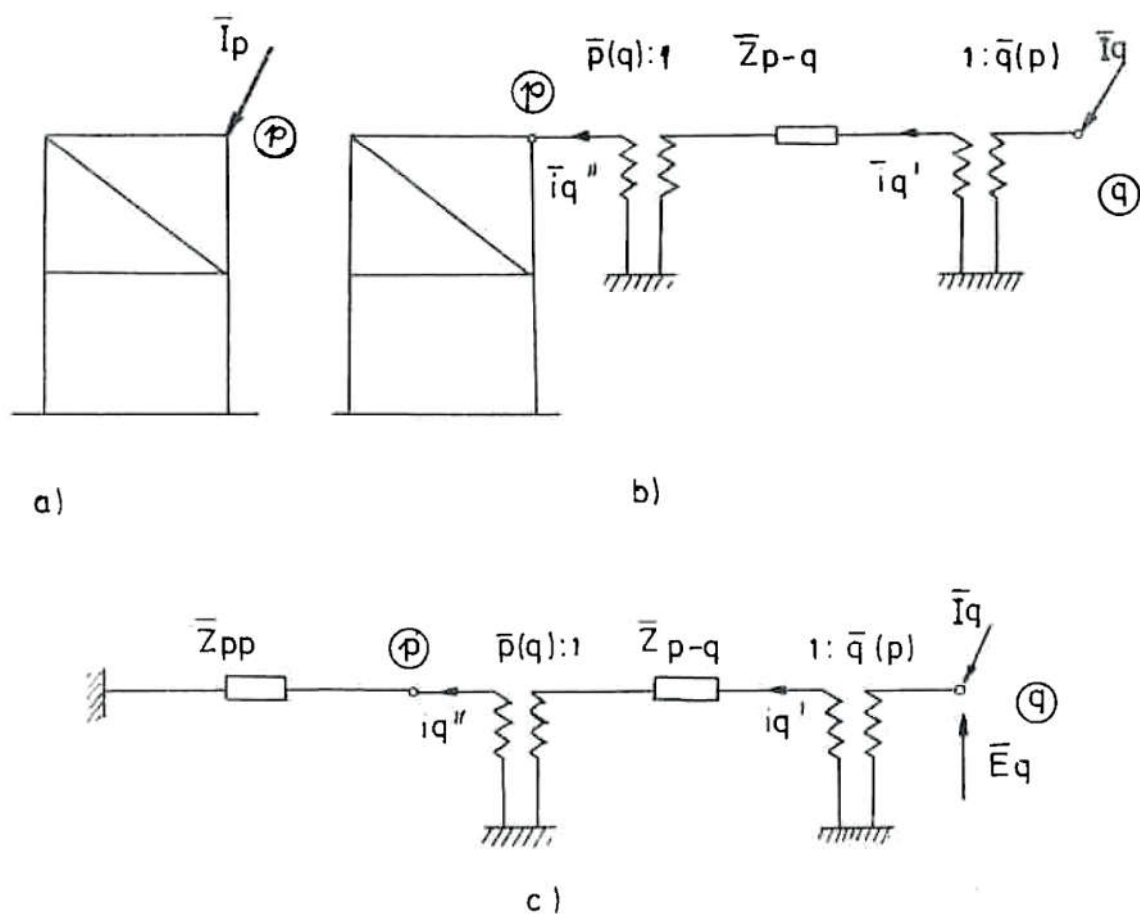
$$\bar{z}_{zj} = \frac{\bar{z}_{pj}}{\bar{p}(q)} - \frac{\bar{z}_{qj}}{\bar{p}(p)} \quad j = 1 \dots n \quad 1-47$$

$$\bar{z}_{zz} = \frac{\bar{z}_{pp}}{|\bar{p}(q)|^2} + \frac{\bar{z}_{qq}}{|\bar{q}(p)|^2} - \frac{\bar{z}_{pq}}{\bar{p}(q)\bar{q}(p)^*} - \frac{\bar{z}_{qp}}{\bar{p}(q)^*\bar{q}(p)} \quad 1-48$$

Nadomjesne struje $\Delta \bar{I}_p$ i $\Delta \bar{I}_q$ računat ćemo prema slici 60. Uzdužna impedancija $\bar{z}_{p-q}$ ostaje nepromijenjena. Sa slike 60b imamo:

$$\bar{I}_p = \Delta \bar{I}_p + \frac{\bar{E}_p - \bar{E}_q}{\bar{z}_{p-q}} \quad 1-49$$

$$\bar{I}_q = \Delta \bar{I}_q + \frac{\bar{E}_q - \bar{E}_p}{\bar{z}_{p-q}} \quad 1-50$$



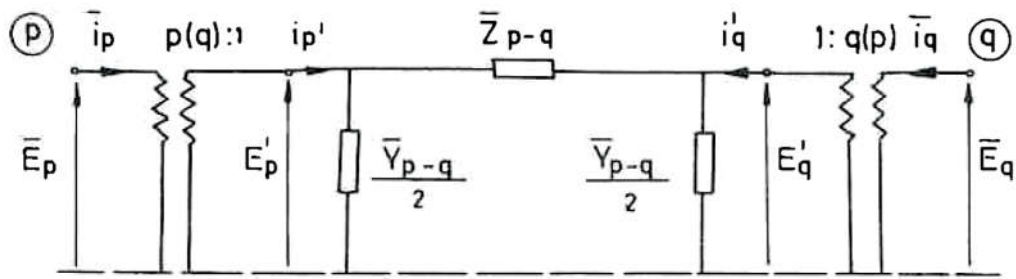
Slika 59 - Formiranje matrice $[\bar{Z}]$ u mreži sa idealnim transformatorima

a sa slike 60a

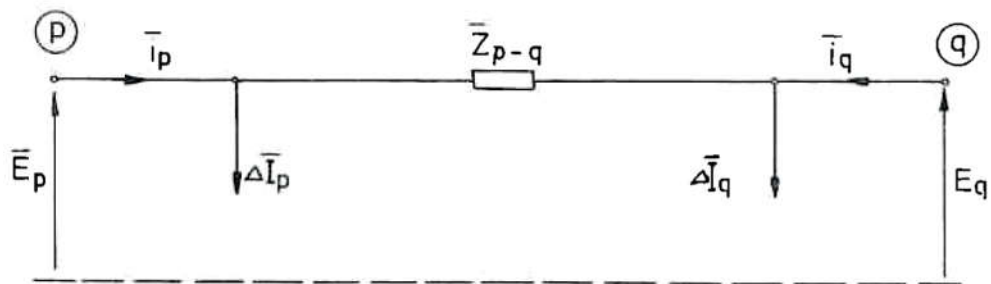
$$\bar{p}(q)^* \bar{i}_p = \frac{\bar{E}_p}{\bar{p}(q)} \frac{\bar{Y}_{p-q}}{2} + \left[\frac{\bar{E}_p}{\bar{p}(q)} - \frac{\bar{E}_q}{\bar{q}(p)} \right] \frac{1}{\bar{Z}_{p-q}} \quad 1-51$$

$$\bar{q}(p)^* \bar{i}_q = \frac{\bar{E}_q}{\bar{q}(p)} \frac{\bar{Y}_{p-q}}{2} + \left[\frac{\bar{E}_q}{\bar{q}(p)} - \frac{\bar{E}_p}{\bar{p}(q)} \right] \frac{1}{\bar{Z}_{p-q}} \quad 1-52$$

Rješenje je ovih jednažbi:



a)



b)

Slika 60 - Nadomjesne struje u mreži s idealnim transformatorima

$$\Delta \bar{I}_p = \left[\frac{1}{|\bar{p}(q)|^2} \frac{\bar{Y}_{p-q}}{2} + \left(\frac{1}{|\bar{p}(q)|^2} - 1 \right) \frac{1}{\bar{Z}_{p-q}} \right] \bar{E}_p - \frac{1}{\bar{Z}_{p-q}} \left[\frac{1}{\bar{p}(q) \bar{q}(p)} - 1 \right] \bar{E}_q \quad 1-53$$

$$\Delta \bar{I}_q = \left[\frac{1}{|\bar{q}(p)|^2} \frac{\bar{Y}_{p-q}}{2} + \left(\frac{1}{|\bar{q}(p)|^2} - 1 \right) \frac{1}{\bar{Z}_{p-q}} \right] \bar{E}_q - \frac{1}{\bar{Z}_{p-q}} \left[\frac{1}{\bar{p}(q) \bar{q}(p)^*} - 1 \right] \bar{E}_p \quad 1-54$$

Uvrstimo li $\bar{p}(q) = 1$ ili $\bar{q}(p) = 1$ dobit ćemo poznate formule za regulacioni transformator, a ako je $\bar{Y}_{p-q} = 0$ znači da nema poprečnih grana. Struji čvora $\bar{I}_p$ sada moramo pribrojiti struje $\Delta \bar{I}_p$ svih grana koje se stječu u čvor p , a isto vrijedi i za ostale čvorove.

$$\bar{I}_{pN} = \bar{I}_p + \sum_{q=0}^n \Delta \bar{I}_p(q) \quad q = 0, 1, 2, \dots p \dots n \quad 1-55$$

Primjer 1.2. Ekvivalentna shema neke mreže zadana je na sl.61a. Treba odrediti matricu $[\bar{Y}]$, matricu $[\bar{Z}]$ te nadomjesne struje $\Delta \bar{I}_1$ i $\Delta \bar{I}_2$.

$$\bar{Z}_{0-1} = 10 \, |\Omega|$$

$$\bar{Y}_{0-1} = 0,1 \, |S|$$

$$\bar{Z}_{1-2} = 5 \, |\Omega|$$

$$\bar{Y}_{1-2} = 0,2 \, |S|$$

$$p = 1 \quad \bar{p}(p) = 1$$

$$q = 2 \quad \bar{q}(p) = j \, 0,1$$

Računamo matricu $[\bar{Y}]$

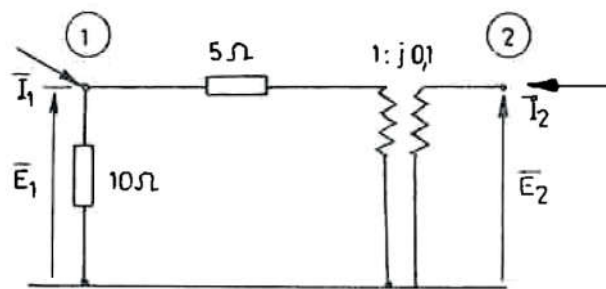
$$\bar{Y}_{11} = \frac{0,1}{1} + \frac{0,2}{1} = 0,3 \, |S|$$

$$\bar{Y}_{12} = - \frac{0,2}{j \, 0,1 \cdot 1} = j \, 2 \, |S|$$

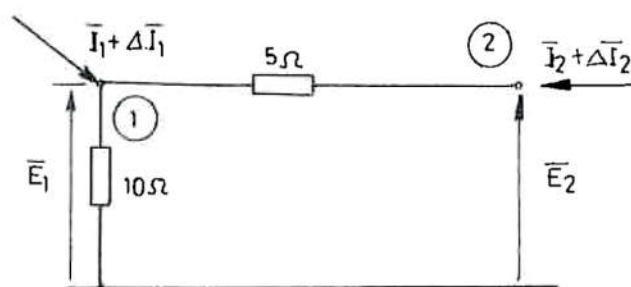
$$\bar{Y}_{21} = - \frac{0,2}{-j \, 0,1 \cdot 1} = - j \, 2 \, |S|$$

$$\bar{Y}_{22} = \frac{0,2}{|j \, 0,1|^2} = \frac{0,2}{0,01} = 20 \, |S|$$

$$\bar{Y} = \begin{array}{c} 1 \quad 2 \\ \begin{array}{|c|c|} \hline 0,3 & j \, 2 \\ \hline -j \, 2 & 20 \\ \hline \end{array} \end{array} |S|$$



a)



b)

Slika 61 - Sheme uz primjer 1.2.

Računamo matricu $[\bar{Z}]$

$$\bar{Z}_1 = 10 \Omega$$

$$\bar{Z}_{12} = 10 \frac{-j 0,1}{1} = -j 1 \Omega$$

$$\bar{Z}_{21} = 10 \frac{j 0,1}{1} = j 1 \Omega$$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{22} &= \left| \frac{j 0,1}{1} \right|^2 10 + |j 0,1|^2 5 = \\ &= 0,01 \cdot 10 + 0,01 \cdot 5 = 0,15 \Omega \end{aligned}$$

$$[\bar{Z}] = \begin{array}{c} 1 \quad 2 \\ \begin{array}{|c|c|} \hline 10 & -j \ 1 \\ \hline j \ 1 & 0,15 \\ \hline \end{array} \end{array} |\Omega|$$

Kontroliramo točnost rezultata invertiranjem matrice $[\bar{Y}]$,
jer je:

$$[\bar{Z}] = [\bar{Y}]^{-1}$$

$$D = 0,3 \cdot 20 - (-j \ 2) (j \ 2) = 2$$

$$[\bar{Y}]^t = \begin{array}{c} 1 \quad 2 \\ \begin{array}{|c|c|} \hline 0,3 & -j \ 2 \\ \hline j \ 2 & 20 \\ \hline \end{array} \end{array} |S|$$

$$[\bar{Z}] = \frac{1}{2} \begin{array}{c} 1 \quad 2 \\ \begin{array}{|c|c|} \hline 20 & -j \ 2 \\ \hline j \ 2 & 0,3 \\ \hline \end{array} \end{array} = \begin{array}{c} 1 \quad 2 \\ \begin{array}{|c|c|} \hline 10 & -j \ 1 \\ \hline j \ 1 & 0,15 \\ \hline \end{array} \end{array} |\Omega|$$

U ovim matricama je uključen idealni transformator, pa se matrice mijenjaju kod promjene njegovog prijenosnog omjera.

Promijenimo $\bar{q}(p)$ na $j \ 0,2$. Računamo novu matricu $[\bar{Y}]$

$$\bar{Y}_{12} = - \frac{0,2}{j \ 0,2 \cdot 1} = j \ 1 \ |S|$$

$$\bar{Y}_{21} = - \frac{0,2}{-j \ 0,2 \cdot 1} = j \ 1 \ |S|$$

$$\bar{Y}_{22} = \frac{0,2}{|j \ 0,2|^2} = \frac{0,2}{0,04} = 5 \ |S|$$

$$[\bar{Y}] = \begin{array}{c} 1 \quad 2 \\ \begin{array}{|c|c|} \hline 0,3 & j \ 1 \\ \hline -j \ 1 & 5 \\ \hline \end{array} \end{array} |S|$$

Računamo nadomjesne struje:

$$\Delta \bar{I}_1 = - \frac{1}{5} \left(\frac{1}{j \ 0,1} - 1 \right) \bar{E}_2 = (0,2 + j \ 0,2) \bar{E}_2$$

$$\begin{aligned} \Delta \bar{I}_2 &= \left(\frac{1}{|j \ 0,1|^2} - 1 \right) \frac{1}{5} \bar{E}_2 - \frac{1}{5} \left(\frac{1}{-j \ 0,1} - 1 \right) \bar{E}_2 = \\ &= (-0,2 + j \ 2) \bar{E}_1 + 19,8 \bar{E}_2 \end{aligned}$$

Ekvivalentna shema mreže sa nadomjesnim strujama prikazana je na sl.61b. Matrica $[\bar{Z}]$ ove mreže je:

$$[\bar{Z}] = \begin{array}{c} 1 \quad 2 \\ \begin{array}{|c|c|} \hline 10 & 10 \\ \hline 10 & 15 \\ \hline \end{array} \end{array} |\Omega|$$

Promjene prijenosnog omjera transformatora nemaju utjecaj na ovu matricu, ali utječu na proračun nadomjesnih struja.

Promijenimo $\bar{q}(p)$ na $j \ 0,2$. Računamo nove nadomjesne struje

$$\Delta \bar{I}_1 = - \frac{1}{5} \left(\frac{1}{j \ 0,2} - 1 \right) \bar{E}_2 = (0,2 + j \ 1) \bar{E}_2$$

$$\begin{aligned} \Delta \bar{I}_2 &= \left(\frac{1}{|j \ 0,2|^2} - 1 \right) \frac{1}{5} \bar{E}_2 - \frac{1}{5} \left(\frac{1}{-j \ 0,2} - 1 \right) \bar{E}_1 = \\ &= (0,2 - j) \bar{E}_1 + 4,8 \bar{E}_2 \end{aligned}$$

1.3 RAČUNANJE TOKOVA SNAGA I NAPONA NA PREMALOM RAČUNALU

Račun tokova snaga i napona jedan je od osnovnih računa u analizi energetske mreže. Prije pojave elektroničkih računala tokovi snaga i naponi određivali su se na mrežnim analizatorima, koji nisu mogli pratiti brz porast elektroenergetskog sistema. Zato je redovito bilo potrebno parcijalno modeliranje mreže, što je donosilo i odgovarajuće netočnosti.

Danas se opet suočavamo sa istim problemom, s tom razlikom što je u pitanju ograničeni kapacitet elektroničkog računala. Potrebno vrijeme računanja i potrebna veličina memorije računala raste progresivno sa veličinom mreže. Iako raspoložemo velikim računskim sistemima, nalazimo se često u situaciji da programom ne možemo obuhvatiti cijeli elektroenergetski sistem, te nismo sigurni da li su naponske prilike po iznosu i po kutu prihvatljive u neobuhvaćenom dijelu mreže.

1.3.1 Prebacivanje tereta

U ovoj metodi, koju nazivamo i ekvivalentiranje, smanjujemo sistem transfiguracijom nakon što smo prebacivanjem tereta od aktivnih čvorova načinili pasivne. Redukcija pasivne mreže je matematički egzaktni postupak, a isto tako i prebacivanje struja. Prebacivanje snaga dovodi do pogreške radi zanemarenja gubitaka do kojih stvarno dolazi u reduciranom dijelu mreže.

Neka mreža ima N čvorova. Sa 1 do L označit ćemo čvorove na koje ćemo raspodijeliti snage čvorova $L+1$ do M . Ostali čvorovi $M+1$ do N ne ulaze u igru. Čvorove 1 do L nazvat ćemo L čvorovima, a čvorove $L+1$ do M nazvat ćemo E čvorovima. Sa $\bar{S}_{L+1}$ do $\bar{S}_M$ označit ćemo snage koje želimo prebaciti u čvorove 1 do L . Ove snage na kraju moramo pribrojiti zatečenim snagama u čvorovima 1 do L .

Snaga $\bar{S}_1$ čvora 1 jednaka je sumi snaga, koje su prebačene iz svih čvorova $\bar{S}_{L+1}$ do $\bar{S}_M$ u čvor 1, a isto vrijedi i za ostale snage $\bar{S}_2$, $\bar{S}_3$, ... $\bar{S}_L$. To možemo izraziti na slijedeći način:

Nakon prebacivanja snaga iz čvorova L+1 do M u čvorove 1 do L čvorovi L+1 do M postaju pasivni. Transfiguracijom pasivne mreže rješavamo se čvorova L+1 do M.

Matricu $[\bar{f}_D]$ možemo odrediti egzaktno samo ako su opterećenja čvorova definirana strujama mjesto snagama, a to je nemoguće, jer naponi čvorova nisu poznati.

Na slici 62a pokazan je sistem, kojemu jedan dio treba ekvivalentirati. Sistem razdvojimo u čvorovima 1 do L na dio A koji ostaje i na dio B koji se ekvivalentira. Snage čvorova 1 do L originalnog sistema neka ostanu u sistemu A. Oba sistema sadrže čvorove 1 do L međusobno vezane vodovima bez impedancije (slika 62b).

U slijedećem koraku presjecimo veze 1 do L. Struje grana sada postaju struje čvora i za podsistem B moraju dobiti negativan predznak (slika 62c).

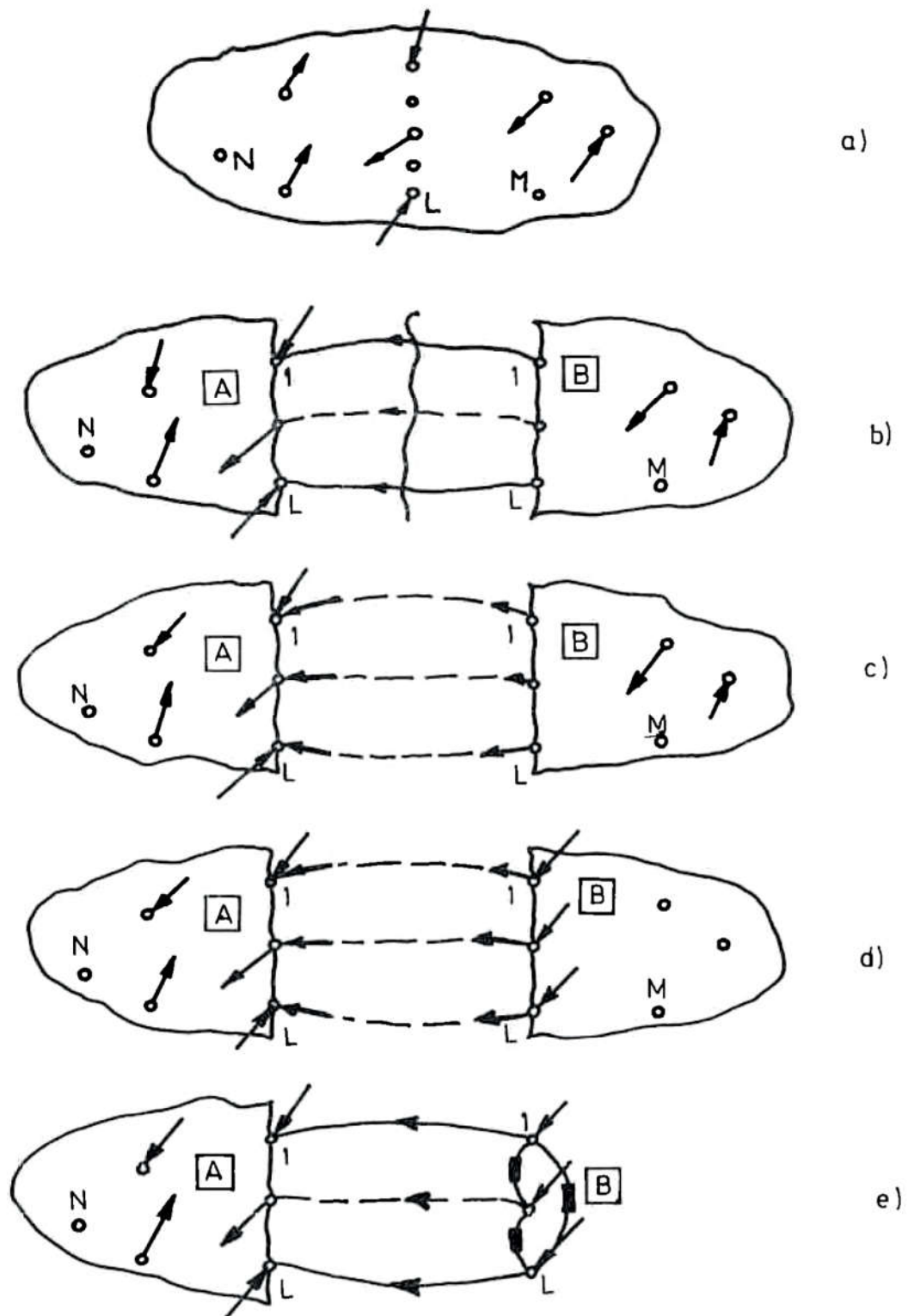
Jednadžbe dijela B prije premještanja struja glase:

$$\begin{bmatrix} -\bar{I}'_L \\ \bar{I}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{LL} & \bar{Y}_{LE} \\ \bar{Y}_{EL} & \bar{Y}_{EE} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{V}_L \\ \bar{V}_E^I \end{bmatrix} \quad 1-61$$

i nakon premještanja struja:

$$\begin{bmatrix} -\bar{I}'_L + \bar{I}_L \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{LL} & \bar{Y}_{LE} \\ \bar{Y}_{EL} & \bar{Y}_{EE} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{V}_L \\ \bar{V}_E^{II} \end{bmatrix} \quad 1-62$$

Ispišimo 4 jednadžbe



Slika 62 - Ekvivalentiranje dijela sistema

$$[-\bar{I}'_L] = [\bar{Y}_{LL}] [\bar{V}_L] + [\bar{Y}_{LE}] [\bar{V}_E^I] \quad 1-63a$$

$$[\bar{I}_E] = [\bar{Y}_{EL}] [\bar{V}_L] + [\bar{Y}_{EE}] [\bar{V}_E^I] \quad b$$

$$[-\bar{I}'_L] + [\bar{I}_L] = [\bar{Y}_{LL}] [\bar{V}_L] + [\bar{Y}_{LE}] [\bar{V}_E^{II}] \quad c$$

$$[0] = [\bar{Y}_{EL}] [\bar{V}_L] + [\bar{Y}_{EE}] [\bar{V}_E^{II}] \quad d$$

Iz jednađžbi 1-63b i 1-63d dobijemo:

$$[\bar{V}_E^I] = [\bar{Y}_{EE}]^{-1} [\bar{I}_E] - [\bar{Y}_{EE}]^{-1} [\bar{Y}_{EL}] [\bar{V}_L] \quad e$$

$$[\bar{V}_E^{II}] = [\bar{Y}_{EE}]^{-1} [\bar{Y}_{EL}] [\bar{V}_L] \quad f$$

što uvršteno u 1-63a i 1-63c daje

$$[-\bar{I}'_L] = [\bar{Y}_{LL}] [\bar{V}_L] + [\bar{Y}_{LE}] [\bar{Y}_{EE}]^{-1} [\bar{I}_E] - [\bar{Y}_{LE}] [\bar{Y}_{EE}]^{-1} [\bar{Y}_{EL}] [\bar{V}_L] \quad g$$

$$[-\bar{I}'_L] + [\bar{I}_L] = [\bar{Y}_{LL}] [\bar{V}_L] - [\bar{Y}_{LE}] [\bar{Y}_{EE}]^{-1} [\bar{Y}_{EL}] [\bar{V}_L] \quad h$$

Sada 1-63g uvrstimo u 1-63h i dobijemo

$$[\bar{I}_L] = -[\bar{Y}_{LE}] [\bar{Y}_{EE}]^{-1} [\bar{I}_E] \quad 1-64$$

Predjimo sa struja na snage

$$[\bar{S}_L] = -[\bar{Y}_{LE}] [\bar{Y}_{EE}]^{-1} [\bar{S}_E] \quad 1-65$$

Usporedimo 1-65 sa 1-60. Viđimo da je

$$[\bar{f}_D] = -[\bar{Y}_{LE}] [\bar{Y}_{EE}]^{-1} \quad 1-66$$

Snage čvorova $L+1$ do M (slika 62c) izazivaju tokove snaga u mreži B , uslijed kojih nastaju određeni gubici. Premještanjem ovih snaga u čvorove 1 do L (slika 62d i e) gubici će imati novu vrijednost što dovodi do stanovite neminovne greške u postupku.

1.3.2 Dijakoptika

Jedan način da se provede račun tokova snaga i napona na premalom računalu je primjena dijakoptike. U ovoj metodi sistem se podijeli na nekoliko djelova, podsistema. U računu se koriste matrice vlastitih i međusobnih impedancija odnosno admitancija čvora podsistema, što smanjuje potrebnu memoriju računala i skraćuje vrijeme računanja.

Neka svaki podsistem ima svoj referentni čvor. Cijeli sistem numeriramo tako, da izostavimo referentne čvorove. Označit ćemo:

$\bar{V}_\alpha$ - napon čvora prema referentnom čvoru podsistema u kojem se čvor nalazi

$\bar{I}_\alpha$ - struja čvora

$\bar{E}_\alpha$ - napon čvora α prema nuli sistema

$\bar{V}_\beta$ - napon grane koja povezuje dva podsistema

$\bar{I}_\beta$ - struja grane koja povezuje dva podsistema

$\hat{\gamma}$ - referentni čvor podsistema, koji je ujedno i referentni čvor cijelog sistema

γ - referentni čvor podsistema, koji nije ujedno i referentni čvor cijelog sistema

$[\bar{Z}'_{\alpha\alpha}]$ - blok matrica sistema sastavljena od matrica vlastitih i međusobnih impedancija čvora podsistema

$[C_{\alpha\beta}]$ - matrica incidencija čvor - povezna grana. $C_{\alpha\beta} = 1$ kada struja povezne grane β ulazi u čvor α . $C_{\alpha\beta} = -1$ kada struja povezne grane β izlazi iz čvora α . $C_{\alpha\beta} = 0$ kada čvor α nije incidentan sa poveznom granom β .

$$[c_{\beta\alpha}] = [c_{\alpha\beta}]^t$$

$[\bar{z}_{\beta\beta}]$ - matrica vlastitih i međusobnih impedancija grane povezanih grana

$[\bar{E}_{\hat{\gamma}}]$ - stupčani vektor napona referentnih čvorova pojedinih pod-sistema prema nuli sistema, koji uključuje i napon referentnog čvora cijelog sistema

$[\bar{E}_{\gamma}]$ - stupčani vektor napona referentnih čvorova pojedinih pod-sistema, koji ne uključuje i napon referentnog čvora cijelog sistema

$\bar{E}_{\gamma}$ - napon referentnog čvora γ prema nuli sistema

$\bar{E}_{\hat{\gamma}}$ - napon referentnog čvora $\hat{\gamma}$ prema nuli sistema

$\bar{I}_{\gamma}$ - ukupna struja koja preko povezanih grana teče iz jednog pod-sistema u drugi

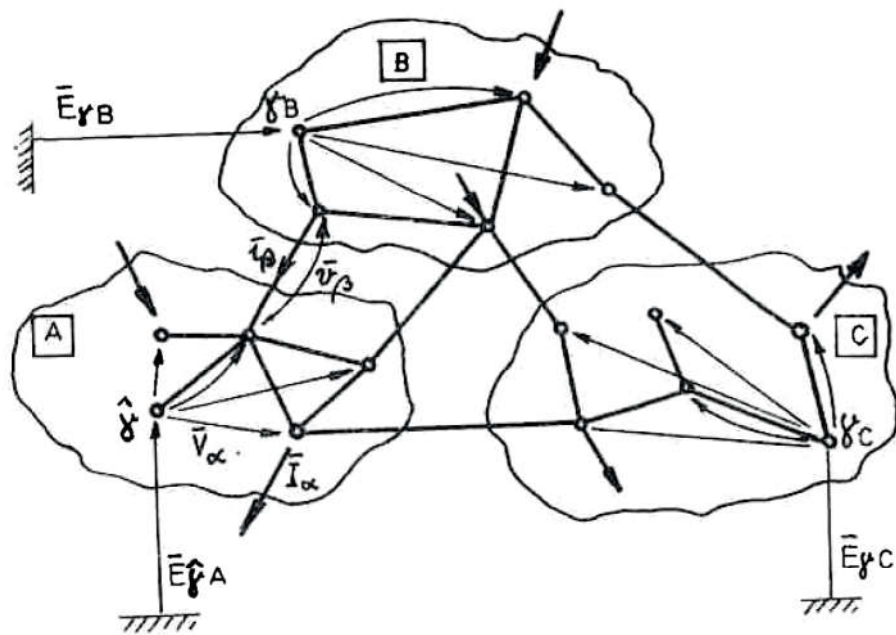
$[c_{\gamma\beta}]$ - matrica incidencija pod-sistem - povezna grana, koja ne uključuje pod-sistem u kojem je čvor $\hat{\gamma}$. $c_{\gamma\beta} = 1$ kada struja povezne grane β ulazi u pod-sistem γ . $c_{\gamma\beta} = -1$ kada struja povezne grane β izlazi iz pod-sistema γ . $c_{\gamma\beta} = 0$ kada pod-sistem nije incidentan s granom β .

$$[c_{\hat{\beta}\beta}] = [c_{\beta\gamma}]^t$$

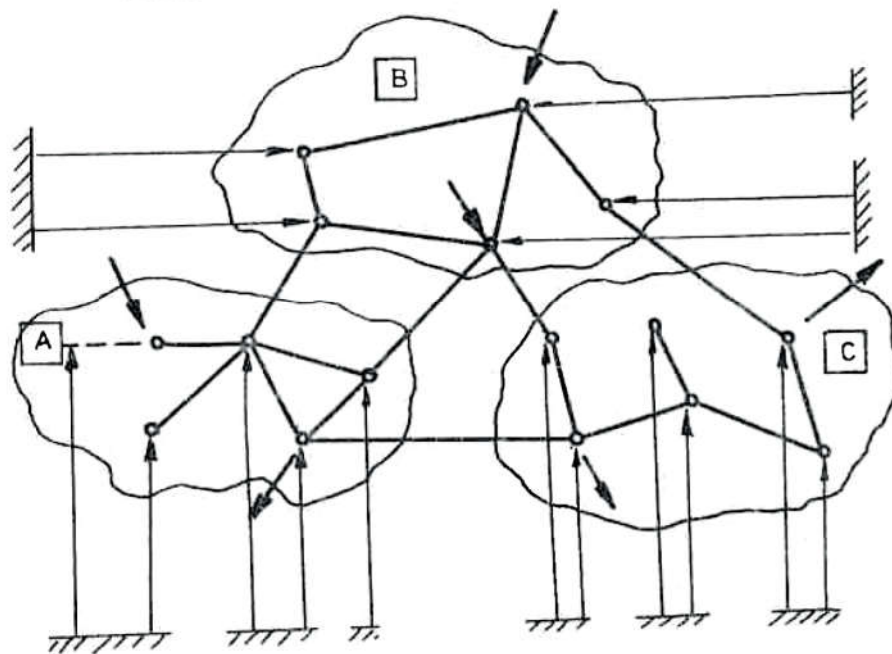
$[\hat{c}_{\beta\gamma}]$ - matrica incidencija pod-sistem - povezna grana, koja uključuje pod-sistem u kojemu je čvor $\hat{\gamma}$

$[c_{\beta\hat{\gamma}}]$ - stupčani vektor incidencija povezne grane - pod-sistem $\hat{\gamma}$.

Na slici 63 pokazan je primjer sistema koji je podjeljen na tri pod-sistema, A, B i C.

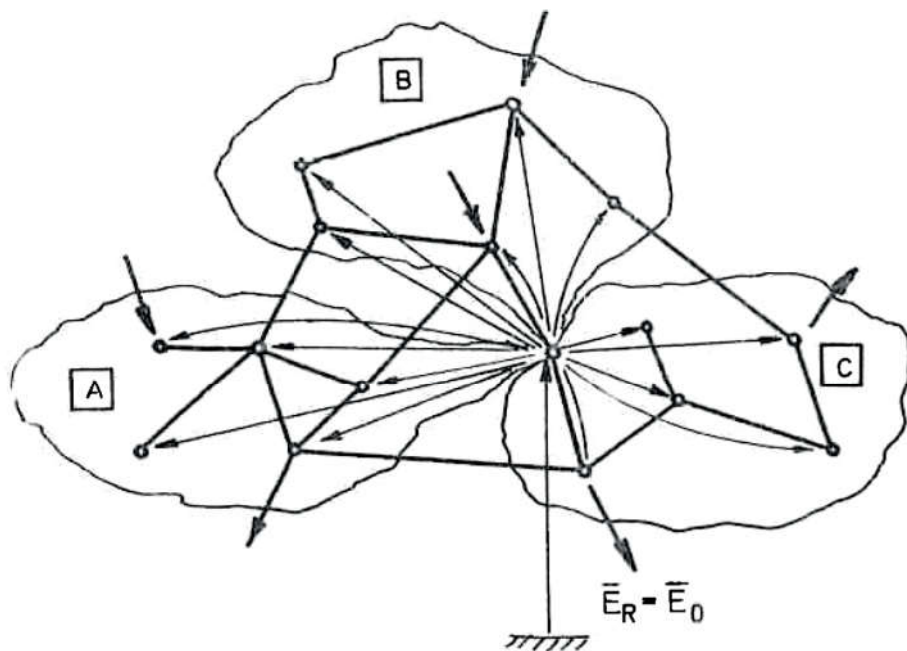


a)



b)

$R=0$



c)

Slika 63 - Ilustracija primjene dijakoptike

Za sistem podjeljen na podsisteme možemo prema slici 63a napisati 4 matrične jednačbe:

$$[\bar{V}_\alpha] = [\bar{Z}'_{\alpha\alpha}] ([\bar{I}_\alpha] + [C_{\alpha\beta}] [\bar{I}_\beta]) \quad 1-67$$

$$[C_{\beta\alpha}] [\bar{V}_\alpha] + [\bar{Z}_{\beta\beta}] [\bar{I}_\beta] + [\hat{C}_{\beta\gamma}] [\bar{E}_\gamma] = [0] \quad 1-68$$

$$[C_{\gamma\beta}] [\bar{I}_\beta] = [\bar{I}_\gamma] \quad 1-69$$

$$[\bar{E}_\alpha] = [\bar{V}_\alpha] + [\bar{E}_\gamma] \quad 1-70$$

Matrična jednačba 1-67 opisuje svaki podsistem posebno. Za svaki podsistem dana je veza između napona čvora i struje čvora preko matrice impedancije čvora. Napisano je onoliko jednačbi koliko sistem ima čvorova, izuzevši referentne čvorove.

Matrična jednačba 1-68 opisuje vezu između podsistemima i nulom sistema preko petlji u kojima se nalazi po jedna povezna grana. Napisano je onoliko jednačbi koliko ima povezanih grana.

Matrična jednačba 1-69 opisuje tokove struja koje iz jednog sistema teku u drugi sistem. Napisano je onoliko jednačbi koliko ima podsistema manje jedan.

Matrična jednačba 1-70 opisuje računanje stvarnih napona, tj. napona prema nuli sistema kao zbroja napona čvora i napona referentnog čvora dotičnog podsistema.

Uvrstimo jednačbu 1-67 u 1-68 i uvodimo da je:

$$[\bar{Y}'_{\beta\beta}] = ([C_{\beta\alpha}] [\bar{Z}'_{\alpha\alpha}] [C_{\alpha\beta}] + [\bar{Z}_{\beta\beta}])^{-1} \quad 1-71$$

pa ćemo dobiti

$$[\bar{I}_\beta] = -[\bar{Y}'_{\beta\beta}] ([\hat{C}_{\beta\gamma}] [\bar{E}_\gamma] + [C_{\beta\alpha}] [\bar{Z}'_{\alpha\alpha}] [\bar{I}_\alpha]) \quad 1-72$$

Ovu jednačbu uvrstimo u 1-69

$$-[C_{\gamma\beta}][\bar{Y}'_{\beta\beta}](\hat{C}_{\beta\gamma}[\bar{E}_{\gamma}] + [C_{\beta\alpha}][\bar{Z}'_{\alpha\alpha}][\bar{I}_{\alpha}]) = [\bar{I}_{\gamma}]$$

Kako je

$$[\hat{C}_{\gamma\beta}][\bar{E}_{\gamma}] = [C_{\beta\gamma}] \bar{E}_{\gamma} + [C_{\beta\gamma}][\bar{E}_{\gamma}]$$

to gornja jednačica prelazi u

$$[C_{\gamma\beta}][\bar{Y}'_{\beta\beta}][C_{\beta\gamma}] \bar{E}_{\gamma} + [C_{\gamma\beta}][\bar{Y}'_{\beta\beta}][C_{\beta\gamma}][\bar{E}_{\gamma}] + \\ + [C_{\gamma\beta}][\bar{Y}'_{\beta\beta}][C_{\beta\alpha}][\bar{Z}'_{\alpha\alpha}][\bar{I}_{\alpha}] = [0] \quad 1-73$$

Uvedimo da je

$$[\bar{Z}_{\gamma\gamma}]^{-1} = [C_{\gamma\beta}][\bar{Y}'_{\beta\beta}][C_{\beta\gamma}] \quad 1-74$$

i uvrstimo u 1-73. Nakon sredjivanja bit će:

$$[\bar{E}_{\gamma}] = -[\bar{Z}_{\gamma\gamma}][\bar{I}_{\gamma}] + [C_{\gamma\beta}][\bar{Y}'_{\beta\beta}][C_{\beta\gamma}] \bar{E}_{\gamma} + \\ + [C_{\gamma\beta}][\bar{Y}'_{\beta\beta}][C_{\beta\alpha}][\bar{Z}'_{\alpha\alpha}][\bar{I}_{\alpha}] \quad 1-75$$

Sada imamo sve elemente za proračun redom: $[\bar{I}_{\beta}]$, $[\bar{V}_{\alpha}]$ i na kraju $[\bar{E}_{\alpha}]$.

Postupak je sličan kada je referentni čvor nula sistema (Sl.63b). Jednačbe 1-69 i 1-70 nisu potrebne, a jednačbe 1-67 i 1-68 prelaze u:

$$[\bar{E}_{\alpha}] = [\bar{Z}'_{\alpha\alpha}](\bar{I}_{\alpha} + [C_{\alpha\beta}][\bar{I}_{\beta}]) \quad 1-76$$

$$[C_{\beta\alpha}][\bar{E}_{\alpha}] + [\bar{Z}_{\beta\beta}][\bar{I}_{\beta}] = [0] \quad 1-77$$

Matrična jednačica 1-76 opisuje svaki podsistem posebno. Za svaki podsistem dana je veza između napona čvora i struje čvora preko

matrice impedancija čvora. Napisano je onoliko jednađžbi koliko sistem ima čvorova.

Druga matrična jednađžba opisuje petlje koje se zatvaraju kroz nulu sistema, podsisteme i povezne grane. Ima onoliko jednađžbi koliko ima poveznih grana.

Uvrstimo jednađžbu 1-76 u 1-77

$$[C_{\beta\alpha}] [\bar{Z}'_{\alpha\alpha}] [\bar{I}_{\alpha}] + [C_{\beta\alpha}] [\bar{Z}'_{\alpha\alpha}] [C_{\alpha\beta}] [\bar{I}_{\beta}] + [\bar{Z}_{\beta\beta}] [\bar{I}_{\beta}] = [0]$$

$$[C_{\beta\alpha}] [\bar{Z}'_{\alpha\alpha}] [\bar{I}_{\alpha}] + ([C_{\beta\alpha}] [\bar{Z}'_{\alpha\alpha}] [C_{\alpha\beta}] + [\bar{Z}_{\beta\beta}]) [\bar{I}_{\beta}] = [0]$$

Uvedimo

$$[\bar{Z}'_{\beta\beta}] = ([C_{\beta\alpha}] [\bar{Z}'_{\alpha\alpha}] [C_{\alpha\beta}] + [\bar{Z}_{\beta\beta}]) \quad 1-78$$

$$[\bar{Z}'_{\beta\beta}]^{-1} = [\bar{Y}_{\beta\beta}] \quad 1-79$$

pa jednađžbu 1-77 možemo pisati:

$$[C_{\beta\alpha}] [\bar{Z}'_{\alpha\alpha}] [\bar{I}_{\alpha}] + [\bar{Z}'_{\beta\beta}] [\bar{I}_{\beta}] = [0]$$

i odavle

$$[\bar{I}_{\beta}] = -[\bar{Y}_{\beta\beta}] [C_{\beta\alpha}] [\bar{Z}'_{\alpha\alpha}] [\bar{I}_{\alpha}] \quad 1-80$$

Sada imamo sve elemente za proračun redom vektora $[\bar{I}_{\beta}]$ i zatim vektora $[\bar{E}_{\alpha}]$.

Interesantno je još razmotriti slučaj kada referentni čvor nije nula sistema, ali je zajednički čvor svim podsistemima (sl.63c). Tada je:

$$\bar{E}_{\gamma}^A = \bar{E}_{\gamma}^B = \dots = \bar{E}_{\gamma}^{\wedge} = \bar{E}_O \quad 1-81$$

$$[\hat{C}_{\beta\gamma}] [\bar{E}_{\gamma}^{\wedge}] = [0] \quad 1-82$$

pa jednađbe 1-67, 1-68, 1-69 i 1-70 prelaze u

$$[\bar{V}_\alpha] = [\bar{Z}'_{\alpha\alpha}] ([\bar{I}_\alpha] + [C_{\alpha\beta}] [\bar{I}_\beta]) \quad 1-83$$

$$[C_{\beta\gamma}] [\bar{V}_\alpha] + [\bar{Z}_{\beta\beta}] [\bar{I}_\beta] = [0] \quad 1-84$$

$$[\bar{E}_\alpha] = [\bar{V}_\alpha] + [\bar{E}_0] \quad 1-85$$

Matrična jednađba 1-83 opisuje svaki podsistem posebno. Za svaki podsistem dana je veza izmedju napona čvora i struje čvora preko matrice impedancije čvora. Napisano je onoliko jednađbi koliko sistem ima čvorova izuzevši referentni čvor.

Matrična jednađba 1-84 opisuje vezu medju podsistemima preko petlji u kojima se nalazi po jedna povezna grana. Svaka petlja prolazi referentnim čvorom.

Matrična jednađba 1-85 opisuje računanje stvarnih napona, tj. napona prema nuli sistema.

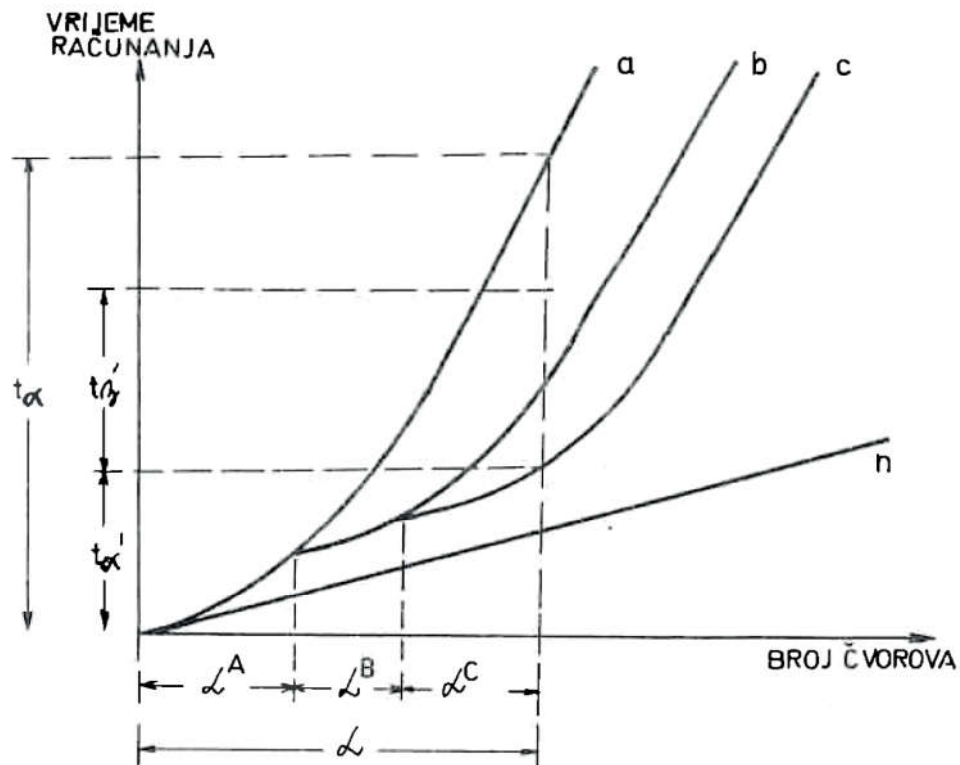
Uvrstimo jednađbu 1-83 u 1-84 i koristimo relaciju 1-78. Dobit ćemo

$$[\bar{I}_\beta] = -[\bar{Y}'_{\beta\beta}] [C_{\beta\alpha}] [\bar{Z}'_{\alpha\alpha}] [\bar{I}_\alpha] \quad 1-86$$

Sada imamo sve elemente za proračun redom $[\bar{I}_\beta]$, $[\bar{V}_\alpha]$ i $[\bar{E}_\alpha]$.

Matrica $[\bar{Z}'_{\alpha\alpha}]$ je dijagonalna blok matrica. Računanje ove matrice je to brže što je više podsistema, jer se tada u dijagonali nalazi veći broj matrica malih dimenzija. Kvalitativno ovu tvrdnju možemo pokazati na slici 64.

Krivulja a daje ovisnost vremena računanja o veličini matrice. Računanje matrice podsistema počinje uvijek ispočetka, iako se numeracija čvorova nastavlja, pa se u tom momentu prelazi na krivulje b, c, itd. Pravac n predstavlja vrijeme računanja matrice $[\bar{Z}'_{\alpha\alpha}]$ za slučaj kada bi svaki pojedini čvor bio podsistem za sebe.



Slika 64 - Dijakoptika i vrijeme računanja

Vremenu za računanje matrice $[\bar{z}_{\alpha\alpha}]$ tj. t_{α}' treba dodati vrijeme za računanje matrice $[\bar{y}_{\beta\beta}]$ i množenje matrica prema izrazu 1-80. Ovo vrijeme označimo sa t_{β}' . Cijeli postupak se isplati, ako je:

$$t_{\alpha} > t_{\alpha}' + t_{\beta}' \quad 1-87$$

tj. ako je vrijeme za računanje matrice nepodjeljenog sistema $[\bar{z}_{\alpha\alpha}]$ veće od računanja matrice $[\bar{z}_{\alpha\alpha}']$ i ostalog računanja što ga donosi dijakoptika. U računanju izraza 1-80 važna je i strategija množenja matrica.

Relacija 1-76 koristi matricu $[\bar{z}_{\alpha\alpha}']$. Možemo napisati algoritam, koji koristi matricu $[\bar{y}_{\alpha\alpha}']$ tj. dijagonalnu blok matricu vlastitih i međusobnih admitancija čvora.

Pomnožimo jednađbu 1-76 sa $[\bar{z}_{\alpha\alpha}']^{-1}$ i jednađbu 1-77 sa $[\bar{z}_{\beta\beta}]^{-1}$. Kako je

$$[\bar{z}_{\alpha\alpha}']^{-1} = [\bar{y}_{\alpha\alpha}] \quad 1-88$$

$$[\bar{z}_{\beta\beta}]^{-1} = [\bar{y}_{\beta\beta}] \quad 1-89$$

sljedeći da je:

$$[\bar{i}_\beta] = -[\bar{y}_{\beta\beta}][c_{\beta\alpha}][\bar{E}_\alpha] \quad 1-90$$

$$[\bar{I}_\alpha] = [\bar{y}'_{\alpha\alpha}][\bar{E}_\alpha] - [c_{\alpha\beta}][\bar{i}_\beta] \quad 1-91$$

Uvrstimo izraz 1-90 u izraz 1-91

$$[\bar{I}_\alpha] = ([c_{\alpha\beta}][\bar{y}_{\beta\beta}][c_{\beta\alpha}] + [\bar{y}'_{\alpha\alpha}])[\bar{E}_\alpha] \quad 1-92$$

Također možemo napisati algoritam, koji koristi matricu $[\bar{y}'_{\alpha\alpha}]$, tj. dijagonalnu blok matricu vlastitih i međusobnih admintacija čvora, kada referentni čvor mreže nije nula sistema, ali je zajednički svim podsistemima. Koristimo relacije 1-88 i 1-89. Slijedi da je:

$$[\bar{I}_\alpha] = [\bar{y}'_{\alpha\alpha}][\bar{V}_\alpha] - [c_{\alpha\beta}][\bar{i}_\beta] \quad 1-93$$

$$[\bar{i}_\beta] = -[\bar{z}_{\beta\beta}]^{-1}[c_{\beta\alpha}][\bar{V}_\alpha] \quad 1-94$$

Cijeli prethodni račun izveden je pod pretpostavkom da su poznate struje, što u praksi nije slučaj. Poznate su snage, sistem jednažbi 1-67 do 1-70, 1-76 i 1-77, odnosno 1-83 do 1-85 je nelinearan i treba ga riješiti nekim iterativnim postupkom. Ovo ćemo pokazati na primjeru podjele sistema na dva podsistema.

Sistem podijeljen na dva podsistema

Sistem podijelimo na dva podsistema A i B. Numerirajmo cijelu mrežu tako da najprije dođu čvorovi podsistema A s kojima su incidentne povezne grane β , a zatim ostali čvorovi podsistema A. Slijede čvorovi podsistema B incidentni s poveznim granama β , a onda ostali. Povezne grane orjentiramo od podsistema B prema podsistemu A. Matrica incidencija grana - čvor imati će slijedeći oblik:

$$[C_{\beta\alpha}] = \begin{matrix} & \beta & a & \beta & b \\ \beta & J & & -J & \end{matrix} \quad 1-95$$

Ako izraz 1-80 uvrstimo u 1-66 dobit ćemo:

$$[\bar{E}_\alpha] = [\bar{Z}'_{\alpha\alpha}] ([\bar{I}_\alpha] - [C_{\alpha\beta}] [\bar{Y}'_{\beta\beta}] [C_{\beta\alpha}] [\bar{Z}'_{\alpha\alpha}] [\bar{I}_\alpha]) \quad 1-96$$

ili

$$\begin{aligned} [\bar{E}_\alpha] &= [\bar{Z}'_{\alpha\alpha}] ([\bar{I}_\alpha] - [\bar{Y}''_{\alpha\alpha}] [\bar{Z}'_{\alpha\alpha}] [\bar{I}_\alpha]) = \\ &= [\bar{Z}'_{\alpha\alpha}] ([\bar{I}_\alpha] - [\bar{Y}''_{\alpha\alpha}] [\bar{E}_\alpha]) = [\bar{Z}'_{\alpha\alpha}] ([\bar{I}_\alpha] - [\bar{I}'_\alpha]) \end{aligned} \quad 1-97$$

Računamo:

$$\begin{aligned} [C_{\beta\alpha}] [\bar{Z}'_{\alpha\alpha}] [C_{\alpha\beta}] &= \begin{matrix} \bar{Z}^A_{\beta\beta} & \bar{Z}^A_{\beta a} \\ \bar{Z}^A_{a\beta} & \bar{Z}^A_{aa} \end{matrix} \begin{matrix} J \\ \\ -J \\ \end{matrix} \\ &= \begin{matrix} J & & -J & \end{matrix} \begin{matrix} \bar{Z}^B_{\beta\beta} & \bar{Z}^B_{\beta b} \\ \bar{Z}^B_{b\beta} & \bar{Z}^B_{bb} \end{matrix} \begin{matrix} J \\ \\ -J \\ \end{matrix} \\ &= [\bar{Z}^A_{\beta\beta}] - [\bar{Z}^B_{\beta\beta}] \end{aligned} \quad 1-98$$

$$[\bar{Y}'_{\beta\beta}] = ([\bar{Z}^A_{\beta\beta}] - [\bar{Z}^B_{\beta\beta} - \bar{z}_{\beta\beta}])^{-1} = [\bar{Z}^A_{\beta\beta} - \bar{Z}^B_{\beta\beta} + \bar{z}_{\beta\beta}]^{-1} \quad 1-99$$

$$\begin{aligned} [\bar{Y}''_{\alpha\alpha}] &= [C_{\alpha\beta}] [\bar{Y}'_{\beta\beta}] [C_{\beta\alpha}] = \\ &= \begin{matrix} J \\ \\ -J \\ \end{matrix} \begin{matrix} \bar{Y}'_{\beta\beta} & & -\bar{Y}'_{\beta\beta} \\ & & \end{matrix} \begin{matrix} J & & -J & \end{matrix} = \begin{matrix} \bar{Y}'_{\beta\beta} & & -\bar{Y}'_{\beta\beta} \\ & & \\ -\bar{Y}'_{\beta\beta} & & \bar{Y}'_{\beta\beta} \\ & & \end{matrix} \end{aligned} \quad 1-100$$

$$[\bar{E}'_{\alpha}] = [\bar{Z}'_{\alpha\alpha}] [\bar{I}_{\alpha}] =$$

$\bar{Z}_{\beta\beta}^A \bar{I}_{\beta}^A + \bar{Z}_{\beta a}^A \bar{I}_a^A$
$\bar{Z}_{a\beta}^A \bar{I}_{\beta}^A + \bar{Z}_{aa}^A \bar{I}_a^A$
$\bar{Z}_{\beta\beta}^B \bar{I}_{\beta}^B + \bar{Z}_{\beta b}^B \bar{I}_b^B$
$\bar{Z}_{b\beta}^B \bar{I}_{\beta}^B + \bar{Z}_{bb}^B \bar{I}_b^B$

1-101

$$[\bar{I}'_{\alpha}] = [\bar{Y}''_{\alpha\alpha}] [\bar{E}'_{\alpha}] =$$

$\bar{Y}_{\beta\beta}' (\bar{Z}_{\beta\alpha}^A \bar{I}_{\alpha}^A - \bar{Z}_{\beta\alpha}^B \bar{I}_{\alpha}^B)$	=	$\bar{I}_{\beta}'$
$-\bar{Y}_{\beta\beta}' (\bar{Z}_{\beta\alpha}^A \bar{I}_{\alpha}^A - \bar{Z}_{\beta\alpha}^B \bar{I}_{\alpha}^B)$		$-\bar{I}_{\beta}'$

1-102

Sada možemo izračunati

$\bar{I}_{\alpha} - \bar{I}'_{\alpha}$	=	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>$\bar{I}_{\beta}^A$</td></tr> <tr><td>$\bar{I}_a^A$</td></tr> <tr><td>$\bar{I}_{\beta}^B$</td></tr> <tr><td>$\bar{I}_b^B$</td></tr> </table>	$\bar{I}_{\beta}^A$	$\bar{I}_a^A$	$\bar{I}_{\beta}^B$	$\bar{I}_b^B$	-	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>$\bar{I}_{\beta}'$</td></tr> <tr><td style="height: 30px;"></td></tr> <tr><td>$-\bar{I}_{\beta}'$</td></tr> <tr><td style="height: 30px;"></td></tr> </table>	$\bar{I}_{\beta}'$		$-\bar{I}_{\beta}'$		=	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>$\bar{I}_{\beta}^A - \bar{I}_{\beta}'$</td></tr> <tr><td>$\bar{I}_a^A$</td></tr> <tr><td>$\bar{I}_{\beta}^B + \bar{I}_{\beta}'$</td></tr> <tr><td>$\bar{I}_b^B$</td></tr> </table>	$\bar{I}_{\beta}^A - \bar{I}_{\beta}'$	$\bar{I}_a^A$	$\bar{I}_{\beta}^B + \bar{I}_{\beta}'$	$\bar{I}_b^B$
$\bar{I}_{\beta}^A$																		
$\bar{I}_a^A$																		
$\bar{I}_{\beta}^B$																		
$\bar{I}_b^B$																		
$\bar{I}_{\beta}'$																		
$-\bar{I}_{\beta}'$																		
$\bar{I}_{\beta}^A - \bar{I}_{\beta}'$																		
$\bar{I}_a^A$																		
$\bar{I}_{\beta}^B + \bar{I}_{\beta}'$																		
$\bar{I}_b^B$																		

1-103

Jednadžbe 1-97 možemo napisati:

$$[\bar{E}_{\alpha}^A] = [\bar{Z}_{\beta\beta}^A] ([\bar{I}_{\beta}^A] - [\bar{I}_{\beta}']) + [\bar{Z}_{\beta a}^A] [\bar{I}_a^A] \quad 1-104a$$

$$[\bar{E}_a^A] = [\bar{Z}_{a\beta}^A] ([\bar{I}_{\beta}^A] - [\bar{I}_{\beta}']) + [\bar{Z}_{aa}^A] [\bar{I}_a^A] \quad b$$

$$[\bar{E}_{\beta}^B] = [\bar{Z}_{\beta\beta}^B] ([\bar{I}_{\beta}^B] + [\bar{I}_{\beta}']) + [\bar{Z}_{\beta b}^B] [\bar{I}_b^B] \quad c$$

$$[\bar{E}_a^B] = [\bar{Z}_{be}^B] ([\bar{I}_e^B] + [\bar{I}_e']) + [\bar{Z}_{bb}^B] [\bar{I}_b^B] \quad 1-104d$$

Prelazimo sa struja na snage. Struje na desnoj strani jednačbi 1-104a,b,c i d izrazit ćemo snagama i i naponima. Pri tome je:

$$[\bar{I}_\beta'] = [\bar{Y}_{\beta\beta}'] ([\bar{Z}_{\beta\alpha}^A] \left[\frac{P_\alpha^A - j Q_\alpha^A}{\bar{E}_\alpha^{A*}} \right] - [\bar{Z}_{\beta\alpha}^B] \left[\frac{P_\alpha^B - j Q_\alpha^B}{\bar{E}_\alpha^{B*}} \right]), \quad 1-105$$

$$[\bar{I}_\beta^A] = \left[\frac{P_\beta^A - j Q_\beta^A}{\bar{E}_\beta^{A*}} \right] \quad 1-106a$$

$$[\bar{I}_a^A] = \left[\frac{P_a^A - j Q_a^A}{\bar{E}_a^{A*}} \right] \quad b$$

$$[\bar{I}_\beta^B] = \left[\frac{P_\beta^B - j Q_\beta^B}{\bar{E}_\beta^{B*}} \right] \quad c$$

$$[\bar{I}_b^B] = \left[\frac{P_b^B - j Q_b^B}{\bar{E}_b^{B*}} \right] \quad d$$

Za čvor regulacione elektrane poznat je napon, a nije poznata snaga. Struju čvora regulacione elektrane računamo kao sumu struja kroz grane incidentne s ovim čvorom. Struje grana dobiju se iz razlike čvrstog napona regulacione elektrane i napona (k-1)-ve iteracije na drugom kraju grane.

Problem uključenja u račun čvrstog napona regulacione elektrane ne postoji, ako referentni čvor nije nula sistema. U tom slučaju treba uključiti u struje čvora još i struje poprečnih grana, jer ove grane nisu obuhvaćene matricom vlastitih i međusobnih impedancijske mreže.

Slijedi neki postupak za rješavanje nelinearnih jednačbi iterativnim putem.

Istražiti ćemo sada primjenu relacije 1-92 na sistem podijeljen na dva dijela, odnosno podsistema A i B. Opet ćemo podsisteme numerirati kao u predhodnom slučaju. Zato je:

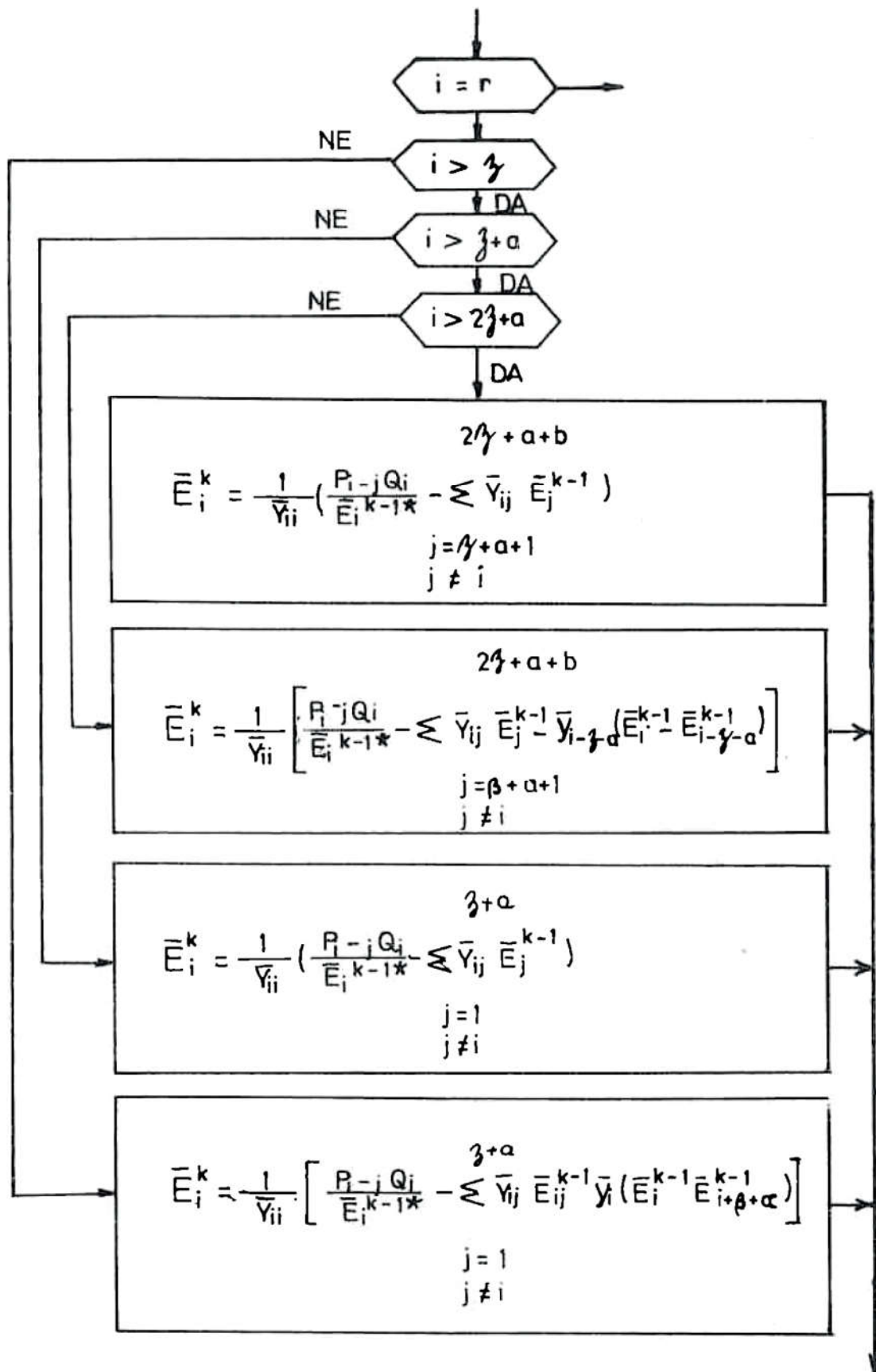
$$[c_{\alpha\beta}] [\bar{y}_{\beta\beta}] [c_{\beta\alpha}] =$$

$$\begin{bmatrix} J \\ \\ -J \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{y}_{\beta\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J & & -J & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{y}_{\beta\beta} & & -\bar{y}_{\beta\beta} & \\ & & & \\ -\bar{y}_{\beta\beta} & & \bar{y}_{\beta\beta} & \\ & & & \end{bmatrix} \quad 1-107$$

što uvršteno u 1-92 daje:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{\beta}^A \\ \bar{I}_a^A \\ \bar{I}_{\beta}^B \\ \bar{I}_b^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{y}_{\beta\beta} & & -\bar{y}_{\beta\beta} & \\ & & & \\ -\bar{y}_{\beta\beta} & & \bar{y}_{\beta\beta} & \\ & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{E}_{\beta}^A \\ \bar{E}_a^A \\ \bar{E}_{\beta}^B \\ \bar{E}_b^B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{y}_{\beta\beta}^A & \bar{y}_{\beta a}^A \\ \bar{y}_a^A & \bar{y}_{aa}^A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{E}_{\beta}^A \\ \bar{E}_a^A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{y}_{\beta\beta}^B & \bar{y}_{\beta b}^B \\ \bar{y}_{b\beta}^B & \bar{y}_{bb}^B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{E}_{\beta}^B \\ \bar{E}_b^B \end{bmatrix} \quad 1-108$$

Iz matrične jednadžbe 1-108 možemo ispisati slijedeće matrične jednadžbe:



Slika 65 - Izvadak iz dijagrama toka kod podjele sistema na dva dijela

$$[\bar{I}_\beta^A] = [\bar{Y}_{\beta\beta}^A] [\bar{E}_\beta^A] + [\bar{Y}_{\beta a}^A] [\bar{E}_a^A] + [\bar{Y}_{\beta\beta}^A] [\bar{E}_\beta^A - \bar{E}_\beta^B] \quad 1-109a$$

$$[\bar{I}_a^A] = [\bar{Y}_{a\beta}^A] [\bar{E}_\beta^A] + [\bar{Y}_{aa}^A] [\bar{E}_a^A] \quad b$$

$$[\bar{I}_\beta^B] = [\bar{Y}_{\beta\beta}^B] [\bar{E}_\beta^B] + [\bar{Y}_{\beta b}^B] [\bar{E}_b^B] + [\bar{Y}_{\beta\beta}^B] [\bar{E}_\beta^B - \bar{E}_\beta^B] \quad c$$

$$[\bar{I}_b^B] = [\bar{Y}_{bb}^B] [\bar{E}_b^B] + [\bar{Y}_{bb}^B] [\bar{E}_b^B] \quad d$$

Matrične jednačbe 1-109a,b,c i d opisuju sistem podijeljen na dva dijela. Dovoljno je poznavati matricu vlastitih i međusobnih admitancija svakog sistema posebno i admitancije povezanih grana.

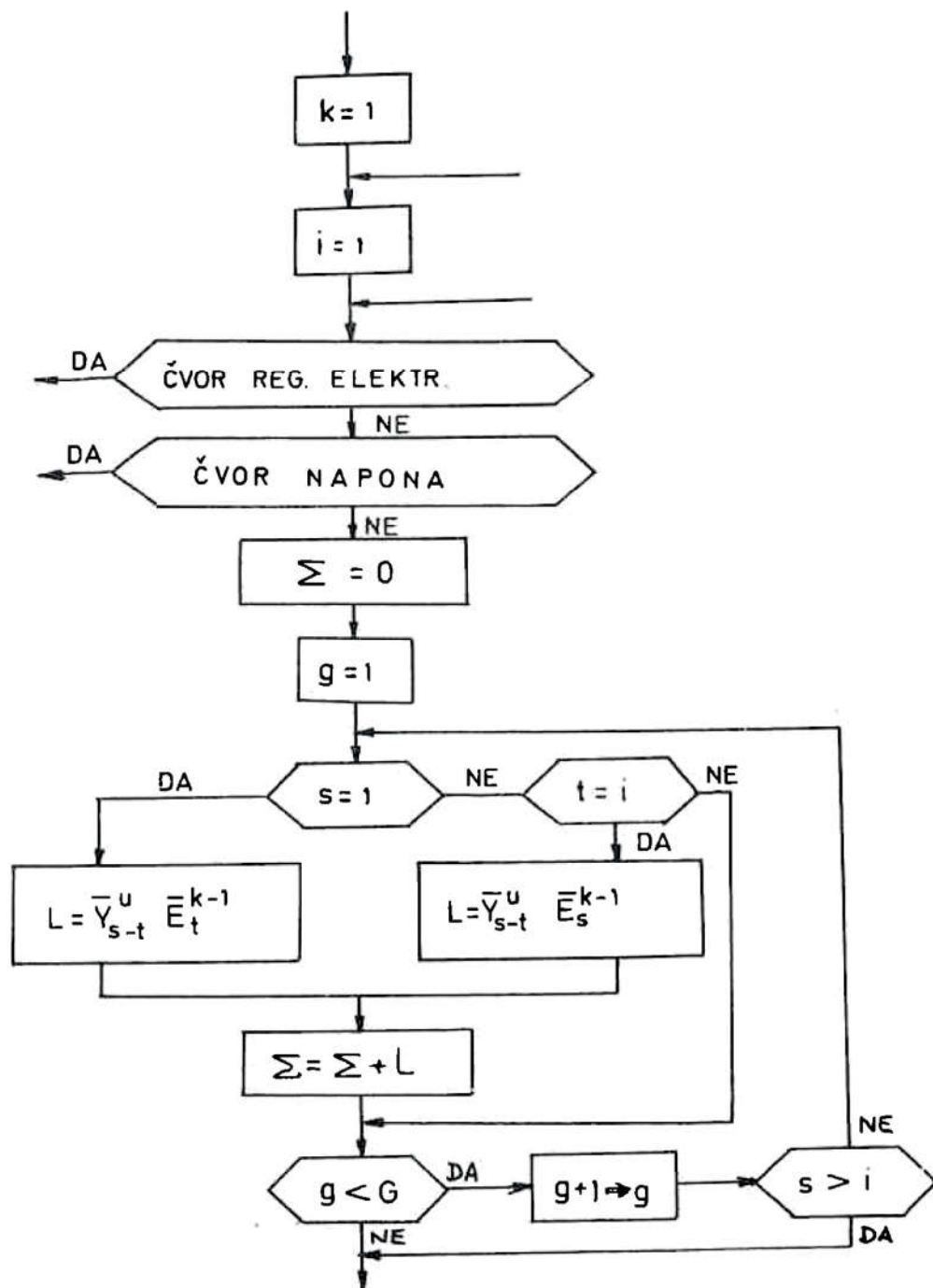
Složenost algoritma je cijena za smanjenje potrebnog vremena i prostora za matrice. Na što je više podsistema sistem podijeljen, to je algoritam složeniji.

Na slici 65. pokazan je izvadak iz dijagrama toka kod podjele sistema na samo dva dijela prema relacijama 1-109a,b,c i d. Primjenjena je Gaussova iterativna metoda, koja koristi matricu vlastitih i međusobnih admitancija čvora uz referentni čvor nula sistema. Napominjemo da je ovo najprimitivniji algoritam i da složenost programa raste progresivno s dodatnim zahtjevima.

1.3.3 Algoritam bez prethodnog računanja matrice mreže

Matrica vlastitih i međusobnih admitancija čvora, tj. matrica $[\bar{Y}]$ je simetrična matrica puna nula i formira se vrlo jednostavno iz liste admitancija grana. Dijagonalni član ove matrice $\bar{Y}_{ii}$ jednostavno je zbroj admitancija svih grana koje su incidentne sa čvorom i, a vandijagonalni član $\bar{Y}_{ij}$ jednak je negativnom zbroju admitancija grana, koje povezuju čvorove i i j. Ova osobina matrice $[\bar{Y}]$ omogućuje da se koeficijenti simultanih jednačbi, u stvari članovi matrice $[\bar{Y}]$, računaju uvijek ponovo, tj. otpada prethodno računanje koeficijenata i njihovo spremanje u vidu članova matrice.

U računski stroj se učitavaju podaci o svakom elementu mreže iz kojih se onda izračuna uzdužna admitancija $\bar{Y}_{s-t}^u$ i poprečna admitancija $\bar{Y}_{s-t}^p$. Nakon toga računa se π -shema vodova i transformatora.



Slika 66 - Algoritam bez prethodnog računanja matrice mreže (izvadak iz dijagrama toka)

Uzdužne admitancije se sredjuju po s uz uvjet da je s manje od t . Sortiranje se isplati, jer je time vrijeme, potrebno da se nađe određena admitancija, svedeno na polovicu.

Praktično je također unaprijed izračunati listu vlastitih admitancija svakog čvora.

Na slici 66 nacrtan je izvadak iz dijagrama toka, koji koristi ovu metodu. Primjenjena je Gauss-Seidel-ova iterativna metoda.

Iz izloženog je lako uočiti da je metoda, iznesena u točki 3., daleko najbolja kada se radi o klasičnom računu tokova snaga i napona. U ovoj metodi bilo koji zahvat u mreži, uključujući i regulaciju transformatora, ne predstavlja problem, jer se račun pretežno provodi neposredno koristeći ulazne podatke.

Metoda opisana pod točkom 1.3.3 ne isključuje korištenje dijakoptike i obrnuto. Potrebno je samo odabrati jedan od modela dijakoptike, koji koristi matricu vlastitih i međjusobnih admitancija čvora. Najprikladnija je metoda sa zajedničkim referentnim čvorom za sve podsisteme.

1.4 PRORAČUN TOKOVA SNAGA I NAPONA U REALNOM VREMENU

1.4.1 Općenito o estimaciji stanja

Operativno upravljanje elektroenergetskim sistemom zahtijeva momentalno poznavanje stanja. Daljinski prijenos informacija, također jedan od podсистема neophodan za funkcioniranje sistema, počinje od postrojenja i proteže se čitavom hijerarhijskom ljestvicom dispečerskih centara. Na prvi pogled veliki broj informacija, s kojim raspolažu svi nivoi upravljanja, izgleda više nego dovoljan. Međutim, svaka od tih informacija nosi izvjesnu pogrešku, nekih informacija je previše, a neke nedostaju, postoji vjerojatnost kvara na prijenosu informacija, itd. Zato je moguće jedino uz posebni pristup problemu utvrditi kompletno stanje sistema u

realnom vremenu, što se još naziva "estimacija stanja".

Pod estimacijom se, dakle, misli na matematski postupak, pomoću kojeg se s vrlo visokom točnošću može rekonstruirati stanje mreže (uklopno stanje, naponi čvorova, snage čvorova, snage u granama, gubici), i to na temelju određenog broja originalnih informacija o sistemu. Informacije su obično heterogene po sadržaju, sadrže mjernu pogrešku, nisu sve prikupljene u istom trenutku, a neke od njih mogu biti i potpuno netočne, što u trenutku njihovog korištenja nije poznato. Broj informacija treba da je veći od teoretski potrebnog, što ovisi i o pouzdanosti sistema za prijenos informacija.

Na temelju nepotpunih originalnih informacija izračunavaju se, dakle, estimirane informacije, među kojima se nalaze one koje prije nismo imali, ali i originalne informacije s korigiranim vrijednostima. Zbog svoje naravi, algoritmi primijenjeni u procesu estimacije koriste statistiku i račun vjerojatnosti.

Estimirane informacije potrebne su u centrima daljinskog vođenja sistema (dispečerskim centrima) radi praćenja stanja i donošenja odluka. Zbog toga estimirane informacije moraju biti što svježije. U idealnom slučaju moraju opisivati trenutno stanje, što nije moguće, pošto prijenos informacije i računanje zahtijevaju određeno vrijeme. Ipak, ukupni proces estimacije ne smije trajati duže od nekoliko sekunda ili najviše nekoliko minuta. Zato kažemo, da se radi o računu u realnom vremenu.

Cijeli hardverski i softverski aparat, koji sudjeluje u estimaciji stanja, može se nazvati "estimator". Za podatke o elementima mreže koristi se banka podataka, a za određivanje pseudomjerenja, koja nadomještavaju potrebna, a nedostajuća originalna mjerenja, koristi se "arhiva" prijašnjih stanja. Postojanje arhive prijašnjih stanja omogućuje, dodatno, da se stara stanja (stanja "post mortem"), potrebna za određene naknadne provjere ili analize, pozovu na display ili dađu odštampati na printeru.

Start računa estimacije može biti na zahtjev, ali i automatski, kada računalo na temelju novih originalnih informacija ustanovi veća odstupanja od prethodnih originalnih ili estimiranih informacija.

Iz klasičnog proračuna tokova snaga i napona je poznato, da se kompletno stanje u mreži može izračunati iz poznatog stupčanog vektora napona sistema i poznate konfiguracije i parametara mreže. Vektor napona označavamo s $[\bar{V}]$.

Vektor napona je sastavljen od dvije komponente: modula i argumenta. Mjeri se modul napona, dok je mjerenje kuta komplicirano i neekonomično. Zadatak je da se ustanovi vektor napona iz raspoloživih informacija, koje su dijelom manjkave, dijelom preobilne, a dijelom netočne.

Uvodimo vektor stanja $[x]$. Elementi vektora stanja su moduli i argumenti vektora napona. S obzirom da su elementi vektora stanja tražene veličine, nazivamo ih varijable stanja.

Sistem od N čvorova ima $n = 2N - 1$ varijable stanja, koje se mogu izračunati iz $2N - 1$ primarno mjerenih veličina, npr. $N - 1$ radne injektirane snage, $N - 1$ jalove injektirane snage i napona regulacione elektrane. Osim toga postoji i velik broj ostalih mjerenih veličina, kao što su radne i jalove snage grana i moduli napona.

Izvršimo li više od $2N - 1$ mjerenja, tada je riječ o prekobrojnom odnosno redundantnom broju mjerenja. Veća redundancija omogućava veću točnost estimiranih veličina, a osim toga omogućava otkrivanje i lokaliziranje greške modela (npr. u modelu nije uzeto da je neki vod van pogona, a zbog kvara u prijenosu upravo te informacije).

Mjerenja vršena u mreži prenose se u realnom vremenu u dispečerski centar, gdje se vrši estimacija stanja. Označimo ih sa stupčanim vektorom $[z]$. Ova mjerenja odstupaju od prave vrijednosti $[z_t]$ za pogrešku $[w]$. Možemo napisati jednadžbu

$$[z] = [z_t] + [w] \qquad 1-110$$

odnosno

$$z_a = f_a(x_1, x_2 \dots x_i \dots x_n) + w_a$$

$$z_b = f_b(x_1, x_2 \dots x_i \dots x_n) + w_b$$

.....

1-115

$$z_j = f_j(x_1, x_2 \dots x_i \dots x_n) + w_j$$

.....

$$z_m = f_m(x_1, x_2 \dots x_i \dots x_n) + w_m$$

Mjerenja koja nedostaju mogu se nadomjestiti pseudomjerenjima. Razne korisne informacije, na pr. iz prethodnog proračuna itd., koristimo pri ocjeni manjkajućeg mjerenja. Formuliramo ih isto kao i prava mjerenja. U tekstu koji slijedi pod mjerenjima će se podrazumijevati prava i pseudomjerenja.

Vektor $[z]$ ima m redaka, tj. onoliko koliko ima mjerenja. Vektor $[x]$ ima n redaka, tj. onoliko koliko ima varijabla stanja.

Najbolji rezultati estimacije bi se postigli, kada bismo izvršili sva moguća mjerenja i unijeli ih u račun, dakle kod maksimalne redundancije. Tih mjerenja bi bilo $4G + 4N - 1$ (G = broj grana):

- N mjerenja djelatnih snaga sabirnica
- N mjerenja jalovih snaga sabirnica
- N mjerenja modula napona sabirnica
- $N - 1$ mjerenja kuta napona sabirnica
- G mjerenja djelatnih snaga na početku grane
- G mjerenja jalovih snaga na početku grane
- G mjerenja djelatnih snaga na kraju grane
- G mjerenja jalovih snaga na kraju grane.

Toliki broj mjerenja bio bi vrlo skup, pa se postavlja pitanje, koji je optimalni broj mjerenja i njihova lokacija u kompromisu između minimalnih troškova izgradnje i održavanja uređaja i točnosti rezultata estimatora. Označimo sa r faktor redundancije definiran kao

$$r = \frac{m}{n}$$

1-116

Danas se smatra, da je poželjno da veličina r bude 1,4 - 2,5.

To znači, da je za sistem od 100 čvorova optimalni broj mjerenja između 280 i 500. Što se tiče izbora i lokacije mjerenja, preporuča se homogenost redundancije preko cijelog područja mreže, proračun matrice kovarijanci, itd.

Trajanje proračuna estimacije stanja velikog elektroenergetskog sistema raste eksponencijalno s veličinom sistema, pa je probitačno podijeliti sistem na podsisteme. Tako se, npr., u regionalnom centru daljinskog vođenja može vršiti estimacija stanja pripadne mreže 220 i 110 kV, dijela mreže 35 kV, te najnužnijih (graničnih) podataka susjednih podsistema i 400 kV mreže. U nadređenom centru vrši se estimacija stanja mreže 220 i 400 kV, te najnužnijih podataka 110 kV mreže. Pri tome se estimacija u nadređenom centru može vršiti na osnovu originalnih mjerenja ili pak na osnovu estimiranih podataka dobivenih iz regionalnih centara. U drugoj varijanti se vremenu trajanja estimacije u nadređenom centru pribraja trajanje estimacije u regionalnom centru, pa se radije primjenjuje prva varijanta.

1.4.2 Metoda najmanjih vaganih kvadrata (WLS)

Uvodimo matricu kovarijanci $[C]$. To je matrica momenata oko očekivanih vrijednosti varijabla. Matrica $[C]$ je simetrična kvadratna matrica.

Ako je općenito očekivana srednja vrijednost $[\hat{u}]$ neke varijable $[u]$

$$E([u]) = [\hat{u}] \quad 1-117$$

tada je matrica kovarijanci

$$[C] = E\{([u] - [\hat{u}])([u] - [\hat{u}])^t\} \quad 1-118$$

U našem specijalnom slučaju očekivana srednja vrijednost pogreške jednaka je nuli, pa se primjenom 1-117 i 1-118 na $[w]$ može pisati

$$E([w]) = [0] \quad 1-119$$

i

$$\begin{aligned} [R] &= E\{([w] - [0])([w] - [0])^t\} = \\ &= E([w][w]^t) \end{aligned} \quad 1-120$$

Matrica $[R]$ je matrica kovarijanci pogrešaka mjerenja. Kada nema međusobnog utjecaja, a to je redovito slučaj, onda je matrica $[R]$ dijagonalna matrica.

Analiza pokazuje da će najvjerojatniji, a time i najtočniji rezultati mjerenja biti oni kod kojih izraz

$$\begin{aligned} F([x]) &= ([z] - f([x]))^t [R]^{-1} ([z] - \\ &- f([x])) \end{aligned} \quad 1-121$$

bude minimalan. Izraz 1-121 naziva se suma vaganih kvadrata pogrešaka.

Iznijeti ćemo sada razmatranja koja dovode do relacije 1-121.

Sa svakog mjernog mjesta uzima se po jedna informacija $z_a \dots z_j \dots z_m$. Pogreške mjerenja $w_a \dots w_j \dots w_m$ imaju istu fizikalnu dimenziju kao i samo mjerenje. Razlikuju se po karakteru i po redu veličine, pa ih zato treba svesti na neku zajedničku mjeru. Osim toga, svako mjerno mjesto ne daje uvijek istu informaciju jednako točno, pa i to treba uzeti u obzir. Zato se svaka pogreška w_j dijeli sa standardnom devijacijom σ_j tog mjernog mjesta.

Standardna devijacija je veličina, koja na izvjestan način mjeri disperziju, a definirana je formulom:

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{v=1}^{\pi} (z_v - \hat{z}_j)^2}{\pi}} \quad 1-121$$

π - ukupni broj mjerenja na mjernom mjestu j , da bi se odredila σ_j .

$\hat{z}_j$ - aritmetička sredina, srednja vrijednost, mjerene veličine kod π mjerenja na mjestu j .

Standardna devijacija ima dimenziju veličine kojoj određuje disperziju oko srednje vrijednosti.

Dijeljenjem pogreške w_j sa standardnom devijacijom σ_j uvodimo u račun, umjesto stvarne pogreške, relativnu veličinu, kojoj je uz to dodijeljeno i mjesto u vjerojatnosti događaja. Ovu relativnu veličinu zato nazivamo vagana pogreška.

U našem slučaju idemo za tim, da iz m pojedinačnih mjerenja sa m mjernih mjesta, pod uvjetom da je $m \geq n$, izračunamo varijable stanja $x_1 \dots x_i \dots x_n$, tj. vektor stanja $[x]$ i to uz najmanju moguću pogrešku.

Iz teorije pogrešaka primijeniti ćemo metodu najmanjih kvadrata, koja kaže da je pogreška najmanja, kada je suma kvadrata pogrešaka najmanja. Pri tome ćemo u račun odmah uzeti vagane pogreške. Dolazimo do relacije:

$$\left(\frac{w_a}{\sigma_a}\right)^2 + \left(\frac{w_b}{\sigma_b}\right)^2 + \dots + \left(\frac{w_j}{\sigma_j}\right)^2 + \dots + \left(\frac{w_m}{\sigma_m}\right)^2 = \text{MIN} \quad 1-123$$

Prema relaciji 1-115 vidimo da je svaka pogreška neka funkcija vektora stanja, pa je i relacija 1-123 također funkcija vektora stanja.

Možemo pisati:

$$F([x]) = \sum_{j=a}^m \left(\frac{w_j}{\sigma_j}\right)^2 \quad 1-124$$

Uvjeti za ekstrem funkcije 1-124 jesu:

$$\frac{\partial F([x])}{\partial x_1} = 0, \quad \frac{\partial F([x])}{\partial x_2} = 0, \quad \dots \quad \frac{\partial F([x])}{\partial x_n} = 0 \quad 1-125$$

Dobili smo n jednažbi sa n nepoznanica.

Relaciju 1-124 možemo pisati u matričnom obliku:

$$F([x]) =$$

$$\begin{bmatrix} w_a/\sigma_a & \dots & w_j/\sigma_j & \dots & w_m/\sigma_m \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w_a/\sigma_a \\ \dots \\ w_j/\sigma_j \\ \dots \\ w_m/\sigma_m \end{bmatrix} \quad 1-126$$

odnosno:

$$F([x]) =$$

$$= \begin{bmatrix} w_a & \dots & w_j & \dots & w_m \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_a^2} & & & & \\ & \dots & & & \\ & & \frac{1}{\sigma_j^2} & & \\ & & & \dots & \\ & & & & \frac{1}{\sigma_m^2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w_a \\ \dots \\ w_j \\ \dots \\ w_m \end{bmatrix}$$

1-127

Dobili smo izraz 1-121 u kojem je:

$$[R] = \begin{bmatrix} \sigma_a^2 & & & & \\ & \dots & & & \\ & & \sigma_j^2 & & \\ & & & \dots & \\ & & & & \sigma_m^2 \end{bmatrix} \quad 1-128$$

1.4.2.1 Linearna estimacija stanja po metodi WLS

Kada su estimirane veličine linearna funkcija varijabli stanja, možemo relaciju 1-110 napisati u obliku:

$$[z] = [A] [x] + [w] \quad 1-129$$

Matrica $[A]$ je $m \times n$ matrica mjerenja, definirana strukturom sistema, Kirchhoffovim zakonima i iznosima parametara sistema.

Prema 1-129 izlazi, da je stupčani vektor pogreške mjerenja i pseudomjerenja

$$[w] = [z] - [A] [x] \quad 1-130$$

te je prema tome suma vaganih kvadrata pogrešaka

$$F([x]) = ([z] - [A] [x])^t [R]^{-1} ([z] - [A] [x]) \quad 1-131$$

Da dobijemo minimum funkcije $F([x])$ derivirat ćemo izraz 1-131, a kojeg ćemo prije napisati u obliku

$$\begin{aligned} F([x]) &= [z]^t [R]^{-1} [z] - [z]^t [R]^{-1} [A] [x] - \\ &- [x]^t [A]^t [R]^{-1} [z] + [x]^t [A]^t [R]^{-1} [A] [x] \end{aligned}$$

Vektor $[z]$ je mjerena veličina i neovisan je o procjeni varijable stanja. Uvjet minimuma je

$$\begin{aligned} \frac{dF([x])}{d[x]} &= -[z]^t [R]^{-1} [A] - ([z]^t [R]^{-1} [A])^t + \\ &+ ([x]^t [A]^t [R]^{-1} [A])^t + [x]^t [A]^t [R]^{-1} [A] = [0] \quad 1-132 \end{aligned}$$

što možemo dalje pisati:

$$\begin{aligned} & \{-[z]^t [R]^{-1} [A] + [x]^t [A]^t [R]^{-1} [A]\} + \\ & + \{-[z]^t [R]^{-1} [A] + [x]^t [A]^t [R]^{-1} [A]\}^t = [0] \end{aligned} \quad 1-133$$

Radi se o zbroju vektora sa istim transponiranim vektorom, što može biti nula samo u slučaju, ako su oba sumanda jednaka nuli. Zato mora biti:

$$-[z]^t [R]^{-1} [A] + [x]^t [A]^t [R]^{-1} [A] = [0] \quad 1-134a$$

$$\{-[z]^t [R]^{-1} [A] + [x]^t [A]^t [R]^{-1} [A]\}^t = [0] \quad b$$

iz čega slijedi nakon sredjivanja

$$[\hat{x}] = ([A]^t [R]^{-1} [A])^{-1} [A]^t [R]^{-1} [z] \quad 1-135$$

Relacija 1-135 daje optimalnu procjenu varijabli stanja na temelju pristiglih mjerenja i pseudomjerenja.

U relaciji 1-135 označili smo vektor stanja s $[\hat{x}]$, jer metoda najmanjih kvadrata daje aritmetičku sredinu rješenja (vidi 1.4.4).

U račun nam je zgodnije ući sa dijagonalnom matricom $[W]$, tzv. matricom težine, čiji su elementi

$$w_{jj} = \frac{1}{\sigma_j^2} \quad 1-136$$

Matrica $[W]$ je inverzna matrica $[R]$

$$[W] = [R]^{-1} \quad 1-137$$

Izraz 1-135 sada glasi

$$[\hat{x}] = ([A]^t [W] [A])^{-1} [A]^t [W] [z] \quad 1-138$$

Interesantna je matrica kovarijanci estimiranog vektora stanja. Ona nam pokazuje točnost estimiranih vrijednosti vektora stanja. To je $n \times n$ matrica momenata oko očekivane vrijednosti varijabla stanja. Očekivana estimirana varijabla stanja je točna vrijednost varijable stanja $[x_t]$.

$$E([\hat{x}]) = [x_t] \quad 1-139$$

Matrica kovarijanci $[P_x]$ je stoga definirana sa:

$$[P_x] = E\{([x_t] - [\hat{x}])([x_t] - [\hat{x}])^t\} \quad 1-140$$

Uvodimo matricu $[K]$, tako da je

$$[\hat{x}] = [K][z] \quad 1-141$$

pa je prema 1-135

$$[K] = ([A]^t[R]^{-1}[A])^{-1}[A]^t[R]^{-1} \quad 1-142$$

Ako matricu $[K]$ pomnožimo sa $[A]$ s desne strane, dobit ćemo

$$[K][A] = ([A]^t[R]^{-1}[A])^{-1}[A]^t[R]^{-1}[A] = [I] \quad 1-143$$

te je prema tome

$$[K][A] = [I] \quad 1-144$$

Pri tome ne smijemo zaboraviti, da je matrica $[A]$ singularna matrica (dimenzija $m \times n$) i da nema inverznu matricu.

Uvažimo li 1-111, možemo pisati

$$[z] = [A][x_t] + [w] \quad 1-145$$

što uvršteno u 1-141 daje

$$[\hat{x}] = [K][A][x_t] + [K][w] \quad 1-146$$

Gornji izraz uvrstimo u 1-140. Dobit ćemo

$$\begin{aligned} [P_x] &= E\{([x_t] - [K][A][x_t] - [K][w])([x_t] - \\ &- [K][A][x_t] - [K][w])^t\} = [K] E\{[w][w]^t\} [K]^t = \\ &= [K][R][K]^t = ([A]^t[R]^{-1}[A])^{-1} \end{aligned} \quad 1-147$$

Konačni izraz za $[P_x]$ dobili smo korištenjem izraza 1-144

$$\begin{aligned} [K][R][K]^t &= ([A]^t[R]^{-1}[A])^{-1}[A]^t[R]^{-1}[R]([A]^t[R]^{-1}[A])^{-1}[A]^t[R]^{-1})^t = \\ &= ([A]^t[R]^{-1}[A])^{-1}[A]^t[R]^{-1}[A]([A]^t[R]^{-1}[A])^{-1})^t = \\ &= ([A]^t[R]^{-1}[A])^{-1}[A]^t[R]^{-1}[A]([A]^t[R]^{-1}[A])^{-1} = \\ &= ([A]^t[R]^{-1}[A])^{-1} \end{aligned}$$

Relaciju

$$[\hat{z}] = [A][\hat{x}] \quad 1-148$$

koja nam daje procjenjene mjerene veličine iz estimiranog vektora stanja, možemo odmah pisati kao funkciju mjerenih veličina.

$$[\hat{z}] = [A]([A]^t[R]^{-1}[A])^{-1}[A]^t[R]^{-1}[z] \quad 1-149$$

Interesantna je matrica kovarijanci estimiranih mjerenih varijabli. Ako je $[x_t]$ točna vrijednost varijable stanja, onda je $[z_t]$ računski dobivena točna vrijednost više ili manje netočno izmjerenih veličina.

$$[z_t] = [A][x_t] \quad 1-150$$

Definiramo matricu kovarijanci estimiranih mjerenih varijabli

$$[P_z] = E\{([z_t] - [\hat{z}])([z_t] - [\hat{z}])^t\} \quad 1-151$$

i uvrstimo 1-150 i 1-148 u 1-151

$$\begin{aligned} [P_z] &= E\{([A][x_t] - [A][\hat{x}])([A][x_t] - [A][\hat{x}])^t\} = \\ &= [A]E\{([x_t] - [\hat{x}])([x_t] - [\hat{x}])^t\}[A]^t = \\ &= [A][P_x][A]^t = [A]([A]^t[R]^{-1}[A])^{-1}[A]^t \quad 1-152 \end{aligned}$$

Relacije 1-139, 1-147, 1-149 i 1-152 su osnovne relacije istimacije stanja metodom najmanjih vaganih kvadrata. Kod redundantnog mjerenja matrica $[A]$ je singularna, međutim kad je $r = 1$, odnosno $m = n$, matrica $[A]$ je nesingularna i zato ima inverznu matricu $[A]^{-1}$. Ako ovu činjenicu iskoristimo u relacijama 1-138, 1-147, 1-149 i 1-152 dobit ćemo odmah izraze za ovaj slučaj. U tablici dan je pregled jednadžbi linearne estimacije.

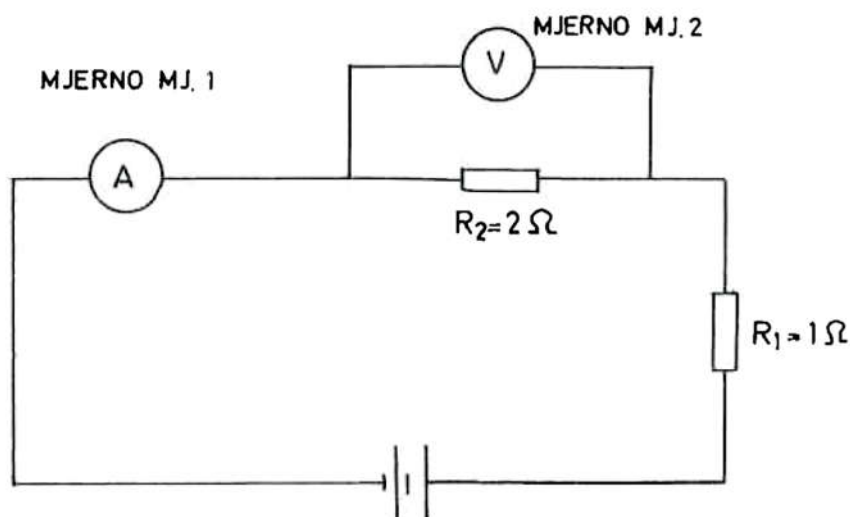
broj mjerenja	jednadžbe linearne estimacije
$m > n$	$[\hat{x}] = ([A]^t[R]^{-1}[A])^{-1}[A]^t[R]^{-1}[z]$ $[P_x] = ([A]^t[R]^{-1}[A])^{-1}$ $[\hat{z}] = [A][\hat{x}] = [A]([A]^t[R]^{-1}[A])^{-1}[A]^t[R]^{-1}[z]$ $[P_z] = [A][P_x][A]^t = [A]([A]^t[R]^{-1}[A])^{-1}[A]^t$
$m = n$	$[\hat{x}] = [A]^{-1}[z]$ $[P_x] = ([A]^t[R]^{-1}[A])^{-1}$ $[\hat{z}] = [z]$ $[P_z] = [R]$

Vidimo da je kod linearne estimacije dovoljno poznavati

- m stupčani vektor pristiglih mjerenja i pseudomjerenja $[z]$,
- $m \times n$ matricu $[A]$, koja daje vezu električnih veličina mjernih mjesta s vektorom stanja $[x]$,
- $m \times m$ matricu kovarijanci pogrešaka mjerenja $[R]$.

Primjenu relacija linearne estimacije iz tablice pokazat ćemo na jednostavnom primjeru.

Primjer 1.3 Na temelju dva mjerenja, $z_1 = 1,999 \text{ A}$ i $z_2 = 4,01 \text{ V}$, potrebno je procijeniti napon izvora u istosmjernom krugu sa slike 67.



Slika 67 - Mreža uz primjer 1.3

Očekuje se napon baterije 6 V. U tom slučaju ampermetar bi nam pokazao vrijednost od 2 A, a voltmetar 4 V.

U ovom je primjeru, kako vidimo

$$m = 2$$

$$n = 1$$

$$r = 2$$

Iz pristiglih mjerenja formiramo vektor $[z]$

$$[z] = \begin{bmatrix} 1,999 \\ 4,01 \end{bmatrix}$$

Kod testiranja ampermetra i voltmetra dobili smo sljedeće rezultate:

ampermetar		
f_{ri}	x_i	$f_{ri} x_i$
1	1,98	1,98
2	1,99	3,98
5	2,00	10,00
3	2,01	6,03
1	2,02	2,02
12	Σ	24,01

voltmetar		
f_{ri}	x_i	$f_{ri} x_i$
1	3,92	3,92
1	3,95	3,95
2	3,97	7,94
3	4,00	12,00
2	4,01	8,02
1	4,02	4,02
10	Σ	39,85

$$\bar{x}_1 = 24,01 : 12 = 2,001 \text{ |A|}$$

$$\bar{x}_2 = 39,85 : 10 = 3,985 \text{ |V|}$$

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{12} [(1,98 - 2,001)^2 + 2(1,99 - 2,001)^2 + 5(2,00 - 2,001)^2 + 3(2,01 - 2,001)^2 + (2,02 - 2,001)^2] = \underline{0,0001076} \text{ |A}^2\text{|}$$

$$\begin{aligned} \sigma_2^2 &= \frac{1}{10} [(3,92 - 3,985)^2 + (3,95 - 3,985)^2 + 2(3,97 - 3,985)^2 + 3(4,00 - 3,985)^2 + 2(4,01 - 3,985)^2 + (4,02 - 3,985)^2] = \\ &= \underline{0,000905} \text{ |V}^2\text{|} \end{aligned}$$

$$\frac{1}{\sigma_1^2} = \frac{1}{0,0001076} = 9294$$

$$\frac{1}{\sigma_2^2} = \frac{1}{0,000905} = 1105$$

Sada možemo ispisati matricu težine $[W]$

$$[W] = \begin{bmatrix} 9294 & 0 \\ 0 & 1105 \end{bmatrix}$$

Računamo matricu $[A]$. Struja na mjernom mjestu 1 može se izračunati iz napona baterije (varijable stanja) V

$$I = \frac{1}{R_1 + R_2} V \quad |A|$$

Napon na mjernom mjestu 2 je pad napona na otporu R_2 izazvan prolazom struje I

$$\Delta V = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V \quad |V|$$

Stoga je matrica $[A]$ (u ovom slučaju matrica 2×1).

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1 + R_2} \\ \frac{R_2}{R_1 + R_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1 + 2} \\ \frac{2}{1 + 2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,3333 \\ 0,6666 \end{bmatrix}$$

Estimirani vektor stanja računamo po relaciji 1-138

$$\begin{aligned} [\hat{x}] &= \begin{bmatrix} 0,3333 & 0,6666 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 9294 & \\ & 1105 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,3333 \\ 0,6666 \end{bmatrix}^{-1} \times \\ &\times \begin{bmatrix} 0,3333 & 0,6666 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 9294 & \\ & 1105 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1,999 \\ 4,01 \end{bmatrix} = \\ &= [6,0023788] \doteq [6,0024] |V| \end{aligned}$$

Kovarijanca varijable stanja iznosi:

$$[P_x] = \left(\begin{bmatrix} 0,3333 & 0,6666 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 9294 & \\ & 1105 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,3333 \\ 0,6666 \end{bmatrix} \right)^{-1} =$$

$$= [0,0006563]$$

odakle slijedi, da je standardna devijacija estimirane varijable stanja

$$\sigma_x = \sqrt{0,0006563} \approx 0,0256183 \text{ |V| odnosno } 0,427 \%$$

Greška estimirane varijable stanja prema očekivanoj točnoj

$$g_x = \frac{x_t - \hat{x}}{x_t} = \frac{6 - 6,0024}{6,00} \cdot 100 = - 0,04 \%$$

Estimirane vrijednosti mjerenja iz estimirane varijable stanja jesu

$$\hat{z}_1 = 0,3333 \cdot 6,0024 = 2,0006 \text{ |A|}$$

$$\hat{z}_2 = 0,6666 \cdot 6,0024 = 4,0012 \text{ |V|}$$

Računamo pogrešku estimiranih vrijednosti u procentima

$$g_{z_1} = \frac{2 - 2,0006}{2} \cdot 100 = 0,03 \%$$

$$g_{z_2} = \frac{4 - 4,0012}{4} \cdot 100 = 0,03 \%$$

Matrica kovarijanci estimiranih mjerenih varijabli prema 1-152 glasi

$$[P_z] = \begin{bmatrix} 0,728 \cdot 10^{-4} & 1,457 \cdot 10^{-4} \\ 1,457 \cdot 10^{-4} & 2,915 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix}$$

U računu za g_x , g_{z1} i g_{z2} pretpostavili smo poznate točne vrijednosti varijable stanja i mjerenih veličina radi usporedbe sa estimiranim vrijednostima. Treba međjutim imati na umu da su točne vrijednosti u pravilu nepoznate.

Matrice kovarijanci varijable stanja i estimiranih mjerenih veličina pokazuju da se je estimiranjem došlo do rješenja, koja su prihvatljivija od bilo kojeg rješenja iz golih mjerenja (za z_1 $x = 5,997$ V, za z_2 $x = 6,015$ V) ili prosjeka ovakvih rješenja ($x = 6,006$ V).

1.4.2.2 Nelinearna estimacija stanja po metodi WLS

Mjerene veličine su nelinearne funkcije varijable stanja, pa nam relacije linearne estimacije (tablica uz 1.4.2.1) ne odgovaraju. Nelinearna estimacija stanja temelji se na razvoju nelinearnih funkcija u Taylorov red oko nazivnih vrijednosti vektora stanja. Radi zanemarenja viših članova reda potrebno je primijeniti iterativni postupak.

Polazimo od relacije 1-114 koja glasi:

$$[z] = f([x]) + [w]$$

Pretpostavimo da je vrijednost vektora stanja $|x^{(0)}|$. Obično ćemo odabrati nazivnu vrijednost vektora stanja, ukoliko ne raspolažemo točnijim podacima. Iz određene vrijednosti vektora stanja možemo izračunati mjerene veličine

$$[z^{(0)}] = f([x^{(0)}]) \quad 1-153$$

Mjerene veličine i vektor stanja možemo pisati u obliku

$$[z] = [z^{(0)}] + [\Delta z^{(0)}] \quad 1-154$$

$$[x] = [x^{(0)}] + [\Delta x^{(0)}] \quad 1-155$$

pa relacija 1-114 prelazi u

$$[z^{(o)}] + [\Delta z^{(o)}] = f([x^{(o)}] + [\Delta x^{(o)}]) + [w] \quad 1-156$$

Razvojem u Taylor-ov red lineariziramo $f([x^{(o)}] + [\Delta x^{(o)}])$.

Ako još za $[z^{(o)}]$ uvrstimo 1-141 dobit ćemo:

$$f([x^{(o)}]) + [\Delta z^{(o)}] = f([x^{(o)}]) + [J^{(o)}][\Delta x^{(o)}] + [w]$$

i nakon kraćenja

$$[\Delta z^{(o)}] = [J^{(o)}][\Delta x^{(o)}] + [w] \quad 1-157$$

Matrica $[J^{(o)}]$ je jakobijana (vidi "Mreže I", 7.5.2).

Sada možemo primijeniti relacije linearne estimacije s time, da estimiramo korekciju varijable stanja $[\Delta x^{(o)}]$. Ako usporedimo relaciju 1-157 sa 1-129 vidimo da je na mjestu

$$[z] \rightarrow [\Delta z]$$

$$[A] \rightarrow [J]$$

$$[x] \rightarrow [\Delta x]$$

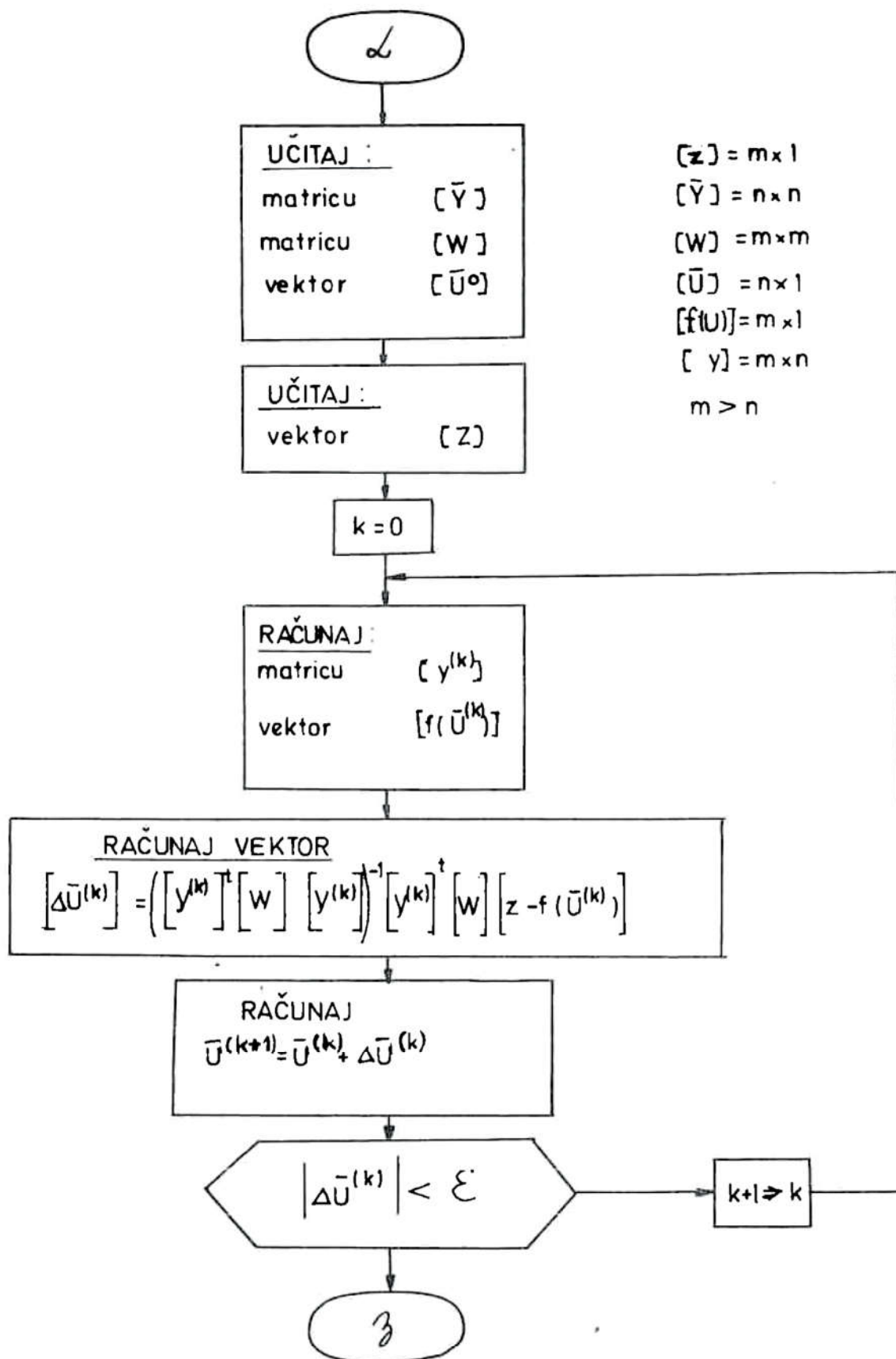
pa je analogno relacijama iz tablice uz 1.4.2.1

$$[\Delta \hat{x}^{(o)}] = ([J^{(o)}]^t [R]^{-1} [J^{(o)}])^{-1} [J^{(o)}]^t [R]^{-1} [\Delta z^{(o)}] \quad 1-158$$

gdje je radi 1-153 i 1-154

$$[\Delta z^{(o)}] = [z] - [\hat{z}^{(o)}] = [z] - f([x^{(o)}]) \quad 1-159$$

Dakle, korekciju $[\Delta \hat{x}^{(o)}]$ iz relacije 1-158 smo dobili iz mjerenih



Slika 68 - Pojednostavljeni dijagram toka za estimaciju vektora stanja po metodi WLS

vrijednosti $[z]$ i pretpostavljene $[x^{(0)}]$.

Korekcija $[\Delta \hat{x}^{(0)}]$ je to manja, što je pretpostavljena vrijednost vektora stanja $[x^{(0)}]$ bolja. U ovom prvom koraku teško će biti zadovoljen uvjet točnosti, tj. da je $[\Delta \hat{x}^{(0)}]$ ispod neke zadane male vrijednosti. Zato će biti potrebno ponoviti račun s korigiranim vrijednostima vektora stanja. Račun ćemo ponavljati sve dok nam korekcija varijable stanja ne postane dovoljno malena.

U k-tom koraku računamo

$$[\Delta z^{(k)}] = [z] - f([x^{(k)}]) \quad 1-160$$

$$[\Delta \hat{x}^{(k)}] = ([J^{(k)}]^t [R]^{-1} [J^{(k)}])^{-1} [J^{(k)}]^t [R]^{-1} [\Delta z^{(k)}] \quad 1-161$$

Kada je $[\Delta \hat{x}^{(k)}]$ preveliko, prelazimo na novi korak:

$$[x^{(k+1)}] = [x^{(k)}] + [\Delta \hat{x}^{(k)}] \quad 1-162$$

i ponavljamo račun.

1.4.3 Metoda mjerenja snaga grana (LO)

Metoda LO je jednostavnija od WLS metode i brže vodi do rezultata. Naziva se i aproksimativnom metodom. Može se primijeniti pod određenim uvjetima, a ti su:

- Za sve vodove odnos $X/R \gg 1$
- Naponi svih sabirnica skoro jednaki po iznosu i kutu
- Greške mjerenja djelatne snage nisu u vezi sa greškama mjerenja napona i reaktivne snage.

Gornji uvjeti su u visokonaponskim mrežama vrlo često ispunjeni.

U metodi LO estimira se vektor stanja iz pristiglih mjerenja djelatnih i jalovih snaga grana i apsolutnih iznosa napona sabirnica.

Na slici 69 nacrtana je ekvivalentna shema grane izmedju čvorova p i q. Namjerno su uzete sasvim druge oznake prema onima u predhodnom poglavlju, da bi se odmah uočila neposredna primjena metode. Ovdje znači:

$\bar{v}_{gr}$ - napon grane računski

$\bar{v}_{gm}$ - napon grane izmjeren

$\bar{r}$ - pogreška mjerenja

$\bar{V}_{poz}$ - poznati fazni napon čvora

$\bar{V}_{nep}$ - nepoznati fazni napon čvora

[A] - matrica incidencija mjerno mjesto - čvor

$a_{ij} = 1$ ako je orijentacija grane na mjernom mjestu i od čvora j, a grana je incidentna sa čvorom j.

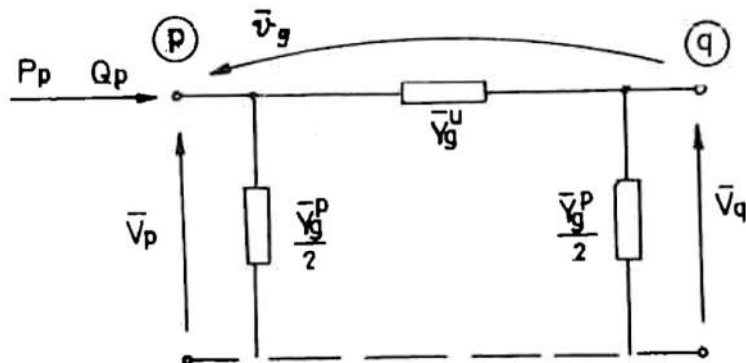
$a_{ij} = -1$ ako je orijentacija grane na mjernom mjestu i prema čvoru j, a grana je incidentna sa čvorom j.

$a_{ij} = 0$ ako grana, na kojoj je mjerno mjesto i nije incidentna sa čvorom j.

Iz slike 69 slijedi:

$$\bar{v}_g = \frac{1}{\bar{Y}_g^u} \left(\frac{P_p - j Q_p}{\bar{V}_p^*} - \bar{V}_p \frac{\bar{Y}_g^p}{2} \right) \quad 1-163$$

$$\bar{v}_g = \bar{V}_p - \bar{V}_q \quad 1-164$$



Slika 69 - Gama p - q u metodi LO

Matrica $[A]$ povezuje napon grane i napon čvora preko relacije:

$$[\bar{v}_{gr}] = [A][\bar{V}] \quad 1-165$$

Ako u vektoru napona $[\bar{V}]$ poredamo najprije poznate napone, a zatim nepoznate, možemo matricu $[A]$ podijeliti u blokove $[A_1]$ i $[A_2]$ kako slijedi:

$$[\bar{v}_{gr}] = \begin{matrix} \downarrow \\ m \end{matrix} \begin{matrix} \xrightarrow{\text{čv}} \\ \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \end{bmatrix} \end{matrix} \times \begin{bmatrix} \bar{v}_{poz} \\ \bar{v}_{nep} \end{bmatrix} \quad 1-166$$

Relacija 1-165 prelazi u:

$$[\bar{v}_{gr}] = [A_1][\bar{v}_{poz}] + [A_2][\bar{v}_{nep}] \quad 1-167$$

Pod pretpostavkom da su nam računske vrijednosti točne, a mjerenje sadrže pogrešku, možemo postaviti:

$$[\bar{v}_{gr}] = [\bar{v}_{gm}] + [\bar{r}] \quad 1-168$$

odnosno:

$$\begin{aligned} [\bar{r}] &= [\bar{v}_{gr}] - [\bar{v}_{gm}] \\ [r] &= [A_1][\bar{v}_{poz}] + [A_2][\bar{v}_{nep}] - [\bar{v}_{gm}] \end{aligned} \quad 1-169$$

Prema metodi najmanjih kvadrata dobit ćemo najbolje rješenje, ako suma kvadrata pogreške bude minimalna. Treba dakle naći minimum funkcije:

$$[\bar{r}]^t [\bar{r}] = ([A_1][\bar{v}_{poz}] + [A_2][\bar{v}_{nep}] - [\bar{v}_{gm}])^t ([A_1][\bar{v}_{poz}] +$$

$$+ [A_2] [\bar{v}_{nep}] - [\bar{v}_{gm}] \quad 1-170$$

Minimum funkcije $[\bar{r}]^t [\bar{r}]$ dobijemo iz uvjeta:

$$\frac{d([\bar{r}]^t [\bar{r}])}{d[\bar{v}_{nep}]} = [0] \quad 1-171$$

Uvjet 1-171 daje:

$$([A_2]^t - \frac{d[\bar{v}_{gm}]}{d[\bar{v}_{nep}]}^t) ([A_1] [\bar{v}_{poz}] + [A_2] [\bar{v}_{nep}] - [\bar{v}_{gm}]) = [0] \quad 1-172$$

Iz čega slijedi:

$$[\bar{v}_{nep}] = ([A_2]^t [A_2])^{-1} ([A_2]^t ([\bar{v}_{gm}] - [A_1] [\bar{v}_{poz}]) + [\bar{n}]) \quad 1-173$$

$$\begin{aligned} [\bar{n}] &= \frac{d[\bar{v}_{gm}]}{d[\bar{v}_{nep}]} ([A_1] [\bar{v}_{poz}] + [A_2] [\bar{v}_{nep}] - [\bar{v}_{gm}]) = \\ &= \frac{d[\bar{v}_{gm}]}{d[\bar{v}_{nep}]} [\bar{r}] \end{aligned} \quad 1-174$$

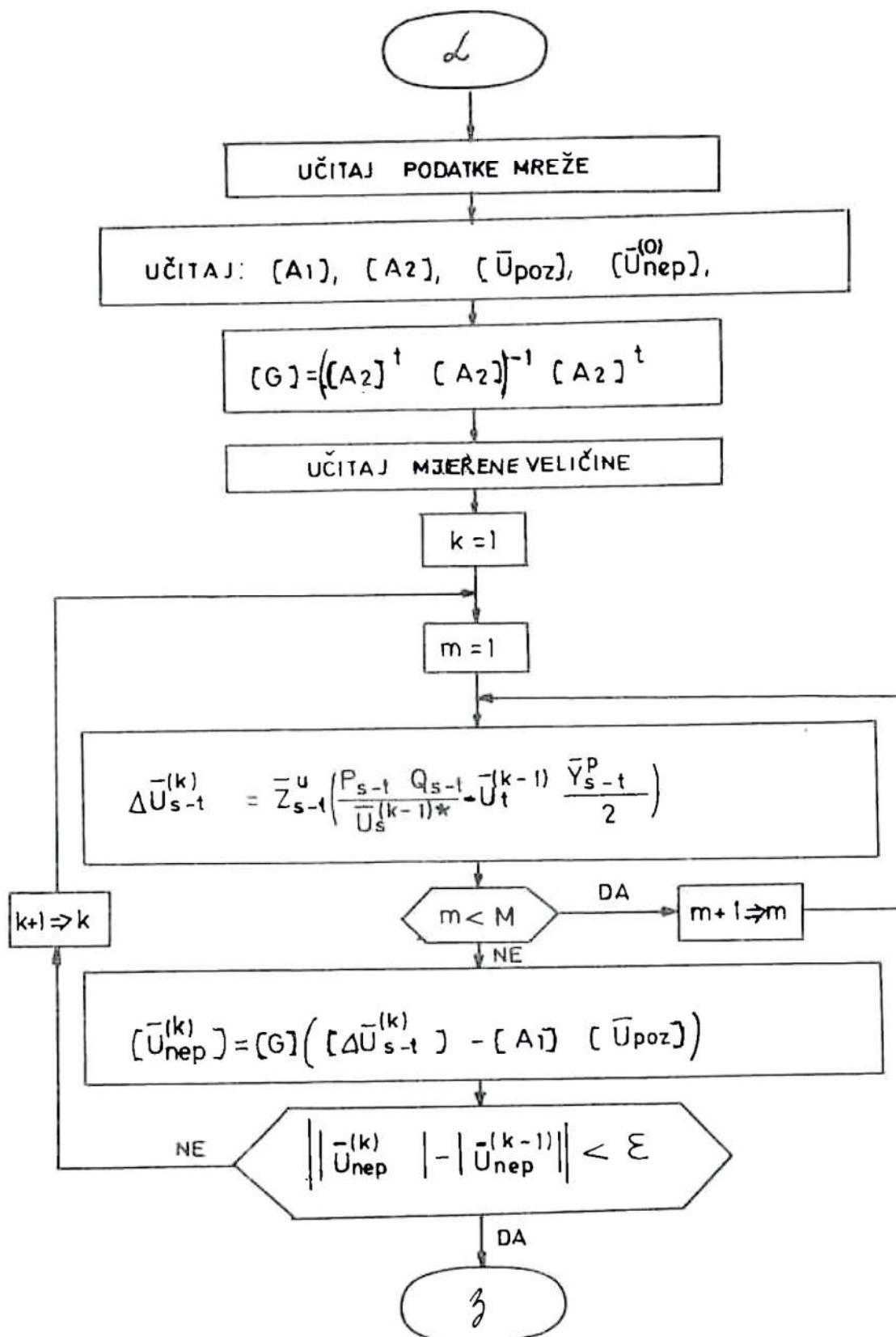
Za $[\bar{n}] = [0]$ vrijedi:

$$[\bar{v}_{nep}] = [G] ([\bar{v}_{gm}] - [A_1] [\bar{v}_{poz}]) \quad 1-175$$

$$[G] = ([A_2]^t [A_2])^{-1} [A_2]^t \quad 1-176$$

$[\bar{n}] = [0]$ pretpostavlja $[\bar{r}] = [0]$ što nije točno, pa se rješenje za $[\bar{v}_{nep}]$ dobije u nekoliko koraka. Relacija 1-175 za k-tu iteraciju glasi:

$$[\bar{v}_{nep}^{(k)}] = [G] ([\bar{v}_{gm}^{(k)}] - [A_1] [\bar{v}_{poz}]) \quad 1-177$$

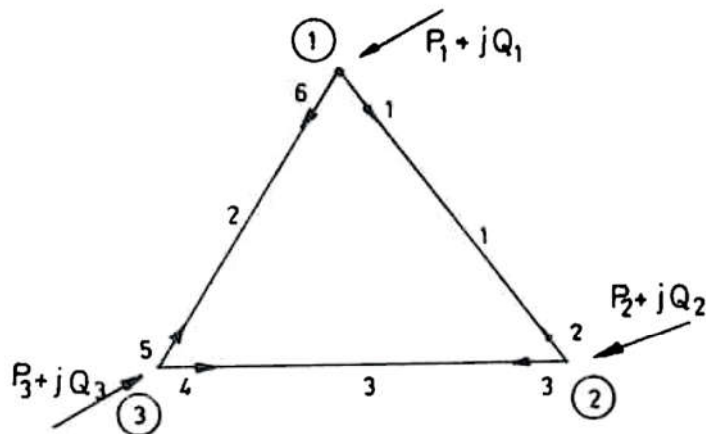


Slika 70 - Dijagram toka za estimaciju po metodi LO

$$[\bar{v}_{gm}^{(k)}] = \left[\frac{1}{\bar{y}_g^u} \left(\frac{P_{gp} - j Q_{gp}}{\bar{v}_p^{+(k-1)}} - \frac{\bar{v}_p^{(k-1)} \bar{y}_g^p}{2} \right) \right] \quad 1-178$$

Na slici 70 nalazi se dijagram toka za ovaj matematski model estimacije stanja.

Primjer 1.4 Zadana je mreža prema slici 71. Na temelju poznate konfiguracije i parametara mreže, poznatog napona $\bar{U}_1$ i pristiglih mjerenja potrebno je odrediti napone $\bar{U}_2$ i $\bar{U}_3$.



Slika 71 - Mreža uz primjer 1.4

Podaci mreže

g	s	t	$\bar{z}_g^u$	$\bar{y}_g^p$
1	1	2	$7 + j 28$	$j 0,000182$
2	1	3	$5 + j 20$	$j 0,00013$
3	2	3	$4 + j 16$	$j 0,000104$

$$\bar{U}_{poz} = U_1 = 110 \angle 0^\circ \text{ |kV|}$$

$$\bar{U}_2^{(0)} = 110 \angle 0^\circ$$

$$\bar{U}_3^{(0)} = 110 \angle 0^\circ$$

Pristigla mjerenja

m	g	s	t	P	Q
1	1	1	2	29,43	16,11
2	1	2	1	-28,75	-15,51
3	3	2	3	-11,26	- 4,5
4	3	3	2	11,32	3,57
5	2	3	1	-31,29	-18,56
6	2	1	3	31,88	19,41

$$[A] = \begin{array}{c|ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 1 & -1 & \\ 2 & -1 & 1 & \\ 3 & & 1 & -1 \\ 4 & & -1 & 1 \\ 5 & -1 & & 1 \\ 6 & 1 & & -1 \end{array}$$

$$[A_1] = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 1 \\ 2 & -1 \\ 3 & \\ 4 & \\ 5 & -1 \\ 6 & 1 \end{array}$$

$$[A_2] = \begin{array}{c|cc} & 2 & 3 \\ \hline 1 & -1 & \\ 2 & 1 & \\ 3 & 1 & -1 \\ 4 & -1 & 1 \\ 5 & & 1 \\ 6 & & -1 \end{array}$$

$$[A_1] [\bar{U}_{poz}] = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 1 \\ 2 & -1 \\ 3 & \\ 4 & \\ 5 & -1 \\ 6 & 1 \end{array} \times \begin{array}{c} 110 \\ 110 \\ 110 \\ 110 \\ 110 \\ 110 \end{array} = \begin{array}{c|c} & 110 \\ \hline 1 & 110 \\ 2 & -110 \\ 3 & \\ 4 & \\ 5 & -110 \\ 6 & 110 \end{array}$$

$$|G| = \left(\begin{array}{cc|cc|cc} -1 & 1 & 1 & -1 & & \\ & & -1 & 1 & 1 & -1 \end{array} \right) \times \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline -1 & \\ 1 & \\ 1 & -1 \\ -1 & 1 \\ & 1 \\ & -1 \end{array}^{-1} \begin{array}{cc|cc|cc} -1 & 1 & 1 & -1 & & \\ & & -1 & 1 & 1 & -1 \end{array} =$$

$$= \frac{1}{12} \begin{bmatrix} -4 & 4 & 2 & -2 & 2 & -2 \\ -2 & 2 & -2 & 2 & 4 & -4 \end{bmatrix}$$

$$k = 1$$

$$\Delta \bar{U}_{1-2} = (7+j28) \left(\frac{29,43-j16,11}{110} - 110 \cdot j0,000091 \right) = 6,2545+j6,3945 \text{ [kV]}$$

$$\Delta \bar{U}_{2-1} = (7+j28) \left(\frac{-28,75+j15,51}{110} - 110 \cdot j0,000091 \right) = -5,4909-j6,4022 \text{ [kV]}$$

$$\Delta \bar{U}_{2-3} = (4+j16) \left(\frac{-11,26+j4,5}{110} - 110 \cdot j0,000052 \right) = -0,9724-j1,496 \text{ [kV]}$$

$$\Delta \bar{U}_{3-2} = (4+j16) \left(\frac{11,32-j3,57}{110} - 110 \cdot j0,000052 \right) = 1,0228+j1,4936 \text{ [kV]}$$

$$\Delta \bar{U}_{3-1} = (5+j20) \left(\frac{-31,29+j18,56}{110} - 110 \cdot j0,000065 \right) = -4,6525-j4,8825 \text{ [kV]}$$

$$\Delta \bar{U}_{1-3} = (5+j20) \left(\frac{31,88-j19,41}{110} - 110 \cdot j0,000065 \right) = 5,123+j4,8775 \text{ [kV]}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{12} \begin{bmatrix} -4 & 4 & 2 & -2 & 2 & -2 \\ -2 & 2 & -2 & 2 & 4 & -4 \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} 6,2545+j6,3945 \\ -5,4909-j6,4022 \\ -0,9724-j1,496 \\ 1,0228+j1,4936 \\ -4,6525-j4,8825 \\ 5,123+j4,8775 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 110 \\ -110 \\ \\ \\ -110 \\ 110 \end{bmatrix} \right)$$

$$\bar{U}_2 = 104,1231 - j 6,3905 = 104,319 \angle -3,512^\circ \text{ [kV]}$$

$$\bar{U}_3 = 105,1165 - j 5,2528 = 105,248 \angle -2,861^\circ \text{ [kV]}$$

Da li je proces konvergirao do kraja?

$$|104,319 - 110| = 5,681 > 0,01 \text{ [kV]}$$

$$|105,248 - 110| = 4,752 > 0,01 \text{ |kV|}$$

Proces nije došao do kraja, pa prelazimo na drugu iteraciju. Nakon nekoliko koraka dolazimo do rezultata:

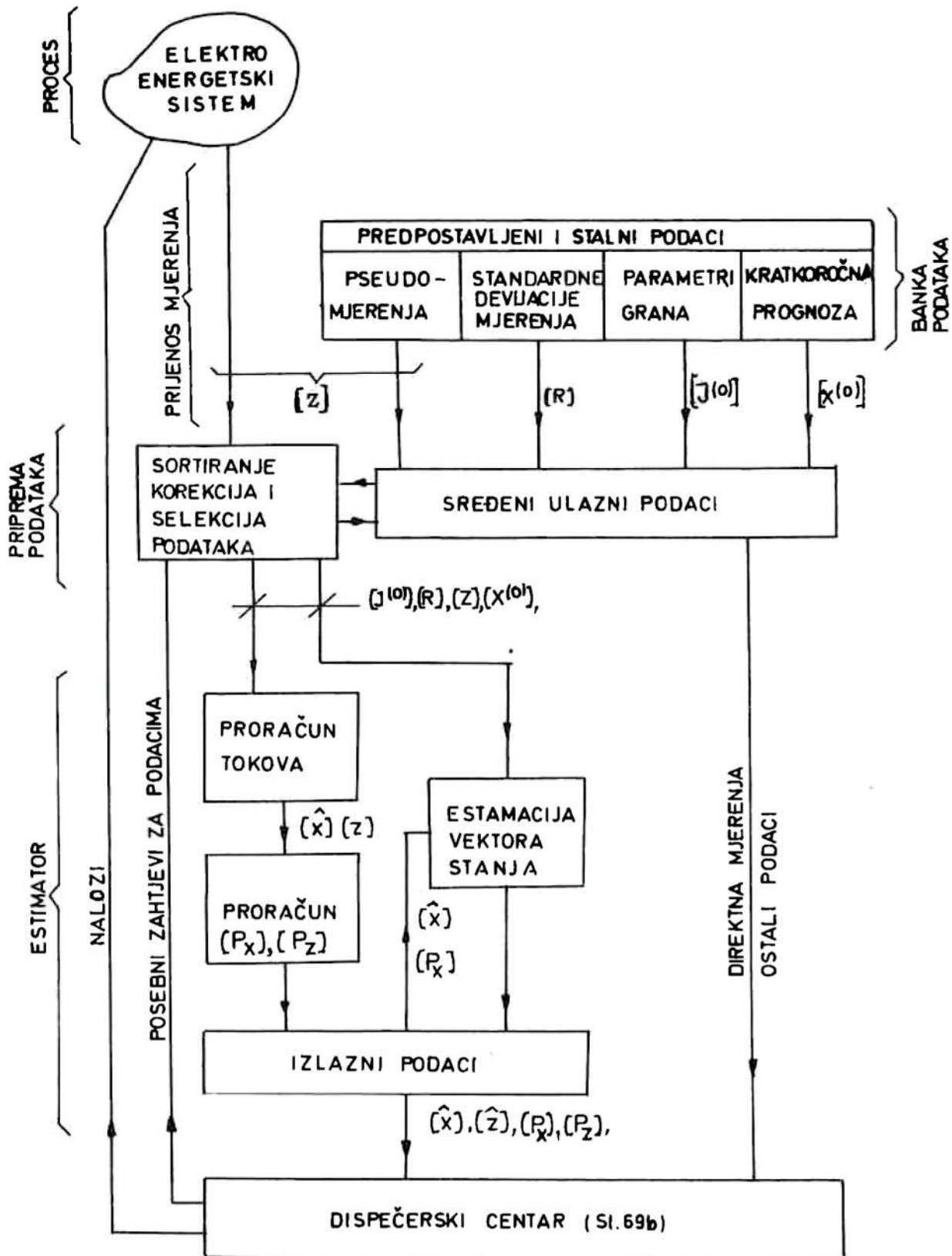
$$\bar{U}_2 = 103,95 \text{ } \underline{-3,50} \text{ |kV|}$$

$$\bar{U}_3 = 104,94 \text{ } \underline{-2,7^0} \text{ |kV|}$$

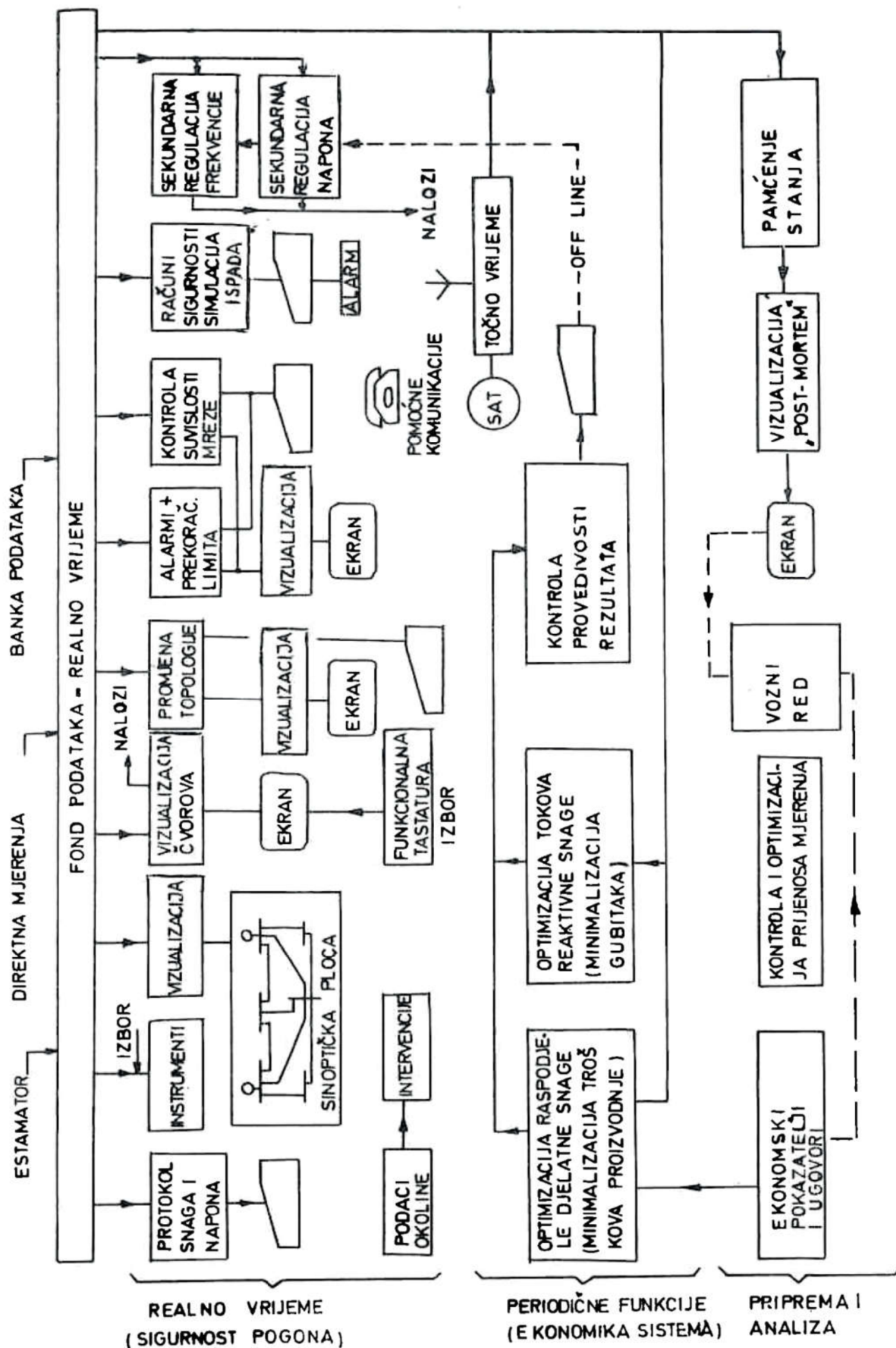
1.4.4 Primjena estimacije stanja u realnom vremenu

Uloga estimacije stanja, uz napomene iz 1.4.1, pobliže je ilustrirana na sl. 72. Slika 72a prikazuje moguću organizaciju pripreme podataka za dispečerske funkcije. Iz elektroenergetskog sistema (procesa) prenose se mjerenja. Osim njih uzimaju se iz banke podataka još i pseudomjerenja, kako bi se postigla homogenost redundancije. Iz banke podataka uzimaju se još i ostali potrebni podaci o kvaliteti mjerenja (standardne devijacije), o parametrima grana, te vjerojatni vektor stanja. Skup podataka se kroz "data processing" sortira, korigira i selektira, ukratko priprema u oblik pogodan za daljnju obradu. Na proces sredjivanja podataka može se i manuelno utjecati. Time je izvršena priprema podataka za račun estimacije (pretpostavljena je nelinearna estimacija po metodi WLS). Estimacija stanja podržana je povremenim paralelnim proračunom tokova i pripadnih kovarijanci. Estimiranim podacima stanja dodaju se još podaci direktnih mjerenja za potrebe regulacije, dojave promjena u mreži (npr. ispadi magistralnih vodova), ostali alarmi i potrebni podaci iz banke podataka. Time je formiran fond podataka potreban za dispečerske funkcije. Podaci iz procesa se obnavljaju u realnom vremenu. Moguće funkcije dispečera i njegovih pomoćnih sredstava prikazane su na sl. 72b, koja je nastavak slike 72a.

- a) Funkcije orijentirane na sigurnost i uredan rad sistema. Ove se funkcije odvijaju u realnom vremenu.



Slika 72a - Organizacija pripreme podataka za dispečera uz korištenje estimacije



Slika 72b - Funkcije dispečerskog centra - pregled

Energetski podaci (djelatne i jalove snage) i naponi se periodično automatski protokoliraju. Radi trajnog pregleda nad cijelom mrežom vrši se vizualizacija na sinoptičkoj ploči, koja sadrži informacije o trenutnoj topologiji mreže i eventualne grube pokazatelje o tokovima snaga. Na određeni broj instrumenata (pokaznih ili registrirajućih) dovode se najvažnija mjerenja po izboru, te zbirna mjerenja (npr. suma radne i jalove proizvodnje, suma radne i jalove razmjene sa susjednim sistemima i slično). Putem vizualizacije čvorova može se pozvati na ekran detaljna shema pojedinog postrojenja sa ispisanim podacima o naponima, snagama, strujama, položajima regulacionih sklopki transformatora, uklopnim stanjima i slično. Putem funkcionalne tastature može se vršiti upravljanje sklopnim elementima pozvanog postrojenja.

Promjena topologije, bez obzira na razlog promjena, kao i ostali alarmi, prikazuju se ("vizualiziraju") na posebnom ekranu i istovremeno protokoliraju na pisaču. Pod alarmima podrazumijevamo sve dojave nenormalnih pojava, kao npr. kvar u kompresorskom postrojenju, provala sigurnosne ograde, itd.

Automatski nadzor nad radom mreže sastoji se u kontroli, dojavi i zapisu prekoračenja unaprijed utvrdjenih limita (npr. preopterećenja vodova, prekoračenja napona i slično), te dodatne kontrole (npr. kontrole suvislosti mreže, kontrole efikasnosti uzemljenja).

Periodično ili nakon promjene topologije, starta "račun sigurnosti". Pretpostavlja se niz mogućih daljnjih ispada i računom ispituje da li u nekim slučajevima dolazi do preopterećenja, ugrožavanja stabilnosti, nedovoljne rezerve u proizvodnji i slično. Dodatno se može kontrolirati snaga kratkog spoja kod pojedinih konfiguracija. Ako se ustanovi da postoji potencijalna opasnost za sigurnost sistema, to se zapisuje i daje alarm. Dispečer može preventivno intervenirati upućivanjem rezervne elektrane, preraspodjelom proizvodnje i slično, i tako spriječiti mogući poremećaj.

U ovaj niz funkcija spada i sekundarna regulacija frekvencije

(djelatne snage) i sekundarna regulacija napona (reaktivne snage).

Mimo elektroprivrednog informacionog sistema dispečer može dobiti i "podatke okoline", uglavnom meteorološke podatke. Tako kod pojave kiša može ubrzati pražnjenje akumulacija radi izbjegavanja vodnih valova, kod opasnosti od zaledjivanja vodiča može dodatno opteretiti vodove reaktivnom snagom itd.

- b) Funkcije orjentirane na ekonomičnost rada sistema. Ove funkcije se obavljaju periodično, najviše svakog sata.

Algoritmi optimalne raspodjele djelatne snage na pojedine elektrane određuju režim proizvodnje djelatne snage uz minimum troškova. Dopunski podaci su cijene goriva, normativi utroška goriva, cijena energije u razmjeni s drugim sistemima, troškovi tranzita energije i slično.

Algoritam optimalne raspodjele proizvodnje jalove snage određuje takvu raspodjelu, koja daje minimalne gubitke u mreži.

Rezultati obaju algoritama provjeravaju se u pogledu provedivosti, tj. da li njihova primjena dovodi do preopterećenja vodova, do loših naponskih prilika, do smanjenja sigurnosti, iscrpljenja akumulacija i slično. Ako su rezultati primjenjivi, dispečer zadaje nove željene vrijednosti podsistemu regulacije.

- c) Pripreme. Registrirane informacije iz prethodnih faza rada koriste se za pripremu i planiranje budućeg rada (izrada voznog reda).
- d) Analize. Registrirane informacije dozvoljavaju naknadne analize pogonskih stanja i događaja, koje se koriste za poboljšanje budućeg rada, za poboljšanje organizacije pripreme podataka, za optimiranje prijenosa mjerenja po broju i lokaciji, za otkrivanje neispravnih elemenata (npr. uređaja zaštite) itd.
- e) Pomoćne funkcije su telefonska mreža kao dopunski put razmjene informacija (uvjet je postojanje sugovornika) i služba točnog vremena. Iz neke javne službe točnog vremena (u SFRJ tek u formiranju) dobivaju se periodički impulsi, kojima se automatski korigira vrijeme lokalnih satova (npr. satova u elektroničkim računalima).

Prethodni prikaz dao je pregled praktički svih mogućih funkcija u dispečerskom centru (centru SDV). Stvarni broj ugrađenih funkcija i njihova organizacija ovisit će o ulozi centra po hijerarhijskom značaju. Težište pojedinih funkcija (što ne isključuje i druge funkcije) biti će orijentirano ovako:

Niži hijerarhijski nivo: nadzor i upravljanje

Srednji hijerarhijski nivo: nadzor, kontrola sigurnosti, sekundarna regulacija

Viši hijerarhijski nivo: općeniti nadzor, koordinacija razmjene među sistemima, ekonomski dispečing, rezerva sistema, tercijarna regulacija.

Estimacija stanja nalazi primjenu na svim nivoima.

Važna karika u radu operatora-dispečera su sredstva za komunikaciju čovjek-sistem. U našem prikazu se primjenjuju:

- Sinoptička ploča, opisana ranije, omogućuje jednosmjernu komunikaciju (prikaz za dispečera).
- Ekran sa funkcionalnom tastaturom omogućuje dvosmjernu komunikaciju. Radi bolje preglednosti ekrani su u boji. Ako nema posebnog ekrana za dojavu alarma, rezerviran je dio površine svakog višenamjenskog ekrana za prikaz alarma bez obzira za koju funkciju se ekran trenutno koristi. Uobičajen je i prikaz točnog vremena na ekranu. Ekran su obično semigrafički (ograničena mogućnost prikaza simbola).
- Pisači u principu omogućuju dvosmjernu komunikaciju, ali se koriste pretežno samo za automatski zapis prispjelih podataka. Datum se zapisuje na početku stranice, a prispjeloj informaciji se dodaje odgovarajuće točno vrijeme nastanka. Za događaje koji zahtijevaju naknadnu preciznu analizu uzroka i posljedica (npr. ispadi usljed djelovanja zaštite), pridodaje se točno vrijeme u formatu

17.22.19.14
h min s

Alfanumerički pisači koriste brojke, slova i znakove, pa omogu-

čuju lako i pregledno čitanje zapisa ("čisti tekst"). Numerički pisači koriste samo brojke i neke znakove, pa je zapis šifriran, što otežava brzo čitanje zapisa.

1.4.5 Prilog objašnjenju metode najmanjih kvadrata

Primjena matematike na razna praktična pitanja često dovodi do slučaja "predodređenih problema" odnosno do proturječnih sistema, npr. sa većim brojem jednažbi nego nepoznanica.

Općenito, neka je zadano m jednažbi sa n nepoznatih ($m > n$)

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = y_i ; \quad i = 1, 2, \dots, m \quad 1-179$$

Treba naći vrijednost nepoznanica $x_1, x_2, \dots, x_n$ tako da vrijednosti funkcije

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) - y_i = \xi_i ; \quad i = 1, 2, \dots, m \quad 1-180$$

najmanje odstupaju od nule.

Ovaj uvjet se može postaviti na više načina. Princip ili metoda najmanjih kvadrata postavlja kao uvjet da suma kvadrata pogreška bude najmanja, tj.

$$\xi_1^2 + \xi_2^2 + \dots + \xi_m^2 = \text{MIN} \quad 1-181$$

Neka je zadan niz linearnih jednažbi prema 1-179:

$$a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \dots + a_{1n} x_n - y_1 = 0$$

$$a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + \dots + a_{2n} x_n - y_2 = 0$$

.....

$$a_{m1} x_1 + a_{m2} x_2 + \dots + a_{mn} x_n - y_m = 0$$

Za metodu najmanjih kvadrata moramo naći funkciju:

$$\begin{aligned}
 F(x_1, x_2 \dots x_n) = & (a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \dots + a_{1n} x_n - y_1)^2 + \\
 & + (a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + \dots + a_{2n} x_n - y_1)^2 + \\
 & + \dots \dots \dots + \\
 & + (a_{m1} x_1 + a_{m2} x_2 + \dots + a_{mn} x_n - y_m)^2 \quad 1-182
 \end{aligned}$$

Uvjeti za ekstrem ove funkcije jesu:

$$\frac{\partial F}{\partial x_1} = 0 \quad , \quad \frac{\partial F}{\partial x_2} = 0 \quad , \quad \dots \quad \frac{\partial F}{\partial x_n} = 0 \quad 1-183$$

U našem slučaju ovi uvjeti daju n jednažbi sa n nepoznanica:

$$\begin{aligned}
 & a_{11}(a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \dots + a_{1n} x_n - y_1) + a_{21}(a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + \\
 & + \dots + a_{2n} x_n - y_2) + \dots \dots \dots + a_{m1}(a_{m1} x_1 + a_{m2} x_2 + \dots + \\
 & + a_{mn} x_n - y_m) = 0 \\
 & \dots \dots \dots \\
 & a_{1n}(a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \dots + a_{1n} x_n - y_1) + a_{2n}(a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + \\
 & + \dots + a_{2n} x_n - y_2) + \dots \dots \dots + a_{mn}(a_{m1} x_1 + a_{m2} x_2 + \dots + \\
 & + a_{mn} x_n - y_m) = 0 \quad 1-184
 \end{aligned}$$

koje treba riješiti nekom poznatom metodom

Primjer 1.5 Zadane su jednađžbe:

$$x_1 + x_2 - 1 = 0$$

$$x_1 + x_2 - 2 = 0$$

$$2x_1 - 3x_2 + 1 = 0$$

Naći rješenje u metodi najmanjih kvadrata:

$$F(x_1, x_2) = (x_1 + x_2 - 1)^2 + (x_1 + x_2 - 2)^2 + (2x_1 - 3x_2 + 1)^2$$

Parcijalne derivacije ove funkcije po x_1 i po x_2 daju prema 1-183

$$2(x_1 + x_2 - 1) + 2(x_1 + x_2 - 2) + 4(2x_1 - 3x_2 + 1) = 0$$

$$2(x_1 + x_2 - 1) + 2(x_1 + x_2 - 2) - 6(2x_1 - 3x_2 + 1) = 0$$

Rješenje je ovih jednađžbi:

$$\underline{x_1 = 0,7}$$

$$\underline{x_2 = 0,8}$$

Ako kombiniramo iz zadanih jednađžbi suglasne sisteme dobit ćemo

a) $x_1 + x_2 - 1 = 0$

$$2x_1 - 3x_2 + 1 = 0$$

$$\underline{x_1 = 0,4}$$

$$\underline{x_2 = 0,6}$$

b) $x_1 + x_2 - 2 = 0$

$$2x_1 - 3x_2 + 1 = 0$$

$$\underline{x_1 = 1}$$

$$\underline{x_2 = 1}$$

Aritmetička sredina rješenja a) i b) daje

$$x_1 = \frac{0,4 + 1}{2} = 0,7$$

$$x_2 = \frac{0,6 + 1}{2} = 0,8$$

dakle upravo rješenje koje smo dobili po metodi najmanjih kvadrata. Zato se ova metoda i naziva još i metodom najmanjih aritmetičkih sredina.

Ako zadane jednačbe nisu linearne nego su izražene proizvoljnim funkcijama, problem se takodjer svodi na problem linearnih jednačbi lineariziranjem u okolišu rješenja razvijanjem funkcija u Taylorov red. Radi zanemarenja viših članova reda jednačbe rješavamo iterativnih postupkom (vidi "Mreže I", 7.5.2).

$$\begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right| (k) & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right| (k) \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right| (k) & \dots & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right| (k) \\ \dots & \dots & \dots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right| (k) & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right| (k) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(k)} \\ \Delta x_2^{(k)} \\ \dots \\ \Delta x_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 - f_1(x_1^{(k)} \dots x_n^{(k)}) \\ y_2 - f_2(x_1^{(k)} \dots x_n^{(k)}) \\ \dots \\ y_n - f_n(x_1^{(k)} \dots x_n^{(k)}) \end{bmatrix}$$

1-185

Sistem linearnih jednačbi može biti rješen na bilo koji način. Ako $\Delta x^{(k)}$ ne zadovoljava (preveliko), ulazimo u novu iteraciju s korigiranim rješenjem

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)} \quad 1-186$$

Računamo $\Delta x^{(k+1)}$ i ponavljamo postupak dok Δx ne postane dovoljno maleno.

2. SMETNJE U STACIONARNOM POGONU MREŽE

Osnovni uvjeti kvalitete električne energije definirani su sa:

- konstantnost napona
- konstantnost frekvencije
- kontinuitet isporuke po količini i neprekidnosti.

Pošto u jednom tehničko - ekonomskom sistemu, kao što je elektroenergetski, rad bez rizika nije moguć, navedene uvjete kvalitete nije moguće potpuno ispuniti, pa se utvrđuju tolerancije unutar kojih se određene vrijednosti mogu kretati, a da se još uvijek smatraju zadovoljavajućim.

Osim navedenih uvjeta kvalitete postoje još i drugi, koji se odnose na "onečišćenje" električne energije odnosno njenih komponenata, struje i napona. Ako se udio reaktivne snage izostavi iz ove problematike kao neminovan, ali rješiv problem, te ako se smetnje uslijed kratkih spojeva, takodjer više ili manje uspješno savladive i uz to rijetke, uvrste u uvjet kontinuiteta isporuke, preostaje da se još pozabavimo s tri vrste smetnji koje se javljaju u stacionarnom pogonu, a kvantificirane takodjer predstavljaju mjerila za kvalitetu električne energije. Te smetnje su:

- a) Izobličenja idealne sinusoide napona uslijed cirkulacije struja viših harmonika osnovne frekvencije u mreži, poznatija pod nazivom izobličenje (distorzija) napona;
- b) Brza kolebanja napona periodičnosti otprilike 0,5 do 25 Hz, a pošto se manifestiraju vidljivim treperenjem rasvjete, nazivaju se flickeri (flicker = treptaj, trzaj; engl.);
- c) Odstupanje trokuta odnosno zvijezde trofaznog napona od idealnog oblika, nazvano nesimetrija napona.

Pri razmatranju ovih smetnji treba imati na umu izvjesne okolnosti, koje ove probleme, u osnovi teoretskog karaktera, svode na tipično tehnički način promatranja. Te okolnosti, od kojih neke imaju karakter realne pretpostavke, možemo svesti na slijedeće:

- Pod a), b) i c) navedene pojave kao i one na početku navedene

kao odstupanja od idealne kvalitete su onoliko ozbiljne i predstavljaju onoliko stvarnu smetnju, koliko poteškoća izazivaju bilo potrošačima bilo samoj mreži, a ne prema objektivno utvrđenom (mjerenom ili izračunatom) intenzitetu. Moglo bi se, prema tome, pretpostaviti postojanje neke nenormalne pojave, koja međutim ne izaziva nikakve negativne posljedice u sistemu. Takva pojava ne bi se mogla nazvati smetnjom u tehničkom smislu.

- Pod a), b) i c) navedene smetnje ne nastaju radom sistema za snabdijevanje električnom energijom, već priključivanjem odredjenih kategorija potrošača ili uređaja. Pretpostavlja se, dakle, da u fazi proizvodnje, prijenosa i distribucije trofazne električne energije nema takvih "generatora smetnji". Pažljivije gledano, to nije razumljivo samo po sebi. Tako, na primjer, nazubljenost statora i raspored njegovog namotaja može izazvati pojavu viših harmonika napona generiranih na samom izvoru, a više harmonike sadrži i struja magnetiziranja energetske transformatora. Više harmonike generiraju i neki statički uređaji za kompenzaciju reaktivne snage. Nadalje, diesel-agregati s nedovoljnom zamašnom masom mogu izazvati kolebanja napona usporediva s flickerima. I konačno, nesimetrije u mreži (neujednačenost induktiviteta i kapaciteta vodova po fazama, nesimetrija magnetske jezgre učinskih transformatora) mogu izazvati nesimetrije napona. U stvarnim sistemima te su smetnje, međutim, svedene na nezamjetljivu mjeru bilo tehničkim sredstvima (prigušni namoti generatora, preplitanje vodova), bilo prigušujućim djelovanjem same mreže.

- Kod analitičkog pristupa nekom od navedenih problema odstupa se od egzaktnih fizikalnih i matematskih metoda, jer bi njihova primjena na velike sisteme dovela do nepotrebno složenih i dugotrajnih proračuna. Često se posize za statističkom ocjenom vjerojatnosti negativnog utjecaja smetnje ili se pak vrše analize uz znatna zanemarenja.

- U sva tri slučaja geneza smetnji je istovjetna. Na stezaljke potrošača, koji izaziva smetnju, priključen je simetrični trofazni sinusoidalni napon. Potrošač zbog njemu svojstvenih karakteristika uzima iz mreže nesimetričnu, izobličenu ili brzo promjenjivu struju, ukratko "nečistu" struju. Nečistoća struje će se, prema prili-

kama, manifestirati u postojanju inverzne komponente (kod nesimetrije), viših harmonika (kod izobličenja) ili brzih varijacija iznosa. Struje nekih potrošača sadrže istovremeno dva od navedenih tipova ili čak sva tri tipa "nečistoća". Takav potrošač je, dakle, "generator struje smetnje". Struje smetnje cirkuliraju u mreži i na odgovarajućim reaktancijama (direktnim, inverznim ili nultim i to za odgovarajuću frekvenciju) izazivaju padove napona, koji se superponiraju prvobitnom idealnom naponu. Tako i napon postaje nečist.

- Iz prethodnog stava se logično zaključuje, da u potpuno krutoj mreži ne može doći do onečišćenja napona uslijed struja smetnji, jer na impedanciji $\bar{Z} = 0$ ne može nastati pad napona. Iz toga dalje slijedi, da će smetnje u jačoj i razvijenijoj mreži biti manje izražene.

- Intenzitet smetnji, što ih određeni potrošač izaziva, može se kvantitativno utvrditi jedino mjerenjem (ili proračunom) struje dotičnog potrošača. Pošto je cilj analiza da se na temelju mjerenja utvrdi utjecaj smetnji na druge potrošače, uobičajeno je da se mjerenje struje vrši u najbližem zajedničkom čvoru iz kojega se, osim potrošača koji izaziva smetnje, napajaju i drugi potrošači. Mjerenje struje mora se vršiti sredstvima, koja omogućuju identifikaciju smetnji po intenzitetu i vrsti.

- Mjerenje napona obično ne daje reprezentativne podatke, prvo zato, što je relativni intenzitet smetnje u naponu bitno manji nego u struji i drugo zato, što ne postoji izvjesnost da su u naponu sadržane smetnje izazvane radom promatranog potrošača, a ne još i radom nekih drugih potrošača. Čak ni uspoređivanjem rezultata dobivenih mjerenjem napona prije i poslije uključivanja promatranog potrošača nije moguće pouzdano zaključiti na udio tog potrošača u pojavi ukupne smetnje.

- Intenzitet smetnje je najveći u neposrednom okolišu potrošača-generatora smetnje, a opada idući dalje u mrežu odnosno prema elektranama. Iz toga slijedi, da će se istraživanje smetnje moći ograničiti na neposredni okoliš mjesta, gdje ona nastaje. Isto tako će se tehničke mjere za suzbijanje smetnje primijeniti na mjestu

njenog nastanka i ako su te mjere na tom mjestu efikasne, smetnja je sigurno suzbijena u cijeloj mreži.

U daljnjem tekstu će u nužnom obimu biti obradjeni nastanak, manifestiranje i mjere za otklanjanje svake od navedenih smetnji posebno.

2.1 IZOBLIČENJE KRIVULJE STRUJE I NAPONA (DISTORZIJA)

U matematsku interpretaciju ući ćemo samo onoliko, koliko je potrebno za razumijevanje problema. Tako ćemo npr. u standardnim slučajevima moći izostaviti istosmjernu (konstantnu) komponentu struje, jer se ona obično ne pojavljuje ili je zanemariva. Zadržati ćemo označavanje faza sa a , b i c . Sa f ćemo označiti numeričku, a sa $\omega = 2\pi f$ kružnu frekvenciju. Sa $N = 1, 2, 3 \dots$ ćemo obilježiti rang harmonika, što znači da je broj N cijeli višekratnik osnovne frekvencije. Vidjet ćemo, da viši harmonici tvore, ovisno o njihovom rang, simetrične trofazne sustave direktnog, inverznog ili nultog sistema. Pošto su viši harmonici također sinusoidalni, moći ćemo i na njih primijeniti simbolični račun. Pri tome nas neće zanimati početni fazni pomak vektora $\bar{V}_{aN}$ prema vektoru osnovnog vala $\bar{V}_{a1} = \bar{V}_a$ ili prema realnoj osi. Taj fazni pomak u okviru našeg razmatranja ne igra nikakvu ulogu, pa ga nećemo ni bilježiti. Nasuprot tome, fazni kut od 120° među pojedinim fazama morati ćemo prikazati uvijek, kada sistem promatramo trofazno.

Za harmonik ranga N vrijediti će, uz uvažavanje izloženoga, za napon po fazama (a analogno i za struje) slijedeći izrazi:

$$\begin{aligned}\bar{V}_{aN} &= V_N e^{jN\omega t} \\ \bar{V}_{bN} &= V_N e^{jN(\omega t - \frac{2\pi}{3})} \\ \bar{V}_{cN} &= V_N e^{jN(\omega t - \frac{4\pi}{3})} \quad N = 1, 2, 3 \dots\end{aligned} \quad 2-1$$

Za $N = 1$ dobivamo osnovni harmonik.

Ako sada ove izraze izrazimo za konkretne rangove N , dobivamo:

Za $N = 2$

$$\begin{aligned}\bar{V}_{a2} &= V_2 e^{j2\omega t} \\ \bar{V}_{b2} &= V_2 e^{j(2\omega t - \frac{4\pi}{3})} \\ \bar{V}_{c2} &= V_2 e^{j(2\omega t - \frac{2\pi}{3})}\end{aligned}\quad 2-2$$

Za $N = 3$

$$\bar{V}_{a3} = \bar{V}_{b3} = \bar{V}_{c3} = V_3 e^{j3\omega t} \quad 2-3$$

i tako redom dalje.

Obratimo li pažnju na eksponent od e , lako možemo zaključiti da osnovni harmonik ($N = 1$) tvori direktni (d), drugi harmonik ($N = 2$) inverzni (i), a treći harmonik ($N = 3$) nulti (o) trofazni sistem. Općenito, direktni sistem tvore harmonici ranga

$$N = 3n + 1 \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad 2-4$$

inverzni sistem tvore harmonici ranga

$$N = 3n - 1 \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad 2-5$$

a nulti sistem tvore harmonici ranga

$$N = 3n \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad 2-6$$

tako imamo pripadnost odredjenom sistemu za prvih nekoliko harmonika:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25			
d	i	o	d	i	o	d	i	o	d	i	o	d	i	o	d	i	o	d	i	o	d	i	o	d	i	o	d

itd.

itd.

Niz viših harmonika, čiji je početak prikazan gore, možemo dakle podijeliti u tri skupine prema tome da li stvaraju direktni, in-

verzni ili nulti sistem. Tako će harmonici struje, koji stvaraju direktni sistem, uzrokovati odgovarajuće padove napona na direktnim impedancijama grana u mreži, pri čemu treba uzeti impedanciju koja odgovara frekvenciji dotičnog harmonika. Ako impedancija grane za osnovni harmonik (50 Hz) iznosi $\bar{Z}_1 = R + j\omega L$, onda će za N-ti harmonik impedancija iste grane iznositi $\bar{Z}_N = R + jN\omega L$ pod pretpostavkom, da je grana (pa i cijela mreža) u tom pogledu idealno linearna, što nije uvijek slučaj. Analogno će inverzni harmonik struje izazvati pad napona na inverznoj impedanciji, a nulti na nultoj. U odgovarajućim analizama se često uzima s dovoljnom točnošću, da su direktne i inverzne reaktancije međusobno jednake.

Niz harmonika možemo podijeliti u tri skupine i po drugom kriteriju:

- a) Parni harmonici (N paran broj) struje (a preko odgovarajućih impedancija i napona) mogu nastati samo uslijed takve smetnje u mreži, koja se ne ispoljava identično na obje poluperiode osnovnog vala. Parni harmonici se rijetko javljaju (izazivaju ih na pr. ispravljači sa poluvalnim ispravljanjem) i zbog toga se rijetko razmatraju, premda ti harmonici prema navodima u literaturi izazivaju teže posljedice od ostalih.
- b) Svi harmonici djeljivi sa 3 (N broj djeljiv sa 3) tvore nulti sistem, pa se po tome izdvajaju od ostalih. Najčešće nastaju prilikom magnetiziranja zasićenih željeznih jezgri, pri čemu je najviše izračen treći harmonik. Struje harmonika ove skupine zatvaraju se kroz mjesta, gdje je nulti sistem spojen s nulom sistema. Pri tome namotaji transformatora spojeni u trokut igraju odlučujuću ulogu, dodatno i zato što omogućuju cirkulaciju harmonika $N = 3$ nastalog magnetiziranjem jezgre.
- c) U treću skupinu spadaju preostali harmonici, tj. oni kojima je rang neparan broj, a tvore direktni ili inverzni sistem. U analizama se najčešće tretiraju.

Svaki harmonik ranga N je idealna sinusoida frekvencije Nf . Harmonici imaju različite amplitude, s time da im, u pravilu, s rastućim N amplituda naglo opada, pri čemu se neke skupine (npr. parni harmonici) obično uopće ne pojavljuju. U svakom slučaju je prisu-

tan osnovni harmonik ($N = 1$, $f = 50$ Hz), kojemu je amplituda ujedno i najviša.

Sumiranjem svih istovremeno postojećih harmonika (npr. napona) u fazi a , dobivamo (za slučaj da nema istosmjerne komponente) konačnu krivulju momentalne vrijednosti napona

$$u_a = \operatorname{Re} \sum_{N=1}^{\infty} \sqrt{2} U_N e^{j(N\omega t + \phi_N)} \quad 2-7$$

gdje je: N - rang harmonika

$\omega = 2\pi f$ - kružna frekvencija osnovnog harmonika

U_N - efektivna vrijednost N -tog harmonika

ϕ_N - fazni kut N -tog harmonika u odnosu na realnu os

Analogne izraze, uvaživši izraze 2-1, možemo dobiti i za u_b i u_c .

Krivulja u_a je periodična krivulja, koja više ili manje odstupa od idealne sinusoide $u_a = \operatorname{Re} \sqrt{2} U_1 e^{j(\omega t + \phi_1)}$. Kažemo da je sinuso-oda izobličena. Uobičajena mjera za izobličenje je faktor izobličenja definiran sa

$$D = \frac{\sqrt{\sum_{N=2}^{\infty} U_N^2}}{U_1} \quad 2-8$$

Poznavanje faktora izobličenja struje ili napona u mreži samo je ograničeno indikativno. Faktor izobličenja sadrži naime sve harmonike, bez obzira na nejednaki intenzitet smetnji, što ih harmonici raznih skupina izazivaju.

2.1.1 Nastanak viših harmonika struja

Potrošači, koji zbog svojih svojstava uzimaju izobličenu struju iz mreže, predstavljaju generatore viših harmonika. U tom se pogledu oni u pravilu ponašaju kao idealni strujni izvori. U suvremenoj strukturi potrošnje električne energije tipični takvi potrošači su usmjerivači (konvertori), bilo da rade kao ispravljači (pretvaranje izmjenične snage u istosmjernu) ili kao izmjenjivači (pretva-

ranje istosmjerne snage u izmjeničnu). Velik broj reguliranih motornih pogona u procesnoj industriji, valjaonicama i drugdje napaja se danas takvim uređajima. Po jediničnoj snazi daleko ih nadmašuju uređaji za napajanje velikih pogona elektrolize (npr. u proizvodnji aluminijske). U ovu kategoriju spadaju i statički uređaji za kompenzaciju reaktivne snage s tiristorskom regulacijom.

Generatori viših harmonika struja su i strujni krugovi induktivno spregnuti sa željeznim magnetskim krugovima zbog nelinearne karakteristike magnetiziranja, pogotovo ako im se željezo magnetizira do zasićenog dijela karakteristike. Ovamo spadaju neki statički uređaji za reguliranu kompenzaciju reaktivne snage, te svi učinkoviti transformatori. Učinkoviti transformatori, međutim, u normalnim uvjetima rada (kad napon ne prekoračuje bitno nazivnu vrijednost) neznatno doprinose pojavi viših harmonika struje.

U kategoriju intenzivnih generatora viših harmonika struje treba na kraju uvrstiti još i elektrolučne peći, od kojih danas najveće dostižu jediničnu nazivnu snagu i preko 100 MVA. Ovdje do izobličenja struje dolazi uslijed nelinearnog otpora električnog luka, koji se iznova pali i gasi u svakoj poluperiodi. Intenzitet izobličenja jako je ovisan o namjeni elektrolučne peći, kao i o trenutnom režimu rada.

Pošto su usmjerivači najintenzivniji generatori viših harmonika struje, daljnja će se razmatranja osloniti na promatranje njihovog ponašanja.

Prvenstveno se postavlja pitanje spoja usmjerivača, jer o njemu ovisi, koje više harmoničke članove možemo očekivati u dijagramu struje. U tom su pogledu najneugodniji jednofazni poluvalni ispravljači, koji na istosmjernoj strani imaju priključen veliki kapacitet. Takvi ispravljači opterećuju izmjeničnu mrežu kratkotrajnim oštrim impulsima struje, i to samo u svakoj drugoj (npr. pozitivnoj) poluperiodi, pa će se u harmoničkoj analizi pojaviti i istosmjerna komponenta struje. Primjenjuju se npr. za napajanje televizijskih prijemnika. Intenzitet smetnje je relativno velik, ali po apsolutnom iznosu malen zbog male jedinične snage trošila (200...400 VA), pa sa stanovišta analize energetske sistema nema

posebni značaj. Zbog toga ćemo se ograničiti na promatranje usmjerivača u mosnom spoju.

Brojem grana u usmjerivačkom (ventilskom) krugu definiran je tzv. pulsni broj ili broj pulsacija koji označujemo sa p . Jednofazni Graetz-ov spoj ima $p = 4$ (sl.73a), a trofazni $p = 6$ (sl.73b). Kombinacijom dvaju trofaznih spojeva (većinom serijskom) uz odgovarajući fazni pomak, koji se postiže izborom grupe spoja napojnih transformatora, dobivamo usmjerivač kojemu $p = 12$ (sl.73c). Većina trofaznih usmjerivača ima spoj po sl.73b i 73.c. Kombinacijom triju i više usmjerivačkih grupa prema sl.73b, uz odgovarajuće fazno pomicanje na izmjeničnoj strani koristeći i spoj z (cik-cak), može se postići $p = 18$, $p = 24$ itd.

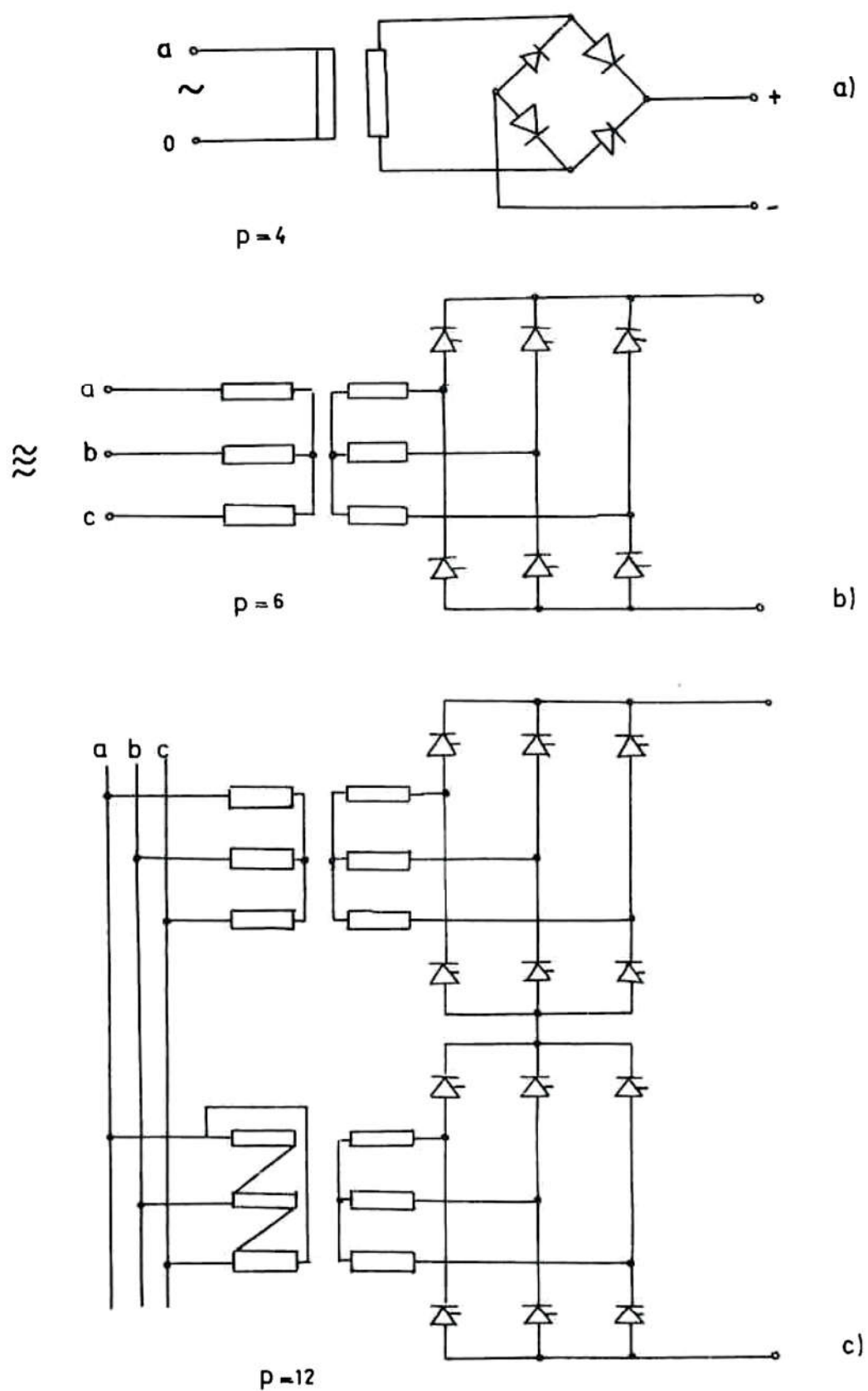
Ovisno o broju p , koji je definiran spojem usmjerivača, naći ćemo u njegovoj struji opterećenja na izmjeničnoj strani osim osnovnog harmonika ($N = 1$) još i harmonike

$$N = np \pm 1 \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad 2-9$$

Vidimo da sa rastućim p otpadaju pojedini harmonici, i to upravo oni nižeg ranga koji su, kao što ćemo vidjeti, po amplitudi najintenzivniji. Tako će spoj na sl.73b sa $p = 6$ generirati harmonike $N = 5, 7, 11, 13, 19, 23, 25, \dots$, a spoj na sl.73c harmonike $N = 11, 13, 23, 25, \dots$. Povoljno je, da se u harmonijskom spektru pojavljuje što manje harmonika, dakle da p bude što veći, ali se rijetko primjenjuju spojevi sa $p > 12$ zbog više cijene takvih uređaja po jedinici snage.

Osim harmonika, koje daje teoretski izraz 2-9, pojavljuju se i drugi harmonici, pa i parni, ali im je amplituda obično zanemariva. Ovi dodatni harmonici pojavljuju se uslijed raznih neizbježivih smetnji u radu usmjerivača, npr. uslijed neujednačene regulacije pojedinih tiristora.

Ako je I_1 efektivna vrijednost osnovnog harmonika struje opterećenja usmjerivača ($N = 1$, $f = 50$ Hz), analogne vrijednosti ostalih harmonika, koje možemo očekivati prema izrazu 2-9, biti će



Slika 73 - Uobičajeni usmjerivački spojevi

$$I_N = \frac{I_1}{N} k \quad (k < 1) \quad 2-10$$

Redukcioni faktor k ovisi o impedanciji (krutosti) mreže i o radnom stanju tiristora (kutu kašnjenja paljenja tiristora α zbog regulacije istosmjernog napona), te o prilikama u istosmjernom strujnom krugu. Za izvjesne vrijednosti $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ neki harmonici potpuno iščezavaju. U idealnom slučaju, tj. kada je impedancija mreže jednaka nuli (kruta mreža), kada je mreža linearna, kada $\alpha = 0$ i kada je istosmjerni napon potpuno izglađen (veliki induktivitet u istosmjernom krugu), redukcioni faktor k u izrazu 2-10 jednak je jedinici.

Ako je na mrežu u istom čvoru priključeno više potrošača koji generiraju harmonike struje, rezultirajuća vrijednost efektivne vrijednosti određenog harmonika struje samo je iznimno jednaka aritmetičkoj sumi pojedinačnih amplituda. U općenitom slučaju za i potrošača rezultirajući N -ti harmonik će biti

$$I_N = \sqrt[a]{\sum_{i=1}^i I_{Ni}^a} \quad (1 < a < 2) \quad 2-11$$

Za $a = 1$ imamo najveću rezultirajuću sumu harmonika (aritmetička suma), a za $a = 2$ najmanju sumu (geometrijska suma). Općenito se o eksponentu podudarnosti a može reći:

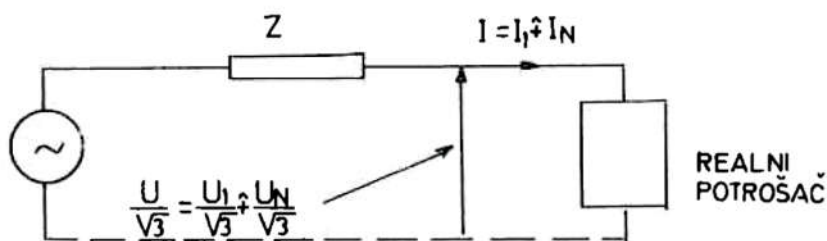
- veća različitost kategorija potrošača izazivača smetnji daje veći a ;
- veća različitost kuta paljenja α tiristora pojedinih usmjerivačkih grupa daju veći a ;
- različitost grupe spoja priključnih transformatora daje veći a ;
- istodobnost rada pojedinih takvih potrošača daje manji a ;

Ovim popisom su obuhvaćeni samo najvažniji utjecaji.

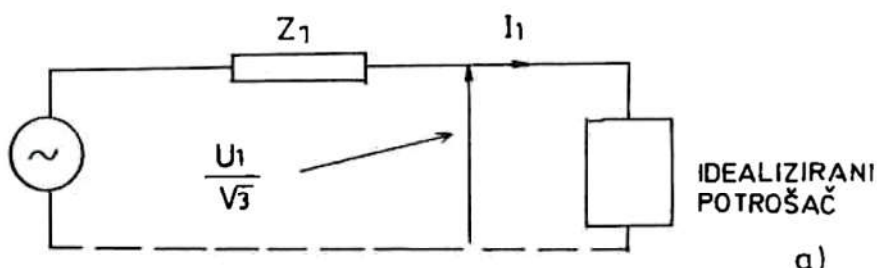
U nekom konkretnom slučaju a može biti različit za razne N .

2.1.2 Izračunavanje viših harmonika napona

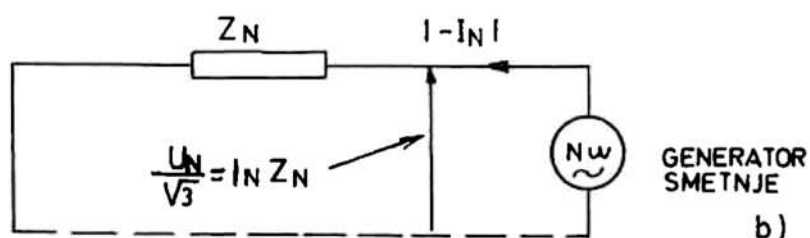
Potrošač, koji uzima izobličenu struju iz mreže ili takvu struju daje u mrežu, ponaša se kao generator viših harmonika struje. Viši harmonici struje određenog ranga cirkulirajući granama mreže izazivaju na linearnim impedancijama tih grana padove napona istog ranga, koji se superponiraju prvobitno sinusoidalnom (neizobličeno) naponu mreže. Ograničimo li razmatranje na jedan određeni harmonik ranga N , možemo realni sistem (sl.74) rastaviti u dva fiktivna sistema (sl.75a i b), koji se superponiraju. U realnom si-



Slika 74 - Ekvivalentna shema realne mreže s potrošačem koji uzima struju izobličenu harmonikom ranga N



a)



b)

Slika 75 - Mreža sa sl.74 rastavljena na dva fiktivna sistema

stemu potrošač uzima izobličenu struju I . U fiktivnom sistemu (sl.75a) potrošač je idealiziran na način, da opterećuje mrežu samo osnovnim harmonikom struje I_1 . U fiktivnom sistemu (sl.75b) potrošač generira struju višeg harmonika I_N i njime napaja mrežu koja je pasivna, pošto pretpostavljamo da nema drugih generatora elektromotorne sile ranga N odnosno izvora struje istog ranga.

Na slikama 74 i 75 cijela je mreža prikazana jednom nadomjesnom impedancijom. Smjer odnosno predznak struje na sl.75b je samo formalan, jer cilj analize nije da se utvrdi oblik krivulje napona U , već samo efektivna vrijednost napona U_N i njegov relativni ili procentualni odnos prema napunu U_1 .

Na sl.75b vidimo, da je mreža prikazana impedancijom Z_N , koja odgovara frekvenciji struje I_N . U linearnoj mreži

$$Z_N = |\bar{Z}_N| = \sqrt{R^2 + (N L)^2} = \sqrt{R^2 + (N X_1)^2} \quad 2-12$$

gdje je X_1 reaktancija kod osnovnog harmonika. Pri tome treba još voditi računa o tome da li harmonik tvori direktni, inverzni ili nulti trofazni sistem struja, pa ovisno o tome kod utvrđivanja vrijednosti Z_N poći od direktne, inverzne ili nulte impedancije mreže. Osim toga kod direktne reaktancije treba poći od subtranzijentne vrijednosti, pošto harmonici, barem u prvoj aproksimaciji, ne izazivaju reakciju armature.

Ovo se razmatranje odnosi samo na mreže koje sadrže omske i induktivne otpore. Mreže koje sadrže i kapacitete biti će, zbog mogućnosti pojave rezonantnih pojava, razmotrene kasnije.

Iz mnogih razloga, od kojih su neki već i navedeni (promjenjivost režima rada potrošača, nelinearnosti u mreži itd.), nemoguće je analize ove vrste izvršiti precizno, pa se tom cilju i ne teži. Stoga i početni podaci o mreži mogu biti približni. To nam dozvoljava, da ekvivalentnu impedanciju mreže Z_1 (sl.75a) s dovoljnom točnošću možemo izračunati iz snage kratkog spoja u promatranom čvoru, pa je onda

$$Z_1 \triangleq \frac{U^2}{S_k} = X_1 \quad 2-13$$

Kao što je poznato, vrijednost S_k ovisi o uklopnom stanju mreže. Za analizu smetnji treba Z_1 odrediti iz one snage trofaznog kratkog spoja S_k , koja je najmanja u razdoblju za koje se analiza vrši. Uzmemo li da su direktna i inverzna impedancija promatrane iz potrošačkog čvora praktički jednake, te da se harmonici ranga $N = 3n$ koji tvore nulte trofazne sisteme obično neće javljati, izrazi 2-12 i 2-13 će u većini slučajeva zadovoljavati, s time da će se u izrazu 2-12 moći zanemariti i omski otpor.

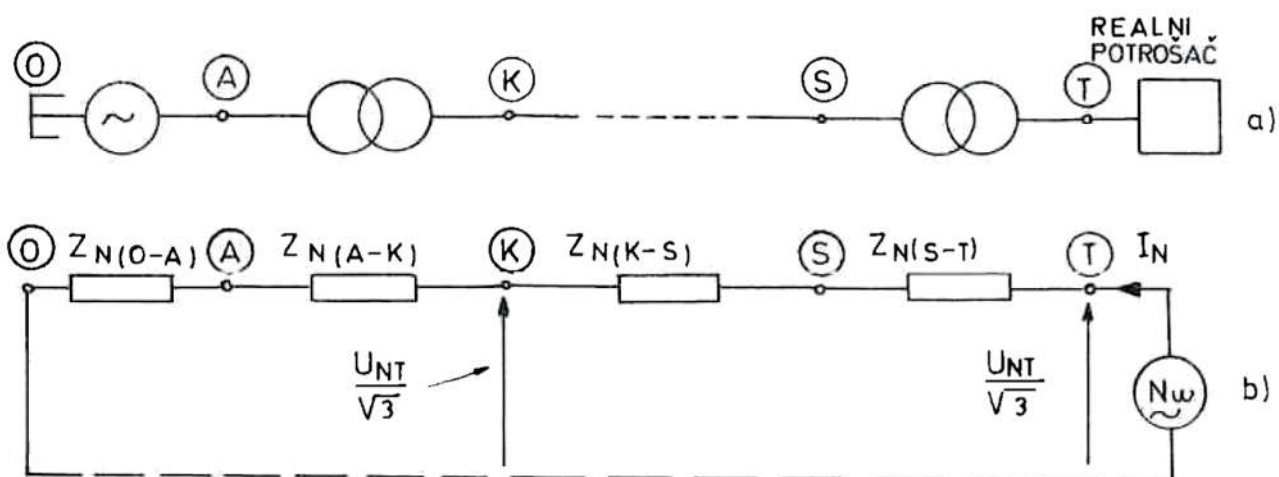
Moguća odstupanja zbog nelinearnosti mreže čine izraz 2-12 netočnim. U literaturi se mogu naći empirijski izrazi, pomoću kojih se ova odstupanja mogu uzeti u obzir.

Efektivnu vrijednost N -tog harmonika napona dobivamo (vidi sl.75b):

$$U_N = \sqrt{3} I_N Z_N \quad 2-14$$

i tako posebno za svaki N .

Efektivna vrijednost napona U_N opada, kada se udaljavamo od izvora smetnje, odnosno kada se približavamo generatoru osnovnog harmonika. To možemo ilustrirati prilikama u prijenosnom sistemu O-T na sl.76a, odnosno njegovoj ekvivalentnoj shemi za N -ti harmonik na sl.76b. Ako je U_{NT} napon izračunat po izrazu 2-14, onda će u K -tom



Slika 76 - Prijenosni sistem i ekvivalentna shema za N -ti harmonik

čvoru napon N-tog harmonika biti

$$U_{NK} = U_{NT} \frac{Z_{N(O-K)}}{Z_{N(O-T)}} \quad 2-15$$

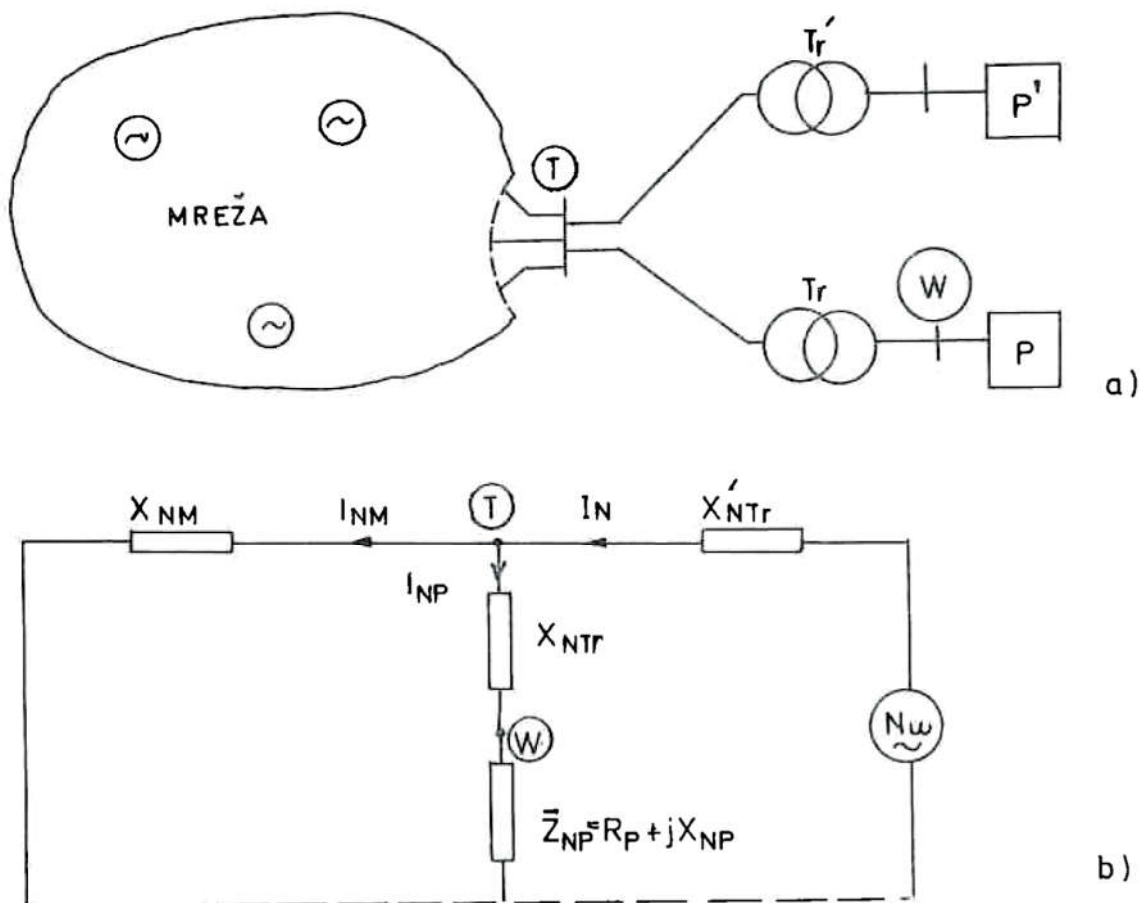
$Z_{N(O-T)}$ je ukupna impedancija za N-ti harmonik od zvjezdišta generatora do priključnog čvora potrošača koji uzima izobličenu struju, a $Z_{N(O-K)}$ je ukupna impedancija za N-ti harmonik od zvjezdišta generatora do čvora K, u kojem želimo odrediti napon U_N .

Primjer sa sl.76 služi samo za ilustraciju, jer su stvarne mreže redovito zamkaste. U tom slučaju treba primijeniti neki od poznatih algoritama za analizu mreže u kratkom spoju, koji može dati raspodjelu struje N-tog harmonika u granama i napone N-tog harmonika u čvorovima. Analiza se može izvršiti i na istosmjernom mrežnom analizatoru.

Opadanje napona harmonika sve dalje od izvora smetnje dozvoljava nam, da u većini slučajeva analizu ograničimo na neposredni okoliš tog potrošača. Ostali potrošači kao grane paralelne izvoru umanjuju intenzitet viših harmonika napona. Tako će se provjera moći ograničiti na čvor (npr. čvor T), iz kojega se osim potrošača koji izaziva smetnju napaja još jedan potrošač ili grupa potrošača (tzv. zajednički čvor). Ovakva analiza može se provesti vrlo jednostavno. Na sl.77a je prikazana realna mreža, a na sl.77b odgovarajući ekvivalent za N-ti harmonik.

X_{NM} je reaktancija mreže izračunata prema izrazima 2-12 i 2-13 iz snage kratkog spoja u čvoru T. P' je potrošač koji uzima izobličenu struju, u kojoj je sadržana struja N-tog harmonika I_N . P je normalni potrošač, koji se napaja iz zajedničkog čvora T. X_{NTr} je reaktancija prijenosnog sistema od T do W za N-ti harmonik, a Z_{NP} je impedancija potrošača P za N-ti harmonik, obje vrijednosti dobivene pomoću izraza 2-12. Izraz 2-14 za izračunavanje napona N-tog harmonika u čvoru T adaptiran za ovaj slučaj glasi (struju I_N postavljamo u realnu os):

$$\bar{U}_{NT} = \sqrt{3} I_N \frac{jX_{NM}(jX_{NTr} + \bar{Z}_{NP})}{jX_{NM} + jX_{NTr} + \bar{Z}_{NP}} \quad 2-16$$



Slika 77 - Shema mreže (a) i pripadni ekvivalent za N-ti harmonik (b)

U čvoru W, na koji je priključen potrošač P, napon N-tog harmonika će biti

$$\bar{U}_{NW} = \bar{U}_{NT} \frac{\bar{Z}_{NP}}{jX_{NTr} + \bar{Z}_{NP}} \quad 2-17$$

U mrežu dalje teče ostatak struje N-tog harmonika

$$\bar{I}_{NM} = I_N - \bar{I}_{NP} = I_N \frac{jX_{NTr} + \bar{Z}_{NP}}{jX_{NM}} \approx I_N \frac{X_{NTr} + X_{NP}}{X_{NM}} \quad 2-18$$

Primjer 2.1 Imamo sistem prema sl.77. Potrošač P je isključen. Potrošač P' je elektroliza aluminijsa sa 6-pulsnim ispravljačem, koji ima snagu $S_P' = 100$ MVA. Početna trofazna snaga kratkog spoja u čvoru T $S_k = 1250$ MVA. Napon čvora T je 110 kV.

Izvršiti analizu za peti i sedmi harmonik. Mreža je linearna.

$$I_1 = \frac{S_P'}{\sqrt{3}U} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 110} = 0,525 \text{ kA} = 525 \text{ A}$$

Prema 2-10 uz $k = 0,9$ imamo da je

$$I_5 = \frac{525}{5} \cdot 0,9 = 94,5 \text{ A}$$

$$I_7 = \frac{525}{7} \cdot 0,9 = 67,5 \text{ A}$$

Prema 2-13

$$X_{1M} = \frac{U^2}{S_k} = \frac{110^2}{1250} = 9,68 \text{ } |\Omega|$$

Prema 2-12

$$X_{5M} = 5 \cdot 9,68 = 48,4 \text{ } |\Omega|; \quad X_{7M} = 7 \cdot 9,68 = 67,76 \text{ } |\Omega|$$

Prema 2-14 u čvoru T je

$$U_5 = \sqrt{3} I_5 X_{5M} = \sqrt{3} \cdot 94,5 \cdot 48,4 = 7922 \text{ V} = 7,922 \text{ kV}$$

$$U_7 = \sqrt{3} I_7 X_{7M} = \sqrt{3} \cdot 67,5 \cdot 67,76 = 7922 \text{ V} = 7,922 \text{ kV}$$

Prema 2-8 faktor distorzije napona u čvoru T

$$D_T = \frac{\sqrt{7,922^2 + 7,922^2}}{100} = 0,102 \text{ ili } 10,2\%$$

Ovakav faktor distorzije se smatra nedopušteno visokim. Nužno je poduzeti tehničke mjere.

Primjer 2.2 Imamo sistem prema sl.77. Potrošač P je uključen. Snaga mu je 80 MVA uz $\cos \varphi = 0,8$, tj. $S_P = 80 \angle 36,87^\circ$ MVA. Transformator Tr je snage 100 MVA uz $e_k = 10\%$. Poštošač P je linearan. Ostali podaci kao u primjeru 2.1.

Analizirati peti i sedmi harmonik.

$$X_{1Tr} = \frac{e_k U^2}{100 S_{Tr}} = \frac{10 \cdot 100^2}{100 \cdot 100} = 12,1 \angle \Omega$$

$$Z_{1P} = \frac{U^2}{S^*} = \frac{110^2}{80 \angle -36,87^\circ} = 151 \angle 36,87^\circ = 120,8 + j90,6 \angle \Omega$$

$$X_{5Tr} = 5 \cdot 12,1 = 60,5 \angle \Omega$$

$$Z_{5P} = 120,8 + j5 \cdot 90,6 = 120,8 + j453 \Omega \approx j453 \angle \Omega$$

Prema 2-16 imamo

$$\begin{aligned} U_{5T} &= \sqrt{3} \cdot 94,5 \frac{48,4(60,5+453)}{48,4+60,5+453} = \sqrt{3} \cdot 94,5 \frac{24853}{561,9} = 7240 \text{ V} = \\ &= 7,24 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$U_{7Tr} = 7 \cdot 12,1 = 84,7 \angle \Omega$$

$$X_{7P} = 7 \cdot 90,6 = 634,2 \angle \Omega$$

$$\begin{aligned} U_{7T} &= \sqrt{3} \cdot 67,5 \frac{67,76(84,7+634,2)}{67,76+84,7+634,2} = \sqrt{3} \cdot 67,5 \frac{48713}{786,66} = \\ &= 7240 \text{ V} = 7,24 \text{ kV} \end{aligned}$$

Faktor distorzije napona u čvoru T

$$D_T = \frac{\sqrt{7,24^2 + 7,24^2}}{110} = 0,093 \text{ ili } 9,3\%$$

Izračunati faktor distorzije je nedopustivo visok. Nužno je poduzeti tehničke mjere.

Primjer 2.1 pokazuje, da je maksimalna snaga potrošača, koji iz mreže uzima izobliženu struju, ograničena snagom minimalnog kratkog spoja mreže u priključnom čvoru i dozvoljenim faktorom distorzije. Nadalje se je pokazalo, da su u linearnoj mreži za koju vrijedi izraz 2-12 i uz potrošač za koji vrijedi izraz 2-10 sa istim k za sve N , visine napona svih harmonika međusobno jednake.

Uvažimo li upravo izložene zaključke, te ako stavimo da u izrazu 2-10 $k=1$, možemo izvesti orijentacionu formulu

$$S = \frac{D_{\max} S_k}{\sqrt{h}} \quad 2-19$$

gdje je:

- $D_{\max}$ - najveći dozvoljeni faktor distorzije
- S_k - snaga minimalnog početnog kratkog spoja u priključnom čvoru potrošača (u MVA)
- h - broj koji pokazuje koliko harmonika želimo ili moramo uzeti u račun
- S - maksimalno dozvoljena snaga ispravljača (u MVA) pod uvjetom da nisu poduzete tehničke mjere za suzbijanje harmonika.

Primjer 2.3 Provjeri rezultat iz primjera 2.1 pomoću izraza 2-19. U tom primjeru je uzet u račun peti i sedmi harmonik, pa je prema tome $h = 2$.

$$S = \frac{0,102 \cdot 1250}{\sqrt{2}} = 90,156 \text{ |MVA|}$$

U primjeru 2.1 smo primijenili ublažavajući faktor $k = 0,9$, pa zato gornji rezultat moramo korigirati:

$$S' = \frac{S}{0,9} = 100 \text{ |MVA|}$$

dobili smo upravo snagu zadanog potrošača P' .

Primjer 2.4 Koju maksimalnu snagu S smije imati 6-pulsni ispravljač, ako $S_k = 1250$ MVA, a u račun uzimamo harmonike $N = 5, 7, 11, 13$. Dozvoljeni faktor distorzije je 0,03 (3%).

$$S = \frac{0,03 \cdot 1250}{\sqrt{4}} = 18,75 \text{ MVA}$$

Primjer 2.5 Zadatak kao u primjeru 2.4, ali u račun uzeti još i harmonike $N = 17, 19, 23, 25$.

$$S = \frac{0,03 \cdot 1250}{\sqrt{8}} = 13,26 \text{ MVA}$$

2.1.3 Rezonantne pojave

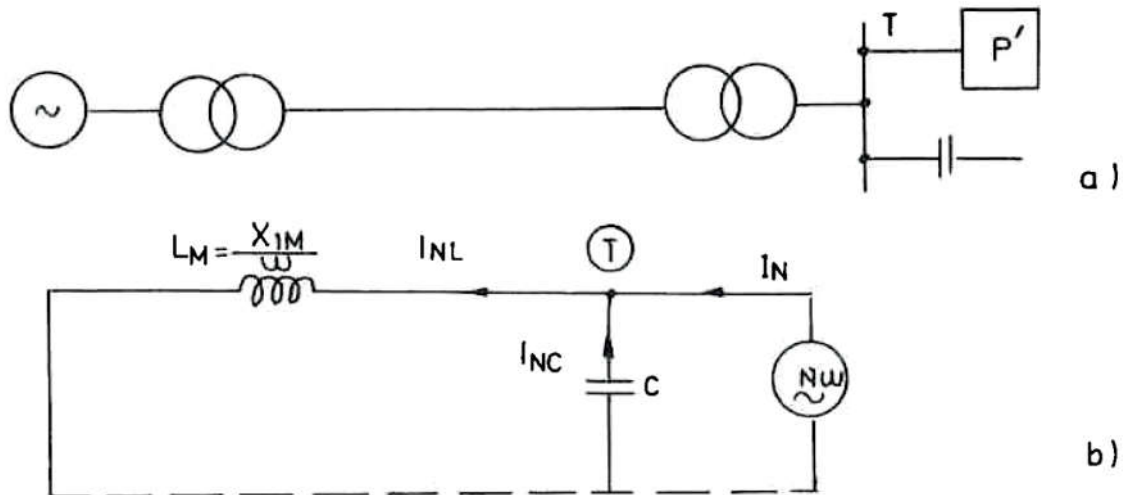
U dosadašnjim razmatranjima pretpostavili smo da u mreži nema kapaciteta, pogotovo ne koncentriranih. Većina potrošača, koji uzimaju izobličenu struju, ujedno imaju loš faktor snage, koji se najčešće popravljja kompenzacionim kondenzatorskim baterijama. Shema jednostavnog sistema s kompenzacijom reaktivne snage prikazana je na sl.78a, a njegov ekvivalent za harmonike na sl.78b (omski otpori zanemareni).

Ukupna susceptancija mreže, promatrana iz potrošačkog čvora T, biti će kod neke frekvencije ω'

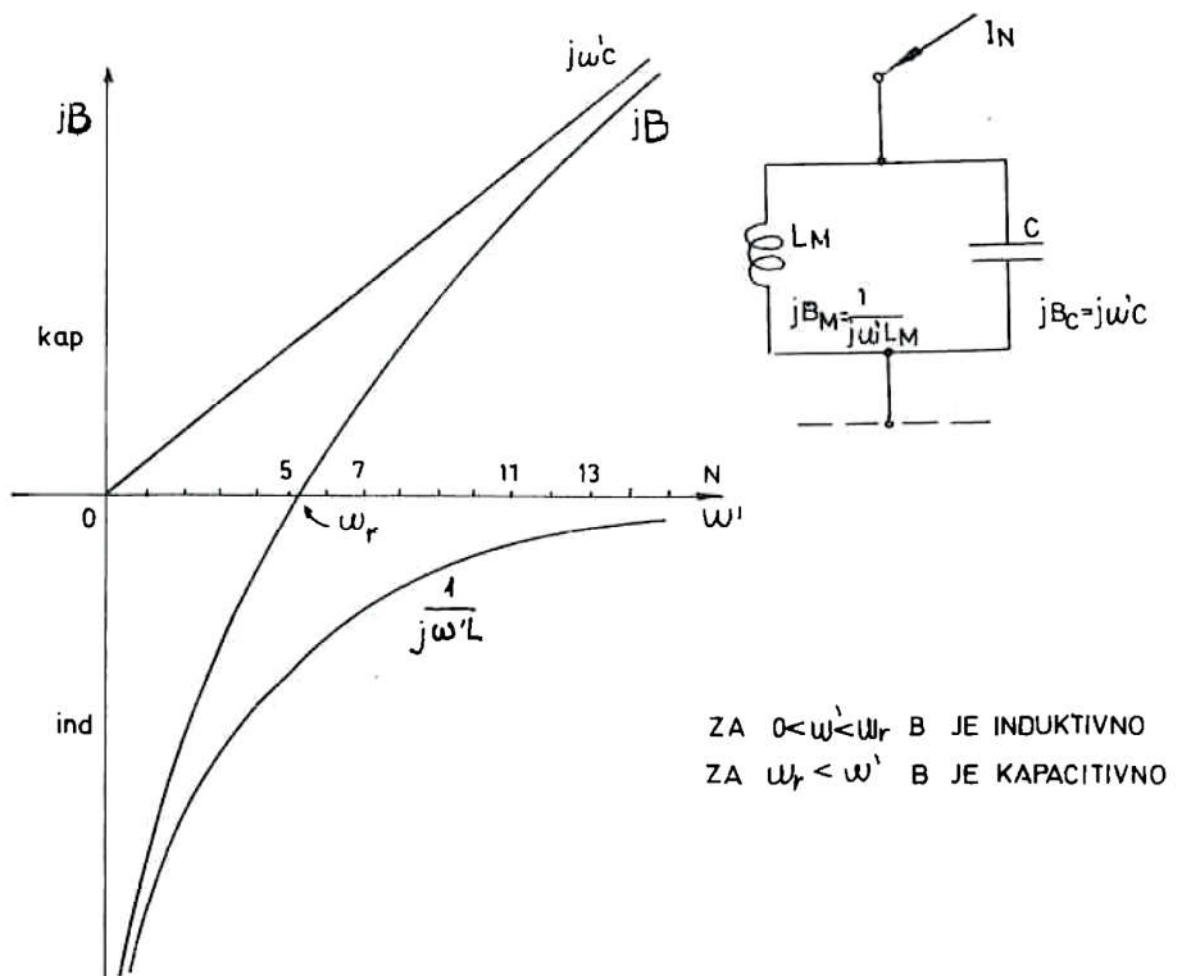
$$jB = \frac{1}{jX} = j\left(-\frac{1}{\omega' L_M} + \omega' C\right) \quad 2-20$$

Uz zadane L_M i C , B ovisi o frekvenciji, što je prikazano na sl.79. Na apscisi je nanesena još i skala za rang harmonika N .

Vidimo da će kod neke frekvencije ω_r , koju nazivamo rezonantnom, susceptancija biti jednaka nuli. ω_r dobivamo, ako desnu stranu izraza 2-20 izjednačimo s nulom:



Slika 78 - Shema mreže sa kondenzatorom za kompenzaciju reaktivne snage i njezin ekvivalent za N-ti harmonik



Slika 79 - Susceptancija paralelnog L-C sklopa u ovisnosti od frekvencije

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_M C}} \quad 2-21$$

Za ovu frekvenciju je rezultirajuća impedancija mreže beskonačno velika, ako zanemarimo omske otpore. Ukoliko ona odgovara frekvenciji jednog od harmonika $N\omega$, kojeg generira potrošač P' , injektirana struja u čvor T izazvati će beskonačno veliki pad napona prema nuli sistema, a ovaj opet u grani L_M i grani C beskonačno velike struje I_{NL} i I_{NC} . Može se reći, da će struja u granama L_M i C biti mnogostruko "pojačana".

U stvarnoj mreži prisutni omski otpori neće dozvoliti da dodje do "beskonačnog pojačanja". "Pojačanje" u praksi može biti do tri puta, što znači da se i neugodne posljedice postojanja harmonika struje i napona barem na toliko puta povećavaju.

Zbog promjenjivosti snage kratkog spoja S_k , iz koje se izračunava L_M , ni rezonantna frekvencija mreže neće biti konstantna. Zbog toga je potrebno ispitati, u kojem se rasponu može očekivati rezonantna frekvencija. Ako je predviđeno postepeno (regulirano) uključivanje kondenzatorske baterije, potrebno je kontrolu provesti za svako udešenje kapaciteta.

Primjer 2.6 Na sabirnice T nazivnog napona 110 kV priključena je kondenzatorska baterija trofazne snage $Q_C = 40$ MVar kod 110 kV. Početna snaga trolnog kratkog spoja u čvoru T je 1250 MVA (vidi sl.78).

Izračunaj rezonantnu frekvenciju.

$$C = \frac{Q_C}{U^2 \omega} = \frac{40}{110^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 10,5 \cdot 10^{-6} \text{ [F]}$$

$$X_{1M} = 9,68 \text{ } |\Omega| \text{ (vidi primjer 2.1)}$$

$$L_{1M} = \frac{X_{1M}}{\omega} = \frac{9,86}{2\pi 50} = 30812 \cdot 10^{-6} \text{ [H]}$$

$$\omega_r = \frac{10^6}{\sqrt{10,5 \cdot 30812}} = 1758$$

Napravimo omjer

$$N_r = \frac{\omega_r}{\omega} = \frac{1758}{2\pi 50} = 5,596$$

Rezonantna frekvencija je najbliža petom harmoniku, ali dovoljno različita od njega. Ne dolazi do rezonancije.

2.1.4 Zaštita kondenzatora kod rezonancije

Kondenzatorske baterije su najugroženiji elementi mreže kod pojave viših harmonika napona, a za koje smo vidjeli da su naročito izraženi (višestruko pojačani) kod pojave rezonancije. Efektivna vrijednost struje kroz kondenzatorsku bateriju definirana je sa

$$I = \sqrt{\sum_{N=1}^N (CN\omega V_N)^2} \quad 2-22$$

gdje je:

N - rang očekivanog harmonika (npr. 1,5,7,11,13...)

C - kapacitet kondenzatora po fazi

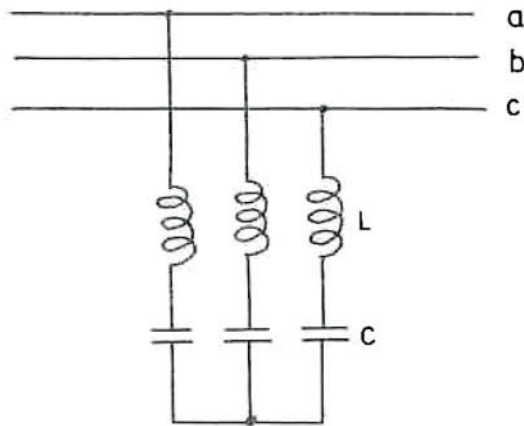
$V_N = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$ - fazni napon harmonika ranga N na stezaljkama kondenzatorske baterije

Za $N = 1$ izraz 2-22 daje efektivnu vrijednost struje osnovnog harmonika I_1 . Ostali harmonici dodatno opterećuju kondenzator. Ovo preopterećenje po tehničkim propisima obično ne smije prekoračiti 30%. Relativno povećanje reaktivne snage kondenzatora uslijed harmonika napona, a prema nazivnoj snazi (snazi kod osnovnog harmonika $N = 1$ i nazivnog napona), mora dakle zadovoljiti uvjet

$$1,3 \geq \frac{Q_C}{Q_{Cn}} = \frac{Q_C}{Q_{C1}} = \frac{\sum_{N=1}^N NU_N^2}{U_1^2} \quad 2-23$$

U gotovo svim normalnim slučajevima će opterećenje kondenzatora ostati u dozvoljenim granicama, osim u slučajevima rezonancije. Ako se rezonantna frekvencija mreže podudara s frekvencijom jed-

nog od generiranih harmonika, treba kondenzator zaštititi serijskom zaštitnom prigušnicom prema sl.80.



Ovakav serijski L-C sklop ima reaktanciju

$$jX = j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad 2-24$$

koja ovisi o frekvenciji i kod rezonantne frekvencije

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad 2-25$$

biti će jednaka nuli (vidi sl.81).

Da sklop ne bi došao u rezonanciju ni sa jednim očekivanim harmonikom, induktivitet

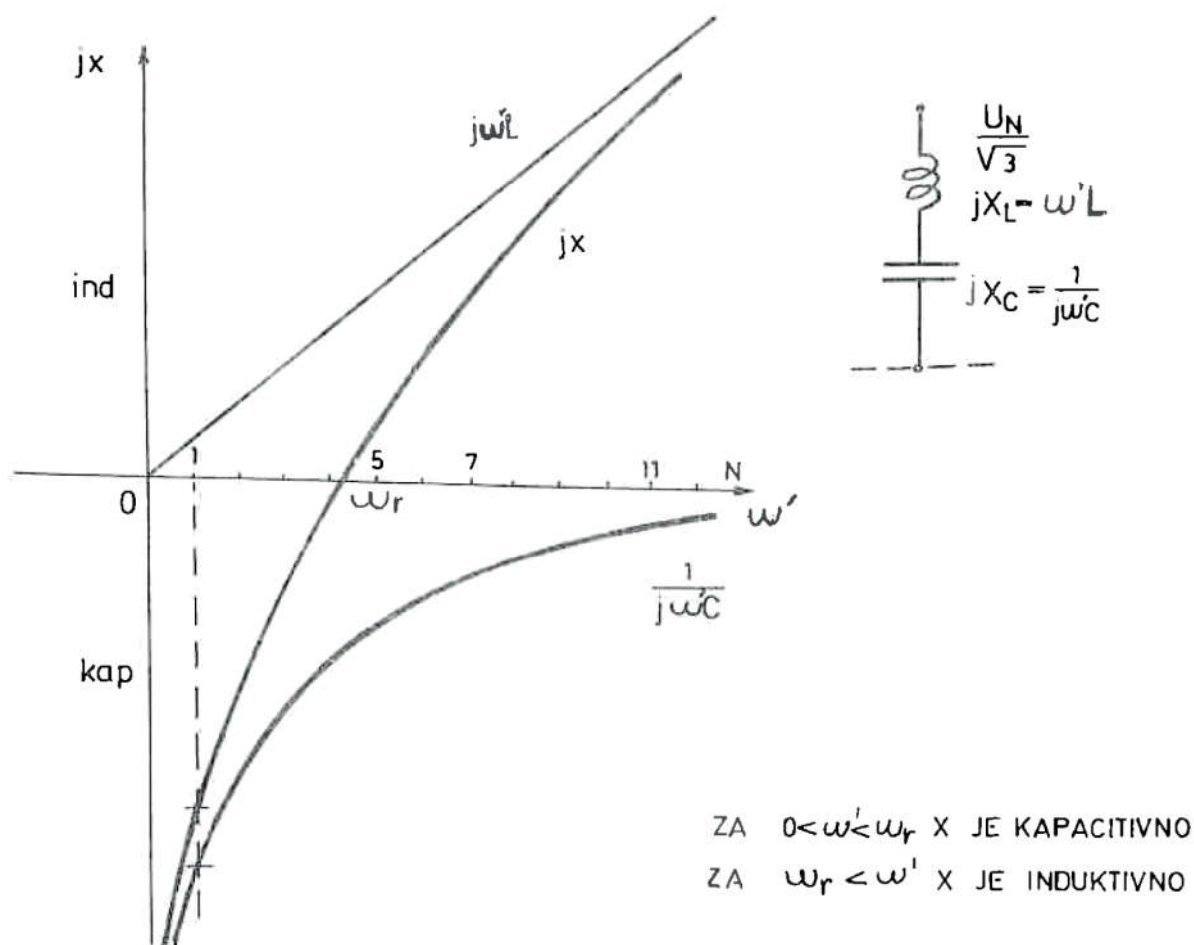
Slika 80 - Trofazna kondenzatorska baterija sa zaštitnim (antirezonantnim) prigušnicama

L se odabire tako, da sa kapacitetom C tvori sklop, kojemu je rezonantna kružna frekvencija $\omega_r \approx 1335$, a rezonantna numerička frekvencija $f_r \approx 212,5$ Hz, kod koje se ne generira nijedan harmonik. To odgovara rangu $N_r \approx 4,25$. Koristeći izraz 2-25, postavljeni će uvjet biti zadovoljen, ako je induktivitet zaštitne prigušnice

$$L = \frac{1}{\omega_r^2 C} = \frac{0,5611 \cdot 10^{-6}}{C} \text{ [H]} \text{ (za } \omega = 1335) \quad 2-26$$

Takav će sklop za sve $N \geq 5$ biti induktivan, pa s induktivitetom mreže L_M neće moći rezonirati ni na jedan očekivani harmonik u mreži.

Kod $\omega < \omega_r$ sklop će biti kapacitivan, pa će i dalje vršiti funkciju kompenzacije reaktivne snage. Dapače, reaktancija sklopa će za nazivnu frekvenciju ω (osnovni harmonik) biti manja (vidi sl. 81), nego reaktancija samog kondenzatora C , pa će i kapacitivna struja odnosno snaga biti veća. Do ovog povećanja snage dolazi uslijed povećanja napona osnovne frekvencije na stezaljkama kon-



Slika 81 - Reaktancija serijskog L-C sklopa u ovisnosti o frekvenciji

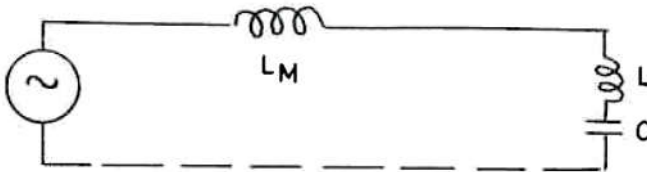
denzatora ("negativni" pad napona na prigušnici). U ovom povećanju snage nije sadržano povećanje snage uslijed harmonika napona. O svemu tome treba voditi računa kod dimenzioniranja kondenzatorske baterije.

Zaštitna prigušnica prema napred izloženom sprečava rezoniranje mreže s frekvencijom jednog od harmonika, ali ne doprinosi smanjenju intenziteta normalne cirkulacije harmonika struje u mreži. Zaštitna prigušnica dodatno prigušuje momentalni porast struje prilikom uključivanja kondenzatorske baterije.

U rijetkim slučajevima kondenzator sa zaštitnom prigušnicom ili bez nje i reaktancija mreže L_m mogu rezonirati na nazivnu frekvenciju (sl.82). Do rezonancije dolazi, ako je ispunjen uvjet

$$\frac{1}{\sqrt{(L_M + L)C}} = 2\pi 50$$

2-27



Slika 82 - Mogući rezonantni krug mreže

Primjer 2.7 Kondenzatorska baterija trofazne snage $Q_C = 40$ MVar kod $U_n = 10,5$ kV izaziva rezonantne pojave s višim harmonicima u mreži. Treba izračunati induktivitet zaštitne prigušnice L i novu kapacitivnu snagu Q'_C kod 50 Hz.

$$C = \frac{Q_C}{U_n^2 \omega} = \frac{40}{10,5^2 \cdot 2\pi 50} = 1,155 \cdot 10^{-3} \text{ [F]}$$

Prema 2-26

$$L = \frac{0,5611 \cdot 10^{-6}}{1155 \cdot 10^{-6}} = 0,4858 \cdot 10^{-3} \text{ [H]}$$

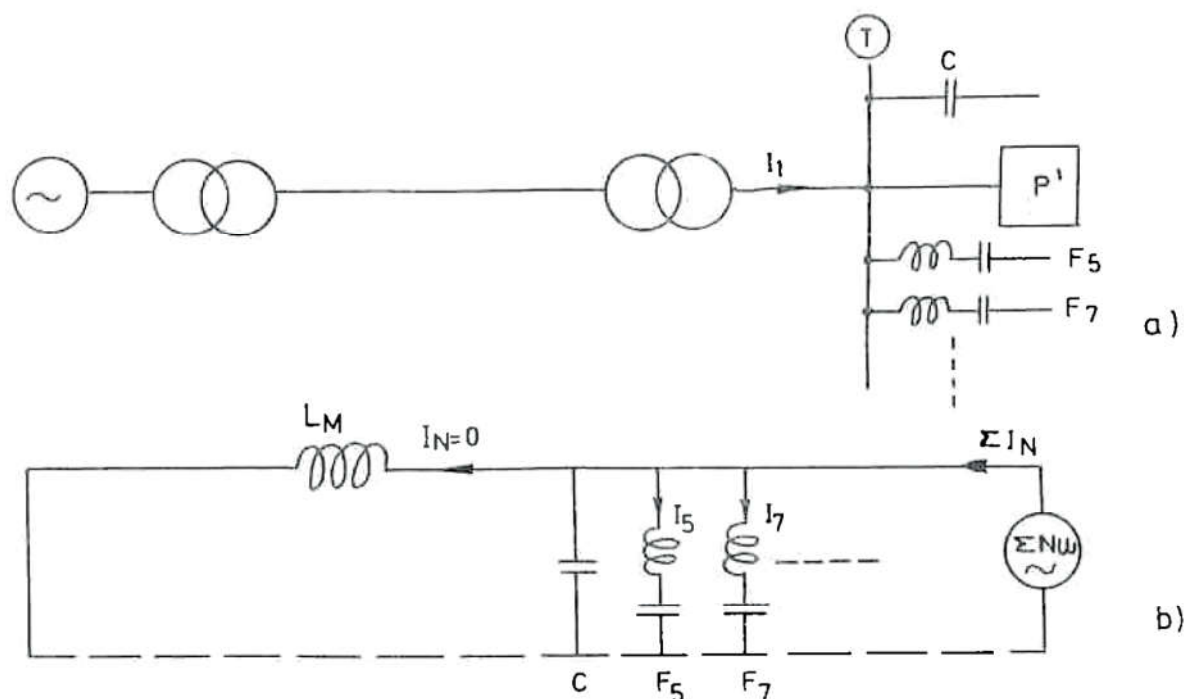
$$X_L = \omega L = \omega 0,4858 \cdot 10^{-3} = 0,15262 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{10^3}{\omega 1,155} = 2,7559 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$Q'_C = \frac{U_n^2}{X_C - X_L} = \frac{10,5^2 \cdot 10^6}{2,7559 - 0,15262} = 42,35 \text{ [MVar]}$$

2.1.5 Suzbijanje viših harmonika u mreži

Ako intenzitet viših harmonika u mreži, koje izaziva neki potrošač, prekoračuje dopuštenu granicu, treba poduzeti mjere za suzbijanje harmonika. Logično je više harmonike suzbijati na samom izvoru, kako ne bi cirkulirali u mreži. Treba naći sredstvo, koje će za više harmonike struje predstavljati kratki spoj i tako ih absorbirati. Takvo sredstvo su filteri izvedeni kao serijski L-C sklopovi, kojima je rezonantna frekvencija udešena na frekvenciju harmonika (absorbirajući filteri). Za svaki harmonik potreban je jedan trofazni filter. Broj filtera ovisi o broju očekivanih harmonika, pri čemu se on ograničava na niže N (npr. do $N=13$ ili iznimno do najviše $N=25$).



Slika 83 - Shema sistema sa filterima i njegov ekvivalent za više harmonike

Na sl.83 označeni su filteri $F_5, F_7 \dots$ za više harmonike $N = 5, 7 \dots$. U mreži teče neizobličena struja. Na istoj slici naznačena je još i kondenzatorska baterija za kompenzaciju reaktivne snage C , mada i kapaciteti filtera doprinose toj kompen-

zaciji i često su sami dovoljni. Kod proračuna filtera uzima se prema tome u obzir i potreba kompenzacije reaktivne snage. Time su u izrazu 2-25 definirane dvije veličine (C i ω_r) od tri. Preostaje da se izračuna induktivitet

$$L = \frac{1}{(N\omega)^2 C} \quad 2-28$$

gdje je N rang harmonika za koji se računa filter. Potrebno je kontrolirati:

- a) Ukupno opterećenje kondenzatora (za osnovni i rezonantni harmonik);
- b) Napon osnovnog harmonika na stezaljkama kondenzatora;
- c) Povećanu snagu kompenzacije za osnovni harmonik;
- d) Eventualno rezoniranje cijelog sistema na osnovni harmonik.

Kod izvedbe filtera ne treba pretjeravati u njihovoj dobroti u pogledu gubitaka. Povremena odstupanja sinhronne frekvencije mreže od nazivne vrijednosti, kao i temperaturna ovisnost kapaciteta kondenzatora, doveli bi kod idealnih filtera povremeno do odviše velikih odstupanja stvarne rezonantne frekvencije od potrebne. Dolazi do razdešenja filtera. Omski otpori u filterskom krugu osiguravaju rezonantno djelovanje i kod izvjesnih malih razlika između rezonantne frekvencije filtera i frekvencije harmonika, za koji je filter gradjen.

Primjer 2.8 6-pulsni ispravljač za napajanje pogona elektrolize ima snagu $S = 100$ MVA uz $\cos \varphi = 0,78$. Ispravljačko postrojenje je priključeno na sabirnice napona 35 kV, na kojima je snaga početnog trolnog kratkog spoja $S_k = 1700$ MVA.

Potrebno je:

- a) Izračunati parametre filtera za peti i sedmi harmonik sa potrebnim kontrolama; pretpostaviti da su omski otpori u mreži i ostali harmonici zanemarivi;
- b) Postići ukupnu kompenzaciju reaktivne snage do $\cos \varphi = 0,98$;
- c) Ispitati da li sistem rezonira na osnovni harmonik.

Dobit ćemo shemu prema sl.83a.

Peti harmonik struje potrošača računamo prema 2-10. Faktor k se prema uvjetima rada odabire $k = 0,8$.

$$I_5 = \frac{I_1}{N} k = \frac{S \cdot k}{5 \cdot \sqrt{3} \cdot 35} = \frac{100 \cdot 0,8}{5 \cdot \sqrt{3} \cdot 35} = 0,264 \text{ kA} = 264 \text{ A}$$

Ova struja u cijelosti prolazi kroz filter za peti harmonik F_5 i dodatno opterećuje pripadni kondenzator. Ostali harmonici su filtriranjem eliminirani (sedmi) odnosno prema tekstu zadatka zanemarivi.

Zbog mogućnosti preopterećenja kapacitet C filtera nećemo moći izabrati proizvoljno. Ako dozvolimo preopterećenje kondenzatora do 25%, te ako napon petog harmonika U_5 izrazimo pomoću struje I_5 i pripadne reaktancije kondenzatora čiji je kapacitet za sada nepoznat, možemo iz formule 2-23 izvesti uvjet

$$C = 4,931 \cdot 10^{-3} \frac{I_5}{U_1}, \quad \text{koji daje}$$

$$C = 4,931 \frac{264}{35} 10^6 = 37,19 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

Da bi filter rezonirao sa petim harmonikom, pripadni induktivitet mora prema 2-28 biti

$$L = \frac{10^6}{(5 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50)^2 \cdot 37,19} = 10,9 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

Reaktancija izračunatog serijskog L-C sklopa za osnovni harmonik je

$$X = \left| \omega L - \frac{1}{\omega C} \right| = |3,424 - 85,591| = 82,2 \text{ } \Omega$$

Trofazna reaktivna (kapacitivna) snaga sklopa za osnovni harmonik je

$$Q^{(5)} = \frac{U^2}{X} = \frac{35^2}{82,2} = 14,9 \text{ MVar}$$

Napon osnovnog harmonika na stezaljkama kondenzatora će iznositi

$$35 \frac{85,591}{82,2} = 36,33 \text{ kV}$$

Napon petog harmonika na stezaljkama kondenzatora iznosi

$$U_5 = \sqrt{3} I_5 X_5 = \frac{\sqrt{3} \cdot 264}{5 C} = \frac{\sqrt{3} \cdot 264 \cdot 85,591}{5} = 7,827 \text{ kV}$$

Kontrola preopterećenja prema 2-23 daje

$$\frac{36,44^2 + 5 \cdot 7,827^2}{36,44^2} = 1,23 < 1,3$$

Zadovoljava!

Račun ponavljamo za sedmi harmonik, s time da polazimo od istog kapaciteta kondenzatora kao ranije.

Struja sedmog harmonika je

$$I_7 = \frac{5}{7} I_5 = \frac{5}{7} 264 = 188,6 \text{ A}$$

Od ranije $C = 37,19 \cdot 10^{-6} \text{ F}$

Da bi filter rezonirao sa sedmim harmonikom, pripadni induktivitet mora prema 2-28 biti

$$L = \frac{10^6}{(7 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50)^2 \cdot 37,19} = 5,56 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

Reaktancija serijskog L-C sklopa za osnovni harmonik je

$$X = \left| \omega L - \frac{1}{\omega C} \right| = |1,747 - 85,591| = 83,844 \text{ } \Omega$$

Trofazna reaktivna (kapacitivna) snaga sklopa za osnovni harmonik je

$$Q^{(7)} = \frac{U^2}{X} = \frac{35^2}{83,844} = 14,61 \text{ MVar}$$

Napon osnovnog harmonika na stezaljkama kondenzatora će iznositi

$$35 \frac{85,591}{83,844} = 35,73 \text{ kV}$$

Napon sedmog harmonika na stezaljkama kondenzatora iznosi

$$U_5 = \sqrt{3} I_7 X_7 = \frac{\sqrt{3} \cdot 188,6 \cdot 85,591}{7} = 3,99 \text{ kV}$$

Kontrola preopterećenja prema 2-23 daje

$$\frac{35,73^2 + 7 \cdot 3,99^2}{35,73^2} = 1,087 < 1,3$$

Zadovoljava!

Snaga potrošača je 100 MVA uz $\cos \varphi = 0,78$

$$S = 100 \frac{1}{0,78} = 78 + j62,58 \text{ MVA}$$

Nakon kompenzacije do $\cos \varphi = 0,98$ snaga potrošača je

$$S' = 78 + j15,84 \text{ MVA}$$

Kompenzirati treba $\Delta Q = 62,58 - 15,84 = 46,74 \text{ MVar}$

Filteri F_5 i F_7 kompenziraju

$$Q_F = Q^{(5)} + Q^{(7)} = 14,9 + 14,61 = 29,51 \text{ MVar}$$

Dodatna kondenzatorska baterija mora kompenzirati

$$Q_C = \Delta Q - Q_F = 46,74 - 29,51 = 17,23 \text{ [MVar]}$$

pa kondenzator po fazi mora imati kapacitet

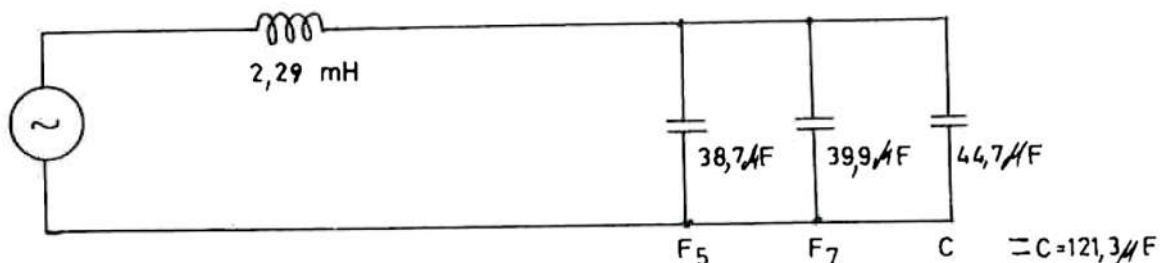
$$C = \frac{Q}{U^2 \omega} = \frac{17,23}{35^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 44,7 \cdot 10^{-6} \text{ [F]}$$

Reaktancija mreže uz $S_k = 1700 \text{ MVA}$ na 35 kV je

$$X_M = \frac{U^2}{S} = \frac{35^2}{1700} = 0,72 \text{ [}\Omega\text{]}, \quad \text{odavde}$$

$$L_M = \frac{X_M}{\omega} = 2,29 \cdot 10^{-3} \text{ [H]}$$

Uz isključeni potrošač imamo za jednu fazu i osnovni harmonik slijedeći ekvivalent:



Rezonantna frekvencija je

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{10^6}{\sqrt{2290 \cdot 121,3}} = 1897,3 ; \quad f_r = \frac{\omega}{2\pi} = 301,96 \text{ [Hz]}$$

Rezonantna frekvencija je bliska šestom harmoniku, ali ovaj pripada nultom sistemu i osim toga nema izvora takvog harmonika. Prema tome nema rezonancije s osnovnim harmonikom.

Uključeni potrošač zajedno s ukupnom kompenzacijom ima $\cos \varphi = 0,98$ dakle induktivni karakter. Prema tome ne može rezonirati s induktivitetom mreže, pa kontrolu ne treba ni provoditi.

2.1.6 Posljedice postojanja viših harmonika struje i napona u mreži

Pojedini istraživački centri razvili su metode kojima se, koristeći elektronička računala, mogu izvršiti dalekosežne analize "tokova struja i naponskih prilika" pojedinih harmoničkih članova (nadvalova) u mreži. Pogodnim instrumentima (valnim analizatorima) mogu se na interesantnim točkama u mreži ustanoviti izobličenja struje i napona, pogotovo ako dovoljno obimni materijal, snimljen na pogodnom nosiocu (npr. na magnetskoj traci), može u laboratoriju biti pažljivo analiziran odgovarajućim pomagalicama. Ipak se već i iz ovako škrtog prikaza problema, kako je ovdje izložen, može zaključiti, da se mnogi faktori koji utječu na rezultate neće moći pouzdano utvrditi. To su razni prigušujući faktori, koeficijent k u izrazu 2-10, eksponent a u izrazu 2-11 i drugi.

Jednako tako ne postoje jedinstveni kriteriji za vrednovanje stvarnih poteškoća, koje izaziva postojanje viših harmonika struja i napona. To se najbolje vidi u značajnim razlikama, koje u tom pogledu možemo naći u propisima i preporukama raznih zemalja.

Prema tome danas još ne postoji jasno definirana veza između harmonijske distorzije s jedne strane i uređaja mreže s druge strane, koja bi dala cjeloviti uvid u tehničku i ekonomsku stranu problema. Unatoč tome može se tvrditi, da postoji štetan utjecaj distorzije na neke elemente u mreži i kod potrošača i da postoje tehnička rješenja kojima se taj utjecaj može otkloniti.

Sve masovnijom primjenom učinske elektronike na svim naponskim nivoima problem postaje sve značajniji, a time i ekonomske posljedice. O tome svjetska literatura danas raspolaže obimnim materijalom dobivenim na temelju mjernih, računskih i statističkih podataka.

Sasvim sažeto može se reći, da distorzije struje i napona izazivaju:

- Kod generatora, transformatora, kabela, vodova i motora dodatne gubitke u vodičima u vidu Joule-ove topline;
- Kod transformatora još i dodatne gubitke u željezu, te mogućnost zasićenja magnetskog kruga;
- Kod kabela i kondenzatora dodatne gubitke u dielektriku;

- Kod kabela dodatne gubitke u vanjskim metalnim oblogama, pogotovo ako postoje harmonici ranga $N=3n$;

Sa ekonomskog aspekta, povećanje gubitaka u elementima mreže i aparatima predstavlja gubitak energije, umanjenje korisne instalirane snage, a kod kabela i kondenzatora još i ubrzano starenje dielektrika.

Kod niza drugih uređaja distorzija struje i napona izaziva jače ili manje izražene smetnje u njihovom urednom funkcioniranju sa neugodnim posljedicama:

- Kod gotovo svih mjernih uređaja, uključujući i brojila energije, dolazi do smanjenja točnosti mjerenja;
- Kod zaštitnih uređaja može doći do krivog ili nepotrebnog reagiranja;
- Kod usmjerivača, elektroničkih uređaja, elektroničkih računala, röntgen-aparata, uređaja za daljinsko upravljanje i tome slično, javljaju se smetnje u funkcioniranju.

2.2 BRZA KOLEBANJA NAPONA

U normalnom radu sistema nije moguće održavati idealno konstantan napon. Ako su kolebanja spora i u okviru dozvoljenih granica ona se ne zamjećuju, osim kod izuzetno osjetljivih potrošača koji u tom slučaju zahtijevaju posebnu stabilizaciju napona. Promjene napona su zamjetljive, čak i onda kada su u dozvoljenim granicama, ako su trenutne. Takve trenutne promjene izazvane su uključivanjem i isključivanjem potrošača relativno velike snage u odnosu na cjelokupno opterećenje čvora, kod grube sinhronizacije sinhronih strojeva, kod uključivanja asinhronih motora, kod rada reverzibilnih elektromotornih pogona, kod uključivanja ili isključivanja značajnih jako opterećenih proizvodnih i prijenosnih jedinica, kod bliskih pa i udaljenih kratkih spojeva itd. Takvi pojedinačni treptaji napona su doduše zamjetljivi, ali normalno ne izazivaju nikakve poteškoće.

Od posebnog su značaja brza uzastopna kolebanja napona prosječne periodičnosti 0,5 do nekih 25 Hz, često nazvana "fluktuacija napona" ili, po manifestacijama na rasvjeti, "flikeri". Takva kolebanja su nepoželjna zbog nepovoljnog utjecaja na neke kategorije potrošača, pa ih treba prikladnim tehničkim mjerama suzbijati.

Analitički pristup ovom problemu polazi od potrošača, koji iz mreže uzimaju brzo promjenjivu struju i tako postaju "generatori smetnje". Ta promjenjiva struja izaziva analogne promjene napona u mreži uslijed promjena padova napona na impedancijama grana. Na taj način i napon koleba, pa u tom pogledu postaje nekvalitetan.

2.2.1 Nastanak brzo promjenjivih struja

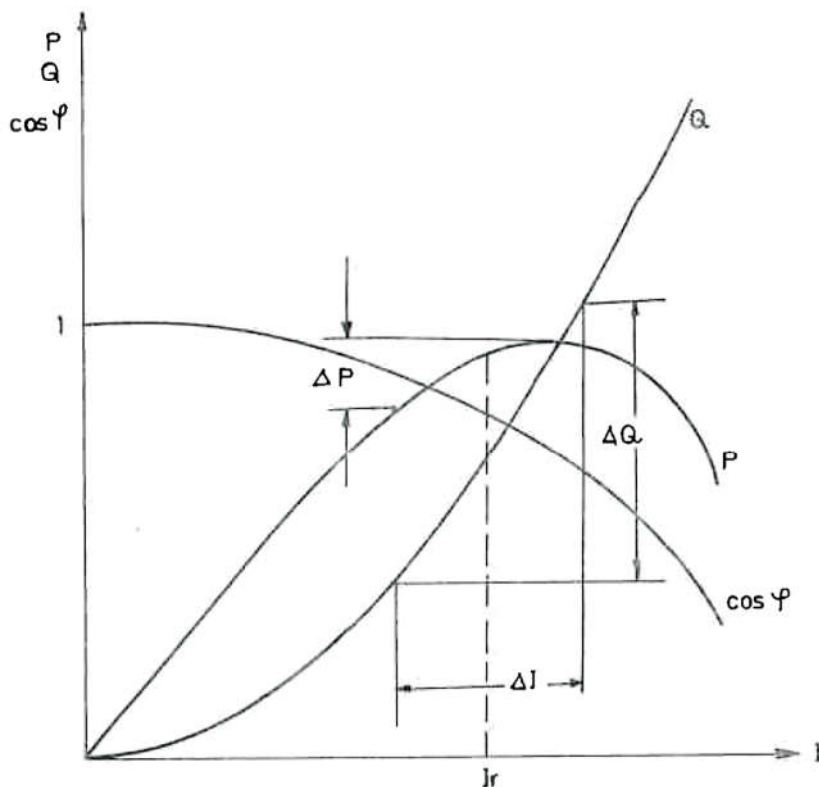
Brzo promjenjive struje uzimaju potrošači, kojima se tokom rada u odgovarajućem ritmu mijenja prividna snaga kojom opterećuju mrežu. Pri tome je naročito značajno kolebanje reaktivne komponente snage, jer ova zbog pretežno induktivnog karaktera uzdužnih grana elemenata mreže gotovo direktno utječe na iznos napona.

Tipični uzročnici brzih kolebanja struje u mreži su elektrolučne peći, kako po znatnoj jediničnoj snazi, tako i po intenzitetu smetnji. Zbog toga će se daljnje razmatranje oslanjati upravo na promatranje rada elektrolučnih peći. Pri tome se sve elektrolučne peći ne ponašaju jednako. Intenzitet izazvanih smetnji ovisi o vrsti materijala koji se prerađuje, pa najnemirniji pogon imaju elektrolučne peći za talenje i rafinaciju čelika.

U procesu rada elektrolučne peći izmjenjuju se faze talenja i faze rafinacije. Rad je naročito nemiran u fazi talenja, i to posebno na početku, kada se u peći nalaze komadi sirovog odnosno starog željeza. Tokom faze rafinacije peć uzima znatno manju snagu uz mnogo mirniji rad.

U razdoblju naročito nemirnog rada impedancija same elektrolučne peći koleba između stanja kratkog spoja i potpunog prekida električnog luka uz odgovarajuće kolebanje struje. Regulacioni sistem peći donekle ujednačuje ova kolebanja, ali s ograničenim efektom

koji ide za maksimalnim učinkom talenja, a ne za smanjenjem amplituda kolebanja struje. Tromost regulacionog sistema u sprezi sa servomehanizmom za pomicanje elektroda izaziva sa svoje strane spora periodična kolebanja u rasponu 0,5 do 2 Hz. Mehanizam gore-nja električnog luka izaziva brža kolebanja, uglavnom u rasponu od 3 do 12 Hz. Još treba dodati, da se kolebanje struje vremenski rijetko podudara u sve tri faze, što uzrokuje nesimetrije, koje su od trenutka do trenutka različite.



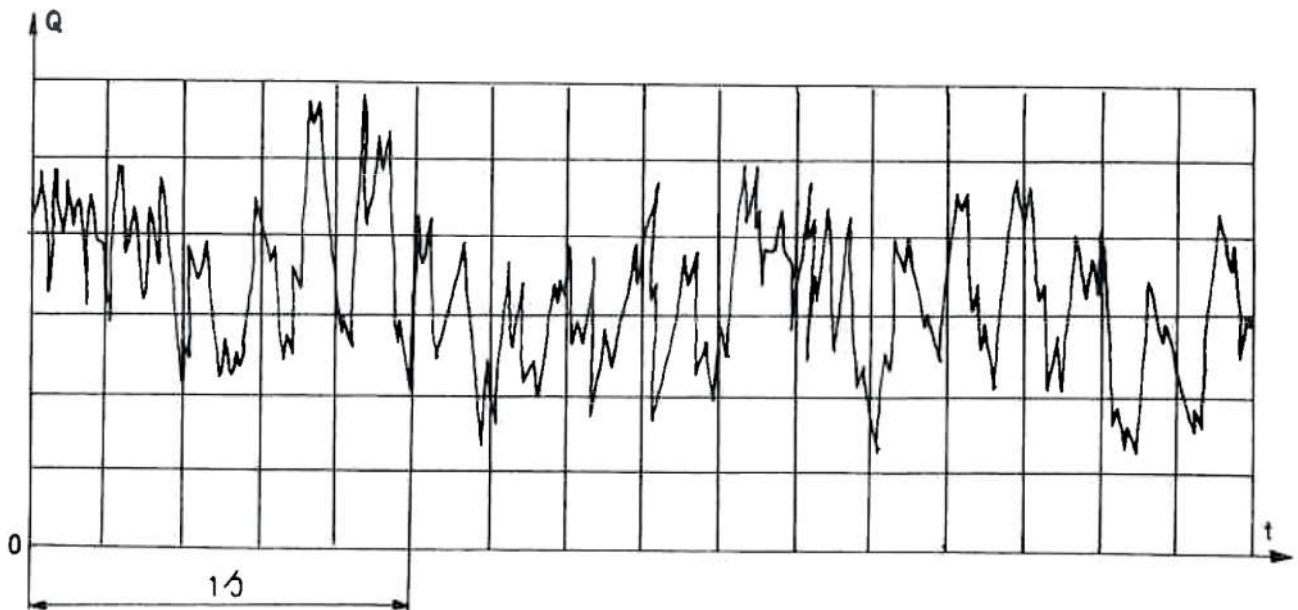
Slika 84 - Pogonske karakteristike elektrolučne peći

Karakteristike elektrolučne peći (Sl.84) daju jasan uvid u zbivanja interesantna za električnu mrežu. Ako struja opterećenja I koleba oko radne točke I_r u rasponu ΔI , reaktivna snaga Q kolebati će u vrlo velikom rasponu ΔQ , koji je daleko veći od raspona ΔP u kojem će se kretati djelatna snaga. A upravo na promjene reaktivne snage mreža reagira promjenom napona.

Vidimo, dakle, da se s kolebanjem struje I mijenja i faktor snage

$\cos \varphi$, pa promatranje struje neće dati mjerodavne rezultate. Morali bi zapravo promatrati reaktivnu komponentu struje. Zato kao polazni podatak u analizi kolebanja napona uzimamo reaktivnu snagu odnosno njezino kolebanje kao veličinu koja se lako mjeri.

Na sl.85 prikazano je tipično kolebanje reaktivne snage elektrolučne peći u fazi talenja. Najviši vrhovi odgovaraju kratkom spo-



Slika 85 - Tipična kolebanja reaktivne snage elektrolučne peći u fazi talenja

ju između elektroda dvaju faza, kada je struja ograničena jedino reaktancijama pećnog transformatora i mreže. Do potpunog prekida struje može doći najčešće u jednoj fazi i to u trajanju obično ne dužem od jedne poluperiode.

Ako je Q_p nazivna reaktivna snaga elektrolučne peći (kod suvremenih peći nazivna reaktivna snaga je brojčano približno jednaka nazivnoj djelatnoj snazi, tj. $\cos \varphi \approx 0,7$), onda u fazi talenja možemo očekivati kolebanje reaktivne snage u granicama

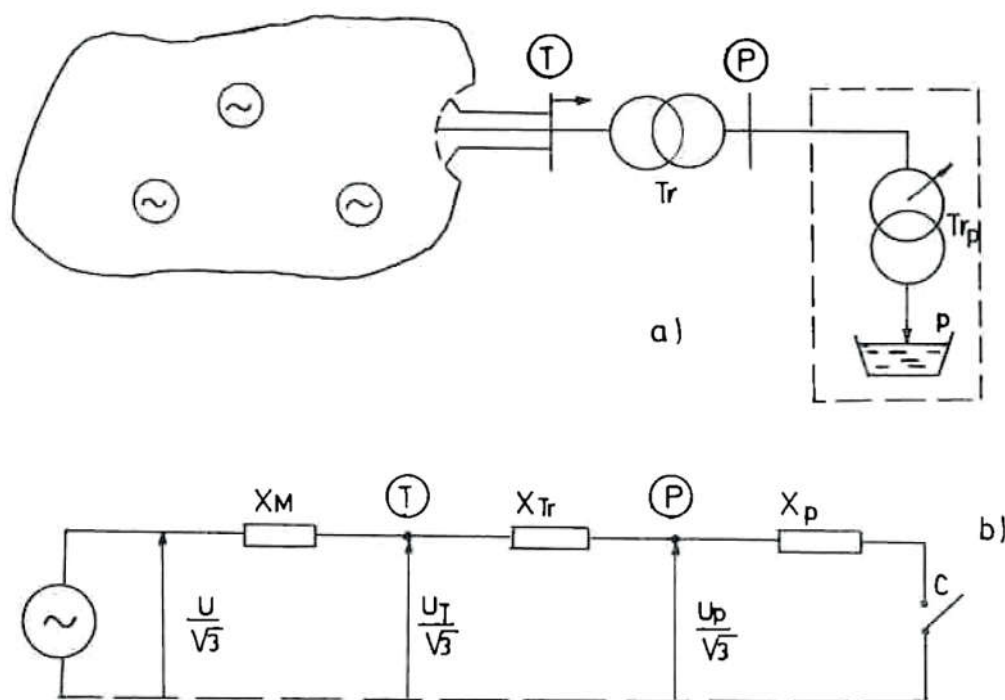
$$Q = Q_p (1 \pm 0,7)$$

2-29

2.2.2 Izračunavanje kolebanja napona

Ova razmatranja se odnose na jednu elektrolučnu peć pod uvjetom, da nisu poduzete nikakve mjere za smanjenje kolebanja napona.

Elektrolučnu peć priključenu na mrežu možemo prikazati slikom 86a. Pripadna ekvivalentna shema sistema prikazana je na sl.86b.



Slika 86 - Mreža sa priključenom elektrolučnom peći
i ekvivalentna shema

Elektrolučna peć označena je s p , a pripadni regulacioni pećni transformator sa Tr_p . Peć s regulacionim pećnim transformatorom predstavlja nedjeljivu cjelinu, kojoj je reaktancija označena sa X_p . Sa Tr je označen "međutransformator", koji se često uključuje između čvora P i čvora T , pri čemu su na čvor T priključeni i drugi potrošači. Ovaj transformator električki "udaljuje" elektrolučnu peć od ostalih potrošača.

Pošto u ekstremnom slučaju, a koji je blizak stvarnosti, rad peći koleba između praznog hoda i kratkog spoja, ekstremna pogonska stanja odgovaraju otvorenom odnosno zatvorenom simboličnom prekidaču C .

Reaktanciju mreže možemo izračunati iz poznate snage početnog tro-polnog kratkog spoja S_k u čvoru T pomoću izraza 2-13 i tako dobivamo X_M .

U trenutku prekida rada peći (prekidač C na sl.86b otvoren) u čvoru T će vladati napon U . U trenutku kratkog spoja elektroda (prekidač C zatvoren) strujnim krugom će teći reaktivna snaga

$$Q_{kp} = \frac{U^2}{X_M + X_{Tr} + X_p} = \frac{U^2}{\Sigma X} = S_{kp} \quad 2-30$$

To je snaga kratkog spoja na vrhovima elektroda elektrolučne peći. Mreža je u tom slučaju djelitelj napona, pa ćemo u čvoru T imati relativno kolebanje napona, koje je jednako relativnom padu napona:

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_T = \frac{X_M}{X_M + X_{Tr} + X_p} = \frac{X_M}{\Sigma X} \quad 2-31$$

Ako uzmemo da se u izrazima 2-13 i 2-30 kvadrat napona pojavljuje kao zajednički faktor, vidimo da je S_k obrnuto proporcionalno sa X_M , a S_{kp} obrnuto proporcionalno sa ΣX . Tako dobivamo izraz

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_T = \frac{S_{kp}}{S_{kT}} \quad 2-32$$

Ovaj izraz je opće priznat i primjenjuje se za ocjenu rizika od kolebanja napona što ga može izazvati elektrolučna peć u čvoru na koji su priključeni i drugi potrošači. Mora biti poznata reaktancija kratkog spoja na elektrodama peći X_p i snaga kratkog spoja S_{kT} u čvoru T, dakle podaci koji obično stoje na raspolaganju.

Ovako promatrane okolnosti su ekstremne, jer pretpostavljaju rad peći naizmjenično u praznom hođu i kratkom spoju. Takav rad peći je doduše rijedak, ali treba s njime računati.

Ako su poznati mjereni podaci, npr. oscilogram reaktivne snage po uzoru na sl.85, možemo za relativno kolebanje napona upotrijebiti ublaženi izraz

$$\left(\frac{\delta U}{U}\right)_T \approx \frac{\Delta Q}{S_{kT}} \quad 2-33$$

u koji se umjesto ekstremnog kolebanja reaktivne snage od nule do S_{kp} uvrštava objektivno utvrđeno kolebanje reaktivne snage peći

$$\Delta Q = Q_{\max} - Q_{\min} \quad 2-34$$

Primjer 2.9 U sistemu prema sl.86a priključena je na čvor P elektrolučna peć trofazne snage 49,5 MVA uz $\cos \varphi = 0,707$ (faza talenja). Transformator Tr koji povezuje čvorove T i P ima snagu 50 MVA uz $e_k = 0,1$. Snaga trolnog kratkog spoja u čvoru T je 1167 MVA.

Treba analizirati kolebanja napona u čvorovima T i P, izazvana radom elektrolučne peći.

Proizvoljno odabiremo bazni napon 35 kV.

Gledano iz čvora T:

$$X_{MT} = \frac{U^2}{S_{kT}} = \frac{35^2}{1167} = 1,05 \, \Omega$$

Reaktancija transformatora Tr:

$$X_{Tr} = \frac{e_k U^2}{S} = \frac{0,1 \cdot 35^2}{50} = 2,45 \, \Omega$$

Reaktancija mreže gledana iz čvora P biti će:

$$X_{MP} = X_{MT} + X_{Tr} = 1,05 + 2,45 = 3,5 \, \Omega$$

i odgovarajuća snaga kratkog spoja

$$S_{kp} = \frac{U^2}{X_{MP}} = \frac{35^2}{3,5} = 350 \, \text{MVA}$$

Impedancija peći je

$$|Z_p| = |R + jX_p| = \sqrt{R^2 + X_p^2} = \frac{U^2}{S_p} = \frac{35^2}{49,5} = 24,75 \, \Omega$$

Uz $\cos \varphi = 0,707$ biti će $R = X_p$, odnosno

$$R_p = X_p = \frac{Z_p}{\sqrt{2}} = \frac{24,75}{\sqrt{2}} = 17,5 \, \Omega$$

Gledano od vrhova elektroda elektrolučne peći biti će

$$\Sigma X = X_{MT} + X_{Tr} + X_p = 1,05 + 2,45 + 17,5 = 21,0 \, \Omega$$

odnosno pripadna snaga kratkog spoja

$$S_{kp} = \frac{U^2}{\Sigma X} = \frac{35^2}{21} = 58,3 \, \text{MVA}$$

Na temelju izračunatih podataka možemo po najoštrijem kriteriju (izraz 2-32) izračunati relativna kolebanja napona u čvoru T

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_T = \frac{S_{kp}}{S_{kT}} = \frac{58,3}{1167} = 0,05$$

i analogno u čvoru P

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_P = \frac{S_{kp}}{S_{kP}} = \frac{58,3}{350} = 0,167$$

Ako primijenimo blaži kriterij po izrazu 2-33 i uz to uzmemo da će kolebanja reaktivne snage oko srednje vrijednosti biti $\pm 17,5 \, \text{MVar}$, tj. da će ΔQ biti $35 \, \text{MVar}$, dobit ćemo

$$\left(\frac{\delta U}{U}\right)_T = \frac{35}{1167} = 0,03$$

odnosno

$$\left(\frac{\delta U}{U}\right)_P = \frac{35}{350} = 0,1$$

Riječima se dobiveni rezultati mogu interpretirati ovako:

Uslijed rada elektrolučne peći mogu se u čvoru T odnosno P normalno očekivati kolebanja napona 3% odnosno 10%, a povremeno 5% odnosno 16,7%.

Još možemo konstatirati, da smo kolebanje reaktivne snage ΔQ u jednom slučaju uzeli sa $58,3$, a u drugom slučaju sa $35 \, \text{MVar}$, dok bi primjenom formule 2-29 dobili kolebanja $\Delta Q = (1,7-0,3)Q_p = 1,4 Q_p = 49 \, \text{MVar}$.

— • —

Ako u ekvivalentnoj shemi na sl.86b reaktanciju X_p zamijenimo impedancijom $R_p + jX_p = \bar{Z}_p$, kod koje djelatna komponenta R_p proizlazi iz nazivne djelatne snage peći, imati ćemo slijedeća pogonska stanja:

- a) Prekidač C isključen, peć van pogona, električni luk prekinut;
- b) Prekidač C uključen, peć u prosječnom stacionarnom radu.

Omjer napona u čvoru P između jednog i drugog uklopnog stanja biti će definiran sa

$$\frac{\bar{U}_P}{U} = \frac{R_p + jX_p}{R_p + j(X_p + X_{MP})} \quad 2-35$$

a omjer apsolutnih vrijednosti napona će biti

$$\frac{U_P}{U} = \frac{Z_p}{\sqrt{R_p^2 + (X_p + X_{MP})^2}} \quad 2-36$$

i dalje

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_P'' = \frac{U - U_P}{U} = 1 - \frac{U_P}{U} = 1 - \frac{Z_p}{\sqrt{R_p^2 + (X_p + X_{MP})^2}} \quad 2-37$$

Za čvor T morali bi omjer impedancija 2-35 prilagoditi njegovom položaju u mreži.

Dobili smo izraz koji doduše uvažava omski otpor peći, ali je ograničeno indikativan, jer uzima u račun raspon od praznog hoda do nazivne prividne snage, dok stvarna kolebanja prividne snage mogu biti različita.

Rezultati dobiveni primjenom izraza 2-37 ne razlikuju se bitno od rezultata prema izrazu 2-33.

Primjer 2.10 Primijeni izraz 2-37 na čvor P prema primjeru 2.9. Svi potrebni podaci su ranije izračunati.

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_P'' = 1 - \frac{24,7}{\sqrt{17,5^2 + (17,5 + 3,5)^2}} = 1 - \frac{24,75}{27,34} = 1 - 0,905 = 0,0946 \approx \left(\frac{\delta U}{U}\right)_P$$

Izvedeni izrazi daju kolebanja napona koja se mogu očekivati, ali ne i periodičnost pojave. Na periodičnost se može zaključiti jedino mjerenjem ili po potrebi iskustveno prema drugim već poznatim slučajevima. O granicama periodičnosti kolebanja napona uslijed rada elektrolučne peći već je bilo govora ranije.

Dosadašnja razmatranja vršena su pod pretpostavkom, da je na određenom čvoru priključena samo jedna elektrolučna peć. Ako su priključene dvije ili više elektrolučne peći, smetnje se ne sumiraju aritmetički. Rezultirajuće smetnje odnosno kolebanja napona izazvana radom n peći neće biti veća od

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_{\text{rez}} = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^n s_{kpn}^2}}{s_{kT}} \quad 2-38$$

promatrano u čvoru T, što je sa stanovišta mreže najinteresantnije. Ako su peći jednake snage, izraz 2-38 prelazi u

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_{\text{rez}} = \sqrt{n} \left(\frac{\Delta U}{U}\right)_T \quad 2-39$$

gdje je $\frac{\Delta U}{U}$ kolebanje napona kod rada jedne peći, izračunato po izrazu 2-32 ili 2-33.

Za usporedbu se može navesti, da se npr. po britanskim tehničkim preporukama rezultirajuće kolebanje napona za n približno jednakih peći računa prema izrazu

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_{\text{rez}} = \sqrt[n]{n} \frac{\Delta U}{U} \quad 2-40$$

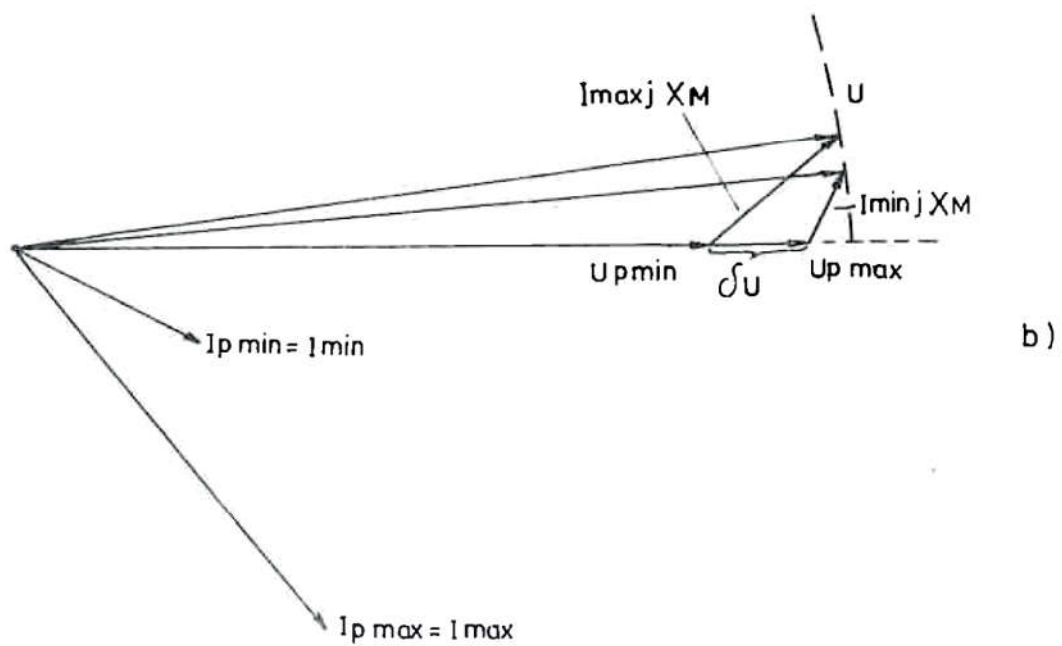
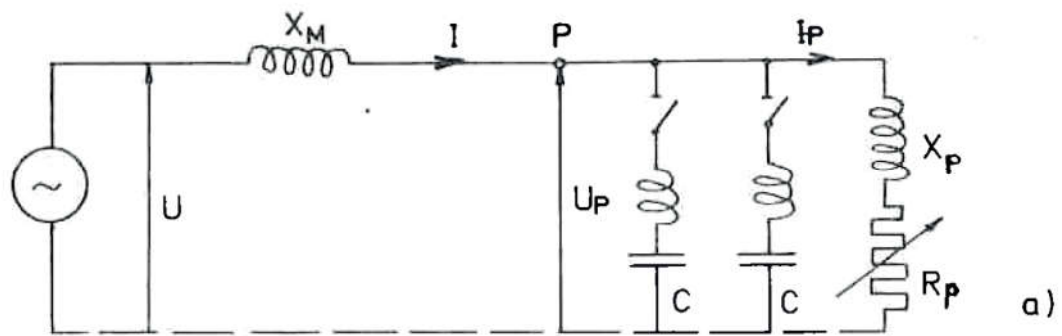
koji daje niže rezultate od izraza 2-39. Po istim preporukama se uzima, da manje peći ne povećavaju kolebanja napona što ih svojim radom izaziva najveća peć u grupi.

2.2.3 Suzbijanje kolebanja napona u mreži

Izraz 2-33 najzornije pokazuje, kako kolebanje napona ovisi o krutosti mreže, odnosno o snazi kratkog spoja u čvoru priključka elektrolučne peći, a na koji su priključeni i drugi potrošači. Prema tome bi se povećanje snage kratkog spoja moglo navesti kao prva mjera za suzbijanje kolebanja napona. Striktna primjena te mjere izazvala bi velike investicione troškove. Ipak je realno u tom pogledu ispitati, da li postoji mogućnost da se elektrolučna peć, putem "medjutransformatora" Tr na sl.86a, priključi na što viši naponski nivo, npr. na 110 kV umjesto na 35 kV. U čvoru višeg naponskog nivoa snage kratkog spoja su u pravilu znatno veće. Osim toga se u graničnim slučajevima može utvrditi kada dolazi do sezonskog smanjenja snage kratkog spoja, pa u to vrijeme obustaviti rad peći. Takva je mjera naravno krajnje naracionalna, mada je sa stanovišta mreže prihvatljiva.

Nadalje se mogu primijeniti razni posebni tehnički uređaji za suzbijanje brzih kolebanja napona. Oni se priključuju što bliže izvoru smetnje, dakle u pravilu u čvoru P (sl.86). Bit će nabrojeni i ukratko opisani takvi uređaji.

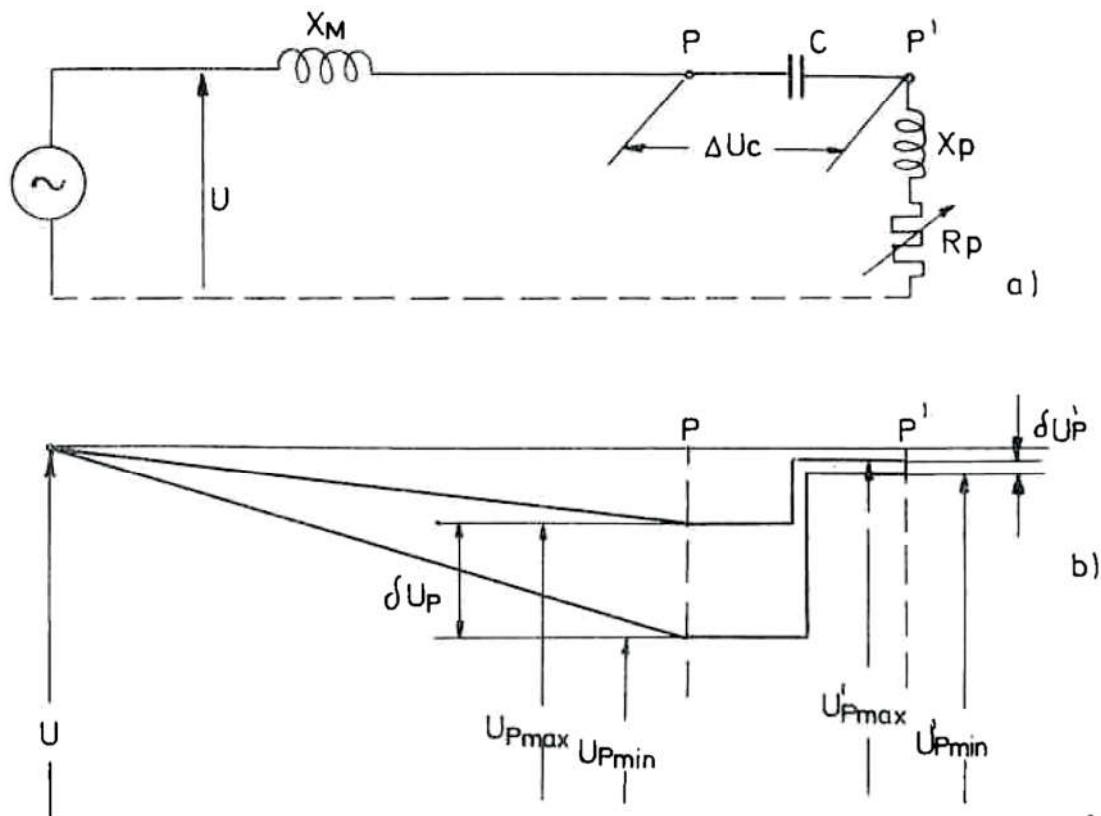
Kondenzatorska baterija se kao najjednostavnije rješenje postavlja za djelomičnu ili potpunu kompenzaciju reaktivne snage, koja je potrebna za rad peći. Povoljno je, da se kapacitet kondenzatorske baterije barem u grubim stupnjevima može prilagoditi trenutnoj fazi rada peći (talenje, rafinacija). Kondenzatorska baterija umanjuje prosječnu reaktivnu snagu što ju peć uzima iz mreže, pa time povećava prosječni napon u čvorovima P i T. Sama kolebanja napona se ne umanjuju, kao što se to vidi na sl.87. Kondenzatorska baterija (sl.87a) podijeljena je u dvije grupe radi grubog prilagodjenja njenog kapaciteta fazi procesa u peći. Na sl.87b prikazan je vektorski dijagram bez kondenzatorske baterije uz kolebanje struje opterećenja između minimalne i maksimalne vrijednosti. Na slici 87c prikazan je vektorski dijagram kod uključene kondenzatorske baterije, pri čemu se struji opterećenja dodaje kapacitivna struja kondenzatorske baterije. Kolebanje napona δU praktički je isto



Slika 87 - Djelovanje kondenzatorske baterije uz elektrolučnu peć na prilike u mreži; a) ekvivalentna shema; b) vektorski dijagram uz isključenu i c) uz uključenu kondenzatorsku bateriju

u oba slučaja. Prema tome se kondenzatorska baterija bez dodatnih brzih regulacionih organa ne može smatrati sredstvom za suzbijanje brzih kolebanja napona u mreži.

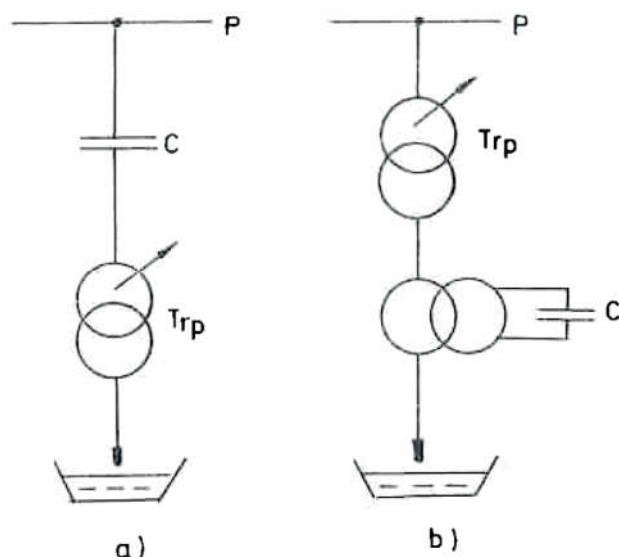
Serijski kondenzator je poznato sredstvo za poboljšanje naponskih prilika kod potrošača, pogotovo kada opterećenja imaju i značajnu induktivnu komponentu, pa se može primijeniti i uz elektrolučnu peć (sl.88). Poboljšanje naponskih prilika i smanjenje brzih ko-



Slika 88 - Priključak elektrolučne peći preko serijskog kondenzatora; a) ekvivalentna shema, b) naponske prilike

lebanja napona imamo međjutim tek iza serijskog kondenzatora idući od izvora prema potrošaču, pa u slučaju njegove primjene uz elektrolučnu peć postićemo pozitivno djelovanje na rad same peći. Napon na stezaljkama peći znatno manje koleba, ali prilike u preostaloj mreži, a time i smetnje, ostaju nepromijenjene.

Serijski kondenzator, kojemu je kao što smo vidjeli jedina svrha da elektrolučnoj peći osigura približno konstantan napon, može se u principu priključiti na dva načina, tj. prije i iza pećnog transformatora (sl.89). Pošto se prijenosni omjer ovog transformatora



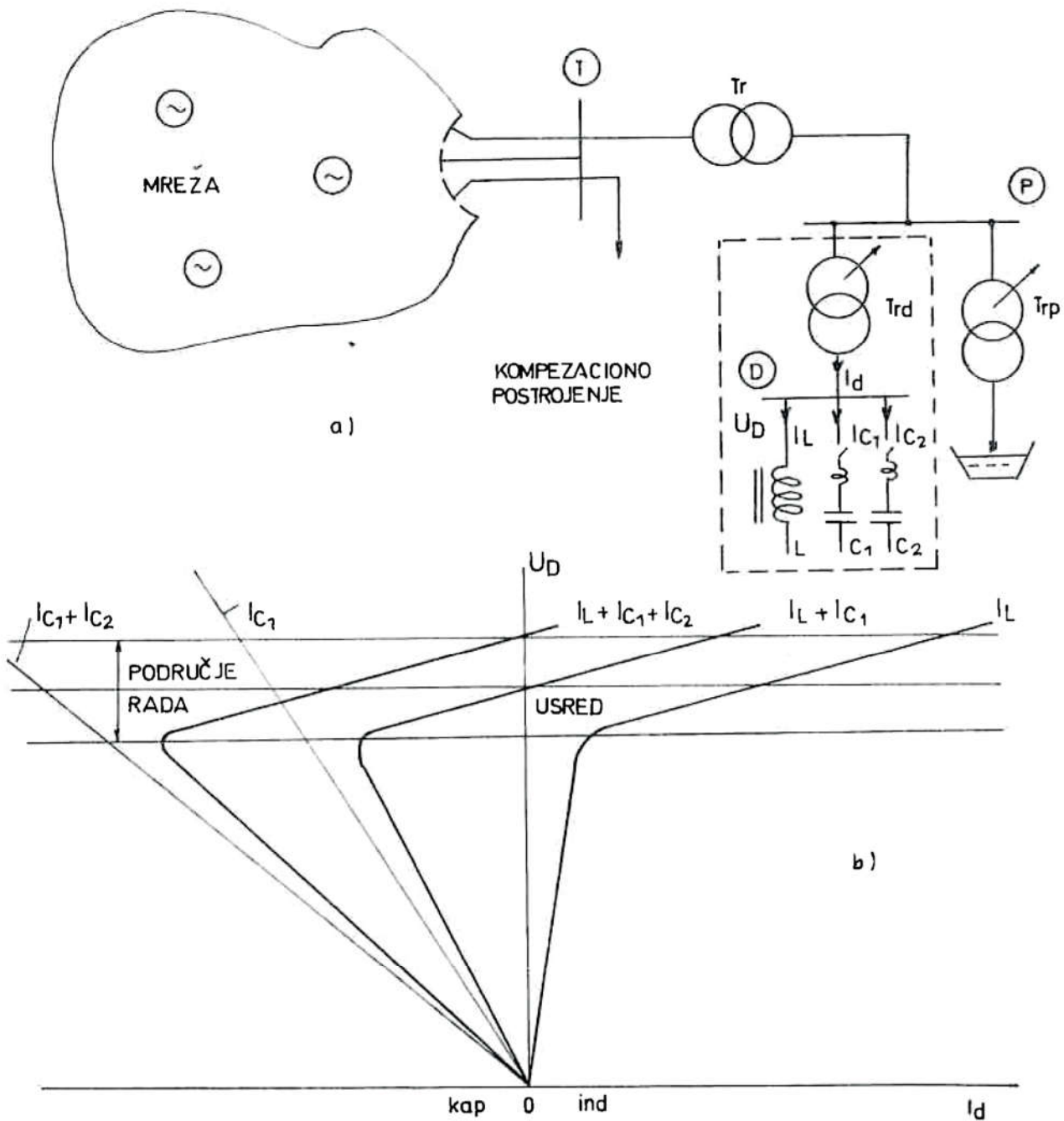
Slika 89 - Varijante priključka serijskog kondenzatora uz elektrolučnu peć.

mijenja u širokim granicama, djelovanje serijskog kondenzatora na rad peći biti će u oba slučaja različito. U slučaju b) kondenzator se ne može priključiti neposredno u strujni krug zbog vrlo jakih struja na tom mjestu, pa se priključak vrši preko dodatnog transformatora, koji se fizikalno ponaša kao strujni transformator.

Paralelni i serijski kondenzatori, kako su opisani, predstavljaju statička tehnička sredstva, jer nemaju regulacione uređaje niti su u stanju da spontano vrše regulacionu funkciju na strani mreže u smislu smanjenja kolebanja napona.

Paralelni kondenzator popravljiva faktor snage i poboljšava prosječne uvjete rada peći kao i prosječni napon u svojem okolišu. Serijski kondenzator osigurava približno konstantan napon na peći i time bitno poboljšava njene uvjete rada i stupanj djelovanja. Prema tome, ove mjere ne doprinose smanjenju kolebanja napona u mreži.

Paralelno spojena zasićena prigušnica, obično u kombinaciji s kondenzatorskom baterijom, predstavlja statički uređaj bez dodatnog regulacionog sistema, koji ima svojstvo spontanog regulacionog reagiranja. Na sl.90a prikazana je shema mreže s priključenom elektrolučnom peći i takvim kompenzacionim postrojenjem. Kondenzatorska baterija je dodana zato, da već ionako induktivno opterećena mreža ne bi bila dodatno opterećena značajnom induktivnom strujom zasićene prigušnice L. Kod porasta napona na sabirnicama P, a time



Slika 90 - Statičko kompenzaciono postrojenje sa zasićenom prigušnicom; a) shema, b) karakteristike

Tr_d - dodatni regulacioni transformator

I_d - struja kompenzacionog uredjaja

U_d - napon na kompenzacionom uredjaju

I_L - struja zasićene prigušnice

I_{C1}, I_{C2} - struje pojedinih dijelova kondenzatorske baterije

i na sabirnicama D , naglo poraste induktivna struja magnetiziranja zasićene prigušnice. Ova induktivna struja izaziva na reaktanciji mreže dodatni pad napona i time je porast napona djelomično kompenziran. Kolebanje napona bit će, dakle, osjetno umanjeno. Odgovarajuće U - I karakteristike prikazane su na sl.90b, gdje se vidi kako priključivanje kondenzatorskih baterija pomiče karakteristiku prigušnice djelomično ili potpuno u kapacitivno područje, što povoljno djeluje na prosječne naponske prilike.

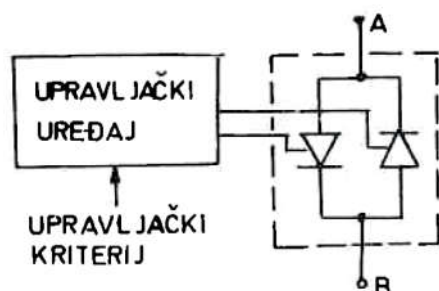
Postrojenje ima oštro ograničeno područje rada, što je na sl.90b i naznačeno. Prema dolje je ovo područje ograničeno prelaskom u nezasićeno stanje, kada prigušnica prestaje biti efikasna, a prema gore je ograničeno zagrijavanjem prigušnice. Pošto normalne spore varijacije napona u mreži dovode do pomaka točke U_{sred} na kompenzacionom postrojenju i time mu remete optimalno radno područje, postrojenje je priključeno preko dodatnog regulacionog transformatora Tr_d koji te promjene napona izravnavaju. Ova regulaciona funkcija može se povjeriti i transformatoru Tr .

Kriterij za regulacionu funkciju kompenzacionog postrojenja je napon na sabirnicama D . Pošto su kolebanja napona manja od kolebanja reaktivne struje peći, kompenzaciono djelovanje uređaja nije toliko precizno kao kod uređaja, koji će biti opisani kasnije.

Struja koju uzima zasićena prigušnica je izobličena, pa je takvo postrojenje izvor viših harmonika struja. Daljnja mana ovog rješenja su relativno visoki gubici i jako brujanje prigušnice uslijed zasićenja željezne jezgre.

Prednosti opisanog kompenzatorskog postrojenja su brzi odziv na promjene napona i jednostavnost, jer nema dodatnog regulacionog uređaja. Postoje izvedbe koje se razlikuju u unutarnjem i vanjskom spoju prigušnice, u načinu prilagodjenja karakteristike itd.

Paralelni kondenzatori s tiristorskim uključivanjem izvode se od većeg broja kondenzatorskih baterija manjeg kapaciteta, koje se prema potrebi uključuju ili isključuju. Umjesto prekidača s kontaktima primjenjuju se beskontaktni prekidači s učinkom tiristorima, kojima se brzo i lako upravlja bez mehanizama s pokretnim djelovima. Tiristorski prekidač prikazan je na sl.91. Dok su ti-



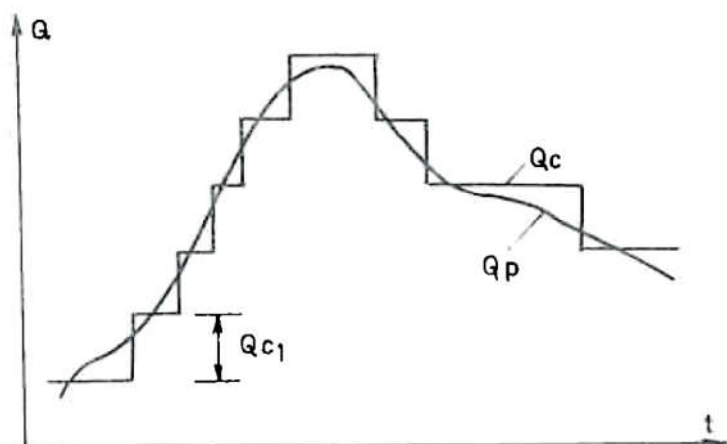
Slika 91 - Tiristorski prekidač

ristori u vodljivom stanju zahvaljujući odgovarajućim upravljačkim impulsima, između A i B nema otpora, "prekidač" je uključen. Ako upravljački impulsi izostanu, otpor od A do B postaje beskonačno velik, "prekidač" je isključen. Zaporni napon ovakvog prekidača limitiran je karakteristikama do danas proizvedenih učinkovitih tiristora i iznosi najviše nekoliko kilovolta. Pošto je priključni napon peći (čvor P na sl.97) redovito mnogo veći, morati

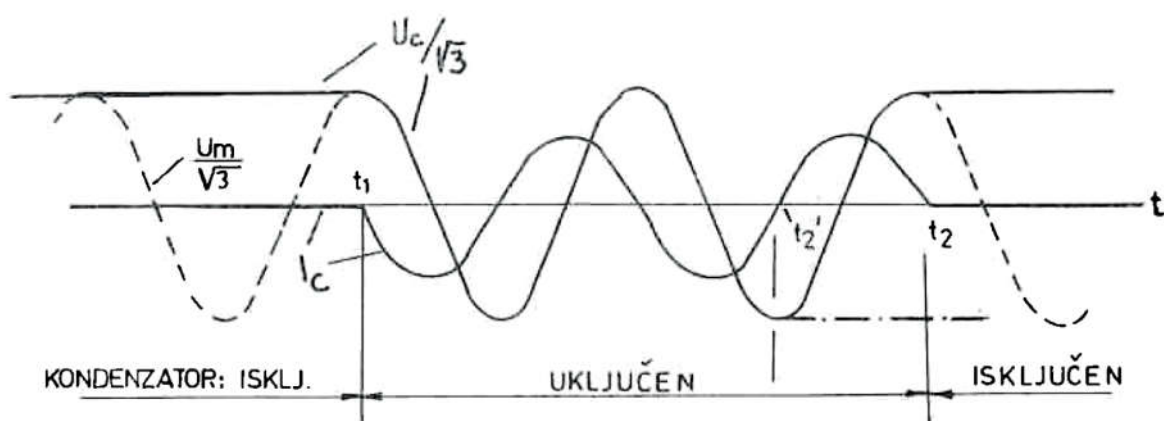
će se kondenzatorska baterija priključiti preko dodatnog transformatora Tr_d . Povećanje napona tiristorskog prekidača moguće je spajanjem više tiristora u seriju, što poskupljuje cjelokupni uređaj, pogotovo upravljački dio.

Ako je kondenzatorska baterija sastavljena iz dovoljnog broja odvojenih jedinica, moguće je snagu baterije dobro prilagoditi promjenjivoj reaktivnoj snazi elektrolučne peći. Na sl.92 je prikazano kako se prilagodjenje postiže sa šest međusobno jednakih kondenzatorskih jedinica jedinične snage Q_{C1} . Na uzlaznom dijelu krivulje Q_p doći će do stanovite prosječne potkompenziranosti, a na silaznom dijelu do prekompenziranosti zbog tromosti upravljačkih uređaja.

Uključivanje i isključivanje kondenzatorske baterije klasičnim prekidačem izaziva strujne udare i sklopne prenapone. Kod tiristorskog prekidanja i uključivanja moguće je te pojave svesti na minimum zahvaljujući mogućnosti preciznog upravljenja tiristora u svakoj fazi posebno, vodeći računa o momentalnoj vrijednosti napona mreže. To se postiže tako, da je isključena baterija trajno nabijena na maksimalni napon mreže ($\sqrt{2}U_m/\sqrt{3}$), a uključivanje se vrši u trenutku t_1 , kada se taj napon poklapa s naponom mreže. Isto tako se bira i trenutak isključenja t_2 , pa kondenzator ostaje nabijen na istu vrijednost napona kao prije uključivanja (sl.93). Po potrebi se isključenje može izvršiti i u trenutku t_2' , s time da



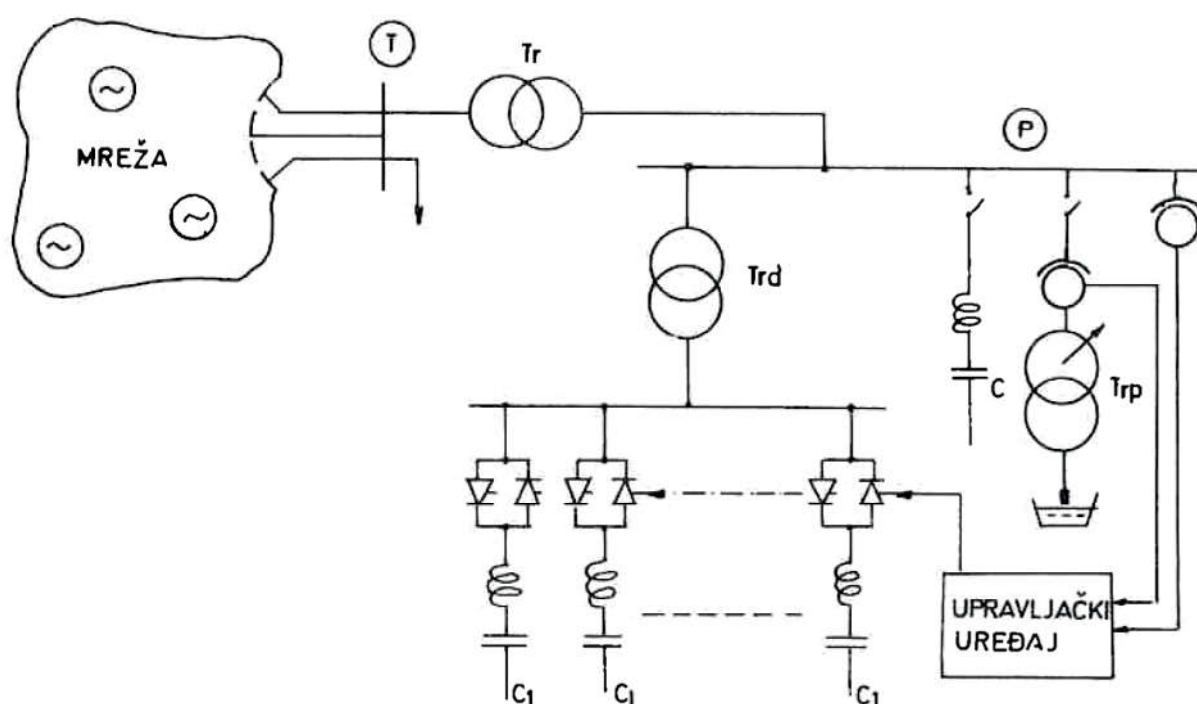
Slika 92 - Prilagodjenje snage kondenzatorske baterije sa tiristorskim uključivanjem reaktivnoj snazi elektrolučne peći



Slika 93 - Napon i struja kondenzatorske baterije kod uključivanja i isključivanja tiristorskim prekidačem

kondenzator ostaje nabijen na napon suprotnog polariteta, što utječe na izbor trenutka ponovnog uključenja. Pošto je u našem slučaju potrebno i poželjno reagiranje baterije u vremenu kraćem od jedne periode, jedan dio baterija spremnih za uključenje treba da je nabijen pozitivno, a drugi negativno. Uključuje se ona baterija, čiji "napon pripravnosti" odgovara naponu mreže. Ako tog trenutka nema nijedna slobodna baterija nabijena na odgovarajući polaritet, uključuje se pola periode kasnije baterija nabijena na suprotni polaritet.

Na sl.94 prikazana je jednofazna shema kompletnog postrojenja.



Slika 94. Kondenzatorska baterija sa tiristorskim uključivanjem

Kondenzatorska baterija C stalno je uključena i daje temeljnu snagu kompenzacije. Sve kondenzatorske baterije opremljene su prigušnicama za ograničenje struja uključivanja i pratećih prenapona do kojih može doći u slučaju greške u tiristorskom uključivanju.

Efikasnost opisanog kompenzacionog uređaja ovisi o brzini odziva na promjene. Kod suvremenih rješenja prosječno vrijeme odziva je ispod trajanja jedne periode. Nadalje je važno, na koliko jediničnih kondenzatora C_1 je podijeljena cijela kondenzatorska baterija. O tome ovisi preostalo kolebanje napona u mreži, pa treba provesti odgovarajuće proračune, odnosno mjerenja ako se uređaj projektira za postojeću peć.

Dobra strana uređaja je što se regulacija može vršiti odvojeno za svaku fazu, a vidjeli smo u uvodu da su razlike u ponašanju pojedinih faza često velike. Gubici uređaja su maleni, a pouzdanost visoka, jer se eventualni kvar reflektira samo na dio ukupnog kompenzacionog postrojenja.

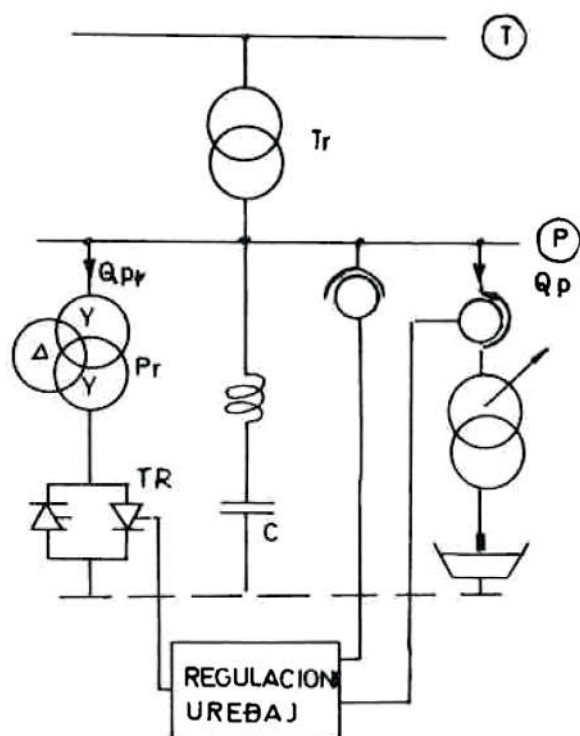
Umjesto većeg broja manjih kondenzatorskih baterija mogu se također primijeniti prigušnice s tiristorskim uključivanjem. Uključivanje i isključivanje vrši se tako, da je suma reaktivne snage peći i prigušnica u svakom trenutku približno konstantna. Kondenzatorskom baterijom konstantnog kapaciteta kompenzira se reaktivna snaga u željenom stupnju.

Uključivanje i isključivanje prigušnica vrši se u momentu kada napon ima maksimalnu vrijednost, odnosno kada struja ima vrijednost nula. Tako se eliminira opasnost od unutarnjih prenapona. Pošto prigušnice ne moraju biti "polarizirane" kao što je to slučaj s kondenzatorima, moguće je postići kraće prosječno vrijeme odziva. Gubici su veći nego kod analognog postrojenja s kondenzatorskim baterijama.

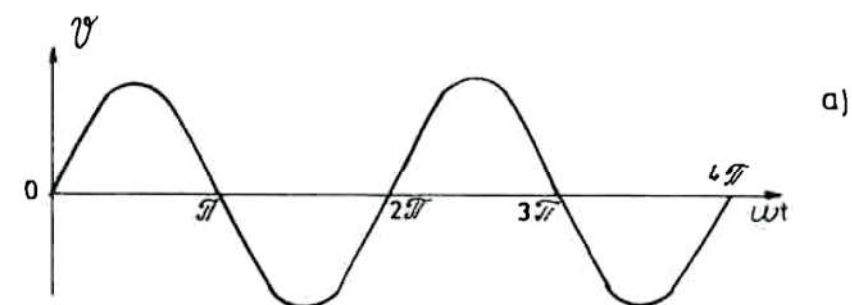
Kod paralelne prigušnice s tiristorskom regulacijom regulaciono djelovanje se ne postiže postepenim uključivanjem i isključivanjem većeg broja manjih prigušnica, već reguliranjem reaktivne struje jedne prigušnice dimenzionirane za ukupni regulacioni opseg. Jedno takvo kompenzaciono postrojenje prikazano je shematski na sl.95. Prigušnica P_r izvedena je kao sekundarni namotaj prilagodnog transformatora, koji je također opremljen i tercijarnim namotom radi kompenzacije harmonika struje magnetiziranja trećeg, devetog itd. ranga. Djelovanje sekundarne strane transformatora kao prigušnice postiže se povećanjem rasipanja između primarnog i sekundarnog namotaja, ali bez zasićenja u radnom području, kako bi se sačuvala linearnost. U većini slučajeva će se zahtijevati mogućnost regulacije u svakoj fazi posebno, pa magnetski krug mora biti konstruiran tako da jedna faza prigušnice ne utječe na drugu. U nekim varijantama kompenzacionog postrojenja ovoga tipa prilagodni je transformator standardne izvedbe, a prigušnica je odvojeno postavljena, često konstruirana bez željezne jezgre.

Kompenzacioni sklop se regulira tako, da ukupna reaktivna snaga peći i prigušnice ($Q_p + Q_{Pr}$) bude približno konstantna, dok kondenzatorska baterija C (sa zaštitnom prigušnicom) popravljajući faktor snage na željenu vrijednost.

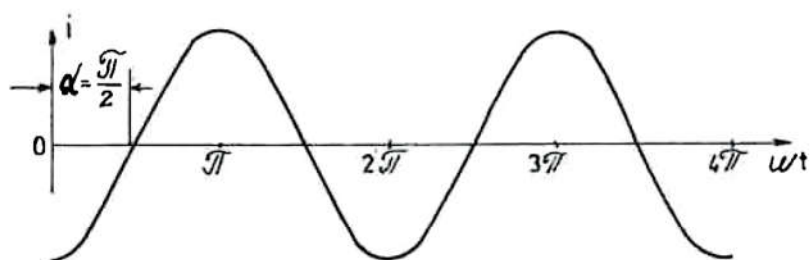
Tiristorski regulator TR ovdje ne radi kao prekidač opisan uz sl.91, već mijenjanjem kuta paljenja tiristora α . Na sl.96 prika-



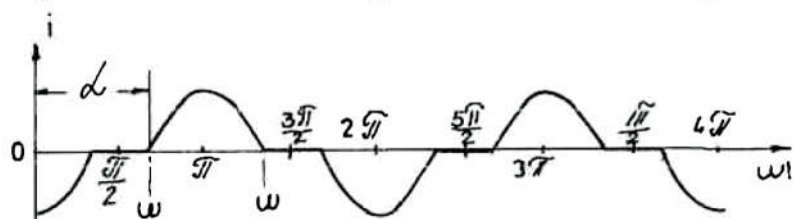
Sl. 95
Kompenzaciono postrojenje
sa tiristorski reguliranom
prigušnicom



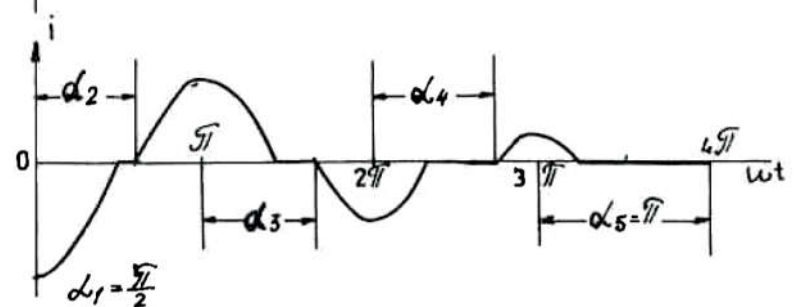
a)



b)



c)



d)

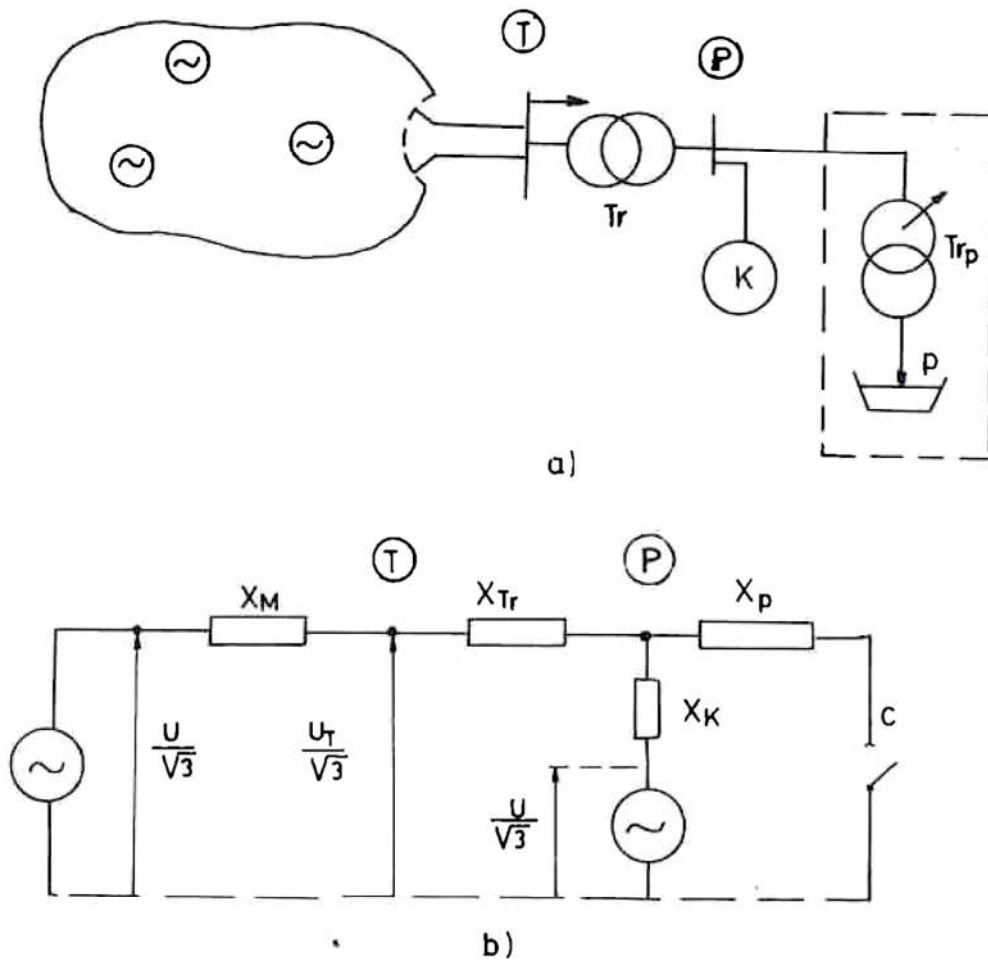
Sl. 96
Struja prigušnice sa
sl.95 regulirana ti-
ristorskim regulatorom

zan je efekt ovakve regulacije na struju prigušnice. Graf a prikazuje sinusoidu napona u jednoj fazi čvora P prema zemlji. Kada se upravljački impulsi pripadnim tiristorima daju tako, da se tiristori ponašaju kao diode, tiristorski regulator kao da ne postoji i graf struje i (graf b) je sinusoida koja za $\pi/2$ kasni za naponom. To pogonsko stanje odgovara "kutu paljenja" tiristora $\alpha = \pi/2$ (90°). Ako se kut paljenja α poveća, struja počinje teći u trenutku $\omega t_1 > \pi/2$ i prestaje teći u momentu prolaza kroz nulu, a to je ωt_2 . U intervalu od ωt_1 do ωt_2 tiristor je u vodljivom stanju, a struja i je tokom tog intervala u diferencijalnom odnosu prema naponu v . Ako se jednako postupi u svakoj poluperiodi regulirajući naizmjenično tiristore istim kutem α , oblik struje će odgovarati grafu c. Uočava se da je struja sada izobličena i prema tome sadrži više harmonika, ali je amplituda osnovnog harmonika bitno smanjena prema amplitudi struje na grafu b. Ako bi se kut paljenja α regulirao na π (180°), struja kroz prigušnicu potpuno iščezava kao da je prigušnica isključena. Ovo pogonsko stanje odgovara potpunom izostanku upravljačkih impulsa.

Na grafu d (sl.96) prikazan je radi bolje ilustracije slučaj, kada se kut paljenja α u svakoj poluperiodi povećava prema prethodnom i tako struja prigušnice postepeno smanjuje od pune vrijednosti ($\alpha_1 = \pi/2$) do nule ($\alpha_5 = \pi$) tokom pet poluperioda.

Kako se mijenja amplituda osnovnog harmonika struje, mijenja se i reaktivna snaga prigušnice. Ako se osigura ultrabrzo mjerenje momentalne reaktivne snage elektrolučne peći, prosječno vrijeme odziva opisanog uređaja na promjene je oko pol periode, pri čemu se svaka faza može regulirati posebno. U usporedbi s kondenzatorima s tiristorskim uključivanjem regulacija je finija. Mane su takvog sklopa nešto veći gubici (tipično za prigušnice), viši harmonici struje i koncentriranost snage u jednoj jedinici, pa kvar dovodi do potpunog ispada uređaja iz pogona.

Sinhroni kompenzator priključen na sabirnice pećnog transformatora također djeluje prigušujuće na kolebanja napona (sl.97a), pošto on na tom mjestu povećava snagu kratkog spoja. Ako u ekvivalentnoj shemi (sl.97b) sinhroni kompenzator prikažemo idealnim generatorom napona U u seriji s početnom reaktancijom kompenzato-



Slika 97 - Mreža sa sl.90 sa priključenim sinhronim kompenzatorom u čvoru P (a) i ekvivalentna shema (b)

ra X_K , možemo izraz 2-31 prilagoditi novonastaloj situaciji, pa dobivamo kolebanje napona u čvoru T:

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_T = \frac{X_M}{(X_M + X_{Tr}) \left(1 + \frac{X_P}{X_K}\right) + X_P} \quad 2-41$$

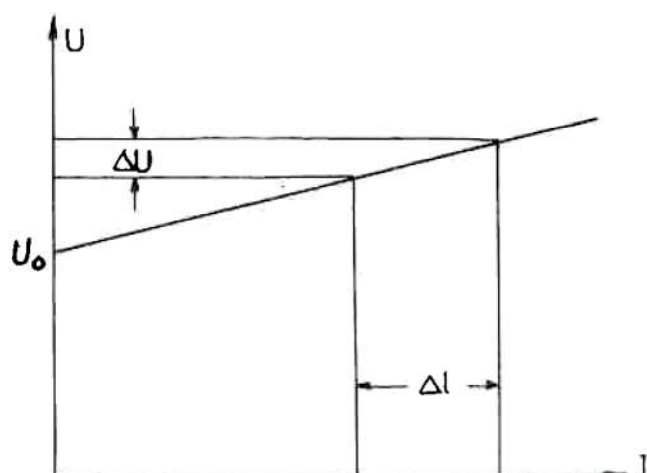
Gornji izraz vrijedi uz pretpostavku, da je uzbuda sinhronog kompenzatora konstantna, a osim toga su pretpostavljena i neka druga dodatna zanemarenja. Ipak se usporedbom izraza 2-31 i 2-41 može vidjeti, kako i u kojoj mjeri već samo priključivanje sinhronog kompenzatora umanjuje kolebanja napona uslijed rada elektrolučne peći.

Ako se dodatno koristi i brza regulacija uzbuđe uz pravilan izbor kriterija, mogu se preostala kolebanja napona umanjiti na oko 50% od vrijednosti izračunate izrazom 2-41. Sinhroni kompenzator, naime, sporo reagira na regulacione zahvate. Dok prije opisani tiristori upravljani statički kompenzacioni uređaji imaju, kao što smo vidjeli, ukupno vrijeme odziva od 0,5 do 1 periode, najbrže vrijeme odziva sinhronog kompenzatora ne može biti kraće od 5 perioda, a obično je i znatno duže (do 100 perioda). Osim toga sinhronom kompenzatoru nije moguće regulirati svaku fazu odvojeno. Ostale mane ovog rješenja su visoka cijena po instaliranom kVar i složeni pogon (hladjenje, podmazivanje, buka, gubici itd).

2.2.4 Posljedice kolebanja napona u mreži

Brze periodične ili uzastopne promjene napona, o kojima je ovdje riječ, dakle one kojima je periodičnost u rasponu od 0,5 do 25 Hz ili se dađu svesti na ovaj interval frekvencija, mogu izazvati smetnje kod nekih kategorija potrošača. Tako se u literaturi spominju smetnje kod prijema televizijskog programa (svjetlina slike, vertikalna sinhronizacija, veličina slike), ali izgleda da intenzitet smetnji nije velik i da ovisi i o tipu TV prijemnika. Ozbiljnije smetnje pojavljuju se na regulacionim uređajima, posebno elektroničkim, i to sa strane napajanja ovih uređaja iz mreže (eliminiraju se dobrom stabilizacijom napojnog napona) i sa ulazne strane, ako je napon mreže jedan od kriterija za reguliranje. Kolebanja napona mogu štetno utjecati i na rad elektroničkih računala, što se međjutim može eliminirati postavljanjem stabilizatora napona. Primjećene su smetnje i kod rada motora.

Brza kolebanja napona mogu izazvati ozbiljne smetnje u nekim industrijskim elektrolitičkim procesima, koji se napajaju iz mreže preko poluvodičkih ispravljača. Određene elektrolitičke kupke posjeduju naime određenu elektromotornu silu U_0 , pa prema tome nisu linearni potrošači. Na sl.98 prikazana je idealizirana U-I karakteristika elektrolitičke kupke. Vidimo, da mala promjena napona ΔU izaziva veliku promjenu struje ΔI , što može nanijeti štetu te-



Slika 93 -

Idealizirana U-I karakteristika elektrolitičke kupke. U_0 je vlastita elektromotorna sila

hnološkom procesu i postrojenju.

Ako postoje brza kolebanja napona mreže, ona se najuočljivije ispoljavaju u vidu treperenja rasvjete ("flicker"), naročito kod sijalica sa žarnom niti. Prijemnik smetnje je u tom slučaju ljudsko oko, pa značajnu ulogu igraju individualne subjektivne sklonosti i navike pojedinih ljudi, ali je pojava u tolikoj mjeri istražena, da se mogu donijeti mjerodavni zaključci. Ustanovljeno je, da je ljudsko oko najosjetljivije na flickere periodičnosti 10 Hz, a manje je osjetljivo na brža i sporija kolebanja uz istu amplitudu.

Prosječno ljudsko oko počinje zamjećivati flickere frekvencije 10 Hz uz kolebanja napona od 0,25 do 0,3 %.

Pomoću krivulje na sl.99 može se smetnja frekvencije $f \neq 10$ Hz i amplitude a_f svesti na ekvivalentnu amplitudu a_{10} kod 10 Hz:

$$a_{10} = a_f g_f \quad 2-42$$

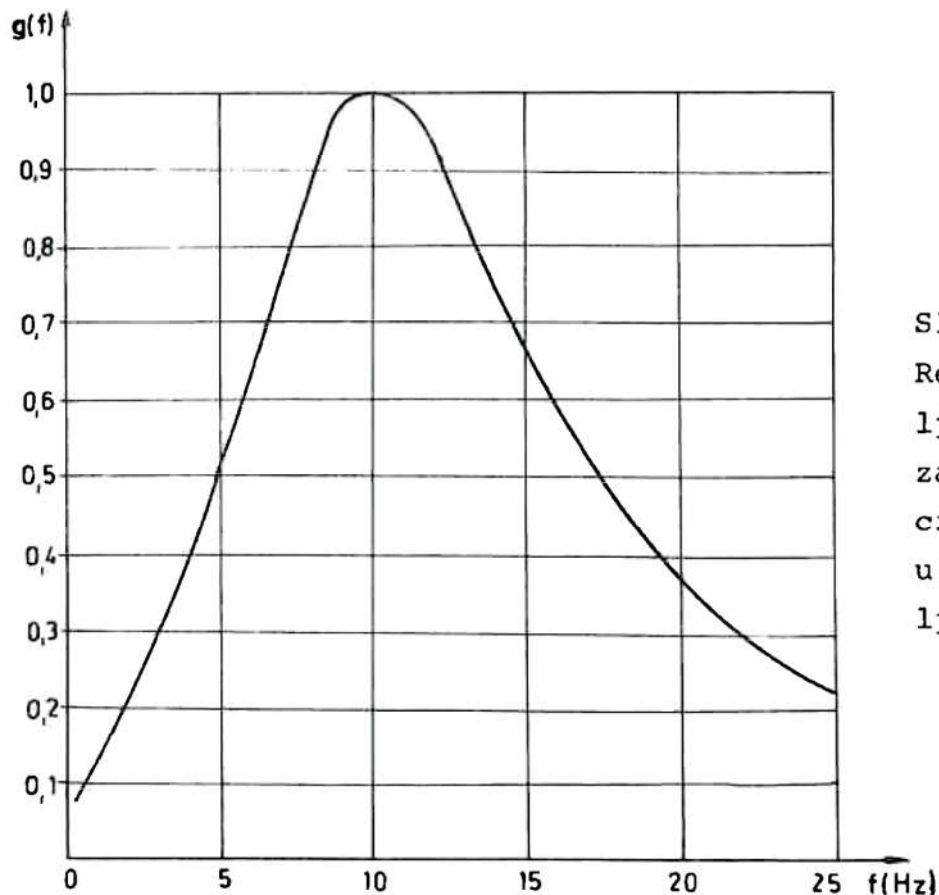
Ako postoji mješavina istovremenih flickera raznih frekvencija f_i i raznih amplituda a_{fi} , rezultirajuća amplituda a_{10} kod 10 Hz dobiti će se kao geometrijska suma pojedinih flickera u spektru, s time da je prethodno svaki sveden na 10 Hz:

$$a_{10} = \sqrt{\sum (a_{fi} g_{fi})^2} \quad 2-43$$

Ustanovljeno je, nadalje, da iritirajuće djelovanje flickera na čovjeka raste s kvadratom amplitude a_{10} i linearno s trajanjem smetnje. Tako se dolazi do pojma "flicker-doze", tj. do "količine" iritiranja, koja se može izraziti sa

$$G = \int_0^T a_{10}^2 dt$$

2-44



Slika 99 -
Relativna osjetljivost oka $g(f)$ za razne frekvencije flickera f u odnosu na osjetljivost kod 10 Hz

Ova i slična razmatranja dovela su do konstrukcije instrumenata (Francuska, Engleska), koji omogućuju objektivno mjerenje iritirajućeg djelovanja flickera na čovjeka.

Propisi i tehničke preporuke, koji reguliraju maksimalna brza kolebanja napona mreže, u raznim zemljama svijeta još dosta odstupaju kako po definiranju problema, tako i po dozvoljenim kolebanjima. Zajedničko im je, da se u mrežama višeg napona (npr. 110 kV i više) postavljaju stroži kriteriji nego u mrežama niskog i srednjeg napona. To je zato, što se smetnja u mreži višeg napona od-

razuje na znatno veći broj pojedinačnih potrošača.

Jedna opsežna anketa provedena u Evropi 1973.godine pokazala je, da u 90% slučajeva nema smetnji u mreži uslijed kolebanja napona, ako je zadovoljen uvjet (vidi izraz 2-32):

$$\frac{S_{kp}}{S_{kT}} = 0,018 \dots 0,023 \quad 2-45$$

pri čemu vrijedi 0,018 za male elektrolučne peći

0,0186 za $S_{pn} = 20 \text{ MVA}$

0,023 za $S_{pn} = 100 \text{ MVA}$

Ista anketa je pokazala, da u 90% slučajeva nema smetnji u mreži, ako je zadovoljen uvjet

$$S_{pn} = \frac{S_{kT}}{K} \quad 2-46$$

pri čemu $K = 125$ za male elektrolučne peći

$K = 100$ za $S_{pn} = 20 \text{ MVA}$

$K = 70$ za $S_{pn} = 100 \text{ MVA}$

U pogledu konfiguracije mreže treba odabrati razdoblje, kada je S_{kT} minimalna.

Smetnje uslijed kolebanja napona manifestiraju se u većini slučajeva najprije, najintenzivnije i najmasovnije kod flickera rasvjete, pa je ta činjenica utjecala i na rezultate ankete. Tako je potpuno analogna anketa u Japanu pokazala da se 90 % vjerojatna granica smetnje postiže kod dosta većih snaga elektrolučnih peći nego u Evropi. Razlog je tome, što je nazivni niski napon u Japanu 110 V umjesto 220 V, pa su žarne niti sijalica uz istu snagu deblje i stoga toplinski tromije i manje osjetljive na kolebanja napona.

2.3 NESIMETRIJE STRUJE I NAPONA

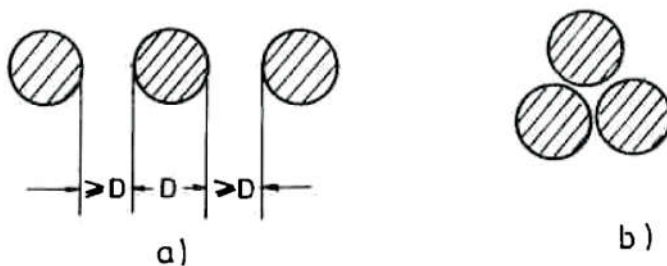
U ovom poglavlju obradit ćemo, u najnužnijem obimu, samo one nesimetrije, koje se mogu pojaviti u normalnom (stacionarnom) pogonu. Nesimetrični kvarovi će biti obrađeni u poglavlju 3.

Trofazna mreža pretpostavlja idealnu simetriju po fazama, kako po izvedbi ugradjenih elemenata, tako i u (normalnom) pogonu. U stvarnosti ove pretpostavke nisu u cijelosti ispunjene.

Od elemenata mreže nesimetrični su, u većoj ili manjoj mjeri, nadzemni vodovi, neke vrste kabela i transformatori.

Nadzemni vod zbog obično nejednakih udaljenosti među vodičima, te zbog nesimetričnog položaja zaštitne užadi i zemlje prema faznim vodičima, predstavlja nesimetrični element mreže (vidi Mreže I, poglavlje 4.). Radi toga se na dužim vodovima vrši preplitanje vodiča ("Mreže I", 4.2.4). Vodovi s potpuno prepletenim vodičima ponašaju se kao simetrični elementi mreže.

Jednožilni kabeli, kojima su tri žile (faze) položene u jednoj ravnini, imaju nesimetrične uzdužne reaktancije. Polaganjem žila u trokut ova se nesimetrija eliminira, a dolazi u obzir i preplitanje žila (sl.100 i "Mreže I", 4.2.5).



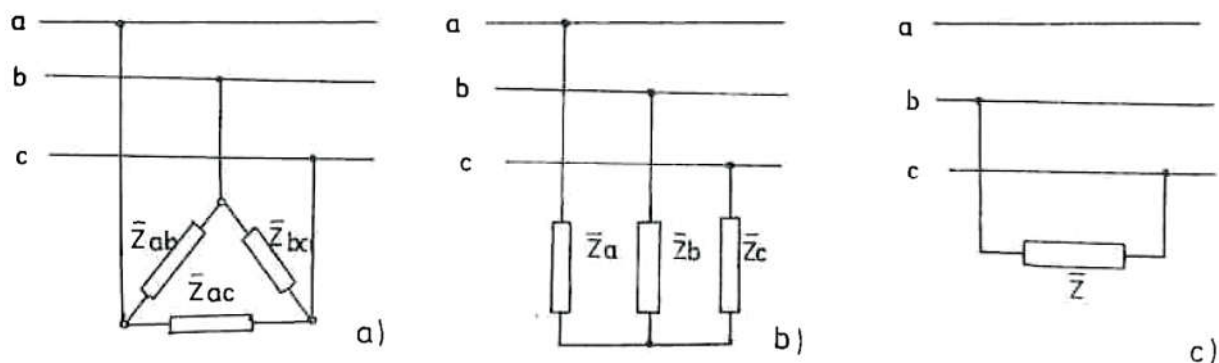
Uobičajene izvedbe učinskih transformatora imaju nešto različite struje magnetiziranja po fazama, no te su razlike sa stanovišta mreže sasvim beznačajne.

Slika 100 - Načini polaganja jednožilnih kabela

Prilikom osnivanja mreže i njenih pojedinih elemenata vodi se računa o nesimetriji, pa u poglavlju 2.3.1 polazimo od pretpostavke, da je mreža u užem smislu (bez potrošača) tehnički simetrična.

2.3.1 Računanje nesimetrija uslijed nesimetričnog potrošača

Osnovni slučaj razmatranja je priključivanje nesimetričnog potrošača na simetričnu mrežu. U općem slučaju, nesimetrični potrošač se može pojaviti u oblicima prikazanim na sl.101.



Slika 101 - Vrste nesimetričnih potrošača

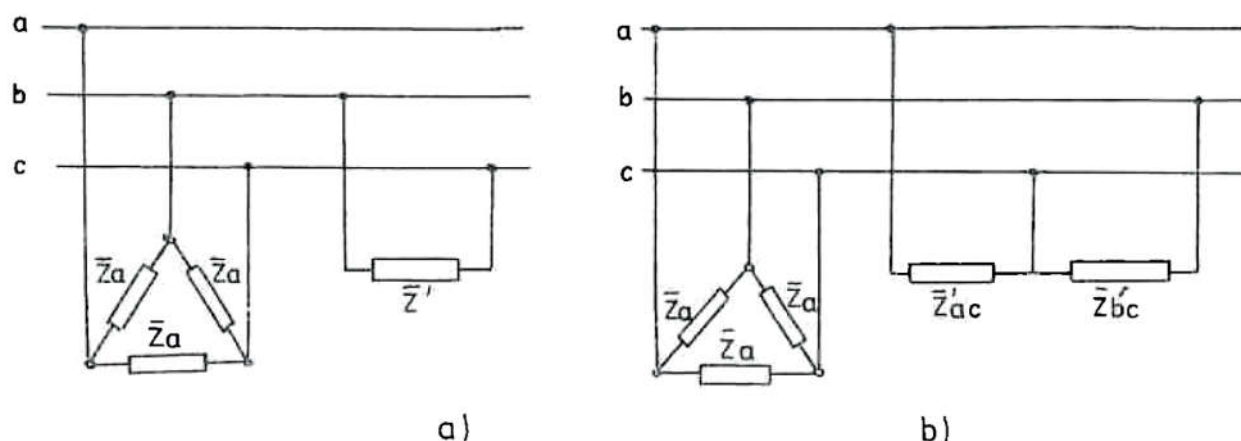
Sl.101a prikazuje općenito nesimetričnog trofaznog potrošača spojenog u trokut, a sl.101b takvog potrošača spojenog u zvijezdu. Jedan oblik je lako transfigurirati u drugi ("Mreže I", 7.4.1. i 7.4.2). Izuzet ćemo jednofazna trošila na niskom naponu priključena između faze i nulvoda, jer ona svojom brojnošću omogućuju takav raspored po pojedinim fazama, da sa stanovišta mreže tvore simetričnog trofaznog potrošača ("statistička simetrija"). Povremene slučajne nesimetrije su beznačajne, a i elementi niskonaponske mreže su osnovani za takve mogućnosti (opteretivnost nultočke transformatora i nulvoda sa 100% nazivne struje).

Nesimetrični potrošači priključeni na mrežu srednjeg ili visokog napona ne koriste povratni nulvod, pa ne izazivaju pojavu nulte komponente struje, već samo direktnu i inverznu komponentu.

Velika većina nesimetričnih potrošača su jednofazni (monofazni) potrošači, priključeni međufazno prema sl.101c (električne lokomotive, jednofazne elektrolučne peći, priključene na mrežu putem jednofaznih, na primarnoj strani međufazno spojenih transformatora).

Rijetki nesimetrični potrošači općeg oblika prema sl.101a ili

101b dati će se razložiti u jednog simetričnog potrošača i jednog nesimetričnog prema sl.101c. U najsloženijim slučajevima će se opći nesimetrični potrošač prikazati kao jedan simetrični prema sl.101a i dva nesimetrična prema sl.101c. Tako dobivamo ekvivalente kao na sl.102a ili 102b.



Slika 102 - Razlaganje općeg nesimetričnog potrošača sa sl.101a

Simetrični dio nesimetričnog potrošača izuzimamo iz analize ako zanemarujemo i ostale potrošače, a tretiramo ga kao simetričnog potrošača ako ne zanemarujemo ostale simetrične potrošače. Analiziramo dalje samo nesimetrični dio. Razlaganje se vrlo jednostavno provodi putem snaga. Indeksi su isti kao uz impedancije na sl. 101a i 102b. Snage S_{ab} , S_{bc} i S_{ac} su poznate.

$$\bar{S}_a = \bar{S}_{ab}$$

$$\bar{S}'_{ac} = \bar{S}_{ac} - \bar{S}_{ab}$$

2-47

$$\bar{S}'_{bc} = \bar{S}_{bc} - \bar{S}_{ab}$$

Lijevo od znaka jednakosti su snage ekvivalenta (sl.102b), a desno su snage originala (sl.101a).

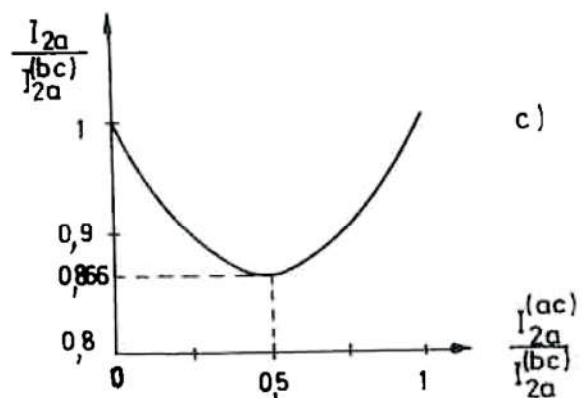
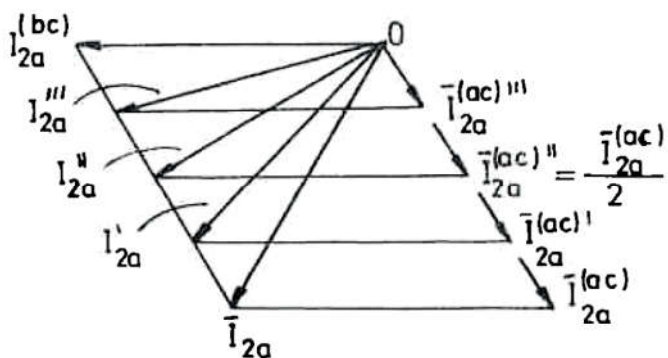
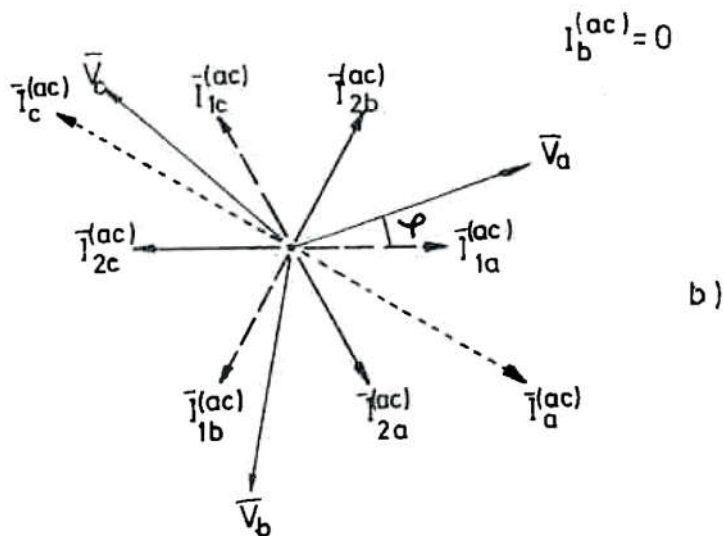
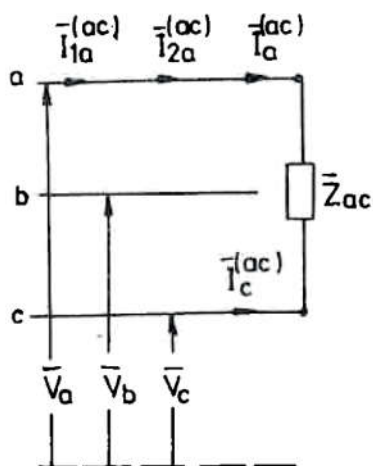
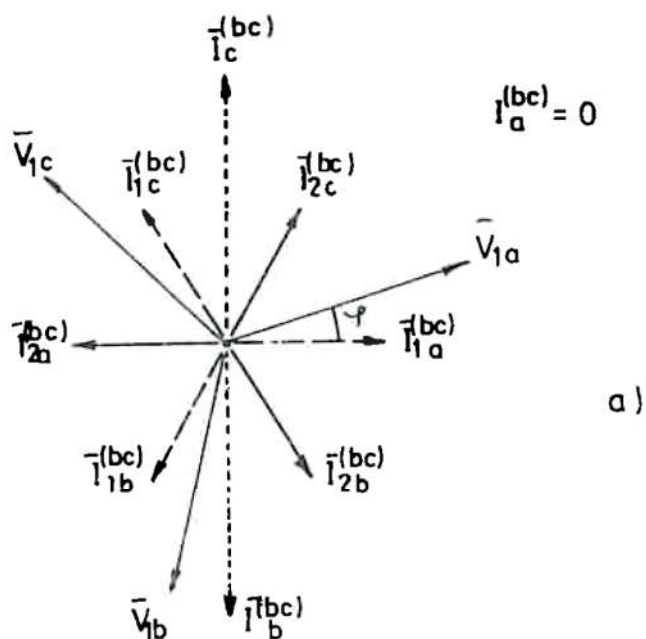
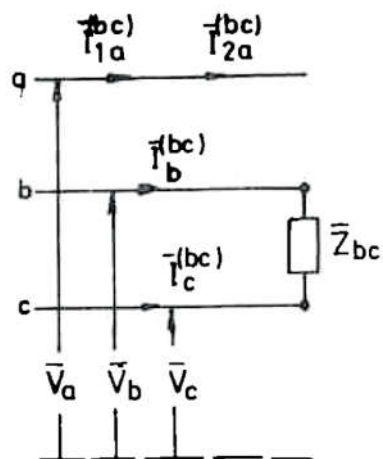
Izrazi 2-47 vrijede u slučaju, kada je $\bar{S}_{ab}$ najmanja od tri međufazne snage. Ako to nije slučaj, jednokratnom ili dvokratnom cikličkom permutacijom indeksa a-b-c možemo izraze 2-47 za svaki

konkretni slučaj prilagoditi ovom zahtjevu.

Tehničke analize moći će se, dakle, uvijek svesti na promatranje međufaznog potrošača prema sl.101c. Ako se, prividno, ne bi moglo izbjeći razmatranje dvaju međufaznih potrošača prema desnom dijelu slike 102b, mogla bi se primijeniti metoda superpozicije, ali ćemo uskoro vidjeti, da se to može jednostavno izbjeći tako, da jednostavno zanemarimo veću od impedancija $\bar{Z}'_{ac}$ i $\bar{Z}'_{bc}$ ili jednu od njih ako su međusobno jednake.

Nesimetrični "ostatak" općeg nesimetričnog trofaznog potrošača, koji preostaje nakon izlučivanja simetričnog dijela (sl.102b desno) sastoji se od dva međufazna potrošača tipa prikazanog na sl. 101c, s time da je svaki od njih priključen na različiti par faza. Svaka od impedancija $\bar{Z}'_{ac}$ i $\bar{Z}'_{bc}$ izazvati će za sebe neku inverznu struju. Te dvije struje će u praksi imati međusobni fazni pomak od oko 120° (točno 120° , ako su argumenti impedancija $\bar{Z}'_{ac}$ i $\bar{Z}'_{bc}$ međusobno jednaki, odnosno ako su faktori snage odgovarajućih snaga $\bar{S}'_{ac}$ i $\bar{S}'_{bc}$ međusobno jednaki). Lako je pokazati, da će apsolutna vrijednost vektora sume inverznih struja izazvanih od dvaju po argumentu sličnih impedancija prema sl.102c desno uvijek biti jednaka ili manja po iznosu od većeg sumanda, ali nikada manja od oko $\sin 60^\circ = 0,866$ puta od većeg sumanda. Takva suma struja će biti najmanja, ako $Z'_{ac} = 2Z'_{bc}$. To nam dozvoljava, da kod grubljih proračuna zanemarimo veću od impedancija Z'_{ac} i Z'_{bc} . Rezultati će biti nepovoljniji za najviše 13%. U spornim slučajevima će trebati računati s vektorskom sumom inverznih komponenata obaju međufaznih potrošača.

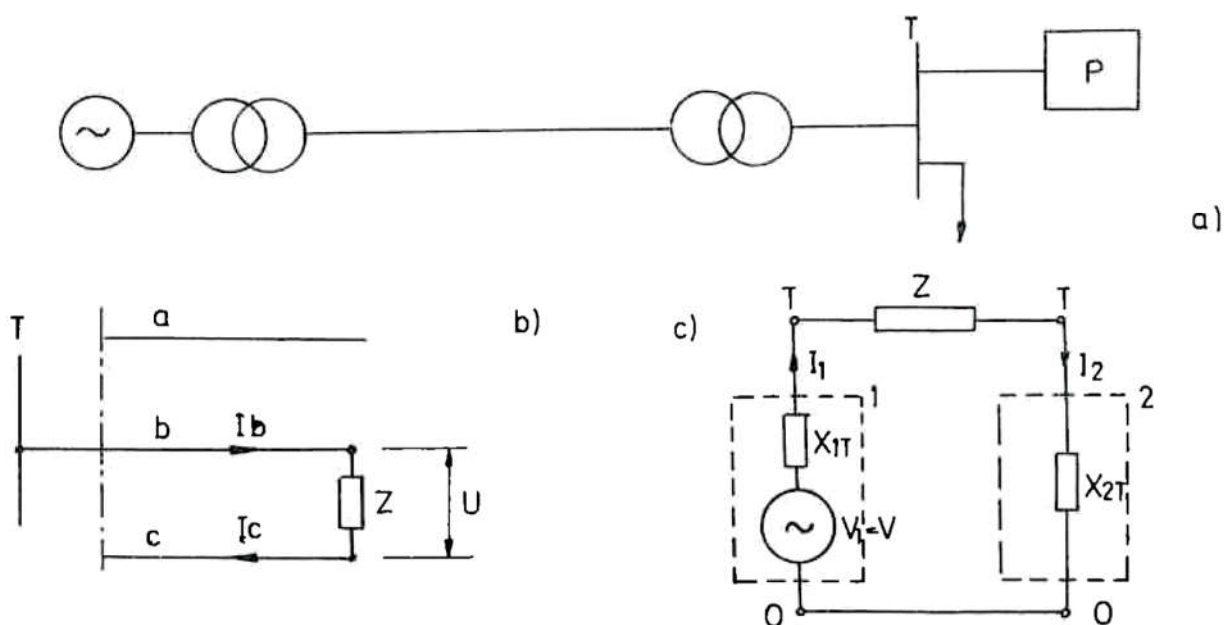
Opisano razmatranje ilustrirano je na sl.103. Na sl.103a prikazana je shema i trofazna vektorska slika za slučaj da postoji samo međufazni potrošač $\bar{Z}_{bc}$, pa su zato sve pripadne veličine, koje su rezultat tog slučaja, indicirane gornjim indeksom (bc). Na sl. 103b prikazan je slučaj, da postoji samo međufazni potrošač $\bar{Z}_{ac}$, pa su pripadne veličine indicirane gornjim indeksom (ac). Radi lakše usporedbe ovih slučajeva je pretpostavljeno, da oba međufazna potrošača imaju istu snagu i isti faktor snage. Prva pretpostavka je upravo predmet razmatranja, a druga je u praksi uvijek približno ispunjena. Dodatno vidimo, da su direktni sistemi stru-



Slika 103 - Prikaz mogućnosti zanemarenja jednog od dva međufazna potrošača

ja sufazni, što je i logično (direktna komponenta struje sa osnovnim, direktnim, naponom daje snagu), a ujedno nam dokazuje, da direktni sistem struja nije izvor nesimetrija i ne mora biti razmatran. Ostaje da se razmotri inverzni sistem struja, pa su u tu svrhu na sl.103c, dvostruko povećano, izdvojeno prikazane struje $\bar{I}_{2a}^{(bc)}$ i $\bar{I}_{2a}^{(ac)}$ faze a, čiji zbroj daje inverznu struju faze a $\bar{I}_{2a}$. To je slučaj, kada su istovremeno priključena oba međufazna potrošača $\bar{Z}_{bc}$ i $\bar{Z}_{ac}$. Na istoj slici 103c je dalje uzeto, da se snaga potrošača između faza a i c postepeno smanjuje, tj. da se $\bar{Z}_{ac}$ povećava. To dovodi do postepenog smanjenja struje $\bar{I}_{2a}^{(ac)}$ na $\bar{I}_{2a}^{(ac)'} = \bar{I}_{2a}^{(ac)}/2$ i tako dalje sve dok ta struja ne iščezne. Apsolutna vrijednost sumarne inverzne struje I_{2a} u fazi a se smanjuje do minimalne vrijednosti $I_{2a}'' = 0,866 I_{2a}^{(bc)}$ kod $\bar{I}_{2a}^{(ac)'} = \bar{I}_{2a}^{(ac)}/2$ i kasnije opet raste do prvobitne apsolutne vrijednosti. Na sl.103d je ovaj odnos još jednom grafički prikazan u relativnom mjerilu. Time je dokazana već ranije iznijeta konstatacija, da se manji od dva međufazna potrošača može zanemariti, ako oba potrošača imaju slični faktor snage.

Na sl.104a prikazana je električna mreža svedena na jednostavni prijenosni sistem. Na "zajednički" čvor T priključen je, osim dru-



Slika 104 - Nesimetrični međufazni potrošač priključen na mrežu

gih (simetričnih) potrošača, još i nesimetrični međufazni potrošač P snage $\bar{S}$. Potrošač P je detaljnije trofazno prikazan na sl. 104b.

Ako se ograničimo na proračun apsolutnih vrijednosti, prema sl. 104b je

$$S = \frac{U^2}{Z} \quad 2-48$$

odakle dobivamo impedanciju potrošača

$$Z = \frac{U^2}{S} \quad 2-49$$

Struje kroz faze b i c su po iznosu jednake

$$I_b = I_c = \frac{U}{Z} = \frac{S}{U} \quad 2-50$$

Ako pretpostavimo, da je mreža neopterećena, tj. ako zanemarimo potrošače i ostale poprečne grane, te ako slično kao kod nekih drugih približnih proračuna zanemarimo i omske otpore elemenata mreže, može se mreža svesti na direktni sistem prikazan u okviru 1 na sl. 104c i na inverzni sistem prikazan u okviru 2 iste slike. Međufazni potrošač impedancije $\bar{Z}$ priključen između faza b i c zatvara strujni krug preko ekvivalentne direktne i inverzne sheme kako je prikazano na sl. 104c.

Ekvivalentnu direktnu reaktanciju mreže promatranu iz čvora T i pripadnu inverznu reaktanciju možemo bez velike greške međusobno izjednačiti (vidi "Mreže I", 5.7), a izračunati ćemo ih iz poznate snage početnog trofaznog kratkog spoja u čvoru T u minimalnom (noćnom) režimu prema 2-13:

$$X_{1T} = X_{2T} = \frac{U^2}{S_{KT}} \quad 2-51$$

Ako pretpostavimo, dalje, da su reaktancije X_{1T} i X_{2T} malene u odnosu na Z potrošača, što je u praksi čest slučaj, možemo prema sl.

104c izračunati direktnu i inverznu komponentu struje potrošača Z

$$I_1 = I_2 \doteq \frac{V}{Z} = \frac{U}{\sqrt{3}} \frac{1}{Z} = \frac{S}{\sqrt{3}U} \quad 2-52$$

Ako reaktancije X_{1T} i X_{2T} nisu zanemarivo male u odnosu na Z, struje I_1 i I_2 izlaze veće od stvarnih. U spornim slučajevima može se u izraz 1-52 umjesto Z uvrstiti apsolutna vrijednost ukupne impedancije strujnog kruga po sl.104c, s time da za X_{2T} uvrstimo vrijednost izračunatu iz snage početnog trofaznog kratkog spoja prema 2-51, a za X_{1T} vrijednost izračunatu pomoću istog izraza, ali iz podatka o trajnom trofaznom kratkom spoju (pogotovo ako je čvor T u blizini velike elektrane ili velikog sinhronog kompenzatora):

$$Z = |jX_{1T} + jX_{2T} + \bar{Z}| \quad 2-53$$

Inverzna komponenta struje I_2 grana se u cjelokupnoj ekvivalentnoj shemi inverzne mreže. Ta je mreža spojena s nulom sistema preko inverznih reaktancija generatora u generatorskim čvorovima (vidi npr. "Mreže I", sl.217). Raspodjelu struje I_2 u mreži možemo odrediti analitički bilo kojom poznatom metodom, ako zamislimo da je struja I_2 injektirana u inverznu mrežu u čvoru T.

Nesimetričnost struje možemo u bilo kojoj grani mreže izraziti omjerom tako ustanovljene inverzne komponente struje prema direktnoj komponenti struje (ili ukupnoj struji) koja teče tom granom uslijed svih potrošača u mreži:

$$v_I = \frac{I_2}{I_1} \doteq \frac{I_2}{I} \quad 2-54$$

ili u postotku

$$v_I\% = 100 v_I \quad 2-55$$

Struja I_2 će na ekvivalentnoj inverznoj reaktanciji mreže X_{2T} proizvesti pad napona ΔU_{2T} . Pošto u mreži nema aktivnih izvora inverzne komponente napona, napon ΔU_{2T} će ujedno biti izvor inverznog

napona U_2 u čvoru T. Uvažavamo 2-51 i 2-52.

$$\Delta U_{2T} = U_2 = \sqrt{3} I_2 X_{2T} = \frac{SU}{S_{KT}} \quad 2-56$$

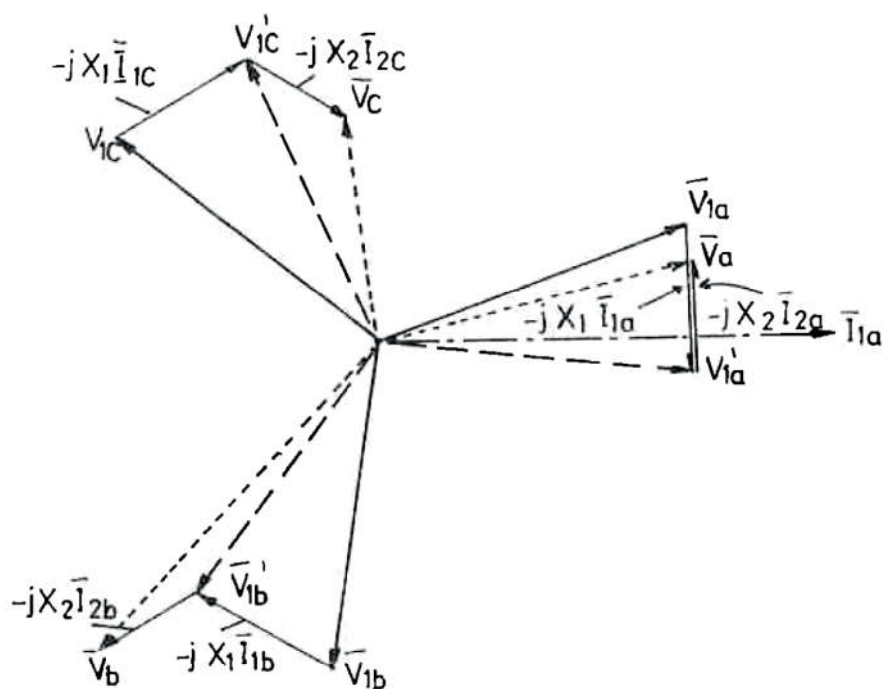
Nesimetričnost napona možemo izraziti kao omjer inverzne i direktne komponente napona (odnosno omjerom inverzne komponente i ukupnog napona). Uvažavamo 2-56:

$$v_U = \frac{U_2}{U_1} \approx \frac{U_2}{U} = \frac{S}{S_{KT}} \quad 2-57$$

ili u ‰

$$v_U^{\%} = 100 v_U \quad 2-58$$

Makar u tehničkim proračunima ne smatramo nužnim voditi računa o međusobnim faznim odnosima direktnih i inverznih struja odnosno napona, na sl.105 ćemo pokazati nastanak nesimetrije napona usli-



Slika 105 - Nastanak nesimetrije napona uslijed jednofaznog potrošača priključenog između faza b i c

jed priključivanja jednofaznog potrošača u čvoru T (sl.104a) između faza b i c. Slika struja odgovara onoj na sl.103a, pa ju na sl.105 radi bolje preglednosti nećemo ponavljati, jedino je naznačeno da je struja $\bar{I}_{1a}$ postavljena u realnu os. Direktna i inverzna reaktancija uzete su pretjerano velike, kako bi nastala nesimetrija napona bila bolje uočljiva. Uzeto je, nadalje, da je $X_{1T} > X_{2T}$. Indeks T je na slici izostavljen.

Od osnovne zvijezde napona $\bar{V}_{1a}$, $\bar{V}_{1b}$ i $\bar{V}_{1c}$ odbijeni su najprije padovi napona uslijed prolaza direktne komponente struje kroz direktnu reaktanciju mreže ($jX_1\bar{I}_{1a}$ u fazi a i analogno u ostalim fazama). Pošto je direktni sistem struja simetričan i istog smjera i brzine rotacije kao i zvijezda osnovnih vektora napona, za taj pad napona umanjeni naponi $\bar{V}'_{1a}$, $\bar{V}'_{1b}$ i $\bar{V}'_{1c}$ i dalje tvore zvijezdu simetričnih napona (na slici crtkano). Tek odbijanjem padova napona uslijed prolaza inverznih struja kroz inverzne reaktancije, zvijezda napona se izobličuje (točkama naznačeni vektori $\bar{V}_a$, $\bar{V}_b$ i $\bar{V}_c$ na slici).

Primjer 2.11 Na čvor T 110 kV mreže priključen je nesimetrični potrošač međufaznih snaga

$$\begin{aligned} S_{ab} &= 8 \text{ [MVA]} & \cos \varphi &= 0,92 \\ S_{bc} &= 12 \text{ " } & & \text{" " " } \\ S_{ac} &= 11,5 \text{ " } & & \text{" " " } \end{aligned}$$

Početna snaga trofaznog kratkog spoja u T u režimu noćnog rada je

$$S''_{kT} = 1150 \text{ [MVA]}$$

a trajna snaga kratkog spoja pod istim uvjetima je

$$S_{kT} = 1050 \text{ [MVA]}$$

Angažirana instalirana snaga svih elektrana u pogonu je 2200 [MVA].

Potrošač se može razložiti (uz isti $\cos \varphi$) prema 2-47

$$S_a = S_{ab} = 8 \text{ [MVA]}$$

$$S'_{ac} = S_{ac} - S_{ab} = 11,5 - 8 = 3,5 \text{ [MVA]}$$

$$S'_{bc} = S_{bc} - S_{ab} = 12 - 8 = 4,0 \text{ [MVA]}$$

Račun ćemo provesti s S'_{bc} , a S'_{ac} ćemo zanemariti. U tom pogledu možemo izvršiti provjeru (snage tretiramo kao inverzne struje):

$$\bar{S}'_{bc} + \bar{S}'_{ac} = S'_{bc} + S'_{ac} \angle 120^\circ = 3,775 \text{ [MVA]}$$

Zanemarenjem S'_{ac} nastaje greška od oko 5%, što je u granicama točnosti drugih podataka.

Radi kontrole računamo:

Prema 2-51

$$X_{1T} = \frac{U^2}{S_{kT}} = \frac{110^2}{1050} = 11,524 \text{ } [\Omega]$$

$$X_{2T} = \frac{U^2}{S_{kT}} = \frac{110^2}{1150} = 10,522 \text{ } [\Omega]$$

Prema 2-49

$$Z = \frac{110^2}{4} = 3025 \text{ } [\Omega]$$

Pogreška, koja nastaje zanemarenjem reaktancija mreže je približno

$$\frac{11,524 + 10,522}{3025} 100 = \frac{22,046}{3025} 100 = 0,729 \%$$

pa je zanemariva. Možemo primijeniti 2-52:

$$I_2 = \frac{S}{\sqrt{3} U} = \frac{4}{\sqrt{3} 110} = 0,0211 \text{ [kA]}$$

Angažirana instalirana snaga angažiranih elektrana u sistemu daje nazivnu struju

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} U} = \frac{2200}{\sqrt{3} 110} = 11,547 \text{ kA}$$

Procentualna strujna nesimetrija generatora pod pretpostavkom da se I_2 razmjerno raspoređuje na sve generatore je prema 2-54 i 2-55

$$\mathcal{V}_I \% = \frac{0,021}{11,547} 100 = 0,182 \%$$

Procentualna naponska nesimetrija u čvoru T prema 2-57 i 2-58 je

$$\mathcal{V}_U \% = \frac{4}{1050} = 0,381 \%$$

2.3.2 Nesimetrija prouzrokovana neprepletenim nadzemnim vodovima

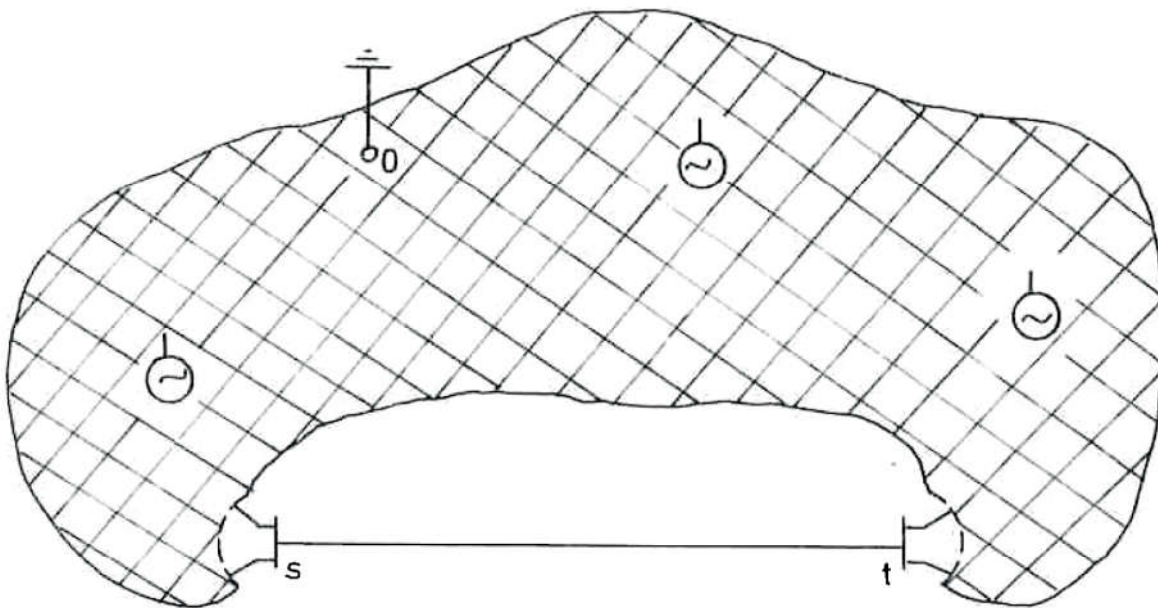
Pokazat ćemo u principu proračun struja i napona u inače simetričnoj mreži, a u kojoj se nalazi jedan neprepleteni vod. Ovom vodu smo izračunali ekvivalentnu π -shemu, kako je to pokazano u "Električne mreže I", poglavlje 5.1.9.

Na slici 106 nacrtan je položaj nesimetričnog voda s-t u mreži, a na slici 107 nacrtano je to isto u trofaznom prikazu.

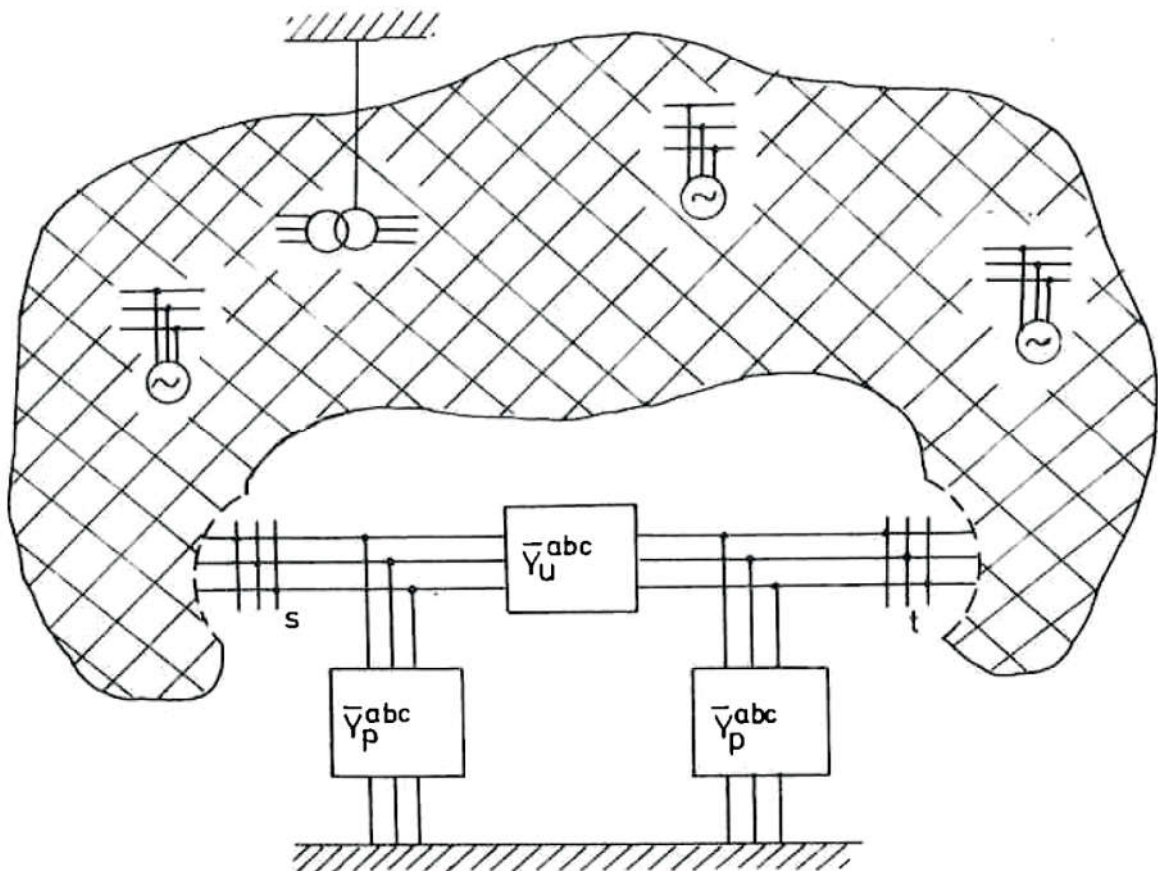
Za interpretaciju poprečnih grana trofazne π -sheme nema problema, jer poprečne matrice daju vezu između vektora struja, koje se u čvoru s odnosno t odvajaju prema zemlji i vektora napona prema zemlji. Problem je uzdužna matrica, koja daje vezu između vektora pada napona na uzdužnoj grani i vektora struja kroz uzdužnu granu.

Za uzdužnu matricu $[\bar{Y}_u^{abc}]$ dalekovoda možemo općenito napisati relacije za čvor s

$$[\bar{I}_s^{abc}] = [\bar{Y}_u^{abc}] [\Delta \bar{V}^{abc}] = [\bar{Y}_u^{abc}] ([\bar{V}_s^{abc}] - [\bar{V}_t^{abc}]) \quad 2-59$$



Slika 106 - Položaj nesimetričnog voda S-T u mreži



Slika 107 - Trofazno uključivanje nesimetričnog voda u mrežu

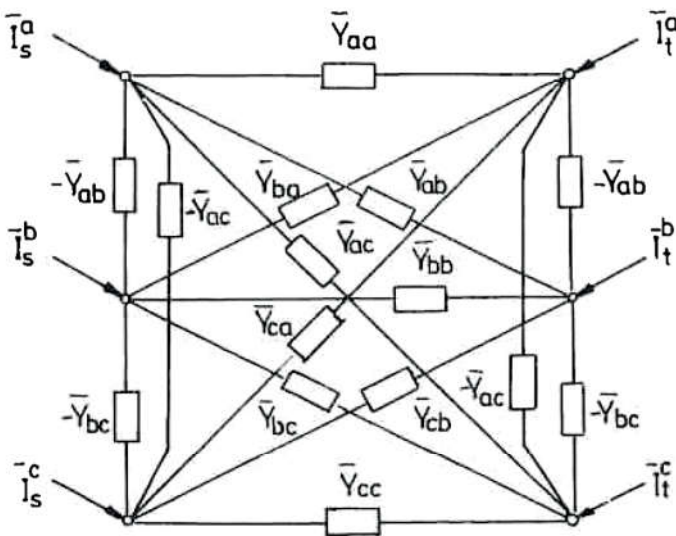
i analogno za čvor t:

$$[\bar{I}_t^{abc}] = [\bar{Y}_u^{abc}] [\Delta \bar{V}^{abc}] = [\bar{Y}_u^{abc}] ([\bar{V}_t^{abc}] - [\bar{V}_s^{abc}]) \quad 2-60$$

Sada možemo ispisati jednadžbe, koje preko blok matrice povezuju struje i napone:

$$\begin{bmatrix} [\bar{I}_s^{abc}] \\ [\bar{I}_t^{abc}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\bar{Y}_u^{abc}] & -[\bar{Y}_u^{abc}] \\ -[\bar{Y}_u^{abc}] & [\bar{Y}_u^{abc}] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [\bar{V}_s^{abc}] \\ [\bar{V}_t^{abc}] \end{bmatrix} \quad 2-61$$

Jednadžbi 2-61 odgovara shema na slici 108 u kojoj nema međusobnog utjecaja grana.



Slika 108 - Fizikalna interpretacija uzdužne matrice voda $[\bar{Y}_u^{abc}]$

Admintancije grana u shemi sa slike 108 određujemo na slijedeći način:

Ispišemo jednadžbe struja iz matrične jednadžbe 2-61 kao npr.

$$\bar{I}_s^a = \bar{Y}^{aa} \bar{V}_s^a + \bar{Y}^{ab} \bar{V}_s^b + \bar{Y}^{ac} \bar{V}_s^c - \bar{Y}^{aa} \bar{V}_t^a - \bar{Y}^{ab} \bar{V}_t^b - \bar{Y}^{ac} \bar{V}_t^c$$

U gornju jednadžbu uvrstimo:

$$\bar{Y}^{aa} = \bar{Y}^{aa} + \bar{Y}^{ab} - \bar{Y}^{ab} + \bar{Y}^{ac} - \bar{Y}^{ac}$$

Nakon sredjivanja i analognog postupka s drugim strujama dobijemo:

$$\begin{aligned} \bar{I}_s^a &= \bar{Y}^{aa}(\bar{V}_s^a - \bar{V}_t^a) + \bar{Y}^{ab}(\bar{V}_s^a - \bar{V}_t^b) + \bar{Y}^{ac}(\bar{V}_s^a - \bar{V}_t^c) - \\ &\quad - \bar{Y}^{ab}(\bar{V}_s^a - \bar{V}_s^b) - \bar{Y}^{ac}(\bar{V}_s^a - \bar{V}_s^c) \end{aligned} \quad 2-62a$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_s^b &= \bar{Y}^{bb}(\bar{V}_s^b - \bar{V}_t^b) + \bar{Y}^{bc}(\bar{V}_s^b - \bar{V}_t^c) + \bar{Y}^{ba}(\bar{V}_s^b - \bar{V}_t^a) - \\ &\quad - \bar{Y}^{bc}(\bar{V}_s^b - \bar{V}_s^c) - \bar{Y}^{ba}(\bar{V}_s^b - \bar{V}_s^a) \end{aligned} \quad 2-62b$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_s^c &= \bar{Y}^{cc}(\bar{V}_s^c - \bar{V}_t^c) + \bar{Y}^{ca}(\bar{V}_s^c - \bar{V}_t^a) + \bar{Y}^{cb}(\bar{V}_s^c - \bar{V}_t^b) - \\ &\quad - \bar{Y}^{ca}(\bar{V}_s^c - \bar{V}_s^a) - \bar{Y}^{cb}(\bar{V}_s^c - \bar{V}_s^b) \end{aligned} \quad 2-62c$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_t^a &= \bar{Y}^{aa}(\bar{V}_s^a - \bar{V}_s^a) + \bar{Y}^{ab}(\bar{V}_t^a - \bar{V}_s^b) + \bar{Y}^{ac}(\bar{V}_t^a - \bar{V}_s^c) - \\ &\quad - \bar{Y}^{ab}(\bar{V}_t^a - \bar{V}_t^b) - \bar{Y}^{ac}(\bar{V}_t^a - \bar{V}_t^c) \end{aligned} \quad 2-62d$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_t^b &= \bar{Y}^{bb}(\bar{V}_t^b - \bar{V}_s^b) + \bar{Y}^{bc}(\bar{V}_t^b - \bar{V}_s^c) + \bar{Y}^{ba}(\bar{V}_t^b - \bar{V}_s^a) - \\ &\quad - \bar{Y}^{bc}(\bar{V}_t^b - \bar{V}_t^c) - \bar{Y}^{ba}(\bar{V}_t^b - \bar{V}_t^a) \end{aligned} \quad 2-62e$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_t^c &= \bar{Y}^{cc}(\bar{V}_t^c - \bar{V}_s^c) + \bar{Y}^{ca}(\bar{V}_t^c - \bar{V}_s^a) + \bar{Y}^{cb}(\bar{V}_t^c - \bar{V}_s^b) - \\ &\quad - \bar{Y}^{ca}(\bar{V}_t^c - \bar{V}_t^a) - \bar{Y}^{cb}(\bar{V}_t^c - \bar{V}_t^b) \end{aligned} \quad 2-62f$$

Po gornjim jednadžbama određeni su iznosi admitancija i uneseni u shemu na slici 108.

Slijedi trofazni proračun mreže.

Računamo mrežu u normalnom pogonu. Pretpostavka je da je mreža simetrična i da je vod s-t jedino mjesto nesimetrije. Ovo nas navodi na primjenu transformacije u simetrične komponente.

Odredimo sisteme komponenata mreže. Direktni sistem odgovara direktnom sistemu kod proračuna tokova snaga i napona.

U inverznom sistemu problem je određivanje sheme potrošača. Potrošači su u direktnom sistemu zadani snagama, a napone potrošača tek treba izračunati. Pod pretpostavkom da je inverzna impedancija potrošača jednaka direktnoj, možemo odrediti inverznu impedanciju potrošača u prvoj aproksimaciji iz relacije

$$\bar{z}_{p1} = \bar{z}_{p2} = \frac{U_p^{(0)2}}{\bar{s}_p^*} \quad 2-63$$

gdje je $U^{(0)} = U_n$. Tokom iterativnog procesa korigiramo $\bar{z}_{p2}$.

Potrošači su priključeni na distributivnu mrežu, kojoj je zvjezdište izolirano, pa o njenom nultom sistemu ne treba voditi računa.

Primjenimo simetričnu transformaciju na matrice $[\bar{y}_p^{abc}]$ i $[\bar{y}_u^{abc}]$. Pojavljuje se isti problem s matricom $[\bar{y}_u^{012}]$ kao i s matricom $[\bar{y}_u^{abc}]$.

Za čvor s možemo napisati relacije:

$$[\bar{I}_s^{012}] = [\bar{Y}_u^{012}] [\Delta \bar{V}^{012}] = [\bar{Y}_u^{012}] ([\bar{V}_s^{012}] - [\bar{V}_t^{012}]) \quad 2-64$$

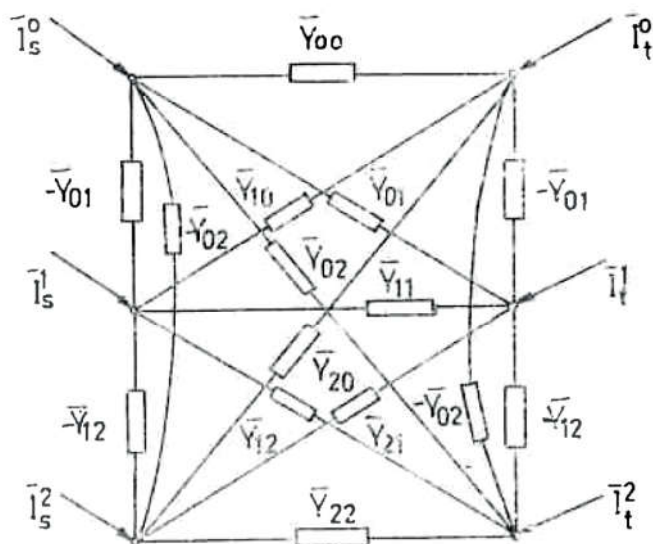
i analogno za čvor t:

$$[\bar{I}_t^{012}] = [\bar{Y}_u^{012}] [\Delta \bar{V}^{012}] = [\bar{Y}_u^{012}] ([\bar{V}_t^{012}] - [\bar{V}_s^{012}]) \quad 2-65$$

Sada možemo ispisati jednačbe, koje preko blok matrice povezuju struje i napone:

$$\begin{bmatrix} [\bar{I}_s^{012}] \\ [\bar{I}_t^{012}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\bar{Y}_u^{012}] & -[\bar{Y}_u^{012}] \\ -[\bar{Y}_u^{012}] & [\bar{Y}_u^{012}] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [\bar{V}_s^{012}] \\ [\bar{V}_t^{012}] \end{bmatrix} \quad 2-66$$

Jednadžbi 2-66 odgovara shema na slici 109 u kojoj nema međusobnog utjecaja grana,

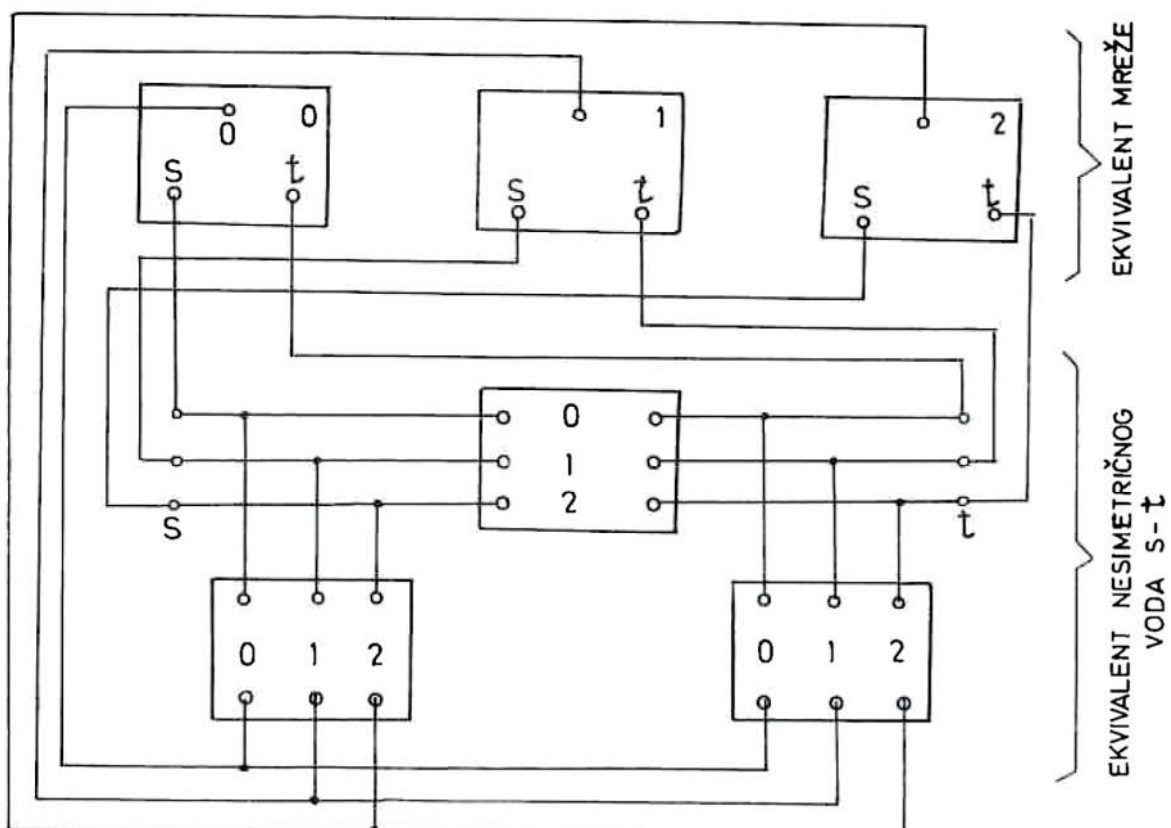


Slika 109 -
Fizikalna interpretacija
uzdužne matrice voda
 $[\bar{Y}_u^{012}]$
u sistemu komponenata

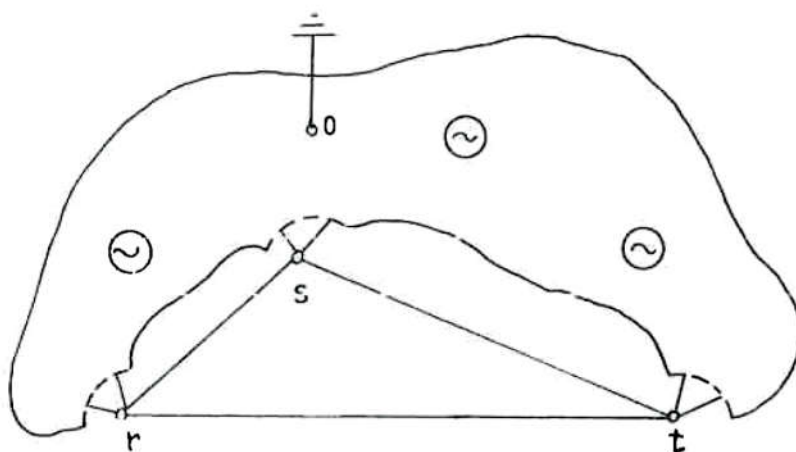
Admitancije grana u shemi na sl.109 odredjujemo na isti način kao u slučaju sheme na slici 108.

Koliko je problem kompliciran pokazuje slika 110, na kojoj je izvršeno povezivanje sistema komponenata mreže sa sistemima komponenata voda, što odgovara slučaju kada u cijeloj mreži imamo samo jedan neprepleteni vod.

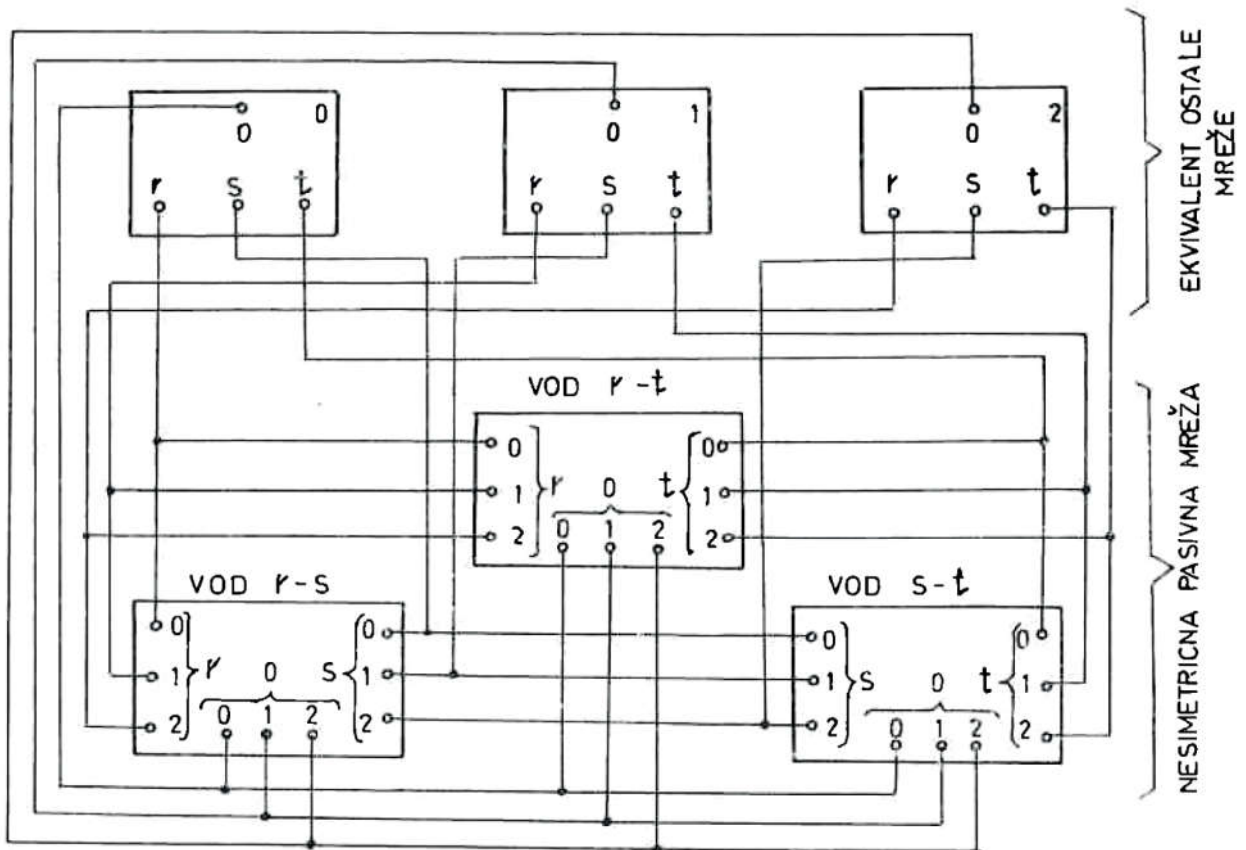
U stvarnoj mreži će se rijetko razmatrati utjecaj jednog jedinog neprepletenog voda uključenog u inače potpuno simetričnu mrežu. Obično će se razmatrati mreža s više neprepletenih vodova, koji ne moraju pripadati istom naponskom nivou. Na sl. 111 prikazana su tri neprepletena voda, koji povezuju čvorove r, s i t, dok je ostatak mreže simetričan. Ekvivalentna shema u sistemu simetričnih komponenata prikazana je na sl.112. Ekvivalent svakog voda je sveden u jedan zajednički okvir na način, koji je lako uočiti usporedbom slika 110 i 112.



Slika 110 - Povezivanje sistema simetričnih komponenata simetrične mreže s nesimetričnim vodom



Slika 111 - Tri nesimetrična (neprepletena) voda u simetričnoj mreži



Slika 112 - Ekvivalentna shema mreže sa sl.111 u sistemu simetričnih komponentata

Analiza se, dakle, svodi na klasični proračun tokova snaga i napona pomoću adaptiranog programa bilo za originalnu trofaznu mrežu prema sl.107, bilo za mrežu rastavljenu u komponente prema sl.110 ili 112. Teško je unaprijed reći koja varijanta proračuna brže dovodi do rezultata, ali je sigurno da takav "egzaktni" proračun s nesimetričnim elementima zahtijeva višestruki volumen računanja u usporedbi s proračunom tokova u simetričnoj mreži. Dodatno se postavlja pitanje vjerodostojnosti rezultata. Očekivane nesimetrije struja i napona su malene i približuju se redu veličine računske pogreške, s kojom neminovno treba računati, kako radi samog primijenjenog algoritma, tako pogotovo radi točnosti ulaznih podataka (npr. nultih reaktancija elemenata mreže). Osim toga bi analizu u principu trebalo ponoviti za veći broj tipičnih pogonskih slučajeva i za više varijanata prepli-

tanja vodova. Lako je zaključiti, da je egzaktni pristup problemu većeg broja nesimetričnih vodova u mreži povezan s velikim poteškoćama, kako u fazi pripreme podataka, tako i u fazi računanja, a jednako i u fazi vrednovanja rezultata.

Čak ako se pretpostavi niz zanemarenja, račun i dalje ostaje dovoljno složen, a rezultati postaju još manje pouzdani. U slučaju pojednostavljenih analiza nesimetrije uslijed neprepletenih vodova u mreži dodatno treba ispitati, koji je smisao greške nastale uslijed zanemarenja, tj. da li su tako dobiveni rezultati povoljniji ili manje povoljni od stvarnog stanja.

Preostaje još mogućnost da se izvrše odgovarajuća mjerenja u stvarnoj mreži, no i tu se mogu očekivati poteškoće, jer su osnovni pogonski naponi i struje veliki u odnosu na očekivana fazna odstupanja uslijed nesimetrije.

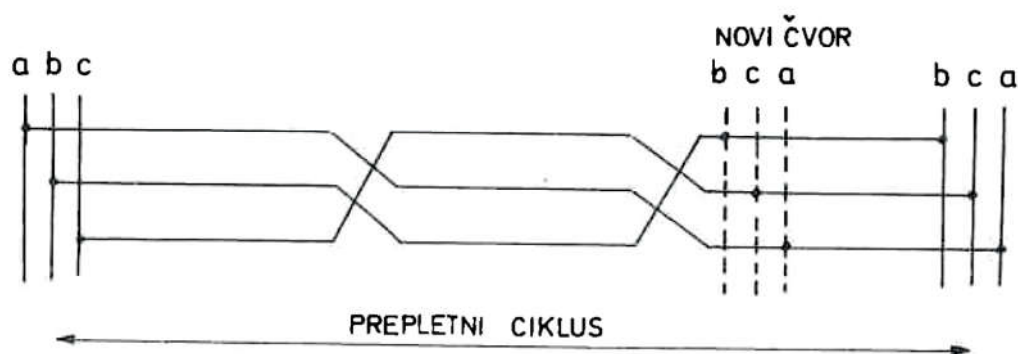
Opisane poteškoće dovele su do vrlo različitih gledanja i preporuka u pogledu ocjene nužnosti i načina preplitanja visokonaponskih vodova u raznim zemljama svijeta, pa je i praksa vrlo različita.

Preplitanje faza na vodovima visokih i vrlo visokih napona ima i svoj konstruktivni i ekonomski aspekt. Izvedba prepletnog mjesta skopčana je s poteškoćama i troškovima, koje progresivno rastu s visinom nazivnog napona voda. Osim toga koncepcija rasklopnog postrojenja obično ograničava slobodu u pogledu prostornog rasporeda faza, pa i o toj činjenici treba voditi računa.

Na strategiju preplitanja vodova utječe i sam razvoj mreže. Pojava novog čvora u trasi potpuno prepletenog voda remeti prepleteni ciklus (sl.113). Tako rast mreže s jedne strane utječe nepovoljno, ali s druge strane utječe i povoljno, jer vodovi postaju kraći, pa i problem nesimetrije postaje manje izražen.

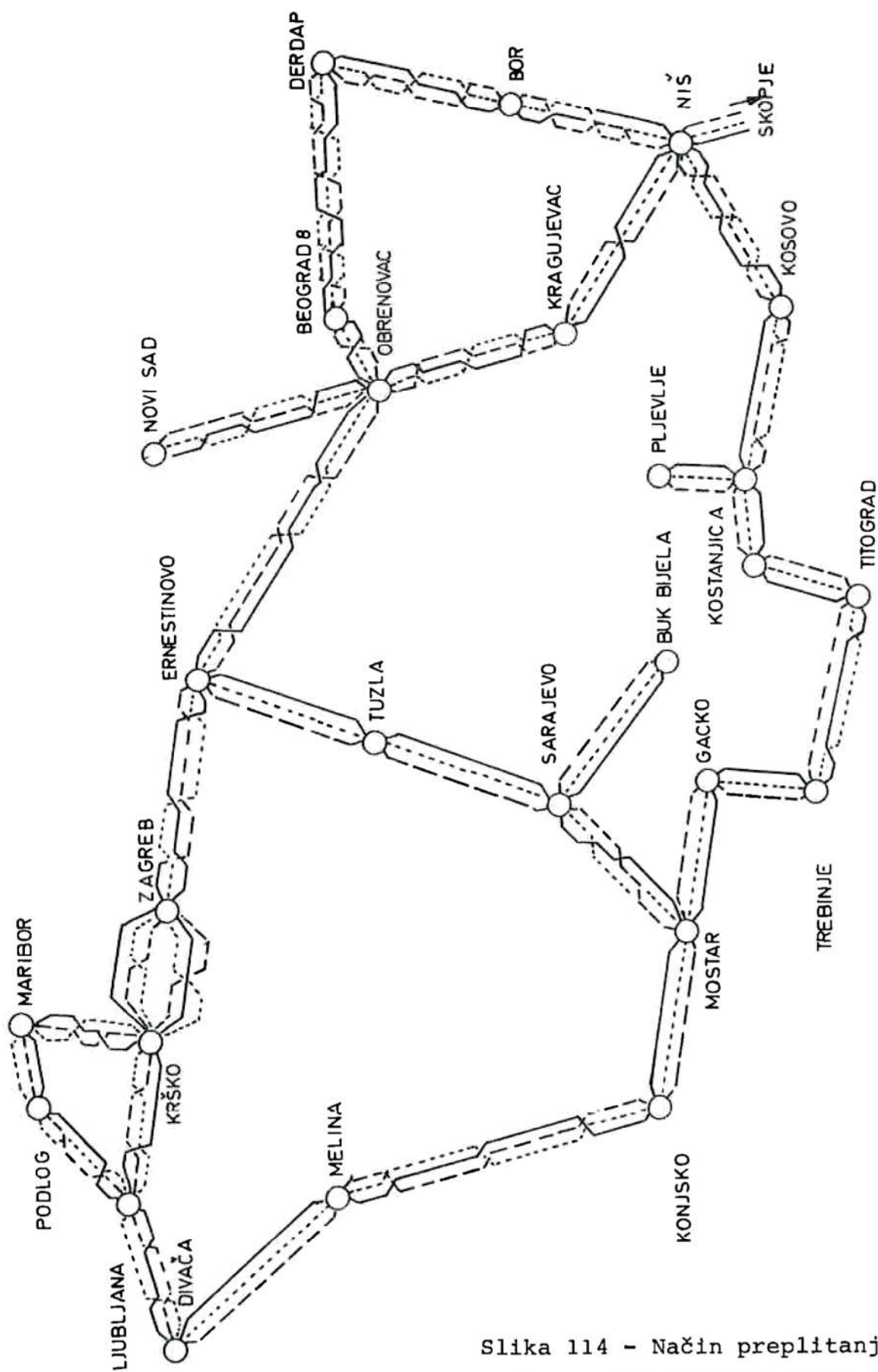
Na sl.114 prikazan je, radi ilustracije, način preplitanja 400 kV mreže SFRJ.

S obzirom na složenost problema optimalnog tehničko-ekonomskog određivanja strategije preplitanja faza vodova u mreži vrlo visokog napona, logično je pretpostaviti, sa stanovišta simetrije



Slika 113 - Poremećaj prepletnog ciklusa uslijed izgradnje novog čvora

cijele mreže, da će i "slučajni" raspored faza dati bolju simetriju od one najnepovoljnije. Vjerojatno je, naime, da će raspored faza većeg broja neprepletenih vodova prema konstruktivnim uvjetima izvedbe postrojenja dovesti do toga, da će, npr. faza a na jednomvodu biti srednja, a na drugom krajnja (pretpostavljen je raspored vodiča u jednoj ravnini). Ako tako postignuti stupanj simetrije po analizama ili drugim načinom ocjenjivanja ne zadovoljava, mogu se razmotriti druge varijante rasporeda faza, koristeći konstruktivne slobode u postrojenjima, a bez preplitanja vodiča na vodovima. Tek ako nijedna tako ostvariva varijanta ne zadovoljava postavljene zahtjeve simetrije, može se pribjeći preplitanju najprije najdužih, a potom sve kraćih vodova projektirane mreže. Ustanovljeni tehnički opravdani raspored faza i broj prepletnih mjesta se potom u realnoj mreži zaista i izvodi.



Slika 114 - Način preplitanja
vodova u 400 kV mreži SFRJ

2.3.3 Posljedice nesimetrija u mreži

U svjetskoj praksi postoje vrlo različiti stavovi u pogledu dopuštenih faktora nesimetrije, pa se to odražava u šarolikosti tehničkih propisa i preporuka.

U mreži s kruto ili na sličan način uzemljenim zvjezdištem cirkulirati će uslijed nesimetrija, u općem slučaju, inverzna i nulta komponenta struje, koje će izazvati i odgovarajuću nesimetriju napona.

Kod generatora se nulta komponenta struje ne razmatra, jer je njegov nulti sistem uvijek odvojen od nultog sistema ostale mreže, pa se nulta struja ne prenosi u generator. Inverzna komponenta struje izaziva dodatno zagrijavanje željeza, posebno u rotoru, u kojem magnetsko polje uslijed inverzne komponente struje rotira dvostrukom sinhronom brzinom. Radi toga se ograničava dopuštena vrijednost inverzne struje kroz generator. Za zagrijavanje namotaja statora je mjerodavna ukupna struja, koja će biti najveća u onoj fazi, u kojoj direktna i inverzna komponenta struje imaju isti smjer. Ta ukupna struja ne smije biti veća od nazivne, jer bi izazvala nedopušteno lokalno zagrijavanje tog namotaja. Dozvoljena relativna inverzna komponenta struje generatora katkada je regulirana propisima ili preporukama, a katkada je prepuštena dogovoru između proizvođača i kupca generatora. U praksi je dopuštena inverzna struja obično između 6% i 12% od nazivne.

Kod transformatora inverzna komponenta struje ima u načelu slično djelovanje kao i kod generatora, tj. izaziva povećanje gubitaka i dodatno zagrijavanje jedne faze. U pogledu nulte komponente struje, naši transformatori su u stanju da ju podnesu, zahvaljujući postojanju tercijarnog namotaja.

Sa stanovišta mreže i njenih elemenata može se zaključiti:

- a) Inverzna i nulta komponenta struje izaziva dodatne gubitke, pa ih treba eliminirati ili svesti na minimum.
- b) Elementi mreže su u znatnoj mjeri sposobni da bez štete podnesu strujne nesimetrije, dok su naponske nesimetrije bez utjecaja

na njih.

Od trofaznih potrošača se asinhroni motori mogu navesti kao elementi osjetljivi na nesimetriju napona. Posljedice nesimetrije napona na stezaljkama asinhronog motora su slijedeće:

- a) Smanjenje zakretnog momenta uslijed suprotnog smjera rotacije inverznog polja.
- b) Povećanje gubitaka (smanjenje faktora korisnosti).
- c) Lokalno povećano zagrijavanje namotaja jedne faze.

Posljedica pod a) je zanemariva. Radi ostalih utjecaja dopuštena naponska nesimetrija kod potrošača je ograničena, i to (po nekim stranim preporukama) na 2%.

Nulta komponenta struje izaziva smetnje (brujanje) u žičnim nadzemnim telefonskim i telegrafskim linijama, ovisno o udaljenosti od puta nulte struje, o njenom intenzitetu i o širini zamke fazni vodič - zemlja uključivo zaštitnu užad. Utjecaj nije ograničen na zonu trase neprepletenog voda, već se javlja na svim područjima kojim cirkulira nulta komponenta struje. Posljedice se, dakle, mogu ispoljiti i na prostorno velikoj udaljenosti od lokacije uzroka. Problem se, prema tome, može postaviti na dva načina:

- a) smetnje u okolišu neprepletenog voda i
- b) smetnje uslijed postojanja nulte komponente struje u mreži.

Propisi i preporuke su u tom pogledu vrlo neprecizne. Tehnički je ispravnije pristupiti problemu ispitivanjem smetnji na način b), a na način a) samo u onolikoj mjeri, u kojoj se ono svodi na pitanje b). Drugim riječima, generator nulte struje (u ovom slučaju neprepleteni vod) ne izaziva smetnje samo neposredno u svojoj okolini, već u okolini svih elemenata mreže, kojima nulta komponenta mreže cirkulira.

Uključivši i ranije utvrđene spoznaje, utjecaj nulte komponente struje na tt linije može se spriječiti ili umanjiti:

- simetriziranjem elemenata mreže, tj. preplitanjem faznih vodiča u tehnički i ekonomski prihvatljivom obimu;

- postavljanjem nadzemnih tt linija van zone utjecaja;
- umjesto nadzemnih tt linija primijeniti (skuplje) tt kabele, usmjerene UKV veze (koje ne moraju biti skuplje) ili primijeniti neke druge moguće mjere zaštite;
- opremiti dalekovode zaštitnim užetom dobre vodljivosti, što je povoljno još i iz drugih razloga (smanjenje utjecaja na tt linije kod jednopolnog kratkog spoja, pouzdaniji rad distantne zaštite, bolja zaštita od atmosferskih prenapona);
- promjenom broja i lokacije uzemljenih zvjezdišta sistema.

2.4 ZAKLJUČNI KOMENTAR O SMETNJAMA U STACIONARNOM POGONU

Razmatrana su tri tipa smetnji u stacionarnom pogonu mreže: distorzija sinusoide, brza kolebanja i nesimetrija struje i napona. Za sva tri tipa smetnji moguć je, u jednostavnim slučajevima, jednostavan tehnički pristup koji brzo vodi do rezultata. Jednostavnost pristupa pretpostavlja niz zanemarenja i pojednostavljenja, koja u sebi kriju mogućnost krive procjene situacije. U principu je moguća i primjena tzv. egzaktnih algoritama za vršenje odgovarajućih proračuna, ali se gotovo sa sigurnošću može tvrditi, da će za takve proračune nedostajati pouzdani ulazni podaci. Kada bi svi uvjeti bili ispunjeni, egzaktni proračuni bi bili složeni i dugotrajni, a neke popratne slučajne pojave neće se nikako moći obuhvatiti.

Mjerenja na živoj mreži dati će najbolji uvid u stvarno stanje, ali se ona mogu vršiti tek nakon izgradnje izvora smetnje, kompenzacionih uređaja i slično, i to pod uvjetom da smo mjerenjem uspjeli registrirati pravu pojavu u pravo vrijeme. Osim toga neke veličine se mogu lako mjeriti, a neke teže ili nikako. Daljnje je pitanje, da li će se izmjereni i registrirani rezultati moći ispravno interpretirati bez popratnih proračuna, a ovi opet kriju ranije spomenute netočnosti.

Za sve opisane smetnje zajedničko je, da u svjetskoj praksi postoje značajne razlike u ocjeni posljedica kao i u dopuštenom nivou smetnji. Tek će daljnja istraživanja na ovim područjima unižeti više jasnoća i jedinstvenosti u gledanjima.

Daljnja je zajednička značajka opisanih smetnji, što jača mreža lakše bez poteškoća podnosi određeni izvor smetnji nego slabija mreža. Ako, opravdano, snagu kratkog spoja u nekom čvoru uzmemo kao mjerilo jakosti (krutosti), mreže, onda je maksimalno dopuštena snaga generatora smetnje (kod koje je smetnja još podnošljiva) proporcionalna snazi kratkog spoja. Pošto je snaga kratkog spoja promjenjiva veličina (kratkoročno ovisi o režimu rada sistema, dugoročno raste s razvojem sistema, a kod poremećaja može drastično opasti) treba čak i to prividno najsigurnije mjerilo primijeniti uvjetno.

U ovom prikazu su tri tipa smetnji odvojeno razmatrani, jer drukčije nije ni moguće. Nije međjutim rijedak slučaj, da su u pojedinim čvorištima istovremeno priključeni generatori svih vrsta smetnji, npr. čeličana s jednofaznom elektrolučnom peći i elektroliza aluminijska sa statičkim ispravljačima. Neki potrošači, sami za sebe, generiraju sva tri tipa smetnji. To su, na primjer, elektrolučne peći, koje zbog nelinearnosti električnog luka izazivaju pojavu svih mogućih viših harmonika, zbog nemirnog gorenja luka izazivaju brza kolebanja napona, a zbog "kosog" gorenja luka izazivaju povremene nesimetrije.

3. KRATKI SPOJ I OSTALI KVAROVI U MREŽI

Elementi elektroenergetskog sistema su neprekidno izloženi raznim oštećenjima. Uzroci mogu biti u neispravnosti opreme, lošim manipulacijama, atmosferskim pražnjenjima, nezgodama zbog neznanja i nepažnje ljudi koji dolaze u blizinu dalekovoda ili rade u blizini kabela itd. Oštećenja, koja dovode do električkog spoja među djelovima koji su inače na raznim potencijalima (kratki spoj, zemljospoj) ili do neželjenog prekida strujnog kruga (prekid vodiča) nazivamo kvarovima.

Najteži kvar je kratki spoj. Kod kratkog spoja kroz spojno mjesto između djelova pod raznim potencijalom teku struje višestruko jače od pogonskih struja (struje kratkog spoja). Uzroci kratkog spoja se ne mogu potpuno spriječiti. Ako se mjesto kratkog spoja ne odvoji od izvora napajanja, dolazi do razaranja opreme, a katkada i do raspada sistema.

Zemljospoj je spoj između faze i zemlje u izoliranoj ili gašenoj mreži. Struje na takvom spojnom mjestu su umjerene jakosti (struje zemljospoja) ili tehničkim mjerama svedene na minimum (struja ostatka). Pogon je moguć uz izvjesni rizik. Zemljospoj lako prelazi u kratki spoj na slabim mjestima izolacije.

Razni prekid faza također spadaju u kvarove. Prekid i pad vodiča uvijek prelazi u kratki spoj ili zemljospoj.

Nabrojeni kvarovi ne moraju obavezno izazvati trajne posljedice (prolazni kvarovi). Ako su posljedice ipak trajne, element mreže se ne može ponovo staviti u pogon prije nego se izvrši popravak. U nekim elementima mreže svi su kvarovi trajni (generatori, transformatori, kabele). Prolazni kvarovi su tipični kod nadzemnih vodova. I oni kvarovi, koji su po svojoj genezi prolazni, postaju trajni, ako se mjesto kvara ne odvoji dovoljno brzo od izvora napajanja.

Pogonska stanja mreže za vrijeme trajanja raznih kvarova potrebno je poznavati iz više razloga. Analitički postupak, kojim se

ta stanja utvrđuju zove se, skraćeno, "račun kratkog spoja". Ovaj se naziv koristi i onda, ako se stanje za vrijeme kvara utvrđuje eksperimentalno, na mrežnom analizatoru. Podaci od analiza koriste se u mnoge svrhe:

- za dugoročno i srednjeročno planiranje razvoja električne mreže i elektroenergetskog sistema uopće;
- kod konstruiranja i dimenzioniranja elemenata mreže, posebno generatora, transformatora i kabela;
- za određivanje parametara rasklopnih postrojenja i rasklopnih aparata;
- kod osnivanja podsistema zaštite i izbora parametara zaštitnih uređaja;
- kod raznih analiza stvarnih i pretpostavljenih smetnja u mreži;
- kao početno stanje kod računa dinamičke stabilnosti, itd.

Svestrana korist od poznavanja struja, a katkada i napona u mreži za vrijeme trajanja kvara svrstava račun kratkog spoja među osnovne i najraširenije analize mreže.

U nekim evropskim zemljama, pa tako i kod nas, račun kratkog spoja se često uvrštava u udžbenike o rasklopnim postrojenjima, što je donekle historijski uvjetovano, makar te analize predstavljaju tipičnu problematiku mreža. U ovom poglavlju se račun kratkog spoja i analiza ostalih kvarova prikazuje na način, da bude što manje preklapanja s drugim prikazima, a da pri tome ipak ostane cjelovit.

3.1 KRATKI SPOJ, UZROCI I POSLJEDICE

Fazni vodiči elemenata elektroenergetskog sistema (vodiči dalekovođa, sabirnice, spojevi, nemotaji strojeva i transformatora ...) nalaze se trajno na različitim potencijalima i moraju biti međusobno i prema zemlji izolirani. Primijenjeni nivo izolacije, definiran kao izdržljivost na dogovorno utvrđena razna tipična električka naprezanja, ovisan je o nazivnom odnosno najvišem pogonskom naponu mre-

že i rezultat je niza tehničko-ekonomskih razmatranja. Prema tome, izolacija se ne dimenzionira tako, da izdrži bilo kakvo moguće električko naprezanje, jer bi to bilo ekonomski nepodnošljivo. Unaprijed se, dakle, dopušta i računa s time, da će povremeno dolaziti do sloma izolacije, odnosno proboja. U tom slučaju dolazi na tom mjestu (na mjestu kvara) do spoja među djelovima, koji su na različitim potencijalima. U širem smislu, svaki takav spoj je kratki spoj.

Neposredni uzrok sloma izolacije može biti različit: vrlo visoki prenapon, oslabiljenost izolacije uslijed proizvodne greške ili starenja, oslabiljenost izolacije uslijed onečišćenja, mehaničko oštećenje, nesmotrena manipulacija uređajima za sigurnosno uzemljavanje, strana vodljiva tijela. Ako se prethodno isključeni element mreže uzemlji zbog sigurnosti ljudi, pa onda taj element zabunom uključi, a da uređaji za uzemljavanje nisu uklonjeni, nastaje pogonsko stanje istovjetno kratkom spoju.

Spoj među točkama različitog potencijala može biti galvanski, što se uočava već i iz gore navedenih mogućih uzroka, ali se češće uspostavlja preko električnog luka. Otpor električnog luka je za potrebe proračuna gotovo uvijek zanemariv, pa se račun kratkog spoja može vršiti pod pretpostavkom, da je spoj na mjestu kvara direktan, bez otpora.

Kroz nastali spoj na mjestu kvara (na mjestu kratkog spoja) teče "struja kratkog spoja", koja je ovisna o elektromotornoj sili i o impedanciji strujnog kruga. U pravilu, struja kratkog spoja je višestruko jača od normalnih pogonskih struja. Iznimno, ako je režim rada sistema ili njegova skromna izgradjenost takva, da je impedancija strujnog kruga velika, struje kratkog spoja mogu imati isti red veličine kao pogonske struje. To se u nedovoljno izgrađenim mrežama može dogoditi noću, kada je značajan broj generatora isključen radi niskog opterećenja, naročito ako je istovremeno isključen još i stanoviti broj drugih elemenata mreže (vodova i transformatora).

Sa spontanom prestankom kratkog spoja ne može se računati ni u slučajevima, kada se struja kratkog spoja zatvara preko električnog luka. Prema tome, pojava traje tako dugo, dok se isključi-

vanjem ili isključivanjima ne prekine napajanje mjesta kratkog spoja iz mreže.

Ako u mreži, kojoj je zvjezdište izolirano ili spojeno sa zemljom preko petersenove prigušnice, dodje do spoja jednog faznog vodiča sa zemljom, u impedanciju strujnog kruga su serijski uključeni dozemni kapaciteti vodova, koji struju kvara svode na male vrijednosti. Stoga se ta pojava ne uvrštava u "kratki spoj", već se naziva "zemljospoj" i posebno se tretira (poglavlje 3.3).

Kao što je navedeno, kod kratkog spoja se javljaju struje, koje su višestruko veće od onih, koje teku mrežom u normalnom radu. Neposredna posljedica toga su termička naprezanja, najviše izražena u okolišu kvara, tj. u granama koje neposredno vode ka mjestu kvara. Prolazom struje kratkog spoja kroz vodiče nastaje toplina. Termička naprezanja osim o veličini struje ovise i o trajanju pojave. Pojedini elementi mreže neće biti jednako ugroženi ovim zagrijavanjem. Najviše su ugroženi elementi, koji su škrtro dimenzionirani, imaju vrlo ograničenu mogućnost akumuliranja topline uz otežane uvjete hladjenja, a naročito ako su u sprezi s izolacionim materijalima, koji ne podnose visoku temperaturu. To su prvenstveno kabeli, zatim strojevi, te učinski i strujni transformatori.

Na samom mjestu kvara najčešće se ispoljava razorno djelovanje elekričnog luka uslijed visoke temperature i velike količine topline koja se razvija u električnom luku.

Daljnja posljedica kratkog spoja su mehanička naprezanja elemenata mreže, odnosno postrojenja, takodjer najviše izražena u okolišu mjesta kvara. U ekstremnim slučajevima, ova naprezanja mogu dovesti do loma konstruktivnih djelova i do novih kvarova. Mehaničkim naprezanjima najviše su izložena rasklopna postrojenja (potporni izolatori), namotaji transformatora i glave namotaja generatora.

Prijelaz iz normalnog režima rada u stanje kratkog spoja predstavlja veliku i naglu promjenu, koja se uočava i promjenom napona, makar kratkotrajnom. Pojava je uočljiva i onda, kada je kratki spoj u udaljenom dijelu mreže. Posljedice su promjena intenziteta rasvjet, te mogući poremećaji u radu motora i drugih trošila.

Mnoge negativne posljedice kratkog spoja su teže, ako kratki spoj duže traje. Zato mjesto kvara mora što prije biti dovedeno u beznaponsko stanje, što znači da treba selektivno isključiti sve (i samo te) grane, putem kojih se mjesto kvara napaja energijom. Ova isključenja mogu uzrokovati prekid dobave električne energije jednom dijelu potrošača na određeno vrijeme, koje ovisi o mogućnosti uspostave rezervnog napajanja ili o trajanju popravka kvara. Kod dobro osnovane mreže drugi elementi mreže preuzimaju opterećenje grana ispalih iz pogona, pa do prekida dobave neće doći. Nasuprot tome, kod neselektivnog rada zaštite dolazi do isključivanja većeg broja elemenata mreže nego je neophodno potrebno, pa se prekid dobave električne energije odrazuje na veći broj potrošača odnosno na veće područje kroz duže vrijeme.

Promjene u mreži, koje nastaju kod pojave kratkog spoja, remete ravnotežu proizvodnje i potrošnje električne energije, pa se u većoj ili manjoj mjeri ugrožava stabilnost sinhronih strojeva. U krajnje nepovoljnim slučajevima, kraki spoj može dovesti do poremećaja stabilnosti, ispada pojedinih generatora iz pogona, pa zatim lančano i do najtežeg poremećaja u mreži, do raspada sistema.

Jake struje kratkog spoja uzrokom su jakih elektromagnetskih polja industrijske frekvencije u blizini vodiča, kojima te struje prolaze. Dok utjecaj direktne i inverzne komponente struje kratkog spoja ostaje ograničen na neposrednu okolinu trofaznog sustava vodiča, nulta komponenta tvori sa zemljom kao povratnim vodom široku zamku sa znatnim izmjeničnim poljem i u većoj udaljenosti. Ovo polje izaziva inducirane napone na bliskim metalnim vodovima (telefonskim linijama, cjevovodima). Po tim vodovima ti se inducirani naponi mogu odvesti i daleko van neposredne zone utjecaja.

I na kraju, nulta komponenta struje kratkog spoja može na mjestima ulaska u zemlju izazvati takve potencijalne lijevke, koji su opasni za ljude i životinje (napon koraka i dodira). Putem podzemnih metalnih instalacija, koje dijelom prolaze zonom potencijalnih lijevakata može se potencijal prenijeti i u udaljenija područja.

Ako na kraju dodamo, da i prekidači snage u rasklopnom postrojenju moraju biti tako dimenzionirani da mogu uspješno prekidati struju kratkog spoja i u najnepovoljnijem slučaju, vidimo da je kratki

spoj pojava koju i te kako treba uvažavati kod planiranja i pogona mreže. Drugim riječima, mreža dimenzionirana za veće snage kratkog spoja biti će skuplja u izvedbi. Pošto je, dakle, bitno poznavati veličine očekivanih struja i snaga kratkog spoja sada i u budućnosti, provode se analize zvane "proračun struja i snaga kratkog spoja", odnosno kraće "račun kratkog spoja".

Računi kratkog spoja mogu se provoditi s različitom namjenom, pa se, ovisno o toj namjeni, koriste odgovarajući (različiti) ulazni podaci.

Da bi se ustanovio trend porasta struja i snaga kratkog spoja u budućnosti, paralelno s budućim razvojem elektroenergetskog sistema, provodi se račun kratkog spoja za više decenija unaprijed (10 ...25 g.). Za tako daleka razdoblja nije poznata točna konfiguracija mreže i lokacija budućih izvora, pa se račun obavlja za neku pretpostavljenu mrežu, kako će ona najvjerojatnije u budućnosti izgledati. Rezultati takvih proračuna služe kao kontrolni podatak upravo za razvojne studije budućih mreža, pa ako se dodje do neželjeno visokih rezultata, razvoj mreže usmjerava se drugačije. Konačni rezultati koriste se kod mehaničkog i termičkog dimenzioniranja novih rasklopnih postrojenja, kabela i ostalih elemenata u sistemu, a koje bi bilo teško ili nemoguće zamijeniti odnosno ojačati, kada snaga kratkog spoja prekorači vrijednost za koju su gradjeni.

Račun kratkog spoja za neki srednji rok, do 10 g. unaprijed, može se vršiti na osnovu već definirane mreže za to razdoblje. Tako dobiveni rezultati služe da bi se ustanovilo gdje u mreži prijeti neposredna opasnost od prekoračenja projektantskih snaga kratkog spoja u postojećim postrojenjima i objektima, kako bi se pravovremeno mogle planirati odgovarajuće mjere. Ovi proračuni se koriste i za vrednovanje utjecaja na druge objekte radi pravovremenog poduzimanja preventivnih mjera.

Račun kratkog spoja za sadašnje stanje mreže vrši se pretežno za potrebe udešavanja zaštite mreže, pa se radi najmanje u dvije varijante: uz puno uvrštenje svih elemenata sistema, što daje maksimalne vrijednosti, te uz tzv. noćno uvrštenje elemenata, uglavnom izvora, da bi se dobili minimalni rezultati. Ovi podaci koriste se

i za analize raznih utjecaja na postojeću mrežu, kao što su nesimetrije, flickeri i viši harmonici.

Ovisno o namjeni rezultata, račun kratkog spoja se vrši uz više ili manje izlaznih podataka. Tako se za račune za daljnju budućnost vrše "jednostavni" proračuni, koji daju samo snagu kratkog spoja na mjestu kvara, dok se za potrebe udešenja i analize rada zaštite vrše "složeni" proračuni, koji (na izlaznim listama računala) daju i raspodjelu struja po granama i pojedinim fazama, a po potrebi i naponske prilike u mreži za vrijeme trajanja kratkog spoja.

Neugodne posljedice kratkog spoja, kao neizbježive povremene i slučajne pojave u pogonu mreže, već su pojedinačno opisane. U samoj mreži, one se ispoljavaju kao mehanička i termička naprezanja, uz vrlo različite posljedice (razaranje, starenje izolacije itd.). Za intenzitet gotovo svih neugodnih posljedica (osim mehaničkih), važno je i trajanje kratkog spoja. Ono se može skratiti primjenom brze zaštite i brzih učinskih prekidača, tako da se danas postižu ukupna vremena isključenja (zbroy vremena potrebnog zaštiti i prekidaču) reda 0,05 s. Mehanička naprezanja su najizrazitija u prvoj poluperiodi trajanja kratkog spoja, pa se taj utjecaj može umanjiti jedino mjerama za smanjenje struja kratkog spoja.

Mjere za smanjenje negativnih posljedica kratkog spoja poduzimati će se, dakle, u dva smjera:

- smanjenje trajanja kratkog spoja,
- smanjenje struja kratkog spoja.

3.1.1 Tretman zvjezdišta trofazne mreže

Zvjezdište trofazne mreže može biti neposredno uzemljeno, uzemljeno preko impedancije ili izolirano. Kako mreža ima više od jednog pristupačnog zvjezdišta, to se računa da mreža nema izolirano zvjezdište (nije izolirana), ako postoji barem jedno neizolirano zvjezdište, odnosno ako je barem jedno zvjezdište uzemljeno preko impedancije ili neposredno. Neposredno uzemljeno zvjezdište naziva se i kruto uzemljeno zvjezdište.

Mreža niskog napona po ovom pitanju ne postavlja dilemu. U mreži niskog napona jednofazni potrošači, raspoređeni nesimetrično duž vodova, zahtijevaju povratni vodič, a opasnost od napona zahtijeva da povratni vodič bude propisno uzemljen (vidi "Mreže I", 1.1.4).

Radi cjelovitosti prikaza treba reći, da ima i iznimaka. Tako se, npr. u Norveškoj niskonaponske mreže izvode bez povratnog vodiča a jednofazni potrošači se priključuju na linijski napon, koji iznosi 220 V.

Tretman zvjezdišta mreža srednjih, visokih i najviših napona nije kategorički definiran. Razne zemlje pružaju za iste ili slične naponske nivoe različita rješenja, mahom ovisna o razvojnem putu elektroenergetskog sistema te zemlje. Ovo se odnosi na mreže srednjih i visokih napona. Mreže najviših napona, iz jednostavne ekonomske računice, imaju zvjezdište neposredno uzemljeno.

Prema tretmanu zvjezdišta, mreže možemo podijeliti u 5 velikih grupa. To su:

- mreže sa efektivno uzemljenim zvjezdištem,
- mreže sa zvjezdištem uzemljenim preko malog djelatnog otpora,
- mreže sa zvjezdištem uzemljenim preko malog induktivnog otpora,
- mreže uzemljene preko petersenke (rezonantno uzemljene mreže),
- mreže s izoliranim zvjezdištem.

Za prva tri načina uzemljenja je karakteristično, da su struje greške prema zemlji znatno veće od kapacitivnih dozemnih struja. Kod efektivno uzemljene mreže ove su struje katkada veće i od struja tropskog kratkog spoja. U rezonantno uzemljenoj mreži struje greške su kompenzirane.

Naponi prema zemlji viši od linijskog nazivnog napona mogu se pojaviti kod mreža sa izoliranim zvjezdištem, a katkada i kod mreža koje su uzemljene preko malog djelatnog otpora.

Komutacioni prenaponi najniži su kod mreža, koje su uzemljene efektivno i preko djelatnog otpora, najviši kod mreža s izoliranim zvjezdištem, a u ostala dva slučaja su visoki, ali se mogu kontrolirati.

Primarne posljedice od direktnih atmosferskih prenapona praktički

su jednake za sve načine uzemljenja. Indirektni atmosferski prenaponi izazivaju oscilacije napona zvjezdišta kada je mreža izolirana ili uzemljena preko induktiviteta. Efektivno uzemljene mreže su bez ovih oscilacija, a kod uzemljenih preko malog otpora dolazi do jako prigušenih oscilacija.

U mrežama, u kojima je zvjezdište uzemljeno na jedan od prva tri načina, zaštita od greške prema zemlji (jednopolnog kratkog spoja) je jednostavna i zadovoljavajuća. Kod rezonantno uzemljenih mreža zaštita od zemljospoja se može zadovoljavajuće izvesti, a najčešće se greška samo signalizira. U izoliranim mrežama (peti način) zaštita od zemljospoja je nepouzdana.

Prvi način uzemljenja zvjezdišta dopušta u mrežama visokog i najvišeg napona smanjenje stupnja izolacije i stupnjevanje izolacije transformatora što donosi uštede koje nisu zanemarive.

U dva posljednja načina tretmana zvjezdišta često nastaju visokofrekventne smetnje dok traje zemljospoj, a to može biti i kroz duže vrijeme.

Do sada iznesene komparativne karakteristike pokazuju da prva tri načina uzemljenja zvjezdišta imaju izrazite prednosti, koje se ukratko mogu rezimirati ovako:

- uredan i selektivan rad zaštite,
- reduciranje nivoa komutacionih prenapona, a time i sekundarnih posljedica atmosferskih prenapona,
- greška traje kratko, pa se bitno smanjuje i opasnost po život u blizini kvara,

a kod prvog načina još i

- ušteda na izolaciji.

Nažalost, prednosti su umanjene i manama kod prva tri načina. To su:

- svaka greška dovodi do isključenja s mogućim posljedicama (poremećaj stabilnosti mreže, poremećaj kontinuiteta snabdjevanja),
- utjecaj nulte komponente struje na telefonske linije.

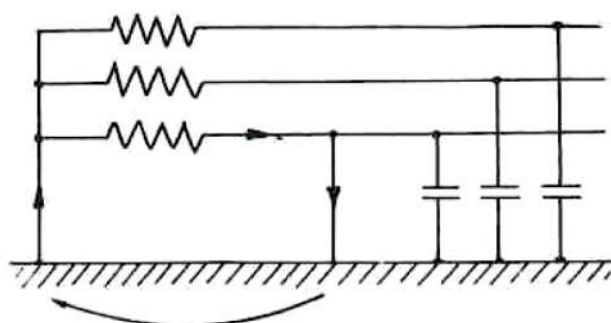
Prva navedena mana ima značajniju težinu samo u slabo razvijenim mrežama radijalnog oblika. U današnjim suvremenim zamkastim mrežama, pogotovo uz primjenu automatike ponovnog uklopa, ova mana gubi na značenju.

Daleko ozbiljniji je problem utjecaja na telekomunikacione linije. Umjesto daljnje komparacije pojedinih načina uzemljenja zvjezdišta dovoljno je navesti, da se danas u svijetu u mrežama do nekih 60 kV primjenjuje pretežno drugi i treći način, preko 60 kV pretežno prvi način, a od nekih 250 kV pa dalje isključivo prvi način uzemljenja zvjezdišta trofaznih mreža.

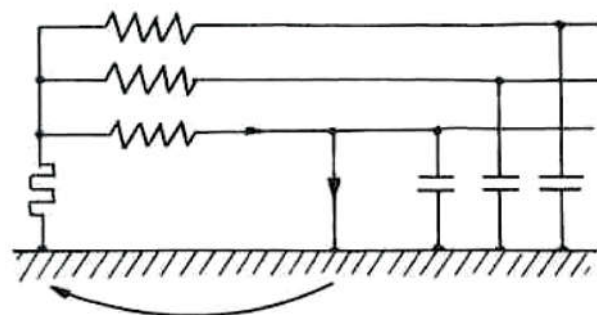
Na slici 115a,b i c nacrtana su prva tri načina uzemljenja zvjezdišta, a na slici 115d i e četvrti i peti način. U prva tri načina teku struje jednopolnog kratkog spoja kod spoja jedne faze sa zemljom. U ta tri slučaja kapacitivne struje se mogu zanemariti u odnosu na struje kratkog spoja. U četvrtom slučaju na mjestu zemljospoja teče struja ostatka, a u petom slučaju ukupna kapacitivna struja zemljospoja.

Da bi mogli ostvariti bilo koji spoj zvjezdišta sa zemljom, neposredni ili posredni (osim, naravno, izoliranog zvijezdišta, sl.115e), zvjezdište mora biti pristupačno. Pristupačnost zvjezdišta ostvarena je na svim namotajima transformatora spojenih u zvijezdu (Y), pod uvjetom da je zvjezdište i izvedeno (putem provodnog izolatora) iz kotla transformatora. Takvi transformatori moraju, osim toga, omogućiti zatvaranje nultih struja kroz spoj sa zemljom (tri jednofazne jedinice, drugi namotaj spojen u trokut ili postojanje terci-jara, vidi "Mreže I", 5.2).

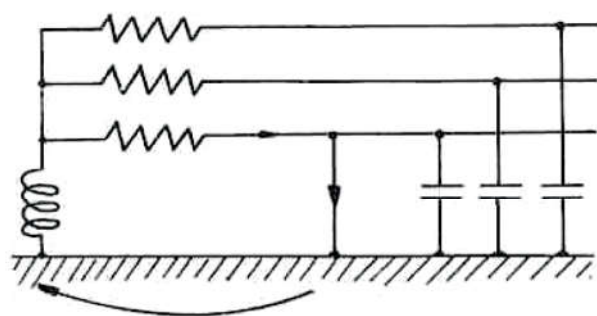
Ako ni jedno zvijezdište neke galvanski povezane mreže određenog naponskog nivoa nije pristupačno ili nije pristupačan dovoljni broj pogodno raspoređenih zvijezdišta, a želimo primijeniti neki od načina povezivanja zvjezdišta sa zemljom, moramo postaviti jedno ili više "umjetnih zvjezdišta". Takva umjetna zvjezdišta su po svojoj konstrukciji u principu transformatori, koji se međjutim koriste samo za spoj zvjezdišta sa zemljom, pa su njihove karakteristike toj ulozi i prilagođene. Oni ne moraju biti dimenzionirani za trajnu struju pogonskog opterećenja, ali moraju izdržati struje



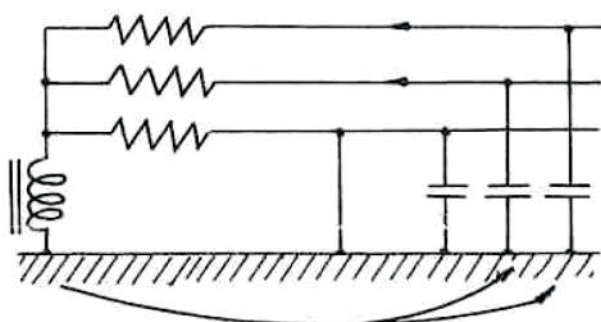
a) kruto uzemljeno
zvjezdište



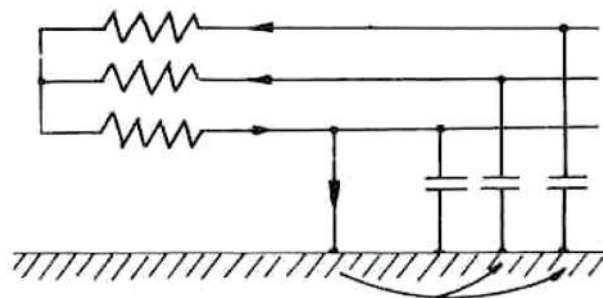
b) zvjezdište uzemljeno
preko malog djelatnog
otpora



c) zvjezdište uzemljeno
preko malog induktiv-
nog otpora



d) zvjezdište uzemljeno
preko petersenke



e) izolirano zvjezdište

Slika 115 - Načini uzemljenja zvjezdišta

greške kroz predviđeno vrijeme, kako termički, tako i dinamički. Također moraju imati dovoljno malu nultu reaktanciju (dodatni namotaj spojen u trokut) i izvedeno zvijezdište.

Ovdje ćemo još napomenuti, da se u glavanski spojenoj mreži, koju sačinjava generator, spojni vod i transformator bloka (takva mreža je npr. vidljiva na sl.121 oko čvora A) zvijezdište ne uzemljuje, makar je namotaj statora generatora redovito spojen u zvijezdu s pristupačnim zvijezdištem. Između zvijezdišta generatora i zemlje priključuju se samo naprave vrlo velike impedancije, npr. naponski transformator ili veliki omski otpor, a koji služe u sistemu zaštite generatora (vidi i "Mreže I" 5.3.3).

Definicija tretmana zvijezdišta mreže u svim slučajevima, osim u slučaju mreže sa izoliranim zvijezdištem, ne ovisi jedino o načinu uzemljenja, već i o ostalim parametrima mreže. Ovo je naročito važno za definiciju "kruto uzemljene mreže", pa se je umjesto ovoga uveo pojam "efektivno uzemljene mreže".

AIEE standard No 32 (1947) specificira: "Za sistem ili dio sistema može se reći da je efektivno uzemljen, ako za sve točke sistema ili njegovog odredjenog dijela odnos reaktancije nultog sistema i reaktancije direktnog sistema nije veći od tri, a odnos rezistencije nultog sistema i reaktancije direktnog sistema nije veći od jedan za bilo koji pogonski slučaj i za bilo koju priključenu snagu generatora. Kada sistem nije u svim svojim djelovima efektivno uzemljen, može se za dio sistema reći da je efektivno uzemljen, ako su za sve točke tog dijela zadovoljeni gornji zahtjevi".

Prema tome, mogu postojati slučajevi, kada je sistem neposredno uzemljen, tj. impedancija uzemljenja jednaka je nuli za uzemljena zvijezdišta, a da svejedno sistem ne zadovoljava postavljenim zahtjevima i ne može se nazvati efektivno uzemljenim.

Dosadašnja razmatranja odnosila su se na strujna i naponska naprezanja interesantna za dimenzioniranje izolacije i sklopki. Osim ovih postoje i drugi problemi, koji se također mogu manifestirati preko postavljenih zahtjeva na struje i napone, kao npr.: struje uzemljivača stanica i stupova, struje faza bliže i dalje od

mjesta kratkog spoja itd. Ovdje spada takodjer i utjecaj energetskih vodova na vodove drugih mrežnih sistema u kojima se mogu inducirati neželjene struje i naponi.

U jednoj već zadanoj mreži, u kojoj ispitujemo tretman zvjezdišta, možemo za svaki čvor (nula i čvor mreže) odrediti ulaznu impedanciju direktnog, inverznog i nultog sistema. Promjenom karaktera i lokacije uzemljenja mijenjati će se samo ulazna impedancija nultog sistema, dok će ulazne impedancije direktnog i inverznog sistema ostati nepromijenjene.

Za ocjenu tretmana zvjezdišta u pogledu struje i napona kratkog spoja za svaki pojedini čvor u mreži može poslužiti omjer ulaznih impedancija nultog i direktnog sistema. Stoga definiramo omjer

$$k_u = Z_o / Z_1 \quad 3-1$$

kojega ćemo nazvati faktorom uzemljenja.

Zamislamo sada u mreži na sl.116a dozemni spoj u čvoru B.

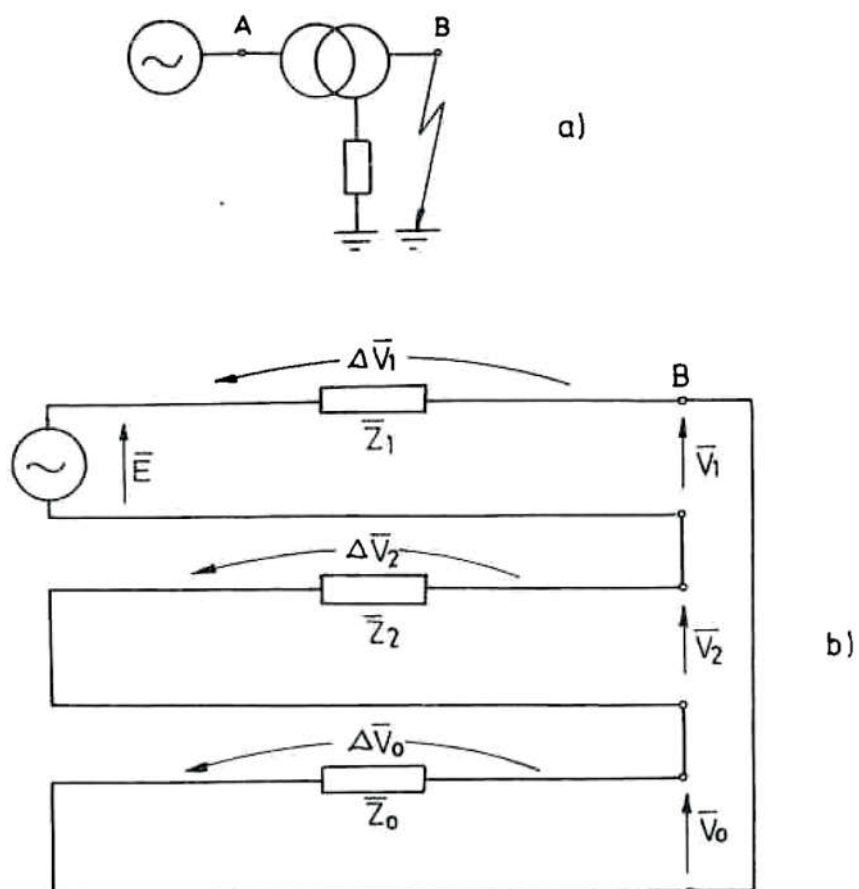
Neka je generator vrlo velik, tako da je $\bar{Z}_{1G} = \bar{Z}_{2G} = 0$. U strujnom krugu ostaje samo reaktancija transformatora. Interesiraju nas naponi zdravih faza.

Zadatak možemo riješiti tako, da sisteme simetričnih komponenata zadane mreže spojimo u ekvivalentnu shemu prema slici 116b.

Pretpostavimo još, da je $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2$, te da je u $\bar{Z}_o$ uključena i trostruka vrijednost impedancije putem koje je zvjezdište transformatora spojeno sa zemljom. Imamo

$$\begin{aligned} \Delta \bar{V}_b &= a^2 \Delta \bar{V}_1 + a \Delta \bar{V}_2 + \Delta \bar{V}_o = (a^2 + a) \Delta \bar{V}_1 + \Delta \bar{V}_o = \\ &= \Delta \bar{V}_o - \Delta \bar{V}_1 = \bar{I}_o (\bar{Z}_o - \bar{Z}_1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \bar{V}_c &= a \Delta \bar{V}_1 + a^2 \Delta \bar{V}_2 + \Delta \bar{V}_o = (a + a^2) \Delta \bar{V}_1 + \Delta \bar{V}_o = \\ &= \Delta \bar{V}_o - \Delta \bar{V}_1 = \bar{I}_o (\bar{Z}_o - \bar{Z}_1) \end{aligned}$$



Slika 116 - Sistem i njegov ekvivalent uz razmatranje napona zdravih faza kod spoja jedne faze sa zemljom

Kako je

$$\bar{I}_0 = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} = \frac{\bar{E}}{2\bar{Z}_1 + \bar{Z}_0}$$

slijedi

$$\begin{aligned} \Delta \bar{V}_0 &= \Delta \bar{V}_c = \Delta = \bar{E} \frac{\bar{Z}_0 - \bar{Z}_1}{2\bar{Z}_1 + \bar{Z}_0} = \\ &= \bar{E} \frac{\bar{Z}_0/\bar{Z}_1 - 1}{2 + \bar{Z}_0/\bar{Z}_1} = \bar{E} \frac{k_u - 1}{k_u + 2} \end{aligned}$$

Vidimo da će napon "zdravih" faza u slučaju kvara ovisiti o faktoru uzemljenja.

Uzmimo sada u razmatranje bilo kakvu mrežu. Ulazne impedancije nekog čvora te mreže neka su $\bar{Z}_1$, $\bar{Z}_2$ i $\bar{Z}_0$. Definiramo referentnu struju jednopolnog kratkog spoja za teoretski slučaj $\bar{Z}_0 = 0$. Tada je:

$$\bar{E} = \frac{\bar{I}_{\text{ref}}}{3} (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2) \quad 3-3$$

Porastom $\bar{Z}_0$ pojavljuje se napon $\bar{V}_0$, pa je sada

$$\bar{E} = \frac{\bar{I}_Z}{3} (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0) = \frac{\bar{I}_Z}{3} (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2) + \bar{V}_0$$

odnosno

$$\bar{E} - \bar{V}_0 = \frac{\bar{I}_Z}{3} (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2) \quad 3-4$$

Omjer relacije 3-4 i 3-3 daje

$$\frac{\bar{I}_Z}{\bar{I}_{\text{ref}}} + \frac{\bar{V}_0}{\bar{E}} = 1 \quad 3-5$$

Relacija 3-5 pokazuje, da je suma relativne struje kvara i relativnog napona nultog sistema konstantna. Smanji li se struja, napon $\bar{V}_0$ naraste za isti relativni iznos i obrnuto.

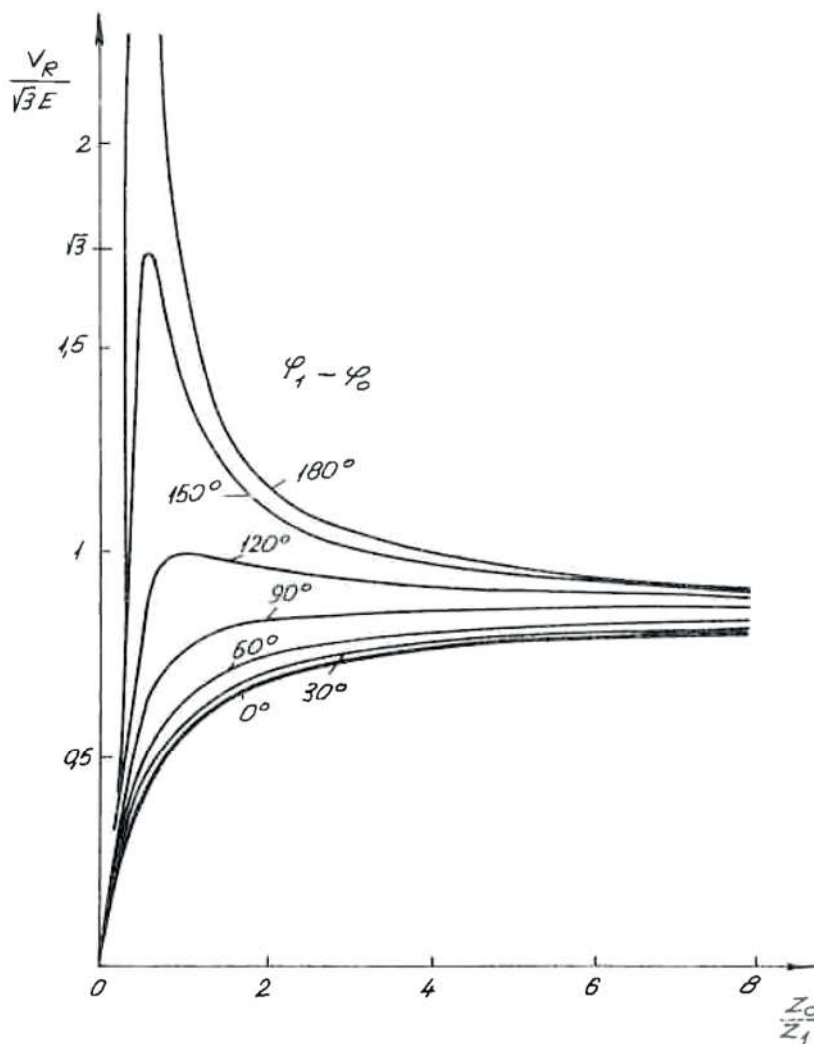
Uzemljenjem zvjezdišta naponska naprezanja zamjenjuju se strujnim naprezanjima.

Dijagrami na slikama 117 i 118 pokazuju ponašanje napona zdrave faze i struja bolesnih faza u ovisnosti od faktora k_u za dvopolni kratki spoj sa spojem sa zemljom. Kutevi φ_1 i φ_0 su argumenti vektora $\bar{Z}_1$ odnosno $\bar{Z}_0$.

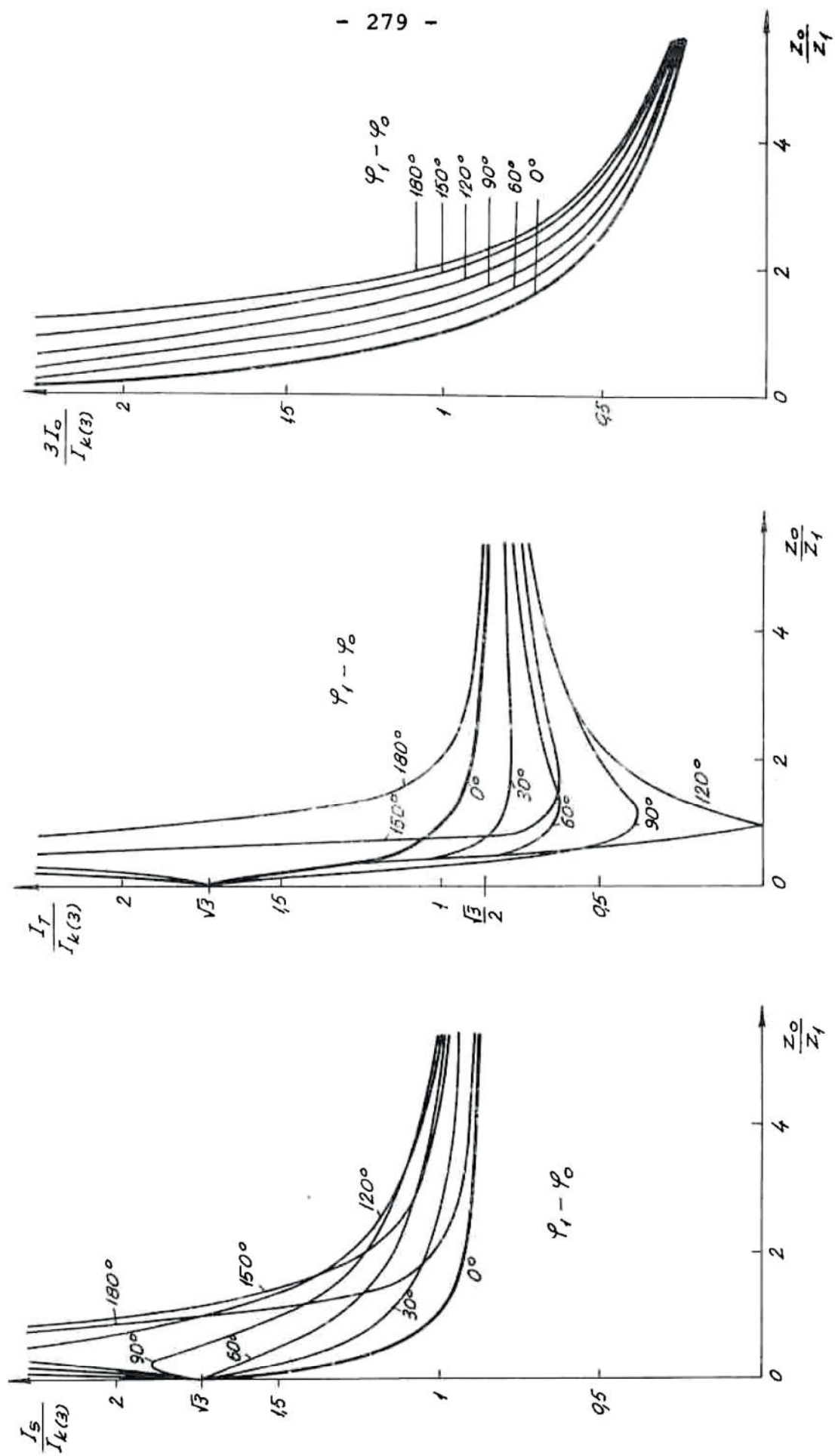
Krivulje na sl.117 pokazuju apsolutne vrijednosti napona faze a prema zemlji u odnosu na linijsku vrijednost elektromotorne

sile, i to na mjestu kratkog spoja. Krivulje na sl.118a i b pokazuju apsolutne struje faze b odnosno c u odnosu na struju trofaznog kratkog spoja. Na slici 118c su krivulje relativnog iznosa trostruke nulte komponente struje.

Kod malih k_u i velikih $\varphi_1 - \varphi_0$ ponašanje napona i struja predstavlja opasnost za pogon.



Slika 117 - Naponi faze a dvopolnog kratkog spoja sa spojem sa zemljom u ovisnosti od k_u

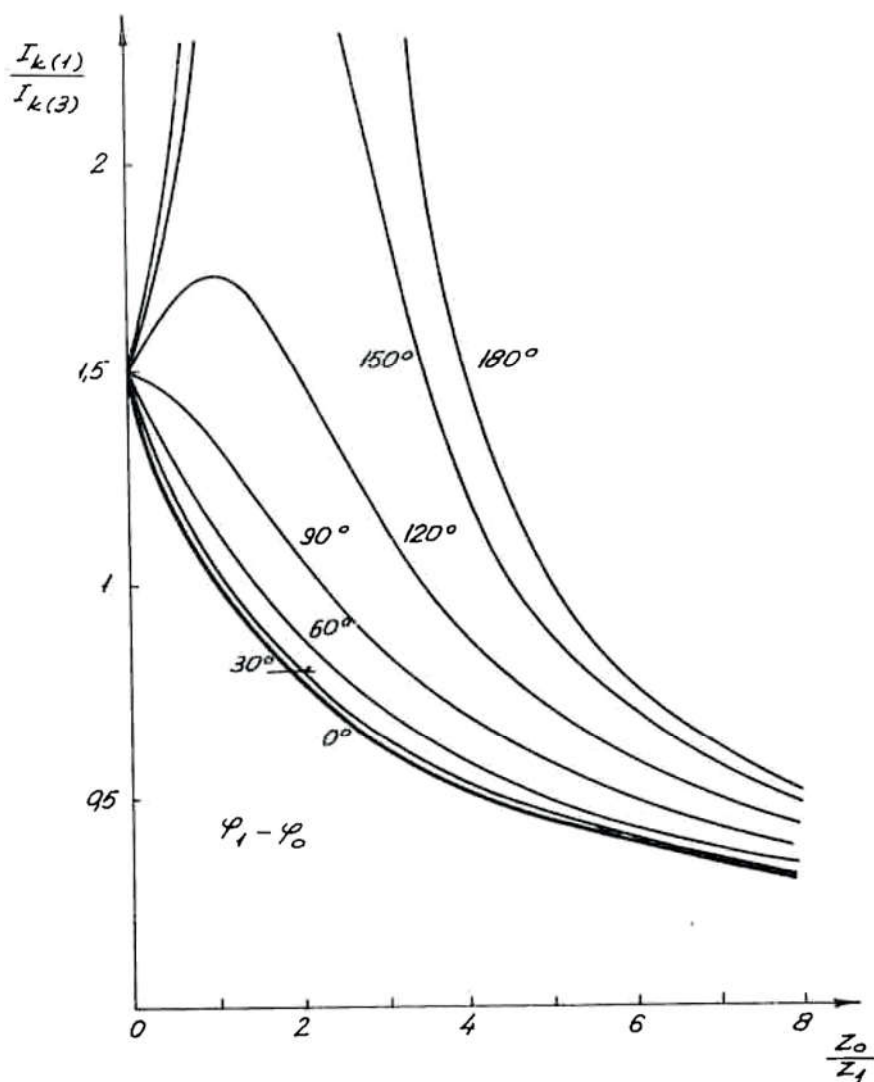


Slika 118 - Struje dvopolnog kratkog spoja sa spojem sa zemljom
u ovisnosti od k_u

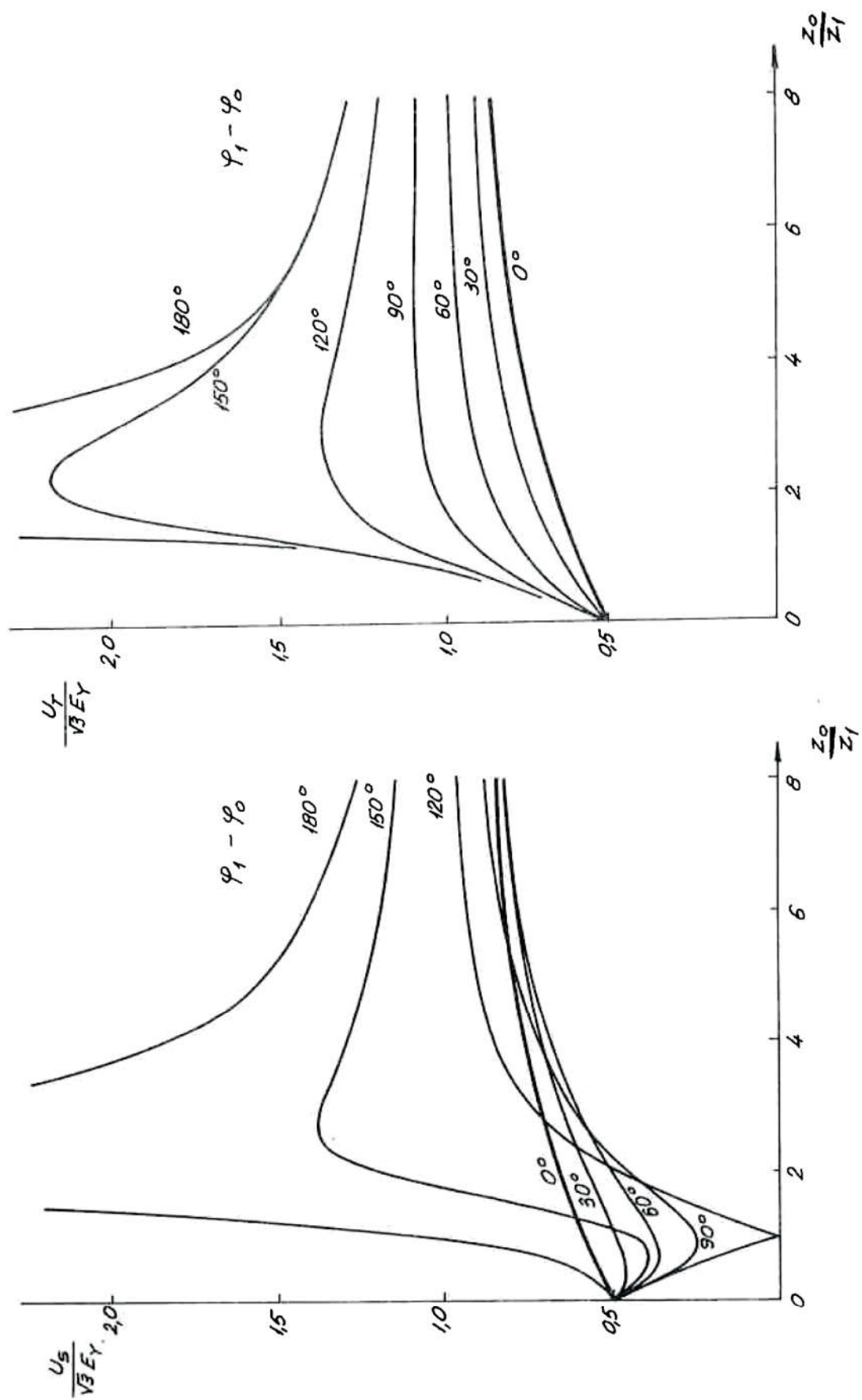
Dijagrami na slikama 119 i 120 pokazuju ponašanje struje bolesne faze i napona zdravih faza u ovisnosti od faktora k_u za jednopolni kratki spoj na mjestu kratkog spoja.

Krivulje na sl.119 pokazuju apsolutne vrijednosti struje faze a u odnosu na struju troleznog kratkog spoja. Krivulje na slikama 120a i b pokazuju apsolutne vrijednosti napona faze b odnosno faze c u odnosu na linijsku vrijednost elektromotorne sile.

Kod malih k_u i velikih $\varphi_1 - \varphi_0$ ponašanje napona i struja predstavlja opasnost za pogon.



Slika 119 - Struja faze a jednopolnog kratkog spoja u ovisnosti od k_u



Slika 120 - Naponi jednopolnog kratkog spoja u ovisnosti od k_u

Iz dijagrama na slikama 117 - 120 vidimo da najteže prilike nastaju kada je omjer $Z_0/Z_1 = k_u$ mali (cca 0 - 5), a kut $\varphi_1 - \varphi_0$ velik. Tada naponi i struje mogu doseći enormne vrijednosti.

U visokonaponskim kruto uzemljenim mrežama možemo zanemariti djelatni otpor ne samo generatorima i transformatorima, nego i vodovima. Radi toga u direktnom i nultom sistemu kutevi φ_1 i φ_0 iznose približno 90° , a njihova razlika nula. Omjer Z_0/Z_1 u ovim mrežama je mali, ali nema opasnosti, jer su mjerodavne krivulje $\varphi_1 - \varphi_0 = 0$.

Izoliranim mrežama je nulta impedancija vrlo velika. Kapacitivni karakter ove impedancije razlog je da je $\varphi_1 - \varphi_0 \approx 180^\circ$. Radi velikog omjera Z_0/Z_1 nalazimo se izvan područja opasnosti.

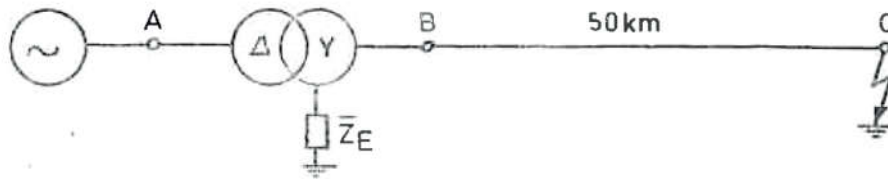
Kod mreža, koje su uzemljene preko malog djelatnog otpora, dolazi do povećanja kuta, ali i do povećanja nulte impedancije. U svakom slučaju ovdje treba biti oprezan.

Mreže, uzemljene preko malog induktivnog otpora, imaju povećan omjer Z_0/Z_1 , a smanjenu razliku $\varphi_1 - \varphi_0$. Ovisi o mreži i veličini induktivnog otpora u kojem području i na kojoj krivulji treba tražiti prilike za vrijeme kratkog spoja i spoja sa zemljom.

Kompenzirane mreže imaju praktički beskonačnu ulaznu impedanciju nultog sistema, pa je kod njih k_u najudaljeniji od opasne zone.

U primjeru 3.1 ilustrirani su odnosi napona i struja u jednostavnom elektroenergetskom sistemu za razne načine uzemljenja zvjezdišta.

Primjer 3.1 Na sl.121 nalazi se jednopolna shema sasvim jednostavnog elektroenergetskog sistema s fazom a u dozemnom spoju. Ovaj sistem treba ispitati mijenjanjem impedancije uzemljenja zvjezdišta mrežnog transformatora.



50 MVA	50 MVA	$R_1 = 0,08 \text{ } \Omega/\text{km}$
20 %	10 %	$X_1 = 0,4 \text{ } \Omega/\text{km}$
10 kV	10/110 kV/kV	$B_1 = 6 \text{ } \mu\text{S}/\text{km}$ (pogonski)
		$B_Z = 3 \text{ } \mu\text{S}/\text{km}$ (dozemni)

- a) $\bar{Z}_E = 0$ c) $\bar{Z}_E = 0 + j300 \text{ } \Omega$
 b) $\bar{Z}_E = 60 + j0 \text{ } \Omega$ d) $\bar{Z}_E = \infty$

Slika 121 - Zadani elektroenergetski sistem uz primjer 3.1.

Postavljena su 4 slučaja i to: a) uzemljeno zvjezdište ($\bar{Z}_E = 0$), b) zvjezdište uzemljeno preko djelatnog otpora ($\bar{Z}_E = 60 \text{ } \Omega$), zvjezdište uzemljeno preko induktivnog otpora ($\bar{Z}_E = j 300 \text{ } \Omega$) i d) zvjezdište izolirano.

Za sva 4 slučaja korištena je ista ekvivalentna shema sistema simetričnih komponenta za spoj faze a sa zemljom u točki C. U svim slučajevima zanemareni su međusobni kapaciteti svih sistema i kapaciteti prema nuli direktnog i inverznog sistema. U slučaju a) zanemareni su svi kapaciteti, dakle i nultog sistema.

- a) Na slici 122 zvjezdište je direktno uzemljeno. Struja kvara $\bar{I}_Z = 3\bar{I}_O$ (pozitivna od faze prema zemlji) jednaka je struji zvjezdišta $\bar{I}_{ZE}$ (pozitivna od zemlje prema zvjezdištu), jer dozemni kapaciteti voda nisu uzeti u račun.

Na mjestu kvara (točka C) napon nultočke iznosi:

$$\bar{V}_{OC} = \frac{1}{3} (-60,442 + j 3,739) = -20,147 + j 1,246 \text{ |kV|}$$

a u točki B

$$\bar{V}_{OB} = \frac{1}{3} (-27,689 - j 1,392) = -9,229 - j 0,464 \text{ |kV|}$$

Spoj transformatora i tretman zvjezdišta ne dozvoljavaju da se u 10 kV mreži razvije struja nultog sistema. Trokut napona u A nije istostraničan, radi struja koje teku u fazama a i b. Kada se pribroje padovi napona uslijed ovih struja naponima u A, dobije se istostraničan trokut elektromotornih sila. Geometrijsko težište oba trokuta pada u istu točku E. Napon zvjezdišta prema zemlji jednak je nuli.

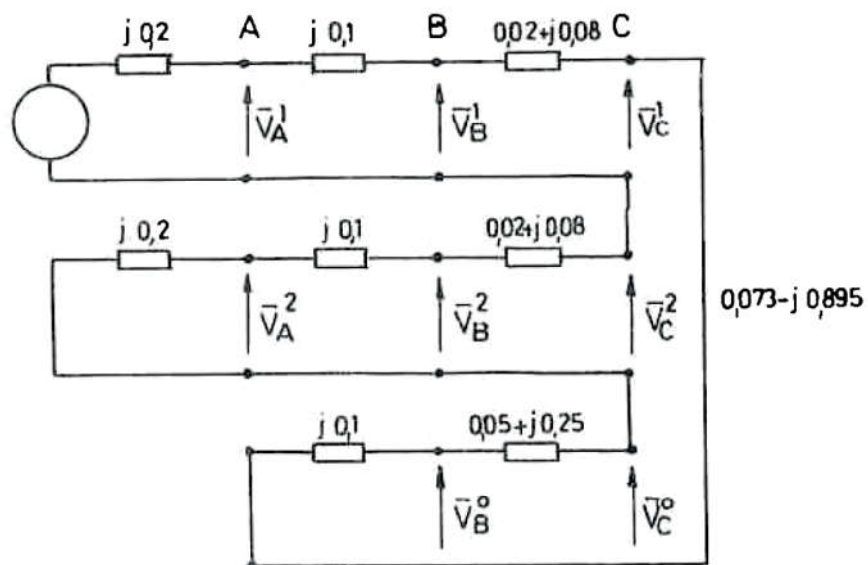
- b) Na slici 124 zvjezdište je uzemljeno preko djelatnog otpora 60Ω . Kapaciteti voda uzeti su u obzir u π -shemi nultog sistema, a zanemareni su kapaciteti direktnog i inverznog sistema. Trokut napona u točki C izrazito je nesimetričan, ne-jednaki su po apsolutnom iznosu i naponi faza prema zemlji. Napon zvjezdišta prema zemlji jednak je negativnom padu napona uslijed struje $\bar{I}_{ZE}$ na impedanciji $\bar{Z}_E$:

$$\bar{V}_{ZE} = - (0,35 - j 0,465) 60 = - 21,0 + j 27,9 \text{ |kV|}$$

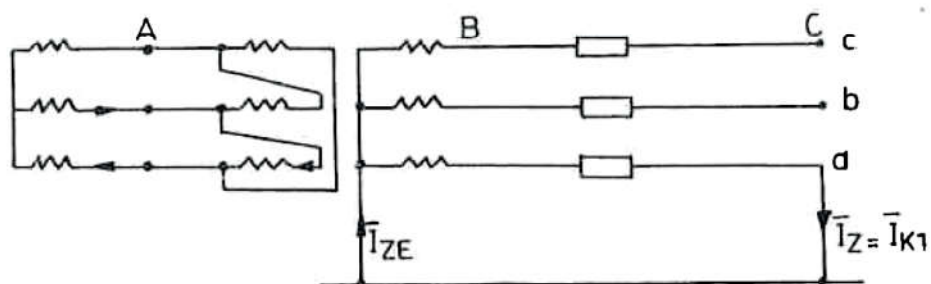
- c) Na slici 126 zvjezdište je uzemljeno preko zavojnice od $j300$ ohma. Trokut napona u C malo odstupa od idealnoga, a u B se još poboljšava. Napon zvjezdišta prema zemlji iznosi:

$$\bar{V}_{ZE} = - (0,0028 - j 0,1601) j 300 = - 48,03 - j 0,84 \text{ |kV|}$$

- d) Na slici 128 zvjezdište je izolirano i nalazi se praktički pod punim faznim naponom prema zemlji. Napon zvjezdišta pre-



a) ekvivalentna shema



b) trofazna shema

Slika 122 - Dozemni kratki spoj faze a u C mreže sa sl.121. Zvezdište neposredno uzemljeno.

	A	B	C
$\bar{V}_1$ p.u.	0,821 - j 0,0146	0,7315 - j 0,0219	0,6584 - j 0,0098
$\bar{V}_2$ p.u.	- 0,179 - j 0,0146	- 0,2685 - j 0,0219	- 0,3416 - j 0,0098
$\bar{V}_0$ p.u.	0	- 0,0895 - j 0,0073	- 0,3169 + j 0,0196
$\bar{V}_a$ kV	- 3,2139 + j 3,0364	23,749 - j 3,249	0
$\bar{V}_b$ kV	3,2139 + j 2,7439	- 25,719 - j 54,135	- 30,221 - j 53,194
$\bar{V}_c$ kV	0,0 - j 5,7803	- 25,719 + j 55,992	- 30,221 + j 56,933
$\bar{V}_{OE}$ kV	0	- 9,23 - j 0,464	- 20,147 + j 1,246
$\bar{V}_{ZE}$ kV	-	0	-
$\bar{I}_a$ kA	- 0,365 + j 4,475	0,056 - j 0,706	0,056 - j 0,706
$\bar{I}_b$ kA	0,365 - j 4,475	0	0
$\bar{I}_c$ kA	0	0	0

$$\bar{Z}_1 = 0,02 + j 0,38$$

$$\bar{Z}_0 = 0,05 + j 0,35$$

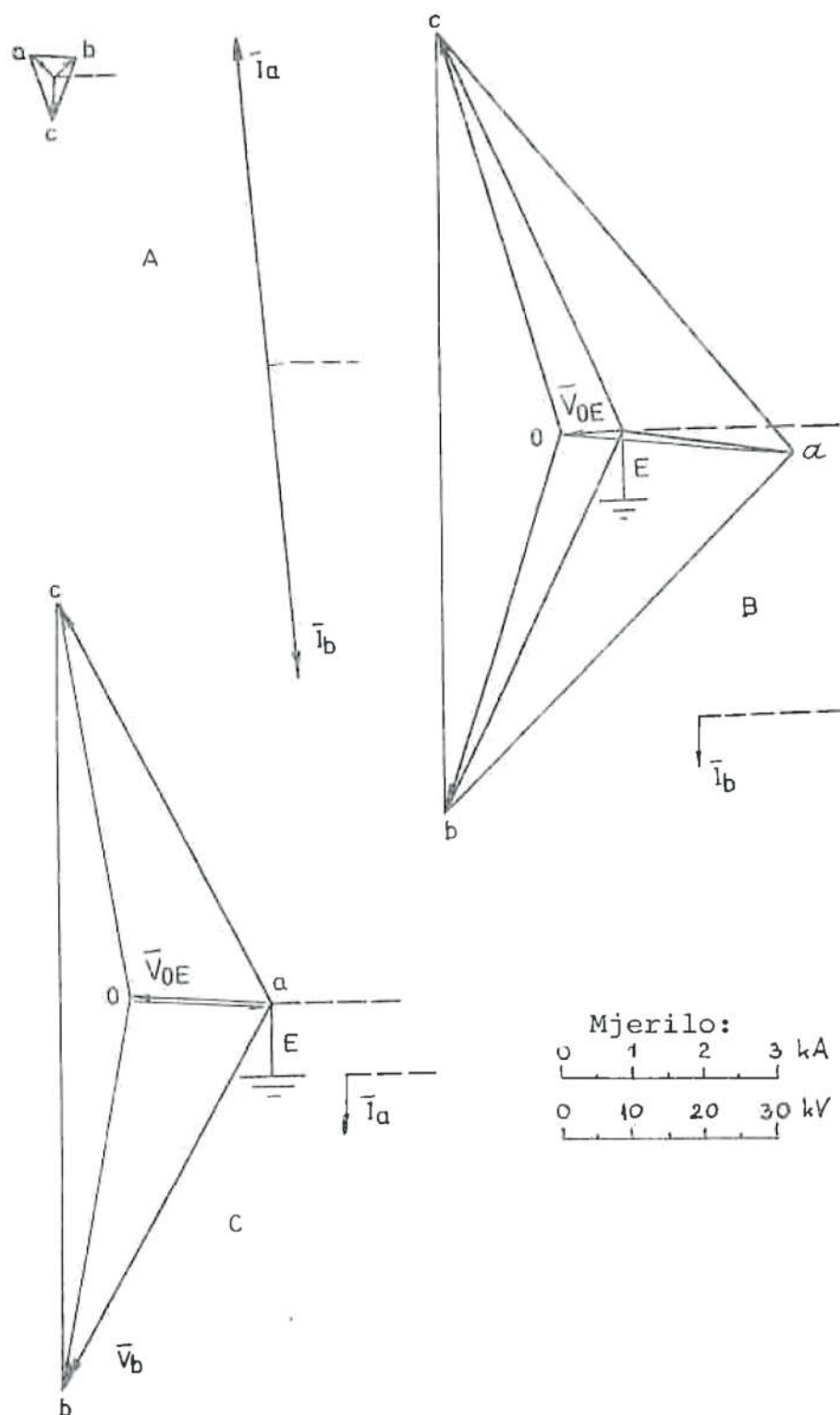
$$\bar{Z}_E = 0$$

$$\bar{I}_Z = 0,056 - j 0,706 \text{ kA}$$

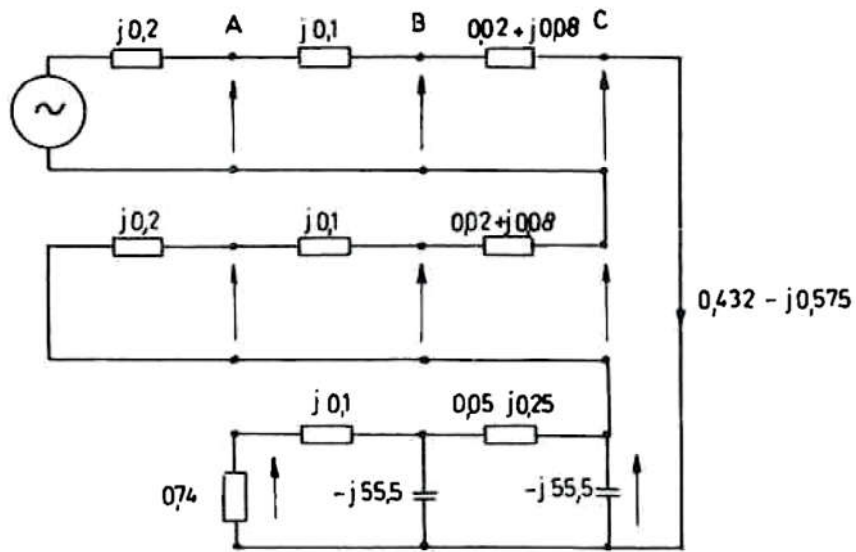
$$\bar{I}_{ZE} = \bar{I}_Z$$

$$\bar{Z}_0 / \bar{Z}_1 = 0,9293 \angle -5,24^\circ$$

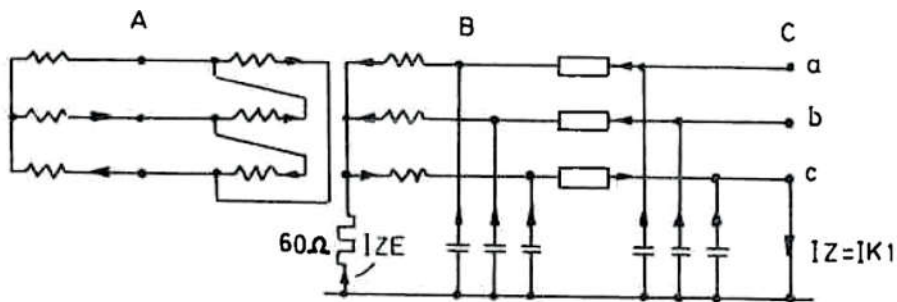
$$\varphi_1 - \varphi_0 = 5,24^\circ$$



Slika 123 - Naponi i struje u mreži sa
sl.121 za pogonsko stanje sa
sl.122



a) ekvivalentna shema



b) trofazna shema

Slika 124 - Dozemni kratki spoj faze a u C mreže
sa sl.121. Zvezdište uzemljeno preko
djelatnog otpora 60Ω .

Tablica 2

	A	B	C
$\bar{V}_1$ p.u.	0,8851 - j 0,0864	0,8277 - j 0,1295	0,7732 - j 0,1526
$\bar{V}_2$ p.u.	- 0,1149 - j 0,0864	- 0,1723 - j 0,1295	- 0,2268 - j 0,1526
$\bar{V}_O$ p.u.	0	- 0,3871 + j 0,0147	- 0,5464 + j 0,3052
V_a kV	- 3,854 + j 3,755	17,059 - j 15,534	0
V_b kV	3,854 + j 2,025	-49,099 - j 48,635	-52,113 - j 25,955
V_c kV	0,0 - j 5,7803	-49,099 + j 61,492	-52,113 + j 84,172
V_{OE} kV	0	-27,046 - j 0,892	-34,742 + j 19,406
V_{ZE} kV	-	-21,00 + j 0,269	-
I_a kA	- 2,162 + j 2,893	0,344 - j 0,459	0,340 - j 0,455
I_b kA	2,162 - j 2,893	0,003 - j 0,003	0
I_c kA	0	0,003 - j 0,003	0

$$\bar{Z}_E = 60 \Omega$$

$$\bar{I}_Z = 0,34 - j 0,455 \text{ kA}$$

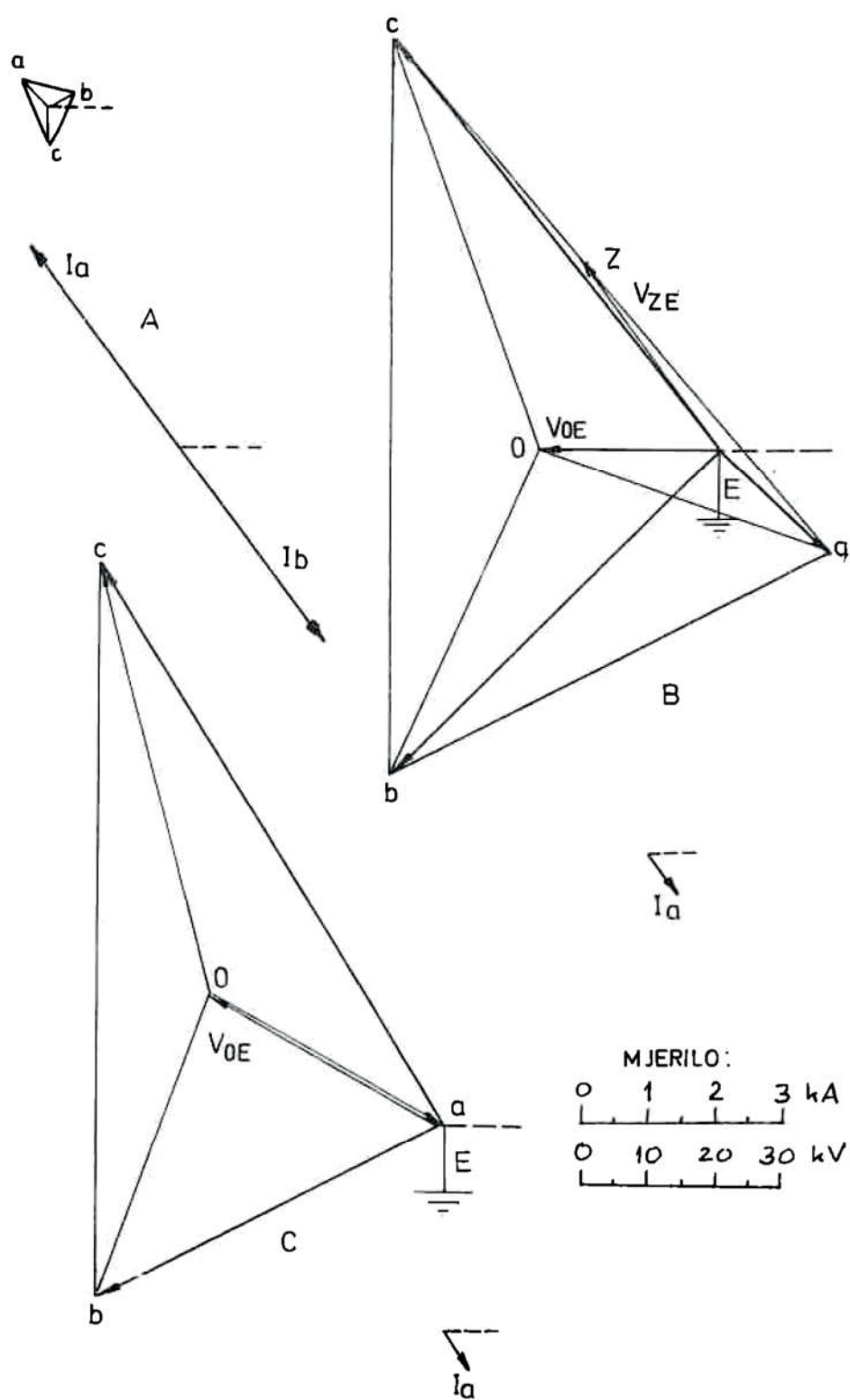
$$\bar{I}_{ZE} = 0,35 - j 0,465 \text{ kA}$$

$$\bar{Z}_O / \bar{Z}_1 = 2,2886 \angle -63,19^\circ$$

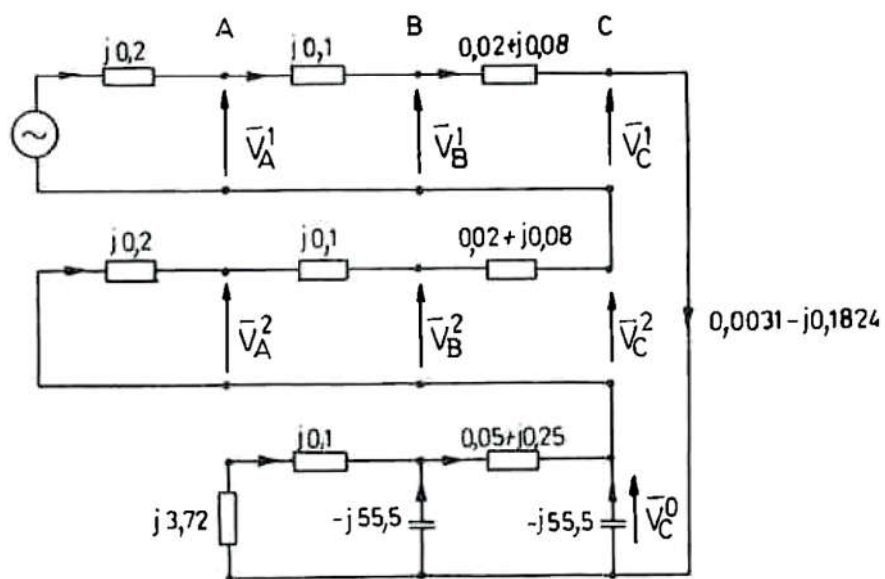
$$\varphi_1 - \varphi_O = 63,19^\circ$$

$$\bar{Z}_1 = 0,02 + j 0,38$$

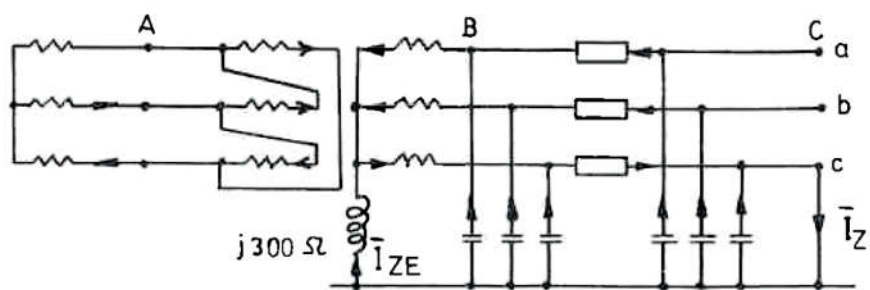
$$\bar{Z}_O = 0,7963 + j 0,3524$$



Slika 125 - Naponi i struje u mreži sa sl.121 za pogonsko stanje sa sl.124



a) ekvivalentna shema



b) trofazna shema

Slika 126 - Dozemni kratki spoj faze a u C mreže
sa sl.121. Zvezdište uzemljeno preko
induktivnog otpora 300Ω

Tablica 3

	A	B	C
$\bar{V}_1$ p.u	0,9964 + j 0,0006	0,9453 + j 0,0009	0,9306 + j 0,0025
$\bar{V}_2$ p.u.	- 0,0036 + j 0,0006	- 0,0547 + j 0,0009	- 0,0694 + j 0,0025
V_O p.u.	0	- 0,8119 - j 0,0138	- 0,8612 - j 0,0050
V_a kV	- 4,970 + j 2,884	5,004 - j 0,763	0
V_b kV	4,970 + j 2,896	- 79,938 - j 55,998	- 82,106 - j 55,540
V_c kV	0,0 - j 5,78	- 79,938 + j 54,129	- 82,106 + j 54,587
$\bar{V}_{OE}$ kV	0	- 51,624 - j 0,877	- 54,737 - j 55,540
$\bar{V}_{ZE}$ kV	-	- 48,030 - j 0,840	-
I_a kA	- 0,016 + j 0,913	0,0026 - j 0,1519	0,0024 - j 0,1434
I_b kA	0,16 - j 0,913	0,0001 - j 0,0041	0
I_c kA	0	0,0001 - j 0,0041	0

$$\bar{Z}_E = j 300 \Omega$$

$$\bar{I}_Z = 0,0024 - j 0,1434 \text{ kA}$$

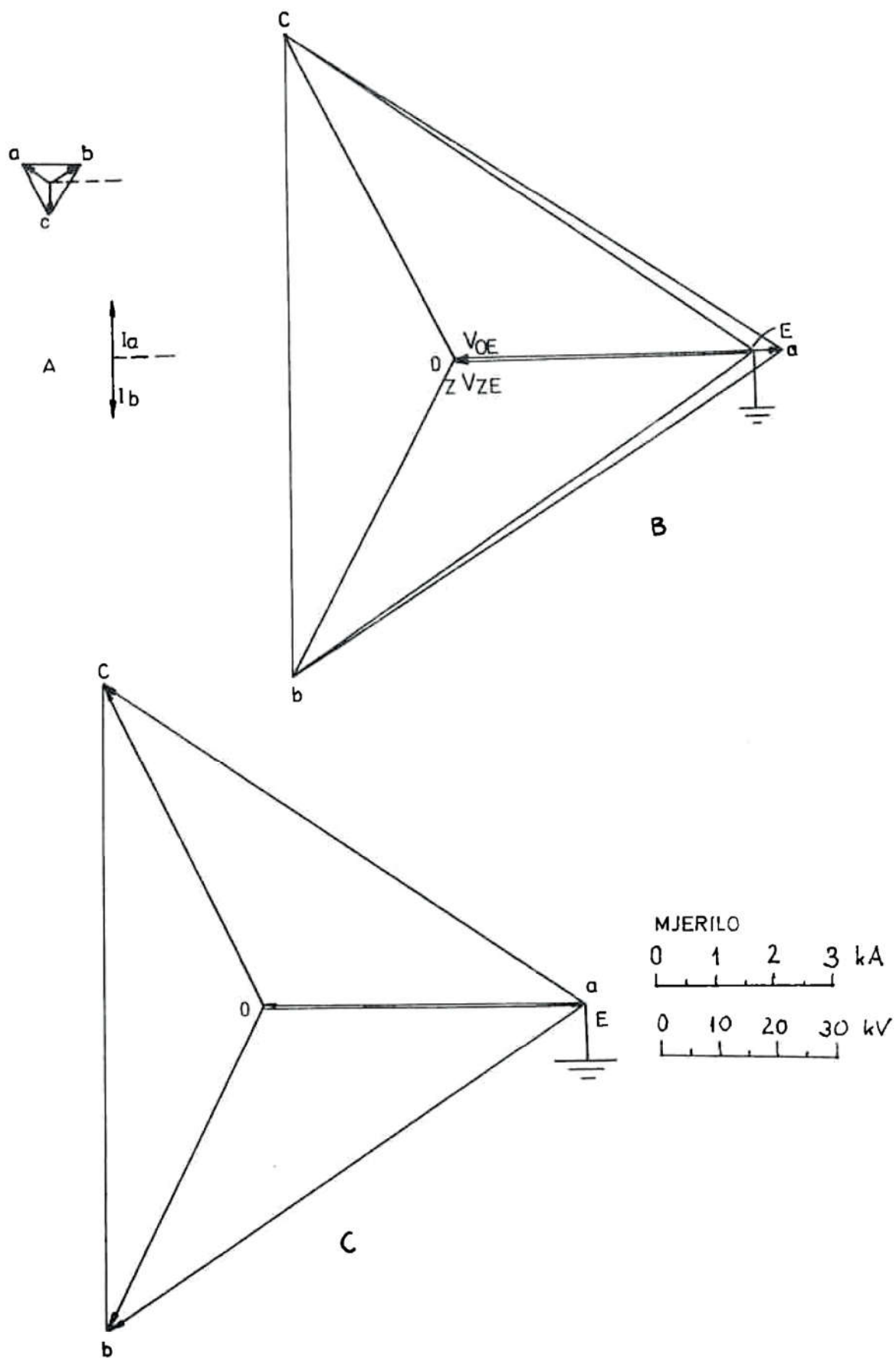
$$\bar{I}_{ZE} = 0,0028 - j 0,1601 \text{ kA}$$

$$\bar{Z}_O / \bar{Z}_1 = 12,4126 / 2,29^\circ$$

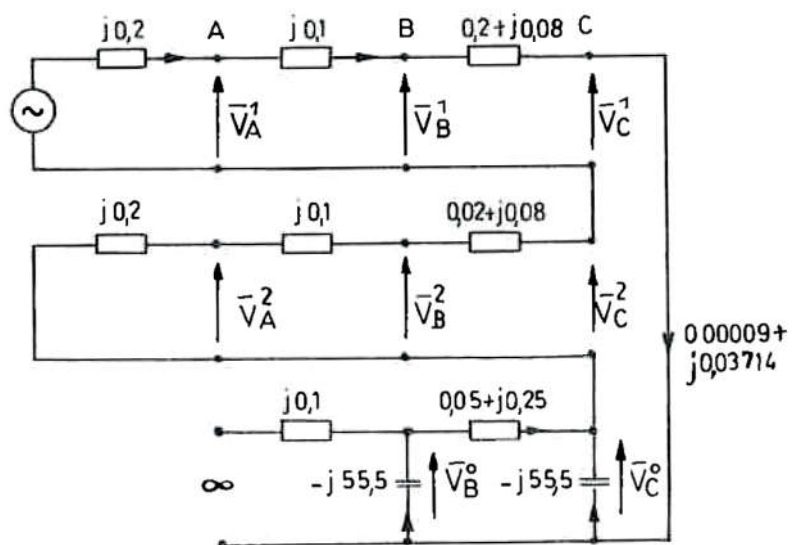
$$\varphi_1 - \varphi_O = - 2,29^\circ$$

$$\bar{Z}_1 = 0,02 + j 0,38$$

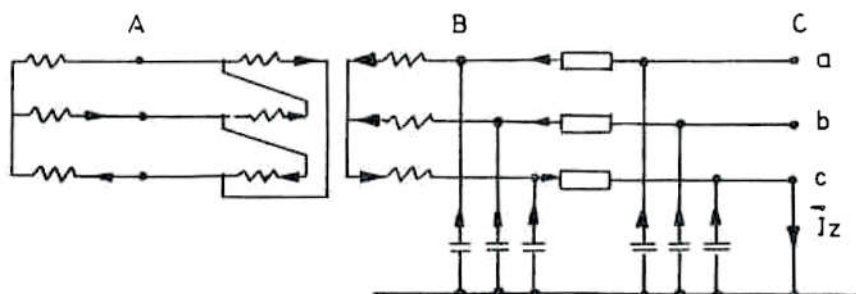
$$\bar{Z}_O = 0,0543 + j 4,7227$$



Slika 127 - Naponi i struje mreže sa sl.121 za pogonsko stanje sa sl.126



a) ekvivalentna shema



b) trofazna shema

Slika 128 - Dozemni kratki spoj faze a u C mreže
sa sl.121, zvjezdište izolirano

Tablica 4

	A	B	C
$\bar{V}_1$ p.u.	1,0074 + j 0,0	1,0111 + j 0,0	1,0141 + j 0,0
$\bar{V}_2$ p.u.	0,0074 + j 0,0	0,0111 + j 0,0	0,0141 + j 0,0
$\bar{V}_O$ p.u.	0	- 1,0328 + j 0,0	- 1,0282 + j 0,0
$\bar{V}_a$ kV	- 5,081 + j 2,89	- 0,292 + j 0,0	0
$\bar{V}_b$ kV	5,081 + j 2,89	- 98,167 - j 55,064	- 98,065 - j 55,064
$\bar{V}_c$ kV	0,0 - j 5,78	- 98,167 + j 55,064	- 98,065 + j 55,064
$\bar{V}_{OE}$ kV	0	- 65,542 + j 0,0	- 65,389 + j 0,0
$\bar{V}_{ZE}$ kV	-	- 65,542, + j 0,0	-
I_a kA	0,0 - j 0,1859	0,0 + j 0,0195	0,0 + j 0,0293
I_b kA	0,0 + j 0,1859	0,0 - j 0,0098	0
I_c kA	0	0,0 - j 0,0098	0

$$\bar{Z}_E = \infty$$

$$\bar{I}_Z = j 0,029 \text{ kA}$$

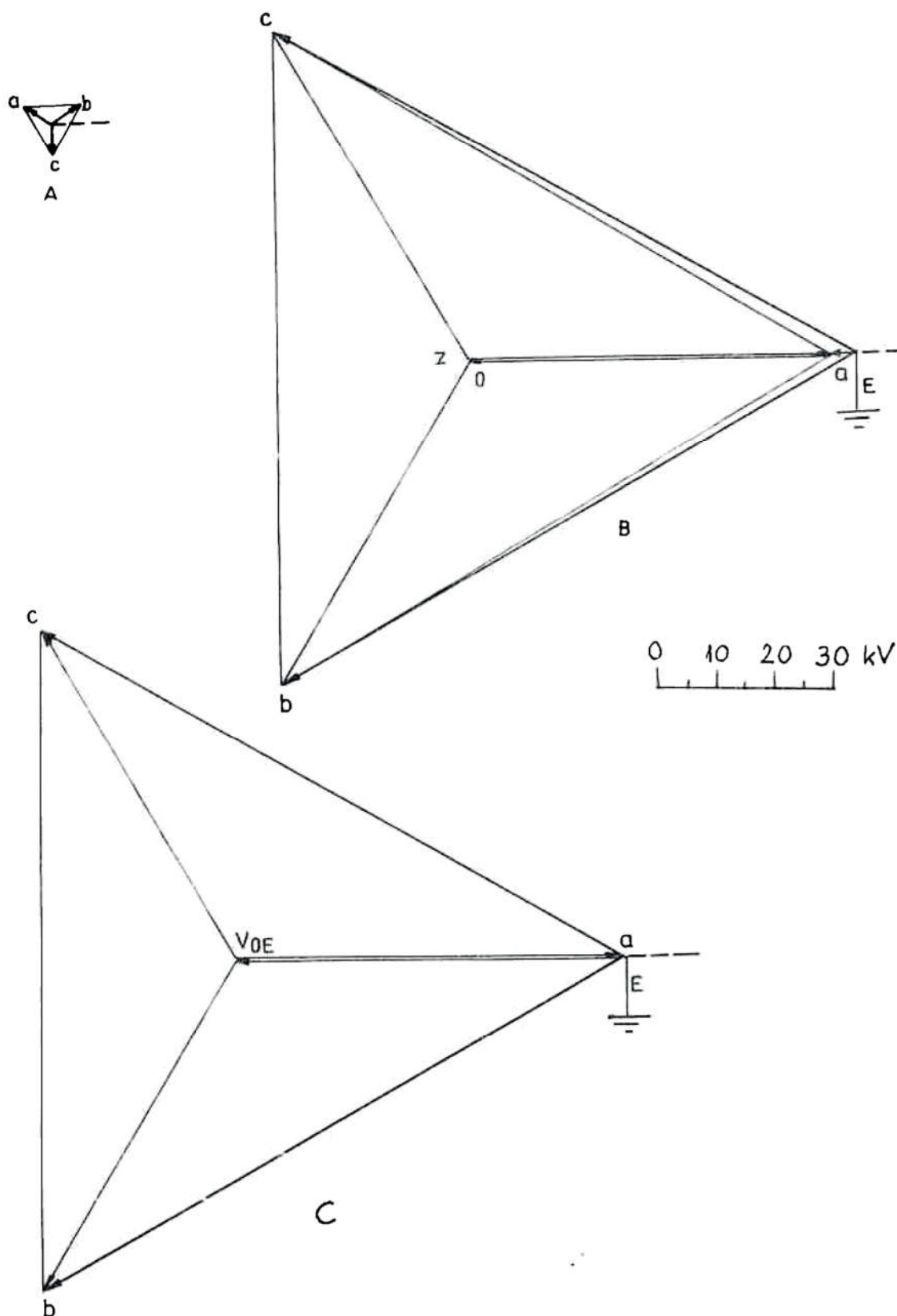
$$\bar{I}_{ZE} = 0$$

$$\bar{Z}_O / \bar{Z}_1 = 72,7658 \angle -177,06^\circ$$

$$\varphi_1 - \varphi_O = 177,06^\circ$$

$$\bar{Z}_1 = 0,02 + j 0,38$$

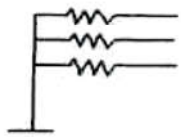
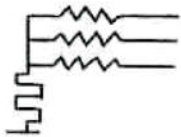
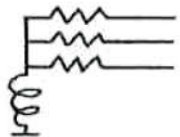
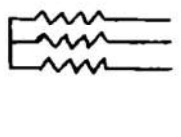
$$\bar{Z}_O = 0,0251 - j 27,6874$$



Slika 129 - Naponi i struje mreže sa sl.121 za pogonsko stanje sa sl.128

Tablica 5

Apsolutne vrijednosti

					
A	V_a	4,421	5,380	5,746	5,846
	V_b	4,421	4,354	5,752	5,846
	V_c	5,780	5,780	5,780	5,780
	I_a	4,490	3,234	0,913	0,186
	I_b	4,490	3,234	0,913	0,186
	I_c	0	0	0	0
B	V_a	24,086	23,093	5,062	0,292
	V_b	59,934	69,109	97,601	112,555
	V_c	61,617	78,690	96,540	112,555
	I_a	0,708	0,574	0,152	0,0195
	I_b	0	0,004	0,004	0,0098
	I_c	0	0,004	0,004	0,0098
C	V_a	0	0	0	0
	V_b	61,180	58,219	99,127	112,467
	V_c	64,457	98,999	98,595	112,467
	I_a	0,708	0,568	0,143	0,029
	I_b	0	0	0	0
	I_c	0	0	0	0

Naponi u kV

Struje u kA

ma zemlji u ovom slučaju ne može se izračunati iz umnoška struje i impedancije, jer je struja kroz zvijezdište nula, a impedancija beskonačna. Analiza izoliranog zvijezdišta daje relaciju:

$$\bar{V}_{ZE} = \bar{V}_{OE} - \frac{1}{3} (\bar{E}_a + \bar{E}_b + \bar{E}_c) \quad 3-6$$

a vrijedi kada možemo zanemariti padove napona u namotajima generatora odnosno transformatora, što s obzirom na veličinu struja možemo bez daljnjega uraditi. Na 10 kV strani jednaka je nuli suma elektromotornih sila generatora, pa je uz zanemarene padove napona generatora i transformatora jednaka nuli suma elektromotornih sila transformatora. Zato je jednaka nuli i suma elektromotornih sila transformatora u B, pa je:

$$\bar{V}_{ZE} = \bar{V}_{OE} = -65,542 + j0,0 \text{ kV}$$

Osim u kompleksnim vrijednostima u tablicama 1 do 4, rezultati su još jedanput rekapitulirani u tablici 5 i to u apsolutnim vrijednostima radi bolje usporedbe.

3.1.2 Smanjenje struja kratkog spoja

Ako se elektromotorna sila, prisutna u elektroenergetskom sistemu, prihvati kao konstantna i unaprijed zadana, vidljivo je da struja kratkog spoja ovisi isključivo od impedancije mreže gledane od mjesta kratkog spoja. Povećanje te impedancije dovesti će do smanjenja struje kratkog spoja. Pošto impedanciju u visokonaponskim mrežama, a donekle i u mrežama srednjeg napona, sačinjava reaktancija, govoriti ćemo dalje o mjerama za povećanje reaktancije kratkog spoja. O povećanju omskog otpora bilo bi apsurdno govoriti već i stoga, što bi se time povećavali gubici. Gotovo sve mjere, koje se danas praktički primjenjuju, svode se na povećanje reaktancije, a biti će spomenute još i neke druge mogućnosti za smanjenje struja kratkog spoja, koje se danas, međjutim, uglavnom još ne primjenjuju.

3.1.2.1 Povećanje reaktancije mreže

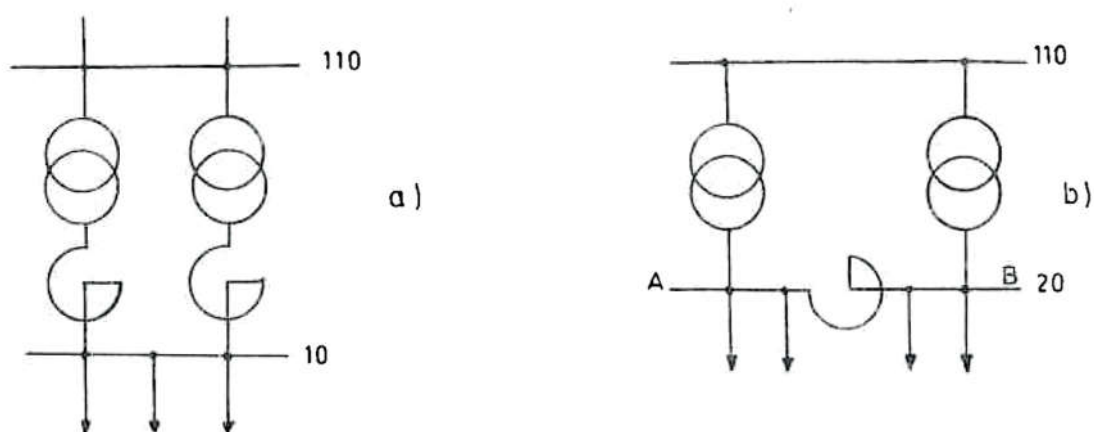
Ova mjera, makar se ona danas jedino i koristi, predstavlja u velikoj mjeri kompromisno rješenje. Povećanje reaktancije uzrokuje povećanje padova napona u mreži, pa prema tome pogoršava naponske prilike. Prenosi li se, međjutim, samo djelatna snaga, padovi napona na reaktancijama su okomiti na osnovni vektor napona, pa pad apsolutne vrijednosti napona nije velik. Takve idealne pogonske prilike u mreži ne mogu se, na žalost, postići. Osim toga, ako se povećanje reaktancije postiže sekcioniranjem mreže (biti će objašnjeno kasnije), smanjuje se i pouzdanost mreže. Povećanje reaktancije naročito se negativno odražava na stabilnost sistema, kako statičku, tako i dinamičku. Kriterij naponskih prilika i kriterij stabilnosti zahtijeva što manje reaktancije, a kriterij kratkog spoja što veće reaktancije. Prema tome, u tom pogledu treba voditi smišljenu strategiju kompromisa na temelju odgovarajućih analiza, koja će dati optimalna rješenja u tehničkom i ekonomskom pogledu.

Načelno, reaktancija mreže se može povećati na tri načina.

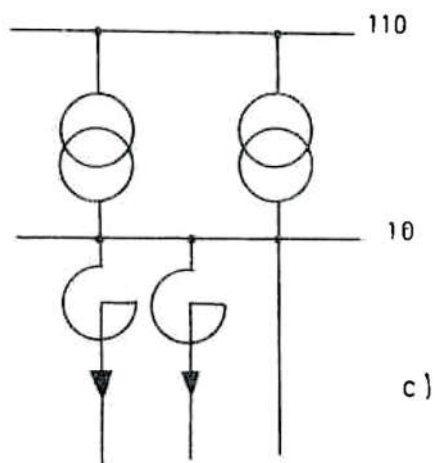
Povećanje prirodne reaktancije pojedinih elemenata mreže postiže se posebnom konstrukcijom tih elemenata. Tako je npr. tipična primjena transformatora snage, kojima je napon kratkog spoja 16% umjesto prirodnog 8...12%. Primjena vodiča u snopu kod vodova visokog napona smanjuje njihovu reaktanciju za oko 25%, pa se i ta okolnost može koristiti. Slično tome, jedan dalekovod odgovarajućeg presjeka imati će približno dvostruku reaktanciju od dva paralelna dalekovoda.

Ugradjivanje dodatnih reaktancija je mjera, koja se dosta često primjenjuje u mrežama srednjeg napona. Reaktancije se obično izvođe kao prigušnice bez željeza za zračnom izolacijom. Sl.130 pokazuje neke tipične mogućnosti ugradnje prigušnica. Na sl.130a prigušnice imaju isto djelovanje kao i povećanje napona kratkog spoja transformatora. Snaga kratkog spoja smanjena je u cijelom 10 kV razvodu, uključujući i postrojenje 10 kV. Na sl.130b prigušnica dijeli sabirnice 10 kV na dva dijela. U dijelu A i u dijelu B snaga kratkog spoja je manja, nego što bi bila bez prigušnice. Na

ovaj način se često međusobno spaja staro postrojenje s novim postrojenjem istog napona, kojim se vrši proširenje. Na sl.130c prigušnice su smještene samo u odvodima gdje je to potrebno, npr. u kabelima manjeg presjeka, koji su osjetljiviji na termičko djelovanje struje kratkog spoja.



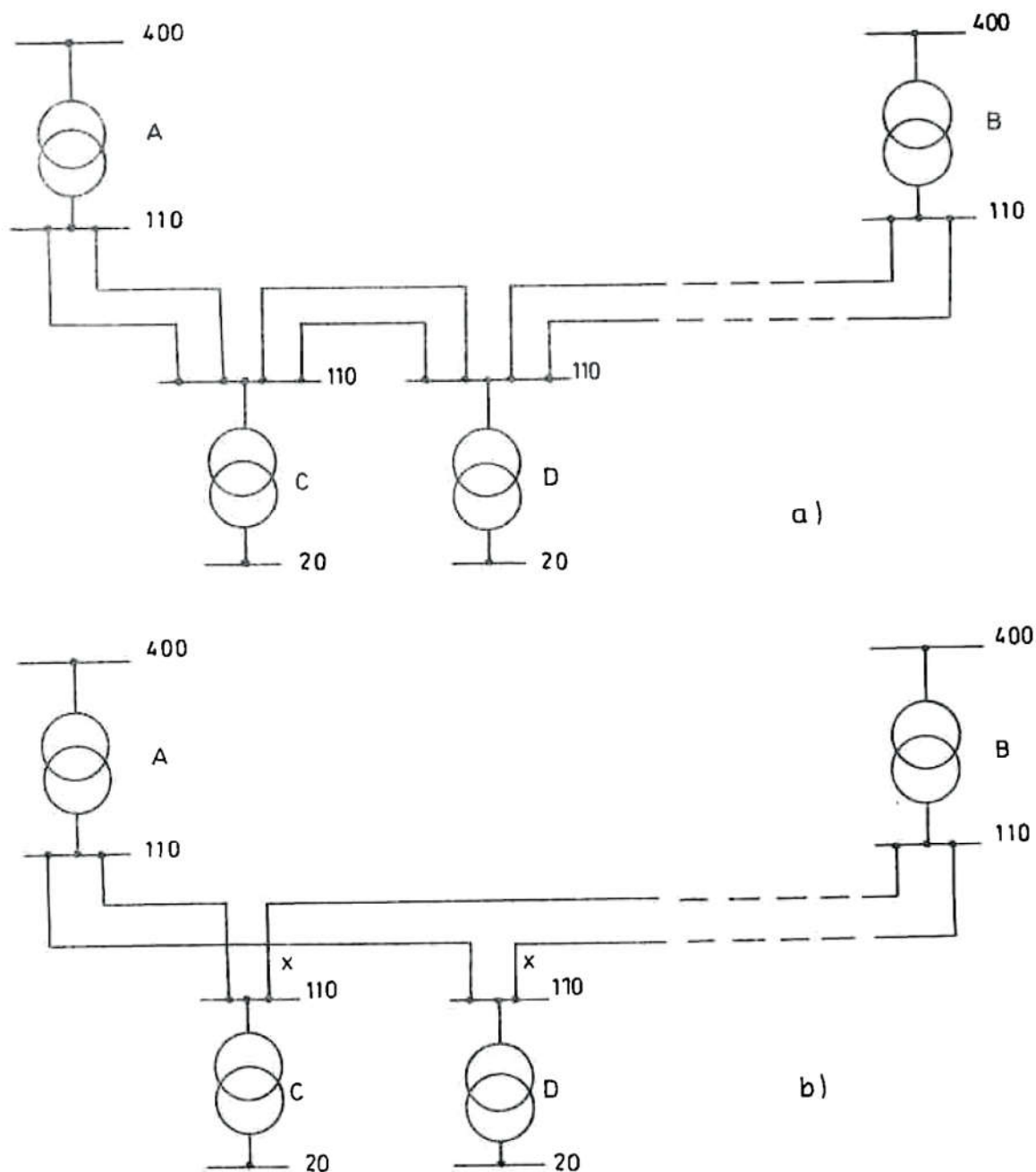
Slika 130 - Neke mogućnosti primjene prigušnica za smanjenje struje kratkog spoja



Kod ekonomske analize primjene prigušnice treba uzeti u obzir i njihove djelatne gubitke.

Promjena konfiguracije mreže se često primjenjuje u mrežama svih napona. Pri tome se potrebna promjena može postići usmjeravanjem razvoja mreže, ali se češće koriste mogućnosti odvajanja, koje pružaju rasklopna postrojenja.

Primjer usmjerenog razvoja pokazuje slika 131. Postrojenja 110/20 kV C i D, napajana dvostrukim vodom iz TS 400/110 kV A i B, imati će u alternativni a) veću, a u alternativni b) manju struju kratkog spoja. Postrojenja C i D će osim toga u alternativni b) biti manjeg obima na 110 kV strani, pa za toliko i jeftinija, ali uz nešto smanjenu pogonsku sigurnost.



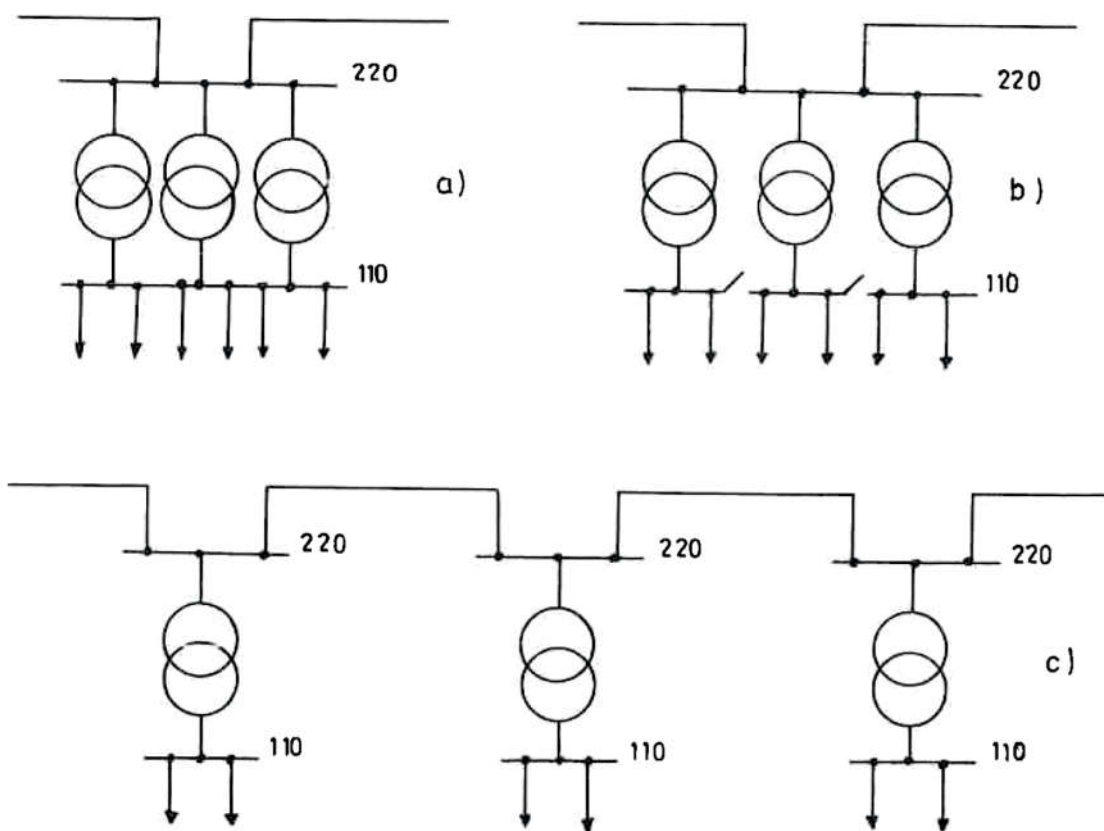
Slika 131 - Smanjenje struje kratkog spoja konfiguracijom

Ovaj primjer može poslužiti za objašnjenje još jedne činjenice, koju treba imati na umu. Sve mjere, koje se lokalno primjenjuju s ciljem da se smanji struja kratkog spoja, reflektiraju se uglavnom na dio mreže, a na ostalu mrežu malo ili nikako. Tako na sl. 131 snage kratkog spoja na 400 kV i 110 kV strani postrojenja A i B, pod uvjetom da je sve uključeno, neće ovisiti o odabranoj al-

ternativi. Nasuprot tome, na 110 kV dalekovodu od A preko C, D i ostalih čvorova u istom nizu do B, u postrojenjima 110/20 kV C, D i ostalim u istom nizu, te pripadnim 20 kV mrežama, struja kratkog spoja će u alternativu b) biti smanjena.

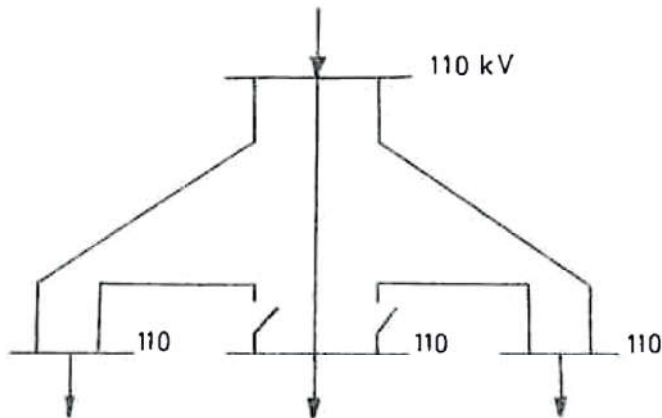
Smišljenim otvaranjem određenih spojnih mjesta u zamkastim i prstenastim mrežama, te priključivanjem pojedinih odvođa na pojedine dijelove sabirnica umjesto na jedinstvene sabirnice, pružaju se široke mogućnosti za povećanje reaktancije mreže i time za smanjenje struje kratkog spoja.

Na sl.132 prikazan je slučaj diobe sabirnica. Prijelaz sa pogonskog stanja a) na pogonsko stanje b) dovodi do drastičnog smanjenja struja kratkog spoja na 110 kV strani. U slučaju potrebe (kvar jednog od transformatora) mogu se pojedini odsječci sabirnica međusobno spojiti na način, da ne dodje do porasta struje kratkog spoja.



Slika 132 - Smanjenje struje kratkog spoja konfiguracijom

U varijanti a) ispad jednog od transformatora ne reflektira se na potrošače, jer će preostala dva transformatora preuzeti ukupno opterećenje. Varijanta b) je pogonski manje sigurna, jer će ispad jednog transformatora ostaviti dva odvoda bez napajanja, barem privremeno. Ovaj nedostatak se u ovom i sličnim slučajevima može u velikoj mjeri otkloniti primjenom odgovarajuće lokalne automatike, koja će u kratkom vremenu (nekoliko sekundi do najviše nekoliko minuta) uspostaviti novo pogonsko stanje uključivanjem odgovarajućeg uzdužnog prekidača na sabirnicama, spojnog polja ili rezervnog transformatora.

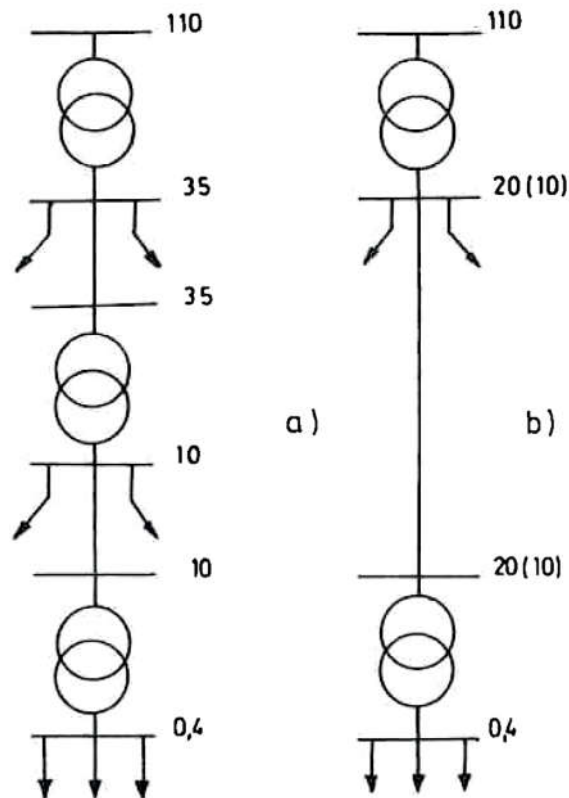


Slika 133 - Smanjenje struja kratkog spoja otvaranjem zamke

Na sl.133 prikazan je slučaj otvaranja zamke u 110 kV mreži uz smanjenje pogonske sigurnosti, a s ciljem da se smanje struje kratkog spoja.

Kao mjera za supstituciju smanjene pogonske sigurnosti uslijed odvajanja (sl.132b i sl.133), spomenuta je automatika, koja isključeni dio mreže priključuje na alternativni izvor napajanja. Postoji i suprotna filozofija, po kojoj se odvojna mjesta normalno drže uključena, dakle mreža radi s maksimalnom pogonskom sigurnošću, ali se na tim mjestima postave ultrabrz prekidači, koji u slučaju pojave kratkog spoja dovedu mrežu u "oslabljeno stanje". Tako se umanjuju termička naprezanja u blizini kvara sve do prorade selektivne zaštite. Primjena ove mjere dolazi u obzir tek na temelju detaljnih razmatranja pozitivnih i negativnih posljedica.

Alternativa c) je po strujama kratkog spoja na 110 kV strani praktički identična s alternativom b), ali su pojedine trećine postrojenja još i geografski dislocirane. U tom slučaju treba naročito povesti računa o nastalom smanjenju sigurnosti pogona.



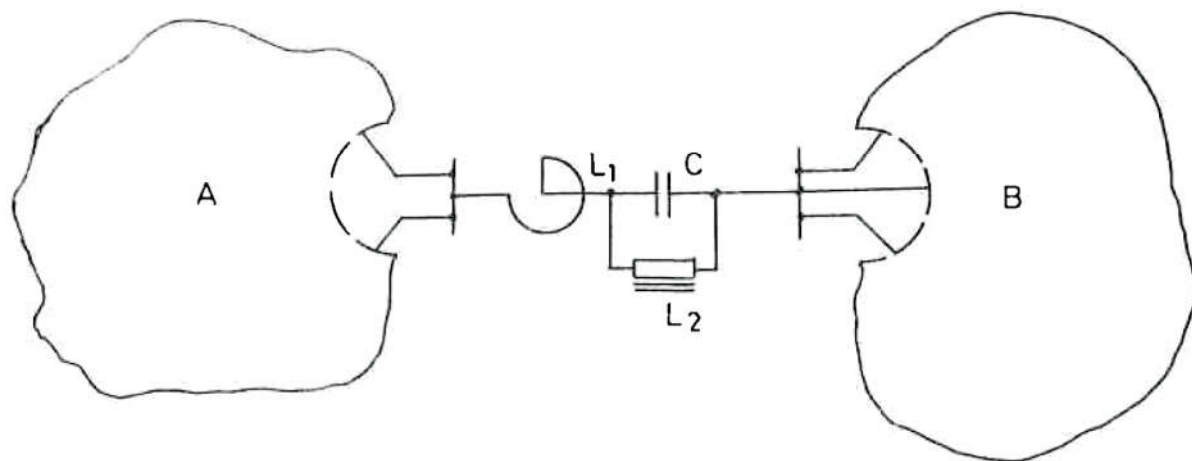
Slika 134 - Sistem sa 4 (a) i 3 (b) naponska
nivoa između 110 i 0,4 kV

Na ovom mjestu treba napomenuti, da će problem struje kratkog spoja u mrežama sa tri naponska nivoa (sl.134b) biti jače izražen nego u mrežama sa četiri nivoa (sl.134a). Isto vrijedi i za alternativu 400/220/110 kV i 400/110 kV.

3.1.2.2 Posebne mjere za smanjenje struja kratkog spoja

Kao što je već spomenuto, ove mjere imaju, uglavnom zbog visoke cijene ili zbog još nekih neriješenih detalja, za sada samo teoretski značaj. Primjena im je predviđena kod povezivanja dvaju velikih mreža visokog napona, a s ciljem da to spajanje ne izazove povećanje struja kratkog spoja u tim mrežama.

Rezonantno spajanje mreža po sistemu Kalkner-a prikazano je na sl. 135. Linearni induktivitet L_1 i kapacitet C su kod pogonske frekvencije u serijskoj rezonanciji, tako da im je rezultirajuća reaktancija jednaka nuli. Paralelno kapacitetu C priključena je prigušnica sa željezom L_2 . Kod padova napona, koji na C nastaju uslijed prolaza normalnih pogonskih struja, reaktancija prigušnice L_2 je praktički beskonačno velika i ne remeti serijsku rezonanciju sklopa L_1 - C . Kod pojave struje kratkog spoja kroz sklop poraste pad napona na C , a time i na L_2 , koja dolazi u područje zasićenja. Reaktancija zasićene prigušnice L_2 pada na beznačajnu vrijednost, a time je kondenzator C praktički kratko spojen (premošten). U spoju među mrežama A i B ostaje jedino djelotvorna prigušnica L_1 . Ona sada svojom reaktancijom djeluje prigušujuće na struje kratkog spoja. Kod nestanka kratkog spoja, režim rada se spontano vraća na prvobitno rezonantno stanje.

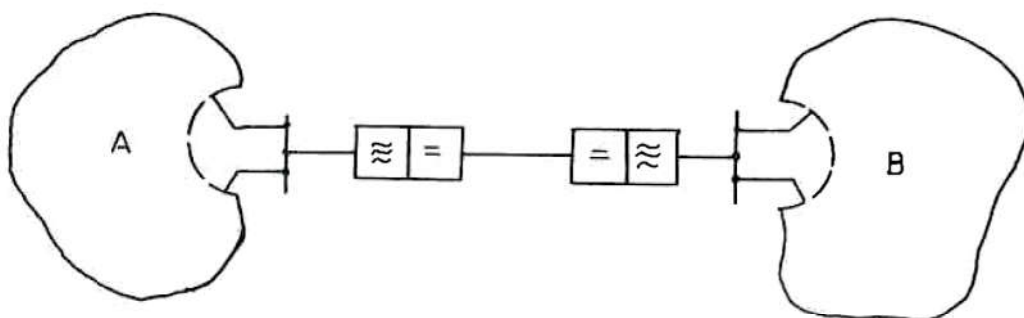


Slika 135 - Rezonantno spajanje velikih mreža po Kalkner-u

Supravodljivi spoj po Claudy-ju za međusobno spajanje visokonaponskih mreža koristi činjenicu, da supravodljivi vodiči, u području (uslijed struja kratkog spoja) povećanog magnetskog polja, gube svojstvo supravodljivosti i otpor im se trenutno povećava.

Spoj putem visokonaponskog istosmjernog prijenosnog sistema (sl.136) odvaja, što se tiče međusobnog utjecaja na struje kratkog spoja, mreže A i B u potpunosti. To se lako može objasniti,

ako se ima na umu, prvo, da je struja kratkog spoja reaktivna i, drugo, da se istosmjernim prijenosnim sistemom može prenositi samo aktivna snaga.



Slika 136 - Dvije mreže spojene istosmjernim prijenosnim sistemom visokog napona

Istosmjerni sistem predstavlja, dakle, nepremostivu zapreku za reaktivnu snagu, niti takvu snagu može generirati. Cijena istosmjernog prijenosnog sistema, zbog potrebnih usmjerivačkih uređaja (konvertora) je takva, da se nikada neće upotrijebiti samo kao sredstvo za smanjenje struja kratkog spoja, ako ne postoje i drugi valjani razlozi za primjenu takvog sistema.

Na ovom mjestu ćemo spomenuti još jedan uređaj, koji doduše ne smanjuje struje kratkog spoja, ali u velikoj mjeri umanjuje razorno djelovanje električnog luka na mjestu kvara. To je brzi kratkospojni uređaj, koji se primjenjuje uglavnom u mrežama srednjeg napona. On u momentu pojave kratkog spoja, u vremenu od nekoliko milisekunda, kratko spaja sve tri faze solidnim galvanskim spojem bez prijelaznog otpora. To izaziva potpuni slom napona na tom mjestu i njegovoj okolini, kao i na svim radijalnim odvodima, koji se iz te točke napajaju. Električni luk se gasi, a time prestaje i njegovo razorno djelovanje. Mjesto kratkog spoja premješteno je sada u kratkospojni uređaj, koji je tako termički dimenzioniran, da može bez štete izdržati struju kratkog spoja. Sistem zaštite isključiti će mjesto kratkog spoja u programiranom vremenu. Naročito brzo djelovanje kratkospojnog uređaja se postiže, ako ga se učini osjetljivim (gdje je to moguće) na svjetlosnu pojavu elek-

tričnog luka, pri čemu treba cijeli sistem učiniti neosjetljivim na druge (normalne) svjetlosne pojave.

3.1.2.3 Smanjene nulte komponente struje kratkog spoja

Neke negativne posljedice kratkog spoja nastaju gotovo isključivo djelovanjem nulte komponente struje kratkog spoja (induciranje napona u drugim sistemima, napon koraka i dodira). One se kod kruto uzemljenih mreža javljaju, kada je u strujni krug uključena i zemlja. Promatrano na modelu, u strujni krug je kod takvih pojava uključena i nulta ekvivalentna shema mreže, odnosno nulta reaktancija. Za povećanje nulte reaktancije, s ciljem da se smanje nulte komponente struje kratkog spoja, mogu se i moraju primijeniti drugačije mjere, nego što je to opisano u 3.1.2.1, gdje se je utjecalo na direktnu i inverznu reaktanciju. Ipak ne treba zaboraviti, da se povećanje direktne i inverzne reaktancije ipak odražuje na smanjenje nulte komponente struje kratkog spoja.

Nulta reaktancija u velikoj mjeri ovisi o broju i lokaciji kruto uzemljenih zvjezdišta transformatora. Smanjenjem tog broja smanjuje se i nulta komponenta struje kratkog spoja. Smanjivanje broja uzemljenih zvjezdišta dovodi najprije do gubitka efektivnosti krutog uzemljenja, a zatim i do potpune izoliranosti zvjezdišta. No i tu treba tražiti kompromis. Zvjezdište mreže se uzemljuje iz drugih razloga, kao što su smanjenje unutarnjih i atmosferskih prenapona i osiguranje selektivnog rada zaštite kod jednopolnih kvarova. Potrebno je naći takav broj i raspored uzemljenih zvjezdišta, kod kojeg će nulta komponenta struje kratkog spoja biti najmanja, a mreža još uvijek efektivno uzemljena. U razvoju su algoritmi, kojima je cilj, da pomoću računala, na temelju zadanih kriterija, odrede optimalno rješenje.

Isključivanjem pojedinih transformatora iz pogona, bilo ručno, bilo djelovanjem zaštite, postoji rizik da pojedini dijelovi inače efektivno uzemljene mreže ostanu izolirani. U tom slučaju treba uzemljiti zvjezdište nekog drugog, do tada neuzemljenog transformatora. U nekim dobro koncipiranim i uredno vodjenim mrežama ovaj zahvat se odvija automatski, primjenom prikladnih, vrlo brzih ure-

djaja. Kriterij za prorađu ovih automata ovisi o položaju u mreži, a može biti na temelju uklopnog stanja i primljenog impulsa za isključenje ili pak na temelju mjerenjem uočenog nastanka jednog polnog kratkog spoja u bližem dijelu mreže.

U mrežama srednjeg napona već uzemljenje jednog zvjezdišta može dovesti do nedopustivo velikih nultih struja. U tom slučaju se zvjezdište transformatora uzemljuje preko induktivnog ili djelatnog otpora određene vrijednosti, koju treba proračunati.

3.1.3 Utjecaj struja kratkog spoja visokonaponskih vodova na vodove telekomunikacija

Gustoća nadzemnih električnih mreža za prijenos električne energije i isto tako gustoća mreža telekomunikacija dovodi često do toga da se ove mreže nalaze na malim međusobnim udaljenostima. Najgori su slučajevi križanja pod malim kutem ili paralelne bliske trase. Problemi su nekad vrlo neugodni, podliježu strogim propisima i zahtijevaju kod izgradnje dalekovoda dodatna ulaganja.

Problem utjecaja elektrostatske i elektromagnetske indukcije može se promatrati odvojeno. Ovdje će se promatrati samo utjecaj elektromagnetske indukcije, odnosno promatrat će se samo opasnost na tt-liniji od napona e , koji je induciran od struja kratkog spoja u v. n. mreži. Visina napona e određena je propisima.

Induciranu EMS računamo po dionicama prema relaciji:

$$e = 2 \pi f k M l I 10^{-6} \quad |V| \quad 3-7$$

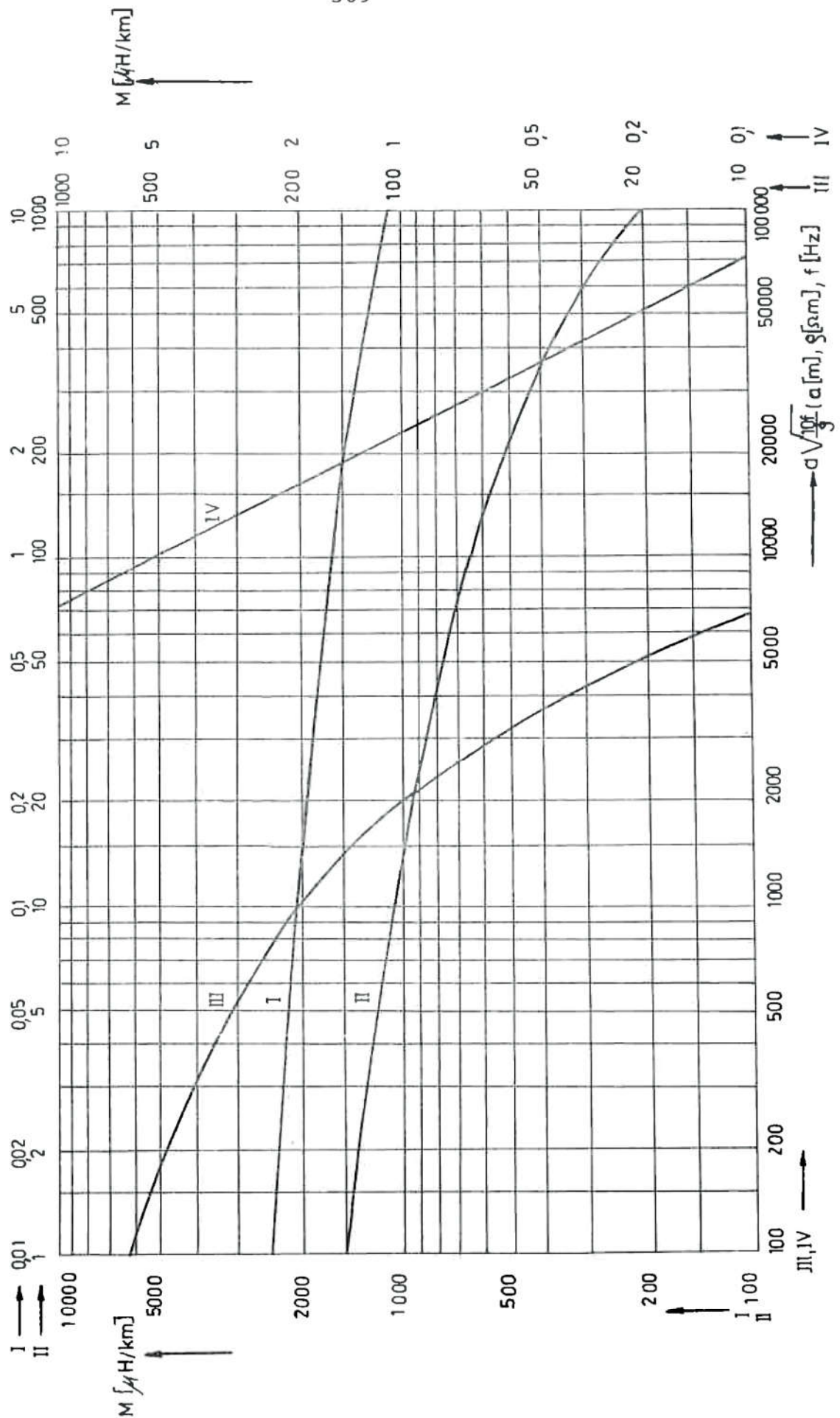
f [Hz] - frekvencija struje v. n. voda

k - redukcionni faktor

M [$\mu H/km$] - koeficijent medjuindukcije

l - dužina približavanja dionice

I [A] - trostruka nulta komponenta struje u vodu visokog napona



Slika 137 - Dijagram za očitavanje medjuinduktiviteta M

Koeficijent M ovisi o razmaku između visokonaponske i tt-linije, specifičnom otporu zemlje i frekvenciji.

Na slici 137 pokazan je dijagram za određivanje koeficijenta M. Dijagram na slici 137 radjen je na bazi Carsonovih formula. Izbjeci ćemo pogreške lošeg očitavanja, ako koristimo izraz:

$$M = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{658}{a} \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad |H/m| \quad 3-8$$

Ukoliko trase nisu paralelne, potrebno je računati sa srednjim geometrijskim razmakom

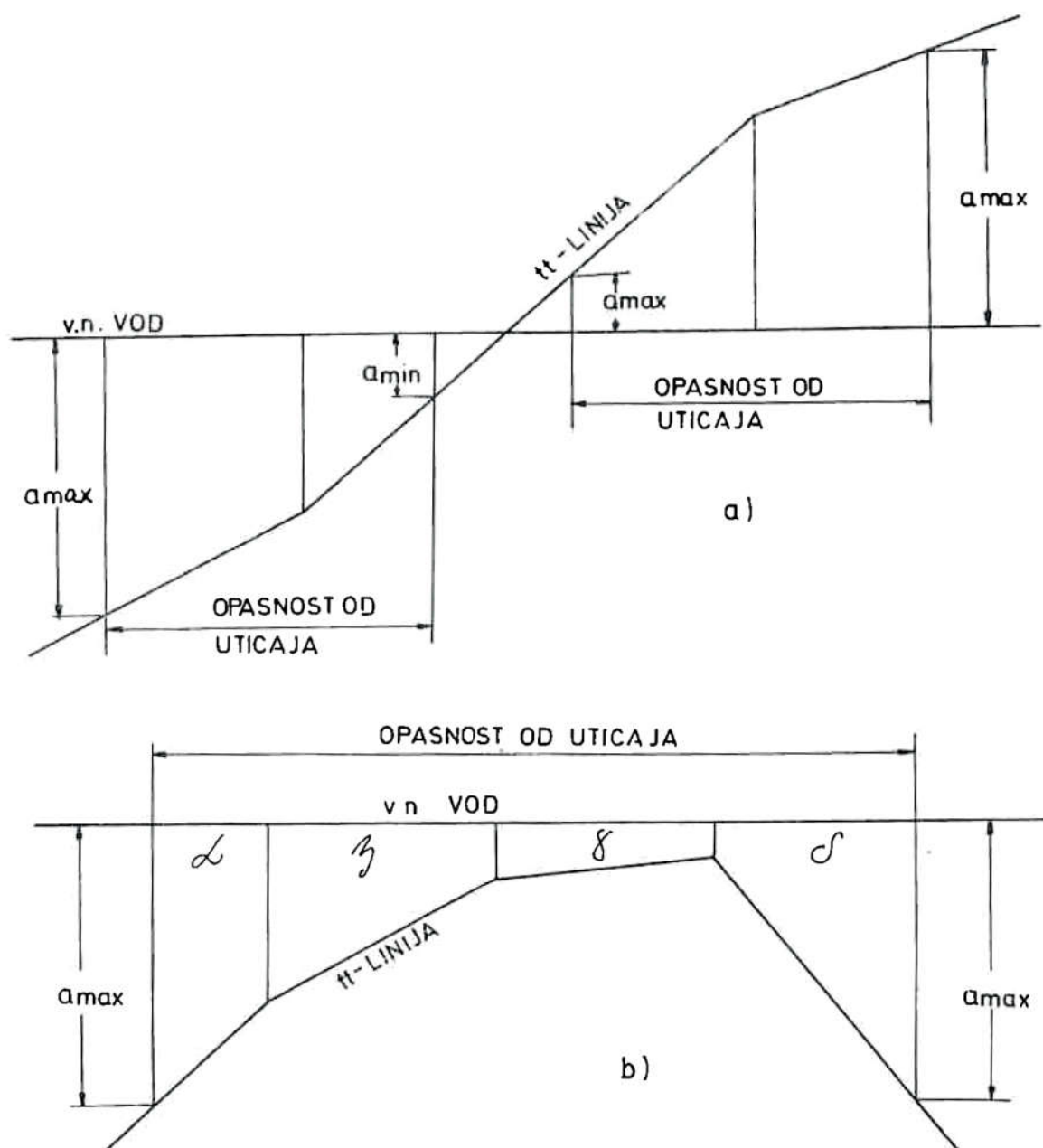
$$a = \sqrt{a_1 a_2} \quad |m| \quad 3-9$$

gdje su a_1 i a_2 razmaci na krajevima ravne dionice približavanja. Utjecaj se ne proračunava ako je razmak među trasama veći od $a_{\max}$ (npr. 1000 m), a kod križanja se ne proračunava za pojas unutar kojeg je razmak među trasama manji od $a_{\min}$ (npr. 10 m). Razmaci $a_{\max}$ i $a_{\min}$ određeni su odgovarajućim propisima.

Na slici 138a i b pokazana su dva slučaja približavanja tt-linije visokonaponskom vodu. Kod izlomljene trase bilo voda visokog napona bilo tt linije, kao što je to npr. slučaj na sl.138b unutar pojasa približavanja na $a \leq a_{\max}$, inducirani napon se računa za svaku ravnu dionicu $\alpha, \beta, \dots$ posebno, pa se tako dobiveni parcijalni naponi zbroje:

$$e = e_{\alpha} + e_{\beta} + \dots \quad 3-10$$

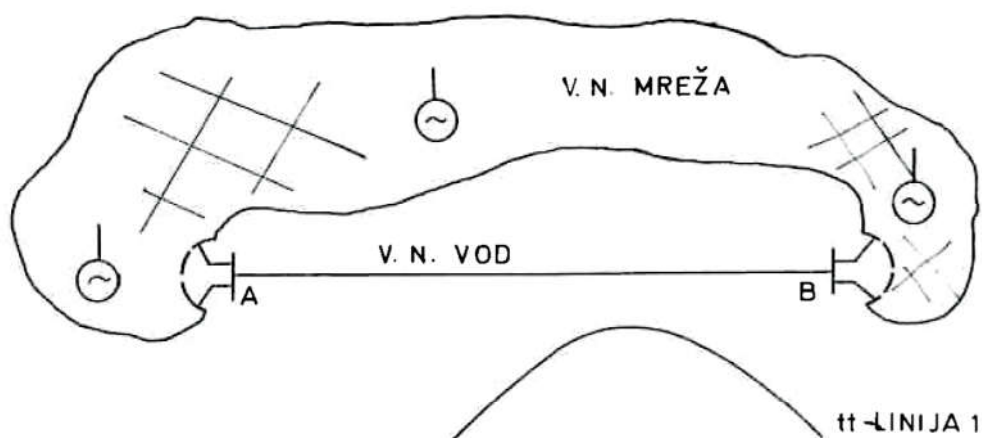
Redukcioni faktor k uzima u obzir kompenzaciono djelovanje svih vodljivih tijela spojenih sa zemljom u blizini visokonaponske i tt-linije i jednak je umnošku parcijalnih faktora, koji se primjenjuju posebno kod postojanja zaštitnog užeta (utječu i karakteristike zaštitnog užeta) na dalekovodu, posebno kod postojanja kabela s uzemljenim omotačem u blizini, pa zatim tračnica, cjevovoda i slično. Ti su faktori definirani odgovarajućim tehničkim propisima ili preporukama.



Slika 138 - Položaji tt-linije prema visokonaponskom vodu, za koje je potrebno računati utjecaj

Napon e inducira trostruka nulta komponenta struje kratkog spoja, koja teče kroz vod. Nulta komponenta struje pojavljuje se kod jednopolnog kratkog spoja ili dvostrukog kratkog spoja sa spojem sa zemljom. Moramo odrediti kada je ova struja najveća, jer je onda i inducirani napon e najveći.

U mreži između čvorova A i B (sl.139) nalazi se vod, kojemu je trasa preblizu trasi tt-linije. Najveće struje kratkog spoja u

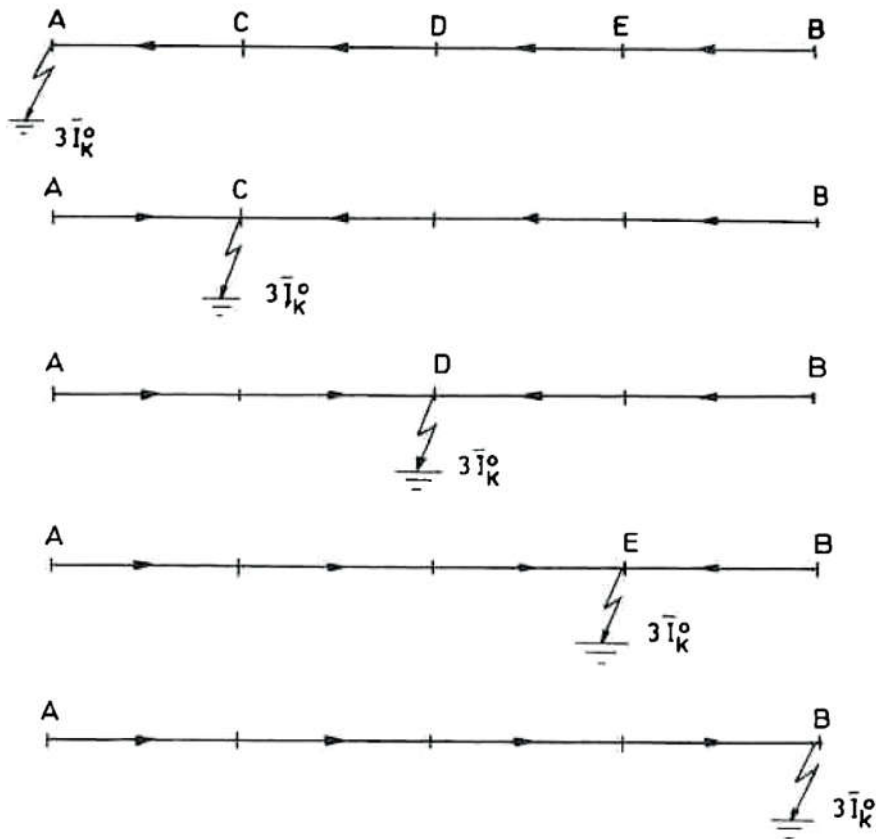


Slika 139 - Položaj v. n. voda i tt-linije u mreži

granama vezanim za neki čvor biti će upravo tada, kada je kratki spoj u tom čvoru. To znači da će najveće struje kratkog spoja teći kroz vod, kada je kratki spoj negdje na tom vodu.

Stanje na vodu, kod kratkog spoja na vodu, pokazano je na sl.140. Promatramo raspodjelu struje $3\bar{I}_k^0$ za razna mjesta nastanka jed-nopolnog kratkog spoja na vodu A-B na sl.139. Za sada ćemo pretpostaviti, da raspodjela nulte komponente struje u ostaloj mreži nema utjecaja na promatranu tt-liniju.

Na slici 140 kratki spoj je nastao redom u A, C, D, E i B. Strelice označuju struju kroz dionice. Razlikujemo struje, koje u točke A, C, D, E i B dolaze s lijeva i one koje dolaze s desna. Dobit ćemo krivulje a i b. Ove krivulje izgledaju kao na slici 141a, b ili c. Račun daje struje za krajnje čvorove voda i za odabrani broj točaka na vodu, pa su krivulje a i b definirane upravo s toliko točaka (u slučaju sa sl.140 to je 5 točaka). Kompletne krivulje se dobivaju interpolacijom koristeći izračunate točke.



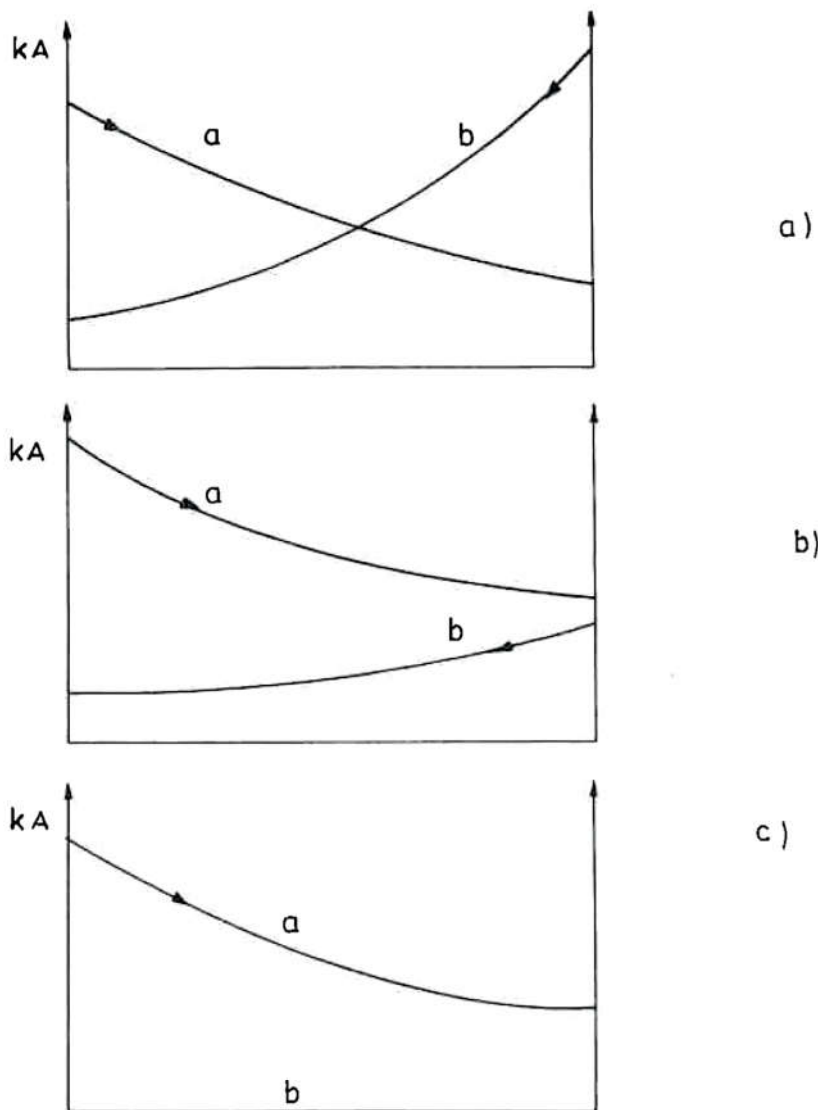
Slika 140 - Raspodjela struje $3 \bar{I}_k^0$ na vođu A - B

Ukupna struja $3 \bar{I}_k^0$ je zbroj struja a i b.

$$3 \bar{I}_k^0 = 3 \bar{I}_{k+}^0 + 3 \bar{I}_{k-}^0 = a + b \quad 3-11$$

Izgled dijagrama na sl.141 ovisi o položaju voda u mreži i o samoj mreži. Pri tome veliku ulogu igra topologija nultog sistema komponenata mreže. Može se reći, da će vod visokog napona u ja-koj mreži prema slici 139 sa efektivno uzemljenim čvorovima A i B imati dijagram, u kojem će se krivulje a i b sjeći kao na slici 141a. Ovakav dijagram smatra se normalnim. U specijal-

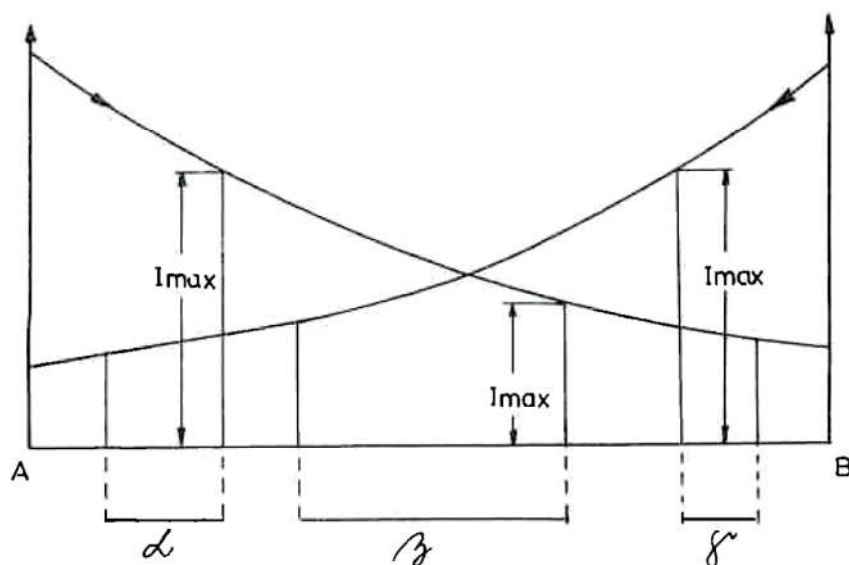
nim slučajevima krivulje se mogu sjeći izvan voda kao na slici 141b ili jedna krivulja može pasti u os abscisa kao na slici 141c.



Slika 141 - Raspodjela struje $3 \bar{I}_k^0$ kod jednopolnog kratkog spoja ili dvopolnog kratkog spoja sa spojem sa zemljom na vodu A - B

Zona približavanja može biti za cijelu dužinu voda od A do B ili samo za neki dio voda. Ono što je rečeno za cijeli vod vrijedi općenito i za zonu približavanja. To znači, da nam je za račun

utjecaja potreban samo dio dijagrama sa sl.141 i to upravo onaj dio, koji se odnosi na dio trase kojemu se približava tt-linija. Kada je kratki spoj unutar zone približavanja, napon e je jednak razlici induciranih napona od struja $3 \bar{I}_{k+}^0$ i $3 \bar{I}_{k-}^0$. Zato se najveći inducirani napon e pojavljuje, kada je kratki spoj na jednom od krajeva zone približavanja. Mjerodavnu struju za računanje napona e očitavamo iz dijagrama sa sl.141. Ovo je pokazano na dijagramu sa sl.142.



Slika 142 - Odredjivanje maksimalne struje kroz vod

Mogu nastupiti 3 slučaja:

- Zona približavanja α nalazi se lijevo od križanja krivulja a i b. Mjerodavna je krivulja struja $3 \bar{I}_{k+}^0$ na kraju zone približavanja prema B.
- Zona približavanja β obuhvaća križanje krivulja. Mjerodavna je jedna od struja (veća) na kraju zone približavanja i to na donjoj krivulji.
- Zona približavanja γ nalazi se desno od križanja krivulja. Mjerodavna je krivulja struja $3 \bar{I}_{k+}^0$ na kraju zone približavanja prema A.

Inducirani napon e predstavlja opasnost za uređaje i za radnike, koji rade na tt-liniji, pa je stoga i ograničen po visini. Trajanje inducirano napona ovisi o vremenu u kojem se kratki spoj isključuje, tj. o brzini rada zaštite i prekidača. Ako se mogu garantirati vremena isključenja ispod neke određene vrijednosti, propisi dozvoljavaju nešto veće inducirane napone e .

Ako račun utjecaja pokaže da se javlja veći inducirani napon na tt-liniji od dozvoljenog, treba poduzeti mjere kojima se utjecaj svodi u dozvoljene granice. Mogu se primijeniti različite mjere, pojedinačno ili kombinirano. To su:

- Smanjenje nulte komponente struje kratkog spoja, kako je opisano u 3.1.2.3.
- Izbor povoljnije trase visokonaponskog voda, ako je ovaj tek u fazi projektiranja.
- Primjena zaštitnog užeta od dobro vodljivog vodiča na visokonaponskom vođu.
- Izmještanje trase tt-linije izvan zone opasnog utjecaja.
- Zamjena zračne tt-linije kabelskom.
- Zamjena tt-linije radio-vezom.
- Primjena specijalnih zaštitnih uređaja na tt-liniji (transformatori za galvansko odvajanje, odvodnici prenapona).

Od navedenih mogućih mjera se najprije eliminiraju one koje se u konkretnom slučaju ne mogu primijeniti, a između preostalih se odabiru one, koje izazivaju najmanje troškove. Za odabrane mjere se mora ishoditi suglasnost vlasnika tt-linije.

Račun utjecaja se često provjerava mjerenjem.

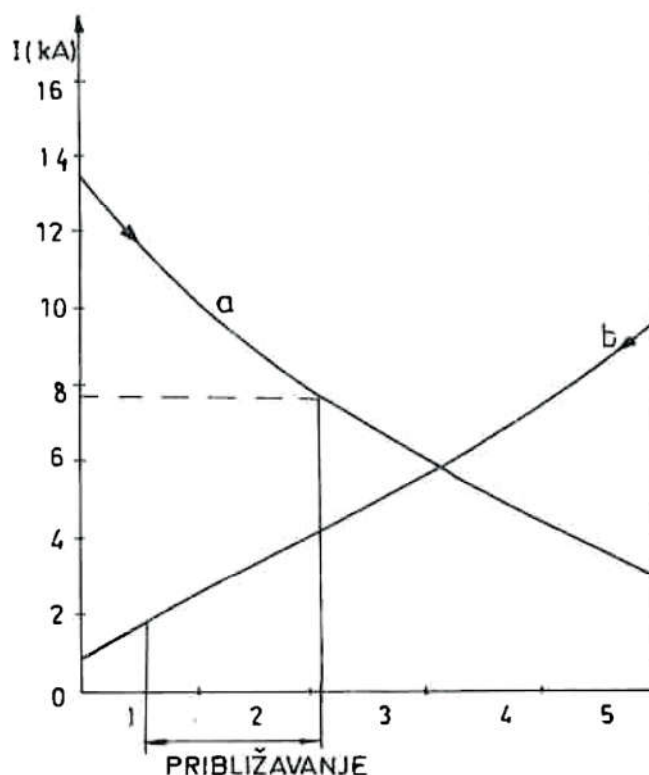
Osim inducirano napona uslijed nulte komponente struje kratkog spoja može doći još i do induktivnog utjecaja uslijed nesimetrije opterećenja ili nesimetrije parametara mreže u normalnom pogonu, te uslijed prekida vodiča. Također je moguć kapacitivni utjecaj i visokofrekventne smetnje uslijed korone i tinjavog izbijanja. Intenzitet spomenutih utjecaja je neusporedivo manji od utjecaja kod kratkog spoja, pa ne predstavljaju opasnost po život,

ali zbog mogućeg dužeg trajanja ove smetnje mogu ometati normalno funkcioniranje tt-linije (brujanje, šum).

Primjer 3.2 Na slici 144 nacrtano je križanje visokonaponskog voda i telefonske linije. Potrebno je odrediti inducirani napon na tt-liniji, ako je na visokonaponskom vođu došlo do jednopolnog kratkog spoja.

Ovdje će biti opisan postupak i priloženi rezultati.

Visokonaponski vođ podijeljen je na 5 dionica. Računat je jednopolni kratki spoj u čvorovima A, C, D, E, F i B i raspodjela struje $3 \bar{I}_k^0$ na struje $3 \bar{I}_{k+}^0$ i $3 \bar{I}_{k-}^0$. Pomoću dobivenih podataka nacrtane su krivulje a i b na slici 143.



Slika 143 - Krivulje raspodjele trostruke nulte komponente struje kod jednopolnog kratkog spoja na zadanom visokonaponskom vođu.

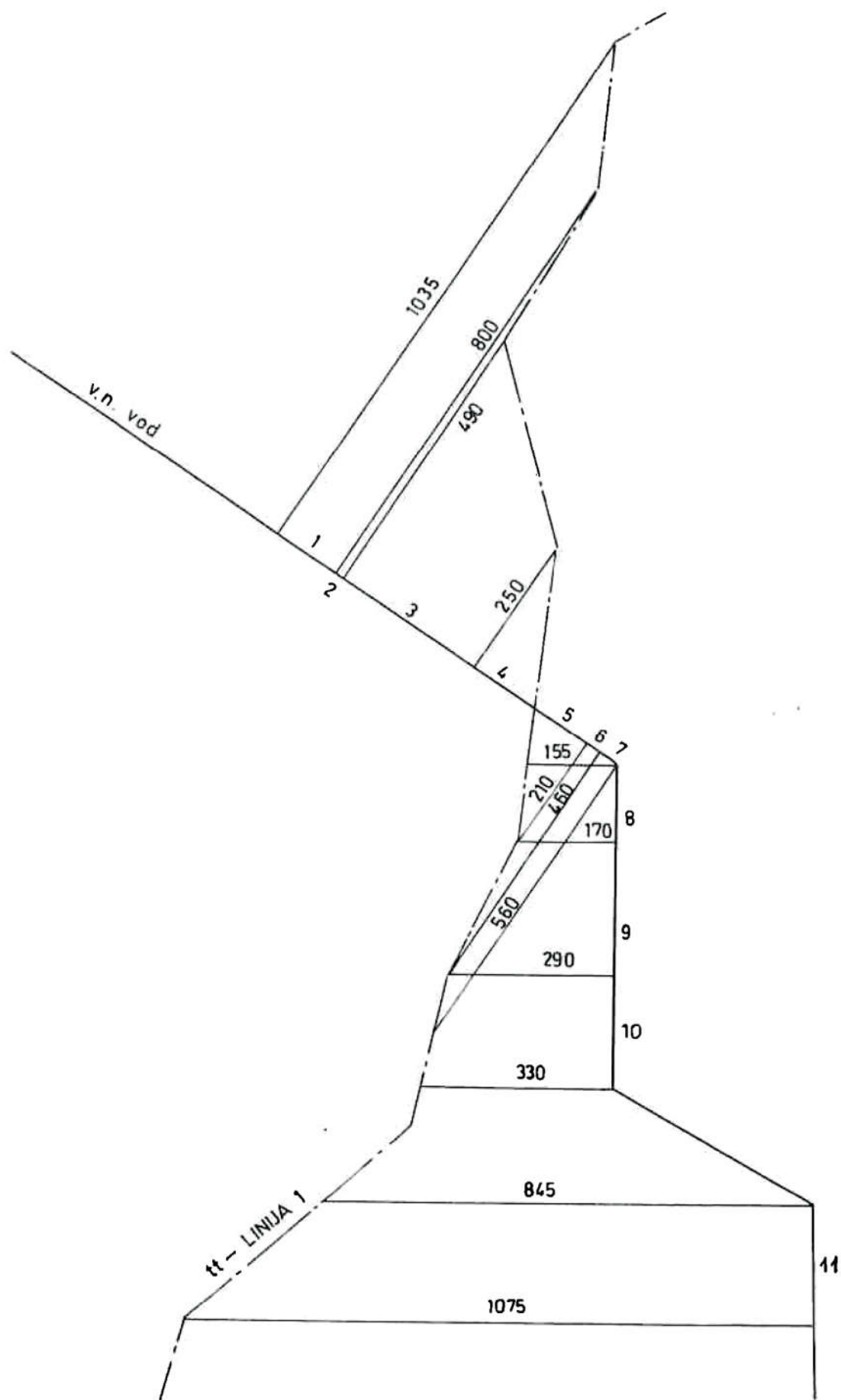
Zatim je visokonaponski vod podijeljen na dionice, kako je to pokazano na sl.144. Iz poznate duljine voda i poznate udaljenosti početka i kraja zone približavanja očitana je najveća struja kroz vod. Ova struja iznosi 7,8 kA.

Slijedi računanje tablice 6. U rubrici 2 unesen je srednji razmak dionica, a u 3 dužina dionica. U dijagramu na slici 137 očitana je koeficijent M za svaku dionicu.

Tablica 6

Br. dionice	a m	ℓ km	M μH/km	b mΩ	e = bI V
1	2	3	4	5	6
1	909,95	0,120	175	3,96	30,888
2	626,1	0,015	230	0,65	5,070
3	350,0	0,270	330	16,79	130,962
4	59,0	0,120	725	16,39	127,842
5	45,83	0,100	710	13,38	104,364
6	310,81	0,030	380	2,15	16,770
7	507,54	0,037	210	1,46	11,388
8	162,33	0,135	500	12,72	99,216
9	222,04	0,230	420	18,20	141,960
10	309,35	0,190	380	13,60	106,080
11	953,09	0,210	200	7,91	61,698
Σ					836,238

Zbroj induciranih napona svih dionica daje ukupni inducirani napon e na telefonskoj liniji. Ovaj napon iznosi 836,238 V. Inducirani napon veći je od dozvoljenog, pa je potrebno poduzeti mjere za smanjenje ovog napona.



Slika 144 - Zadano križanje visokonaponskog voda sa telefonskom linijom

3.1.4 Račun kratkog spoja

Proračune koji dovode do električnih veličina u mreži za vrijeme trajanja kratkog spoja zovemo ukratko račun kratkog spoja.

Po genezi, odnosno po broju pogodjenih faza, razlikujemo slijedeće vrste kratkog spoja:

- a) K3 - trolepolni kratki spoj, kada dolazi do međusobnog spoja svih triju faza. U simetričnoj mreži ne igra nikakvu ulogu, da li je pri tome ostvaren spoj sa zemljom ili ne. K3 je u mrežama napona 110 kV i više razmjerno rijedak i obično se razvije iz jednopolnog kratkog spoja, koji nije odmah isključen.
- b) K2 - dvopolni kratki spoj, kada dolazi do međusobnog spoja dvaju faza.
- c) K2Z - dvopolni kratki spoj sa spojem sa zemljom, kada dolazi do međusobnog spoja dvaju faza i zemlje.
- d) K1 - jednopolni kratki spoj, kada dolazi do spoja jedne faze sa zemljom. Ovo je najčešći oblik kvara u mrežama napona 110 kV i više.

Prilike u mreži za vrijeme kratkog spoja nisu stacionarne, već imaju svoj vremenski tok (vidi lit. i "Mreže I" 5.3). Ako kratki spoj traje duže vrijeme, npr. nekoliko sekunda), struja kratkog spoja će se u tom vremenskom intervalu smanjivati, pa razlikujemo redom:

- a) Udarne struja kratkog spoja jednaka je početnoj struji kratkog spoja uvećanoj za vrijednost istosmjerne komponente. Ima najveću amplitudu, pa je mjerodavna za mehanička naprezanja postrojenja. Istosmjerna komponenta je najviše izražena, kada je kratki spoj nastao u blizini generatora. Izračunava se iz početne struje kratkog spoja primjenom koeficijenata.
- b) Početna (subtranzientna) struja kratkog spoja je izmjenična komponenta struje kratkog spoja u trenutku nastanka kratkog spoja. Za račun je mjerodavna početna reaktancija generatora

X_G'' i elektromotorna sila E'' definirana kao napon generatora uvećan za pad napona na početnoj reaktanciji. Početna struja kratkog spoja može biti polazni podatak za izračunavanje prijelazne, rasklopne i trajne struje kratkog spoja, te podatak za izbor prekidača.

- c) Prijelazna (tranzientna) struja kratkog spoja je niža od početne. Za račun je mjerodavna prijelazna reaktancija X_G' i elektromotorna sila E' definirana kao napon generatora uvećan za pad napona na prijelaznoj reaktanciji. Prijelazna struja kratkog spoja može biti podatak za izbor prekidača. Može se izračunati i iz početne struje kratkog spoja primjenom koeficijenata.
- d) Rasklopna struja kratkog spoja je struja kratkog spoja u trenutku isključivanja prekidača. Koristi se za izbor prekidača. Može se izračunati iz početne struje kratkog spoja primjenom koeficijenata. Često se izjednačuje s prijelaznom strujom kratkog spoja.
- e) Trajna struja kratkog spoja je manja od prijelazne. Za račun je mjerodavna sinhrona reaktancija X_G i elektromotorna sila E definirana kao napon generatora uvećan za pad napona na sinhronoj reaktanciji. Može se izračunati i iz početne struje kratkog spoja primjenom koeficijenata. Koristi se za izračunavanje zagrijavanja elemenata mreže kod pojave kratkog spoja.

Najveća razlika između početne i trajne struje kratkog spoja biti će u slučaju kratkog spoja na stezaljkama generatora, a na periferiji mreže srednjeg i niskog napona ta će razlika iščeznuti.

Iz poznate struje kratkog spoja izvodi se definiciona veličina "snaga kratkog spoja" na određenom mjestu u mreži kao

$$S_K = \sqrt{3} U_n I_K \quad 3-12$$

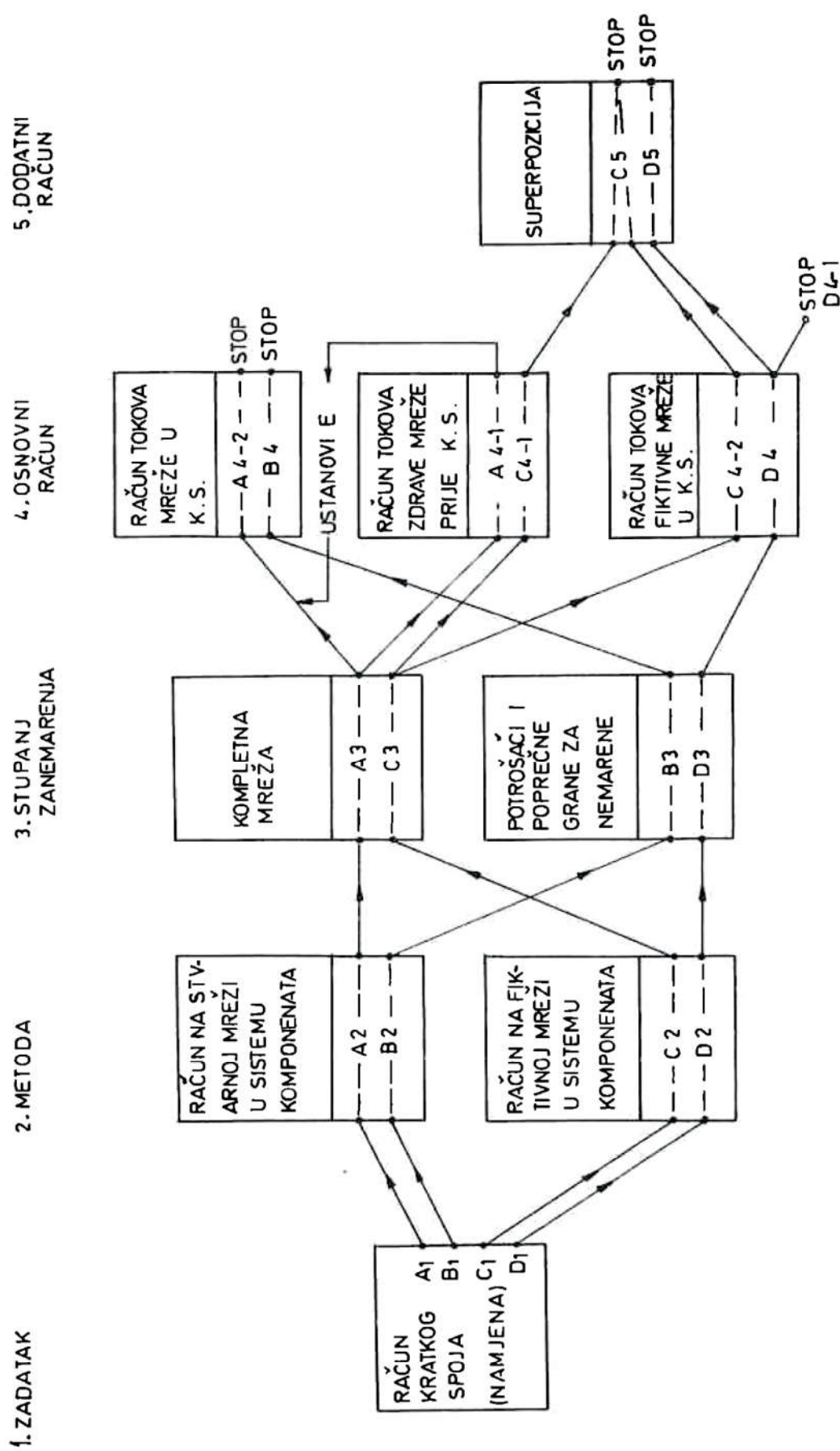
pri čemu se kod nesimetričnih kratkih spojeva uzima struja one faze, u kojoj je ona najveća.

3.1.4.1 Mogućnosti i metode računa kratkog spoja

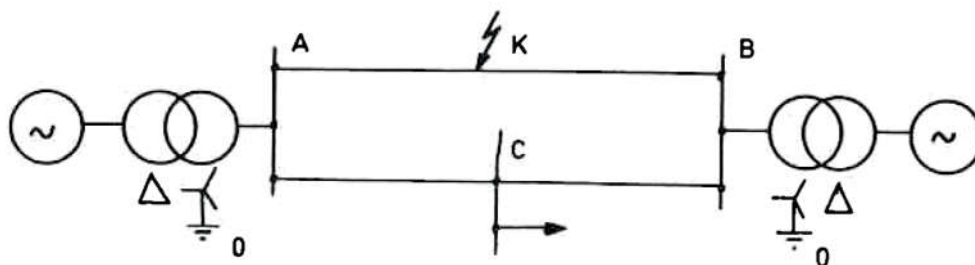
Već je početkom stoljeća utvrđeno, da se račun kratkog spoja s dovoljnom točnošću može provesti i uz znatna zanemarenja, što je dobro došlo uzevši u obzir tadašnja skromna pomoćna sredstva za računanje. Ista zanemarenja provode se u većini slučajeva i danas. Tako se zanemaruju sve poprečne grane u mreži (potrošači, te poprečne grane vodova i transformatora), a osim toga i omski otpori (u mrežama srednjeg i visokog napona) odnosno reaktancije (u mrežama niskog napona) svih grana preostalih nakon prvog zanemarenja. Zanemarivanje poprečnih grana i potrošača silno pojednostavnjuju račun, jer otpada računanje impedancija tih grana, a ukupni broj grana se smanjuje. Zanemarenje omskih otpora dodatno znatno smanjuje volumen računanja, jer otpada baratanje s kompleksnim veličinama. Kod kasnije uvedene primjene mrežnih analizatora zadržane su i dalje iste pretpostavke, pa je tako račun kratkog spoja orjentiran na istosmjerni mrežni analizator (vidi "Mreže I", 8.1). U suvremenim mrežama se povremeno javlja potreba za takvim računima kratkog spoja, gdje uobičajena zanemarenja unose odviše veliku grešku u proračun. To je naročito izraženo kod nesimetričnih kratkih spojeva, gdje se želi uzeti u račun omski otpor u zvjezdištu transformatora (vidi sl. 115b), otpor uzemljenja dalekovodnog stupa i rasklopnog postrojenja, otpor električnog luka i slično.

S druge strane, elektronička računala omogućuju da se provedu i kompliciraniji proračuni, što ranije nije bilo moguće.

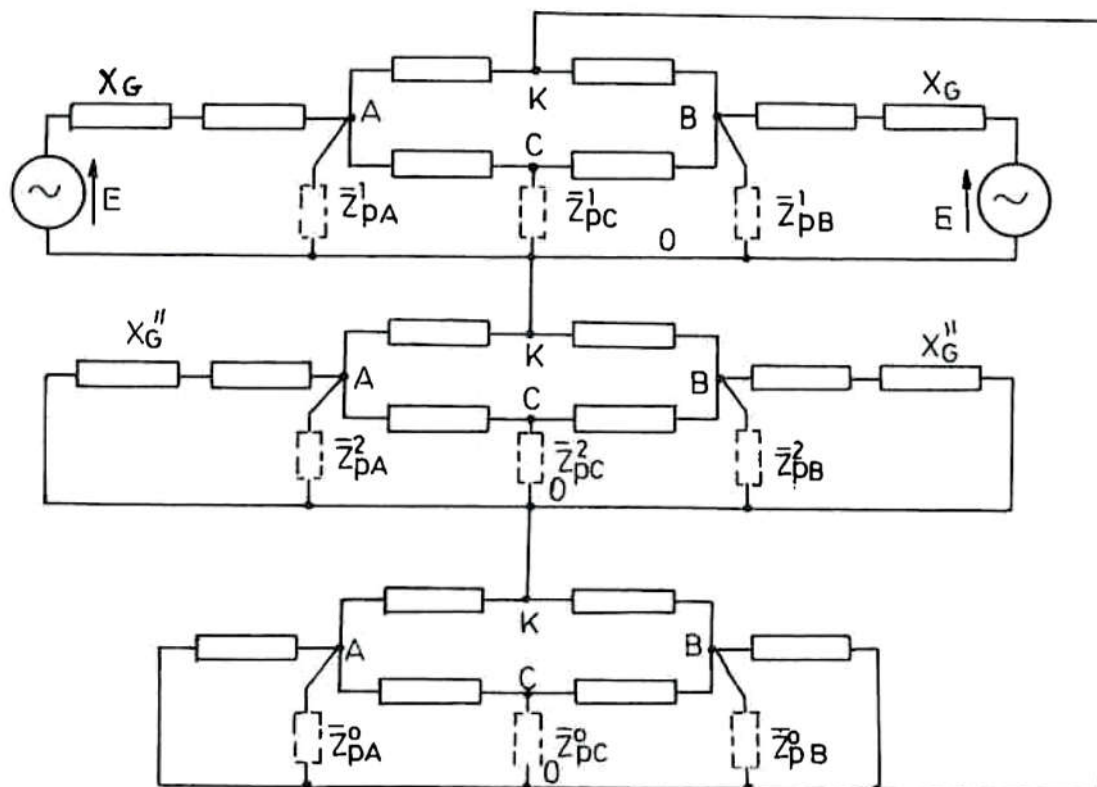
Navedeni razlozi navode na reviziju "klasične" metode računa kratkog spoja, pa će ovdje biti izložene mogućnosti, koje nam stoje na raspolaganju. Pri tome ćemo pretpostaviti da se radi o računu jednopolnog kratkog spoja, koji se uz tropolni najčešće provodi, a složeniji je od tropolnog. Osim toga, vrsta kratkog spoja utječe na pripremu podataka i ekvivalentne sheme, a ne i na izbor metode. Ovo razmatranje ćemo ilustrirati shemom na sl.145, a vršit ćemo ga na osnovu zamišljenog računa kratkog spoja za jednostavnu mrežu prikazanu na sl.146. Zvjezdišta



Slika 145 - Mogućnosti i metode računa kratkog spoja uz primjenu simetričnih komponenata



Slika 146 - Jednopolna shema promatrane jednostavne mreže



Slika 147 - Ekvivalentna shema stvarne mreže sa sl.146 u sistemu komponenata za slučaj jednopolnog kratkog spoja na mjestu K

na strani višeg napona obaju transformatora su kruto uzemljena. Jedini potrošač je priključen u čvoru C. Jednopolni kratki spoj je približno na sredini voda A-B, na mjestu K, pa to mjesto također smatramo čvorom.

Sliku 145 možemo s lijeva na desno komentirati kako slijedi:

1) Najprije treba definirati namjenu rezultata računa kratkog spoja, jer će to bitno utjecati na izbor metode. Te namjene mogu, npr., biti:

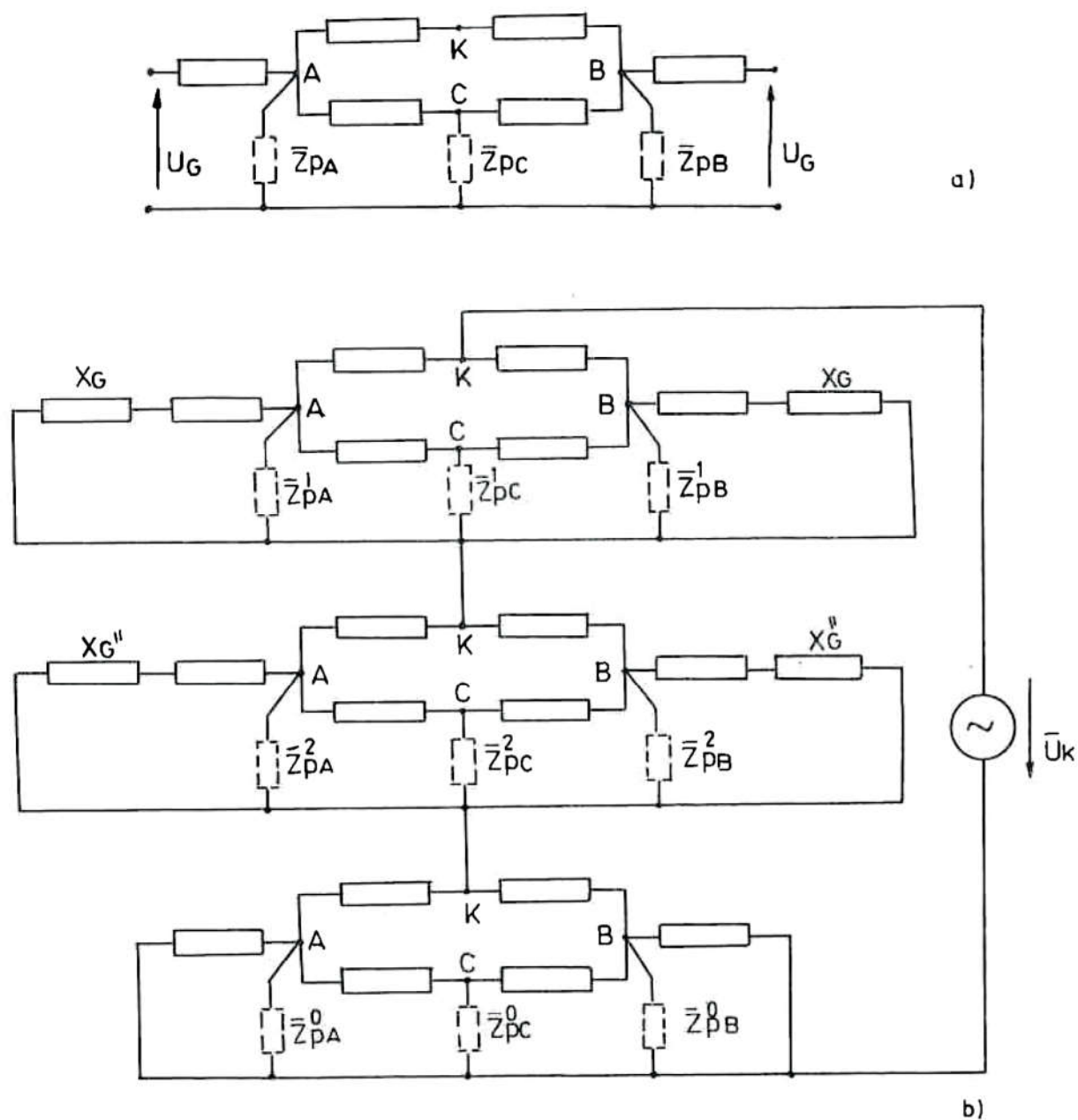
- srednjeročno planiranje razvoja mreže,
- dugoročno planiranje razvoja mreže,
- utvrđivanje parametara elemenata mreže,
- dobivanje podataka za udešenje zaštite,
- izračunavanje utjecaja na tt-linije,
- analiza rada zaštite,
- ocjena sigurnosti ljudi u blizini postrojenja, itd.

Karakteristike mreže, npr. tretman zvjezdišta, također mogu utjecati na izbor metode.

Namjena računa kratkog spoja će utjecati na izbor metode u širem smislu, ali i na vrstu i količinu potrebnih ulaznih i izlaznih podataka, što međjutim u ovom trenutku nije od značenja.

2) Na raspolaganju stoje dvije osnovne metode:

- Račun na stvarnoj mreži (u metodi komponenata, ako računamo nesimetrične kvarove). Tu metodu bi mogli nazvati "neposrednom". Na sl.147 je prikazana ekvivalentna shema stvarne mreže sa sl.146, pripremljena za račun po ovoj metodi, i to u sistemu komponenata i u spoju kakav je prikazan, jer smo pretpostavili da računamo K_1 u čvoru K. Vrijednosti X_G u direktnom sistemu uvrštavamo ovisno o tome, da li računamo početni, prijelazni ili trajni kratki spoj. Isto vrijedi i za elektromotornu silu E , ali njezina vrijednost ovisi još i o stupnju zanemarenja, pa će o tome biti riječi u slijedećoj točki 3). Rezultati dobiveni analizom ekvivalenta na sl.147 su neposredno iskoris-



Slika 148 - Ekvivalentna shema stvarne mreže prije nastanka kratkog spoja (a) i fiktivne mreže za vrijeme trajanja jednopolnog kratkog spoja u K (b)

tivi, a mogu biti kompletni u onoj mjeri, kako to zahtijeva namjena računa, s time da ih iz sistema komponenata preračunamo na trofaznu mrežu (na sl.145 linije A i B).

- Račun na fiktivnoj mreži u metodi komponenata. Ta bi se metoda mogla nazvati "posrednom", pošto iščezavaju (premošćuju se) elektromotorne sile generatora, a na mjestu kratkog spoja se pojavljuje fiktivni generator prema Theveninomom teoremu. Osim toga, na kraju se mora primijeniti još i metoda superpozicije. Odgovarajuća ekvivalentna shema prikazana je na sl.148b. O namjeni računa ovisi, da li ćemo uvrstiti X_G , X'_G ili X''_G . Ova metoda zahtijeva, kako je već spomenuto, da se rezultati analize fiktivne mreže u kratkom spoju sa sl.148b superponiraju rezultatima (strujama i naponima) koje smo imali u mreži neposredno prije nastanka kratkog spoja na temelju analize ekvivalentne simetrične mreže sa sl.148a. Neki od rezultata će se moći koristiti i neposredno, o čemu će se dati objašnjenje u toč.5). Dobiveni rezultati se na kraju iz sistema komponenata moraju preračunati na trofaznu mrežu. Linije C i D na sl.145 odgovaraju ovoj metodi.

3) Ovisno o namjeni računa kratkog spoja ovisi i stupanj zanemarenja kod računa kratkog spoja. Na sl.145 su predviđena dva slučaja: račun bez zanemarenja i račun uz zanemarenje svih poprečnih grana, uključivo potrošača.

- Ako se račun vrši bez ikakvih zanemarenja, imat ćemo u ekvivalentnim shemama na sl.147 i 148 sve crtkano prikazane poprečne grane, a sve će grane biti prikazane u svojim kompleksnim impedancijama. U impedancijama $\bar{Z}_{pA}^1$ i $\bar{Z}_{pB}^1$, kao i u analognim impedancijama inverzne i nulte mreže, sadržane su odgovarajuće poprečne grane π -sheme vodova priključenih u A odnosno B, te poprečne grane ekvivalenta transformatora. U impedancijama $\bar{Z}_{pC}$, $\bar{Z}_{pC}^1$ i $\bar{Z}_{pC}^2$ biti će, osim impedancija odgovarajućih poprečnih grana π -sheme vodova priključenih u C, sadržana još i impedancija u C priključenog potrošača. U impedanciji $\bar{Z}_{pC}^0$ biti će sadr-

žane odgovarajuće nulte impedancije poprečnih grana nulte π -sheme vodova priključenih u C. Uvažavanje svih (ili nekih) poprečnih grana uvjetuje i određivanje elektromotorne sile E , što je spomenuto već u toč 2). Ovisno o namjeni računa kratkog spoja uzeti ćemo E'' (za početni), E' (za prijelazni) ili E (za trajni kratki spoj), a odredit ćemo ju na temelju struje opterećenja generatora neposredno prije nastanka kratkog spoja dodavajući naponu generatora $\bar{U}_G$ padove napona na X_G'' , X_G' odnosno X_G . U metodi računa na stvarnoj mreži mora se, dakle, u fazi pripreme podataka provesti i račun tokova snaga i naponskih prilika neposredno prije nastanka kratkog spoja. U metodi računa kratkog spoja pomoću fiktivne mreže nije potrebno određivati elektromotorne sile, što je prednost ove metode, ali je radi naknadne superpozicije takodjer potrebno izvršiti račun tokova.

- Ako se u računu kratkog spoja zanemaruju poprečne grane, to znači da je mreža neposredno prije kratkog spoja bila u idealnom praznom hodu. To takodjer znači, da nisu postojale ni struje izjednačenja među generatorima radi neujednačene uzbude. Prema tome, prije pojave kratkog spoja u mreži nisu tekle nikakve struje, pa imamo da je u tom slučaju

$$\bar{E}_G'' = \bar{E}_G' = \bar{E}_G = U_G \pm U_n \quad 3-13$$

Zanemarimo li, dakle, sve poprečne grane, otpada potreba da se dodatno izračunavaju elektromotorne sile generatora, pošto su one jednake naponu na stezaljkama generatora odnosno približno jednake nazivnom naponu. Isti napon vlada u cijeloj mreži. Prema tome su prilike u mreži neposredno prije nastanka kratkog spoja unaprijed poznate i nije potrebno provoditi proračun tokova.

Dodatno zanemarivanju poprečnih grana obično se zanemaruju još i omski otpori preostalih uzdužnih grana, odnosno kod

analize distributivnih (uglavnom niskonaponskih) mreža u kratkom spoju, reaktancija. Time račun postaje još jednostavniji, jer otpada potreba računanja s kompleksnim brojevima.

Maksimalni stupanj zanemarenja višestruko pojednostavnjuje račun kratkog spoja, ali kod nekih proračuna određene namjene nije dopustiv. Katkada se, u takvim slučajevima, zadovoljavajuća točnost može postići zanemarivanjem poprečnih grana zajedno s potrošačima, a uz uvažavanje djelatne komponente impedancije vodova i omskog otpora u spojevima zvjezdišta transformatora sa zemljom.

- 4) Prethodna razmatranja su praktički već ukazala na potrebnu strukturu računanja, ali možemo još jednom istaknuti:
 - U računima, kod kojih se ne zanemaruju poprečne grane, potrebno je bez obzira na odabranu metodu provesti račun tokova u mreži neposredno prije nastanka kratkog spoja (linije A i C na sl.145, ekvivalentna shema na sl.148a). Kod računa na ekvivalentu stvarne mreže (linija A) to je potrebno radi određivanja elektromotorne sile E generatora za ekvivalent na sl.147, a kod računa na ekvivalentu fiktivne mreže (linija C) to je potrebno radi naknadne superpozicije rezultata proračuna po shemama 148a i 148b.
 - U računima kod kojih se zanemaruju poprečne grane nije potrebno dodatno računati tokove i naponske prilike u mreži neposredno prije nastanka kratkog spoja, jer su u tom slučaju te prilike a priori poznate: ne teku nikakve struje, a naponi su svagdje jednaki nazivnom (linije B i D na sl. 145).
- 5) Dodatni račun se u prvom redu sastoji u preračunavanju rezultata i komponenata u trofazne struje i napone. U metodi računa s fiktivnom mrežom potrebno je provesti još i superpoziciju (linija C i D) s prethodnim stanjem mreže koje treba ustanoviti računom tokova (linija C) ili je a priori poznato (linija D). Iznimno superpozicija nije potrebna, ako želimo izračunati samo struje kratkog spoja po liniji D, pa su rezultati spremni za korištenje već u fazi proračuna oz-

načenoj na sl.145. točkom D4-1.

Računi kratkog spoja, kod kojih se uvažavaju svi parametri mreže, koji se dakle provode bez ikakvih zanemarenja, vrlo su složeni, pa primjena sistema komponenata ne pruža nikakve prednosti. U tim slučajevima se račun kratkog spoja može provoditi i na trofaznim ekvivalentima, što se u novije vrijeme sve više uvodi.

Većina algoritama za račun kratkog spoja osnivaju se na metodi i postupku po liniji D na sl.145, i to najčešće uz zanemarenje omskih otpora u uzdužnim granama elemenata mreže i u spojevima sa zemljom,

U vezi s računom kratkog spoja još treba reći nešto i o veličini mreže, koja se obuhvaća računom. Tu treba razlikovati dio mreže za koju su potrebni podaci kratkog spoja i dio mreže za koji ti podaci nisu potrebni, ali utječe na promatrano područje.

U načelu cijela sinhrono spojena mreža utječe na struju kratkog spoja, pa bi ju shodno tome trebalo u cijelosti uzeti u račun. Pošto se danas, međjutim, trofazne mreže u pravilu protežu preko više država, teško je saznati potrebne podatke, a kad bi to i bilo moguće, obim računa postao bi nesavladiv. Zato se uzima u račun bliža okolina mreže za koju su potrebni rezultati računa, a udaljeniji djelovi mreže se uzimaju u račun putem ekvivalenata, koji se određuju iz osnovnih podataka o tim susjednim mrežama.

Za račun kratkog spoja u mrežama srednjeg napona, koje se napajaju, npr. iz jedne transformatorske stanice gornjeg napona 110 kV, 110 kV mreža se u direktnom sistemu može zamijeniti jednom jedinom reaktancijom, a tako i u inverznom i nultom sistemu, ako je potrebno. Zato je neophodno poznavati snagu kratkog spoja u pojnoj ločki. Ako ova nije poznata, primjenjuju se dva načina: umjesto stvarne snage kratkog spoja uzima se rasklopna snaga prekidača na strani 110 kV napojne stanice, a ako ni ona nije poznata, može se pretpostaviti da je snaga kratkog spoja na 110 kV strani beskonačno velika.

Računamo jedinične impedancije mreže:

$$r_{VE-F} = \frac{0,45 \cdot 2}{2} = 0,45$$

$$x_{VE-F} = \frac{0,32 \cdot 2}{2} = 0,32$$

$$r_{VD-E} = \frac{0,45 \cdot 1}{2} = 0,225$$

$$x_{VD-E} = \frac{0,32 \cdot 1}{2} = 0,16$$

$$x_{TC-D} = \frac{0,1 \cdot 10^2 \cdot 50}{20 \cdot 10^2} = 0,25$$

$$x_{VB-C} = \frac{0,38 \cdot 3}{24,5} = 0,047$$

$$x_{VC-G} = \frac{0,38 \cdot 4}{24,5} = 0,062$$

$$x_{VB-G} = \frac{0,38 \cdot 5}{24,5} = 0,078$$

$$x_{TA-E} = 0,1 \frac{110^2 \cdot 50}{40 \cdot 110^2} = 0,25$$

Gornje vrijednosti unesemo u ekvivalentnu shemu direktnog sistema. Nakon transfiguracije trokuta BCG u zvijezdu ekvivalentna shema izgleda kao na sl.150.

Neka je kratki spoj u F:

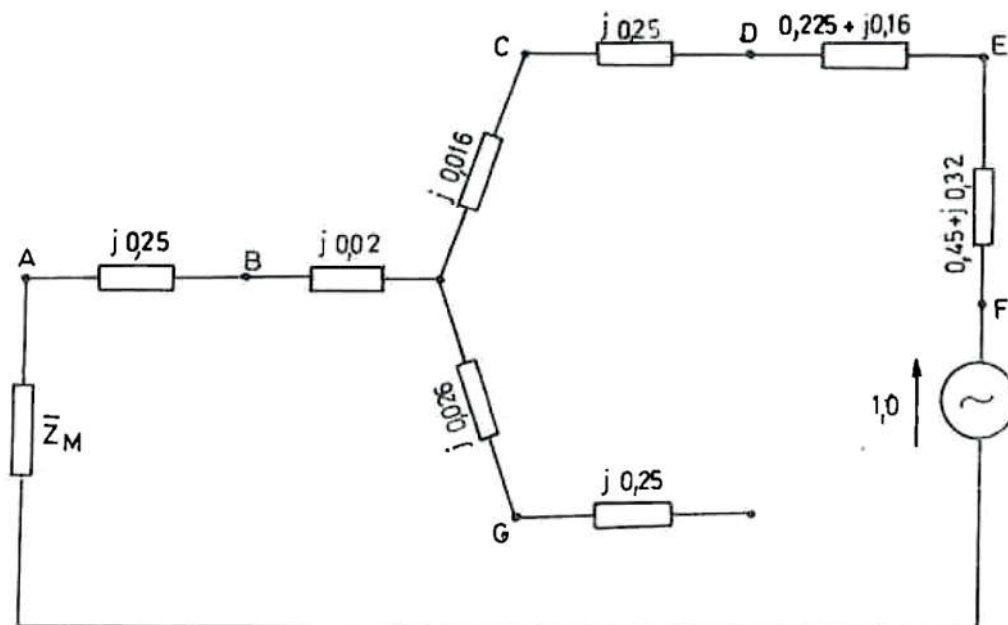
$$a) \quad s_{K3A} = \frac{3520}{50} = 70,4 \quad x_M = 0,014$$

$$\bar{z}_K = 0,675 + j 0,996 + j 0,014 = 0,675 + j 1,01$$

$$s_{K3F} = 0,823 \quad S_{K3F} = 41,159 \text{ |MVA|}$$

$$b) \quad s_{K3A} = \frac{4000}{50} = 80 \quad x_M = 0,0125$$

$$\bar{z}_K = 0,675 + j 0,996 + j 0,013 = 0,675 + j 1,009$$



Slika 150 - Ekvivalentna shema fiktivnog sistema mreže sa sl.149 kada je trofazni kratki spoj u čvoru F

$$s_{K3F} = 0,824$$

$$S_{K3F} = 41,187 \text{ |MVA|}$$

c) $s_{K3A} = \infty$

$$x_M = 0$$

$$\bar{z}_K = 0,675 + j 0,996$$

$$s_{K3F} = 0,83$$

$$S_{K3F} = 41,557 \text{ |MVA|}$$

Neka je kratki spoj u B :

a) $\bar{z}_K = j 0,25 + j 0,014 = j 0,264$

$$s_{K3B} = 3,788$$

$$S_{K3B} = 189,394 \text{ |MVA|}$$

$$b) \quad \bar{z}_K = j 0,25 + j 0,013 = j 0,263$$

$$s_{K3B} = 3,802$$

$$S_{K3B} = 190,114 \text{ MVA}$$

$$c) \quad \bar{z}_K = j 0,25$$

$$s_{K3B} = 4$$

$$S_{K3B} = 200 \text{ MVA}$$

Ovaj primjer pokazuje, da snaga kratkog spoja u 35 kV mreži malo, a u 10 kV mreži gotovo nikako ne ovisi o snazi kratkog spoja u 110 kV mreži. Nasuprot tome, značajan utjecaj ima snaga i napon kratkog spoja transformatora.

3.1.4.2 Struje i snage kratkog spoja

Primarni rezultat računa kratkog spoja je struja I_K'' na mjestu kratkog spoja. Eventualno se računa raspodjela struje I_K'' u okolišu kratkog spoja ili neke druge specijalne informacije.

Struju I_K'' možemo koristiti za izračunavanje udarne struje kratkog spoja, rasklopne struje kratkog spoja, rasklopne snage sklopke i struje mjerodavne za ugrižavanje za vrijeme kratkog spoja (trajne struje kratkog spoja).

Sve se navedene veličine računaju uvažavajući propise. Ovi propisi nisu kod nas doneseni, pa se prema nahodjenju pridržavamo njemačkih ili američkih propisa. Detaljno o ovoj problematici treba potražiti u literaturi.

Prema njemačkim propisima udarna struja kratkog spoja računa se po formuli:

$$I_u = k \sqrt{2} \cdot 1.1 I_K'' \quad 3-14$$

k - faktor, koji ovisi o omjeru R/X .

Prema američkim propisima udarna struja kratkog spoja računa se po formuli:

$$I_u = I_K'' (\sqrt{2} + \sqrt{k'^2 - 1}) \quad 3-15$$

k' - faktor, koji ovisi o nazivnom naponu mreže i o blizini generatora

Za kratke spojeve u neposrednoj blizini generatora udarna struja određena prema njemačkim propisima bit će nešto veća od udarne struje određene prema američkim propisima i to radi faktora 1,1. Za kratke spojeve udaljenije od generatora udarna struja određena prema njemačkim propisima manja je od one određene prema američkim, radi smanjenja istosmjerne komponente struje kratkog spoja (utjecaj omjera R/X), što američki propisi ne uzimaju u obzir. Po njemačkim propisima rasklopna struja troleznog kratkog spoja računa se prema izrazu:

$$I_{rK3} = \mu_{1,1} I_{K3}'' \quad 3-16$$

- faktor, koji ovisi o omjeru I_{K3}''/I_n

a struja jednopolnog kratkog spoja:

$$I_{rK1} = 1,1 I_{K1}'' \quad 3-17$$

Prema američkim propisima rasklopna struja troleznog kratkog spoja računa se iz relacije:

$$I_{rK3} = v I_{K3}'' \quad 3-18$$

a jednopolnog:

$$I_{rK1} = v I_{K1}'' \quad 3-19$$

v - veličina ovisna o vremenu iskapčanja sklopke.

Rasklopna snaga sklopke dana je izrazom:

$$S = \sqrt{3} U_n I_{rmax} \quad 3-20$$

gdje je I_{rmax} najveća rasklopna struja u bilo kojoj od faza, a U_n linijski nazivni napon mreže.

Struja mjerodavna za ugrijavanje za vrijeme kratkog spoja računa se iz izraza:

$$I_t = I_d'' \sqrt{m + n} \quad 3-21$$

I_t - efektivna struja kratkog spoja

I_d'' - efektivna vrijednost prve poluperiode izmjenične komponente struje kratkog spoja

m, n - veličine koje se očitavaju iz dijagrama ili izračunavaju koristeći složene matematske izraze.

3.1.4.3 Matematički model računa kratkog spoja za elektroničko računalo

Svako stanje nekog sistema, pa tako i fiktivnog, može se definirati matričnim jednažbama

$$[V] = [\bar{Z}] [\bar{I}] \quad 3-22a$$

ili

$$[I] = [\bar{Y}] [\bar{V}] \quad b$$

gdje su:

$\bar{V}$ - napon čvora prema referentnom čvoru

$\bar{I}$ - struja čvora

$[\bar{Z}]$ - matrica vlastitih i međjusobnih impedancija čvora

$[\bar{Y}]$ - matrica vlastitih i međjusobnih admitancija čvora

Kad su zanemareni omski otpori, jednažba 3-22a prelazi u:

$$[\bar{V}] = j [X] [\bar{I}] \quad 3-23$$

U fiktivnom sistemu sve su struje čvora jednake nuli osim struje čvora u kojoj je kratki spoj, odnosno osim čvora na koji su priključeni fiktivni generatori.

Metodu simetričnih komponenata možemo primjeniti i na fiktivni sistem. Postupak je slijedeći:

- premostimo sve EMS-e, a na mjestu kratkog spoja uključimo onoliko fiktivnih generatora, koliko je potrebno da nam napon na mjestu kratkog spoja bude jednak po iznosu i suprotnog predznaka naponu, koji je tu vladao prije nastanka kratkog spoja,
- postavimo uvjete na mjestu kratkog spoja,
- izrazimo uvjete na mjestu kratkog spoja sa simetričnim komponentama,
- nacrtamo ekvivalentnu shemu sistema komponenata poštujući zadane uvjete.

Stanje u ekvivalentnoj shemi sistema komponenata definiramo sada matričnim jednadžbama i to za svaki sistem posebno.

Za direktni sistem:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{f1}^1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{V}_{fk}^1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{V}_{fN}^1 \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} x_{11}^1 & \dots & x_{1k}^1 & \dots & x_{1N}^1 \\ \cdot & & \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & & \cdot \\ x_{k1}^1 & \dots & x_{kk}^1 & \dots & x_{kN}^1 \\ \cdot & & \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & & \cdot \\ x_{N1}^1 & \dots & x_{Nk}^1 & \dots & x_{NN}^1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ -\bar{I}_{fk}^1 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} \quad 3-24$$

Za inverzni sistem:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{f1}^2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{V}_{fk}^2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{V}_{fN}^2 \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} x_{11}^2 & \dots & x_{1k}^2 & \dots & x_{1N}^2 \\ \cdot & & \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & & \cdot \\ x_{k1}^2 & \dots & x_{kk}^2 & \dots & x_{kN}^2 \\ \cdot & & \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & & \cdot \\ x_{N1}^2 & \dots & x_{Nk}^2 & \dots & x_{NN}^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ -\bar{I}_{fk}^2 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} \quad 3-25$$

Za nulti sistem:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{f1}^0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{V}_{fk}^0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{V}_{fN}^0 \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} x_{11}^0 & \dots & x_{1k}^0 & \dots & x_{1N}^0 \\ \cdot & & \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & & \cdot \\ x_{k1}^0 & \dots & x_{kk}^0 & \dots & x_{kN}^0 \\ \cdot & & \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & & \cdot \\ x_{N1}^0 & \dots & x_{Nk}^0 & \dots & x_{NN}^0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ -\bar{I}_{fk}^0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} \quad 3-26$$

Prema vrsti kratkog spoja koristimo neke ili sve gore navedene matrične jednačbe.

Kako su struje fiktivnog sistema jedine struje koje treba računati, možemo pisati za sve sisteme:

$$\bar{I}_{fk} = \bar{I}_k \quad 3-27$$

$$\bar{I}_{fs-t} = \bar{I}_{s-t} \quad 3-28$$

k - čvor u kojemu je kratki spoj

s,t - čvorovi grane između s i t.

3.1.4.3.1 Tropolni kratki spoj

Prilike u fiktivnom sistemu u čvoru k (sl.151b) daju:

$$\bar{V}_{kf}^a + \bar{V}_{(n)}^a - \bar{V}_{(n)}^b - \bar{V}_{kf}^b = 0 \quad 3-29a$$

$$\bar{V}_{kf}^b + \bar{V}_{(n)}^b - \bar{V}_{(n)}^c - \bar{V}_{kf}^c = 0 \quad b$$

$$\bar{I}_{kf}^a + \bar{I}_{kf}^b + \bar{I}_{kf}^c = 0 \quad c$$

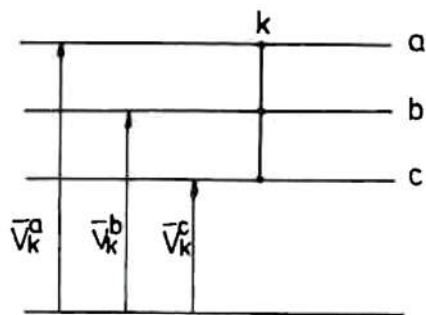
Iz ovih jednažbi izlazi:

$$\bar{I}_{kf}^o = \frac{1}{3} (\bar{I}_{kf}^a + \bar{I}_{kf}^b + \bar{I}_{kf}^c) = 0 \quad 3-30$$

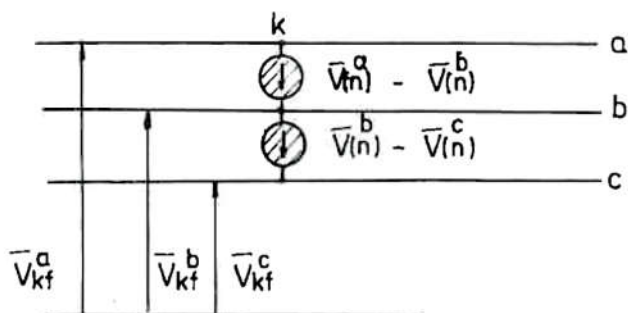
$$\begin{aligned} \bar{V}_{kf}^2 &= \frac{1}{3} (\bar{V}_{kf}^a + a^2 \bar{V}_{kf}^b + a \bar{V}_{kf}^c) = \\ &= \frac{1}{3} \left[(\bar{V}_{kf}^a + a^2 \bar{V}_{kf}^a + a^2 \bar{V}_{(n)}^a - a^2 \bar{V}_{(n)}^b + \right. \\ &\quad \left. + a \bar{V}_{kf}^a + a \bar{V}_{(n)}^a - a \bar{V}_{(n)}^b - a \bar{V}_{(n)}^b - a \bar{V}_{(n)}^c \right] = \\ &= \frac{1}{3} (a^2 - a + a - 1 + 1 - a^2) \bar{V}_{(n)}^a = 0 \quad 3-31 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_{kf}^1 &= \frac{1}{3} (\bar{V}_{kf}^a + a \bar{V}_{kf}^b + a^2 \bar{V}_{kf}^c) = \\ &= \frac{1}{3} (\bar{V}_{kf}^a + a \bar{V}_{kf}^a + a \bar{V}_{(n)}^a - a \bar{V}_{(n)}^b + a^2 \bar{V}_{kf}^a + \\ &= a^2 \bar{V}_{(n)}^a - a^2 \bar{V}_{(n)}^b + a^2 \bar{V}_{(n)}^b - a^2 \bar{V}_{(n)}^c) = \\ &= \frac{1}{3} (a - a + a^2 - a + a - 1) \bar{V}_{(n)}^a = - \bar{V}_{(n)}^a = - \bar{V}_{(n)} \end{aligned}$$

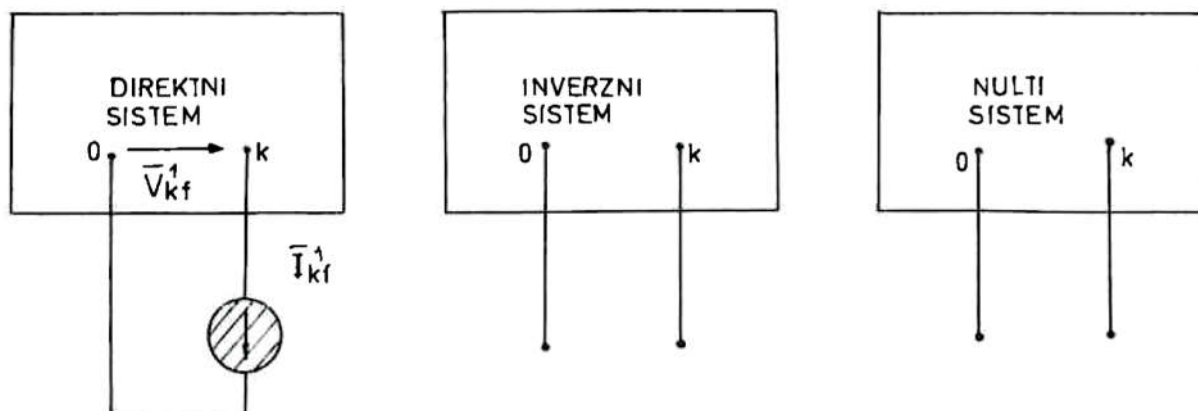
$$\bar{V}_{kf}^1 + \bar{V}_{(n)} = 0 \quad 3-32$$



a) Prilike u čvoru k



b) Fiktivni sistem u čvoru k



c) Mreže fiktivnog sistema

Slika 151 - Formiranje mreže fiktivnog sistema za trofazni kratki spoj

Shema spoja na slici 151c zadovoljava relaciju 3-32

Koristeći relacije 3-24 i 3-32 dobijemo

$$\begin{aligned}\bar{V}_{fk}^1 &= -\bar{V}_{(n)} = -j x_{kk}^1 \bar{I}_k^1 \\ \bar{I}_k &= -j \frac{\bar{V}_{(n)}}{x_{kk}^1}\end{aligned}\quad 3-33$$

Struje grana dobijemo iz razlike napona

$$\bar{I}_{s-t} = -j \frac{\bar{V}_{fs}^1 - \bar{V}_{ft}^1}{x_{s-t}^1} = \frac{x_{tk}^1 - x_{sk}^1}{x_{s-t}^1} \bar{I}_k \quad 3-34$$

Napone čvorova dobijemo kao zbroj napona fiktivnog sistema $\bar{V}_{fi}^1$ i napona mreže koji je vladao u čvoru i neposredno prije kvara

$$\begin{aligned}\bar{V}_i &= \bar{V}_{(n)} + \bar{V}_{fi}^1 = \bar{V}_{(n)} - j x_{ik}^1 \bar{I}_k = \\ &= j x_{kk}^1 \bar{I}_k - j x_{ik}^1 \bar{I}_k = \\ &= \frac{x_{kk}^1 - x_{ik}^1}{x_{kk}^1} \bar{V}_{(n)}\end{aligned}\quad 3-35$$

Relacije 3-34 i 3-35 vrijede za fazu a. Za ostale faze dobiju se vrijednosti množenjem sa a^2 odnosno a.

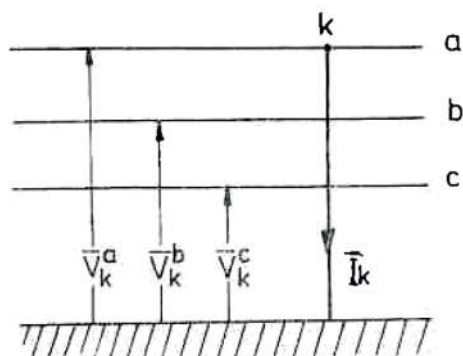
3.1.4.3.2 Jednopolni kratki spoj

Prilike u fiktivnom sistemu u čvoru k (sl.152b) daju

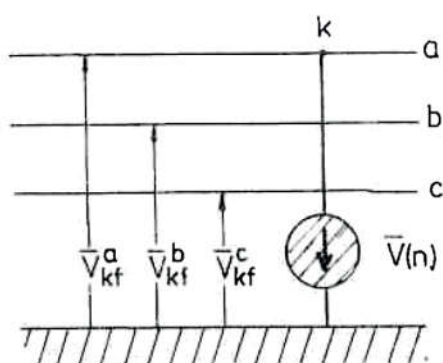
$$\bar{V}_{kf}^a + \bar{V}_{(n)}^a = 0 \quad 3-36a$$

$$\bar{I}_{kf}^b = 0 \quad b$$

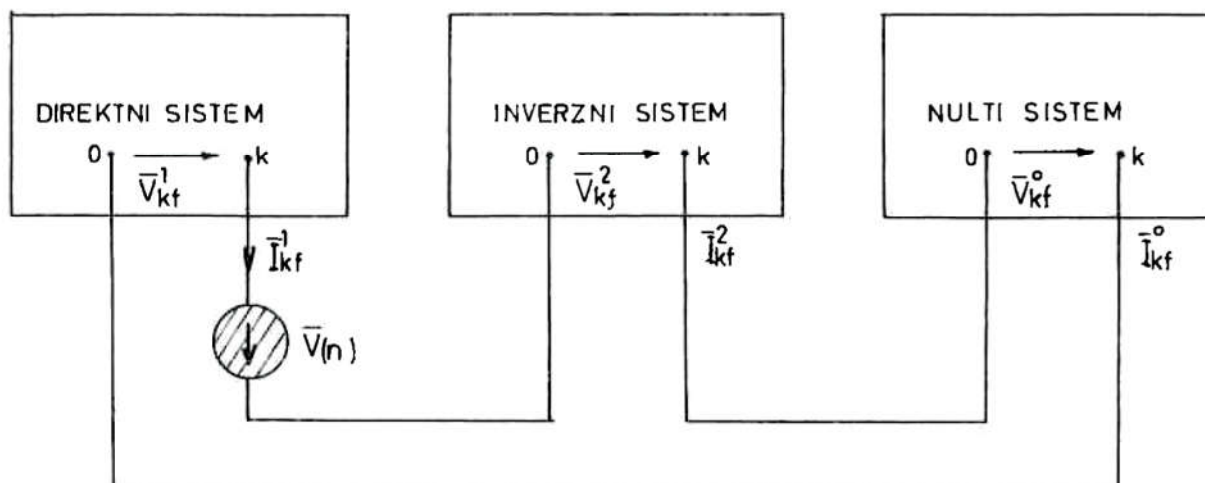
$$\bar{I}_{kf}^c = 0 \quad c$$



a) Prilike u čvoru k



b) Fiktivni sistem u čvoru k



c) Mreže fiktivnog sistema

Slika 152 - Formiranje mreže fiktivnog sistema za jednopolni kratki spoj

Ove jednađbe izrazimo simetričnim komponentama.

$$\bar{V}_{kf}^1 + \bar{V}_{kf}^2 + \bar{V}_{kf}^0 + \bar{V}_{(n)} = 0 \quad 3-37$$

$$\bar{V}_{kf}^1 = \frac{1}{3} (\bar{I}_{kf}^a + a^2 \bar{I}_{kf}^b + a \bar{I}_{kf}^c) = \frac{1}{3} \bar{I}_{kf}^a$$

$$\bar{V}_{kf}^2 = \frac{1}{3} (\bar{I}_{kf}^a + a \bar{I}_{kf}^b + a^2 \bar{I}_{kf}^c) = \frac{1}{3} \bar{I}_{kf}^a$$

$$\bar{V}_{kf}^0 = \frac{1}{3} (\bar{I}_{kf}^a + \bar{I}_{kf}^b + \bar{I}_{kf}^c) = \frac{1}{3} \bar{I}_{kf}^a$$

$$\bar{I}_{kf}^1 = \bar{I}_{kf}^2 = \bar{I}_{kf}^0 \quad 3-38$$

Shema spoja na slici 152c zadovoljava relacije 3-37 i 3-38.

Prilike u sistemima komponenata definiramo matričnim jednađbama 3-24, 3-25 i 3-26.

Uzmemo li u obzir relacije 3-37 i 3-38 i sliku 152c možemo pisati

$$\bar{I}_k^0 = -j \frac{\bar{V}_{(n)}}{X_{kk}^1 + X_{kk}^2 + X_{kk}^0} \quad 3-39$$

Struje i naponi u sistemima komponenata:

$$\bar{V}_{if}^1 = -j X_{ik}^1 \bar{I}_k^1 = -j X_{ik}^1 \bar{I}_k^0 \quad 3-40a$$

$$\bar{V}_{if}^2 = -j X_{ik}^2 \bar{I}_k^2 = -j X_{ik}^2 \bar{I}_k^0 \quad b$$

$$\bar{V}_{if}^0 = -j X_{ik}^0 \bar{I}_k^0 \quad c$$

$$\bar{I}_{s-t}^1 = \frac{\bar{V}_{sf}^1 - \bar{V}_{tf}^1}{j X_{s-t}^1} = \frac{X_{tk}^1 - X_{sk}^1}{X_{s-t}^1} \bar{I}_k^0 \quad 3-41a$$

$$\bar{I}_{s-t}^2 = \frac{\bar{V}_{sf}^2 - \bar{V}_{tf}^2}{j X_{s-t}^2} = \frac{X_{tk}^2 - X_{sk}^2}{X_{s-t}^2} \bar{I}_k^0 \quad b$$

$$\bar{I}_{s-t}^o = \frac{\bar{V}_{sf}^o - \bar{V}_{tf}^o}{j X_{s-t}^o} = \frac{X_{tk}^o - X_{sk}^o}{X_{s-t}^o} \bar{I}_k^o \quad 3-41c$$

$$\bar{I}_k^a = 3 \bar{I}_k^o \quad 3-42$$

Sada možemo računati fazne veličine:

$$\bar{V}_i^a = \bar{V}_{(n)}^a + \bar{V}_{if}^a = \bar{V}_{(n)} - j(X_{ik}^1 + X_{ik}^2 + X_{ik}^o) \bar{I}_k^o \quad 3-43a$$

$$\bar{V}_i^b = \bar{V}_{(n)}^b + \bar{V}_{if}^b = a^2 \bar{V}_{(n)} - j(a^2 X_{ik}^1 + a X_{ik}^2 + X_{ik}^o) \bar{I}_k^o \quad b$$

$$\bar{V}_i^c = \bar{V}_{(n)}^c + \bar{V}_{if}^c = a \bar{V}_{(n)} - j(a X_{ik}^1 + a^2 X_{ik}^2 + X_{ik}^o) \bar{I}_k^o \quad c$$

$$\bar{I}_{s-t}^a = \left(\frac{X_{tk}^1 - X_{sk}^1}{X_{s-t}^1} + \frac{X_{tk}^2 - X_{sk}^2}{X_{s-t}^2} + \frac{X_{tk}^o - X_{sk}^o}{X_{s-t}^o} \right) \bar{I}_k^o \quad 3-44a$$

$$\bar{I}_{s-t}^b = \left(a^2 \frac{X_{tk}^1 - X_{sk}^1}{X_{s-t}^1} + a \frac{X_{tk}^2 - X_{sk}^2}{X_{s-t}^2} + \frac{X_{tk}^o - X_{sk}^o}{X_{s-t}^o} \right) \bar{I}_k^o \quad b$$

$$\bar{I}_{s-t}^c = \left(a \frac{X_{tk}^1 - X_{sk}^1}{X_{s-t}^1} + a^2 \frac{X_{tk}^2 - X_{sk}^2}{X_{s-t}^2} + \frac{X_{tk}^o - X_{sk}^o}{X_{s-t}^o} \right) \bar{I}_k^o \quad c$$

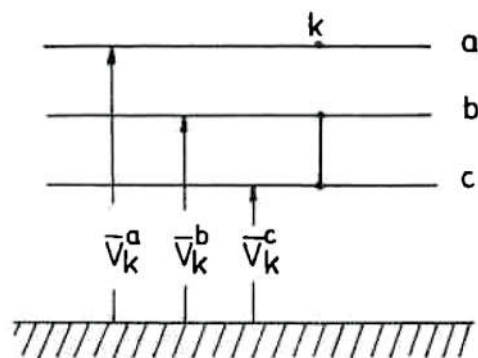
3.1.4.3.3 Dvopolni kratki spoj

Prilike u fiktivnom sistemu u čvoru k (sl.153b) daju:

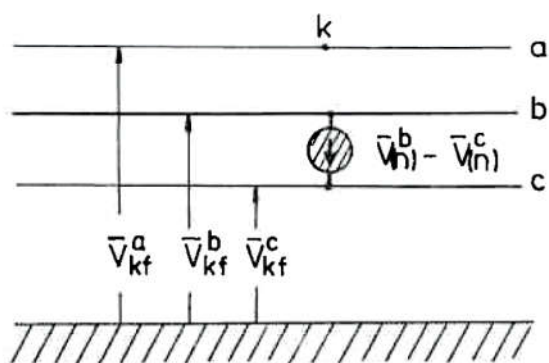
$$\bar{V}_{kf}^b + \bar{V}_{(n)}^b - \bar{V}_{(n)}^c - \bar{V}_{kf}^c = 0 \quad 3-45a$$

$$\bar{I}_{kf}^b + \bar{I}_{kf}^c = 0 \quad b$$

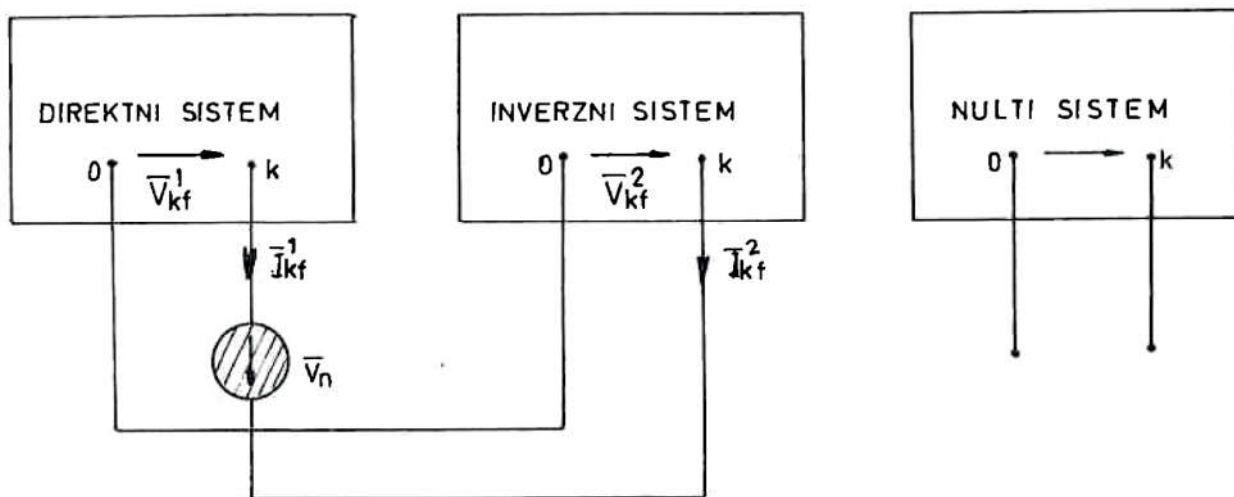
$$\bar{I}_{kf}^a = 0 \quad c$$



a) Prilike u čvoru k



b) Fiktivni sistem u čvoru k



c) Mreža fiktivnog sistema

Slika 153 - Formiranje mreže fiktivnog sistema za dvopolni kratki spoj

Ove jednađžbe izrazimo simetričnim komponentama:

$$a^2 \bar{V}_{kf}^1 + a \bar{V}_{kf}^2 + \bar{V}_{kf}^0 + a^2 \bar{V}_{(n)} - a \bar{V}_{(n)} - a \bar{V}_{kf}^1 - a^2 \bar{V}_{kf}^2 - \bar{V}_{kf}^0 = 0$$

$$(a^2 - a) \bar{V}_{kf}^1 + (a^2 - a) \bar{V}_{(n)} - (a^2 - a) \bar{V}_{kf}^2 = 0$$

$$\bar{V}_{kf}^1 + \bar{V}_{(n)} = \bar{V}_{kf}^2 \quad 3-46$$

$$a^2 \bar{I}_{kf}^1 + a \bar{I}_{kf}^2 + \bar{I}_{kf}^0 + a \bar{I}_{kf}^1 + a^2 \bar{I}_{kf}^2 + \bar{I}_{kf}^0 = 0$$

$$(a^2 + a) \bar{I}_{kf}^1 + (a + a^2) \bar{I}_{kf}^2 = 0$$

$$\bar{I}_{kf}^1 = - \bar{I}_{kf}^2 \quad 3-47$$

$$\bar{I}_{kf}^1 + \bar{I}_{kf}^2 + \bar{I}_{kf}^0 = 0$$

$$\bar{I}_{kf}^0 = 0 \quad 3-48$$

Shema spoja na slici 153c zadovoljava relacije 3-46, 3-47 i 3-48.

Prilike u sistemima komponentata definiramo matričnim jednađžbama 3-24 i 3-25.

Uzmemo li u obzir relacije 3-46, 3-47 i sl.153c možemo pisati:

$$\bar{I}_k^1 = - \bar{I}_k^2 = - j \frac{\bar{V}_{(n)}}{X_{kk}^1 + X_{kk}^2} \quad 3-49$$

Struje i naponi u sistemima komponentata

$$\bar{V}_{if}^1 = - j X_{ik}^1 \bar{I}_k^1 \quad 3-50a$$

$$\bar{V}_{if}^2 = -j x_{ik}^2 \bar{I}_k^2 = j x_{ik}^2 \bar{I}_k^1 \quad 3-50b$$

$$\bar{I}_{s-t}^1 = \frac{\bar{V}_{sf}^1 - \bar{V}_{tf}^1}{j x_{s-t}^1} = \frac{x_{tk}^1 - x_{sk}^1}{x_{s-t}^1} \bar{I}_k^1 \quad 3-51a$$

$$I_{s-t}^2 = \frac{\bar{V}_{sf}^2 - \bar{V}_{tf}^2}{j x_{s-t}^2} = - \frac{x_{tk}^2 - x_{sk}^2}{x_{s-t}^2} \bar{I}_k^1 \quad b$$

Sada možemo računati fazne veličine:

$$\bar{V}_i^a = \bar{V}_{(n)}^a + \bar{V}_{if}^a = \bar{V}_{(n)} - j (x_{ik}^1) \bar{I}_k^1 \quad 3-52a$$

$$\bar{V}_i^b = \bar{V}_{(n)}^b + \bar{V}_{if}^b = a^2 \bar{V}_{(n)} - j (a^2 x_{ik}^1 - a x_{ik}^2) \bar{I}_k^1 \quad b$$

$$\bar{V}_i^c = \bar{V}_{(n)}^c + \bar{V}_{if}^c = a \bar{V}_{(n)} - j (a x_{ik}^1 - a^2 x_{ik}^2) \bar{I}_k^1 \quad c$$

$$\bar{I}_k^c = - \bar{I}_k^b = a \bar{I}_k^1 + a^2 \bar{I}_k^2 = \frac{\sqrt{3} V_{(n)}}{x_{kk}^1 + x_{kk}^2} \quad 3-53$$

$$\bar{I}_{s-t}^a = \left(\frac{x_{tk}^1 - x_{sk}^1}{x_{s-t}^1} - \frac{x_{tk}^2 - x_{sk}^2}{x_{s-t}^2} \right) \bar{I}_k^1 \quad 3-54a$$

$$\bar{I}_{s-t}^b = \left(a^2 \frac{x_{tk}^1 - x_{sk}^1}{x_{s-t}^1} - a \frac{x_{tk}^2 - x_{sk}^2}{x_{s-t}^2} \right) \bar{I}_k^1 \quad b$$

$$I_{s-t}^c = \left(a \frac{x_{tk}^1 - x_{sk}^1}{x_{s-t}^1} - a^2 \frac{x_{tk}^2 - x_{sk}^2}{x_{s-t}^2} \right) \bar{I}_k^1 \quad c$$

3.1.4.3.4 Dvopolni kratki spoj i spoj sa zemljom

Prilike u fiktivnom sistemu u čvoru k (sl.154b) daju:

$$\bar{I}_{kf}^a = 0 \quad 3-55a$$

$$\bar{V}_{kf}^b + \bar{V}_{(n)}^b - \bar{V}_{(n)}^c + \bar{V}_{(n)}^c = 0 \quad b$$

$$\bar{V}_{kf}^c + \bar{V}_{(n)}^c = 0 \quad c$$

Ove jednađžbe izrazimo u simetričnim komponentama:

$$\bar{I}_{kf}^1 + \bar{I}_{kf}^2 + \bar{I}_{kf}^0 = 0 \quad 3-56$$

$$a^2 \bar{V}_{kf}^1 + a \bar{V}_{kf}^2 + \bar{V}_{kf}^0 + a^2 \bar{V}_{(n)} = 0$$

$$a \bar{V}_{kf}^1 + a^2 \bar{V}_{kf}^2 + \bar{V}_{kf}^0 + a \bar{V}_{(n)} = 0$$

Odbijemo gornje dvije jednađžbe jednu od druge

$$(a^2 - a) (\bar{V}_{kf}^1 + \bar{V}_{(n)}) = (a^2 - a) \bar{V}_{kf}^2$$

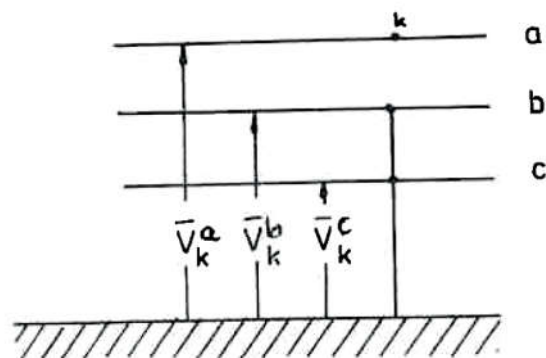
$$\bar{V}_{kf}^1 + \bar{V}_{(n)} = \bar{V}_{kf}^2$$

Ovo uvrstimo u njihov zbroj pa dobijemo

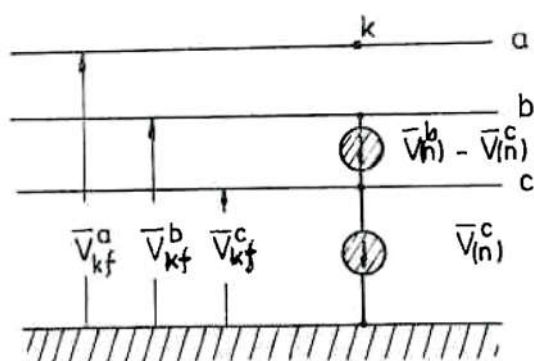
$$\bar{V}_{kf}^1 + \bar{V}_{(n)} = \bar{V}_{kf}^2 = \bar{V}_{kf}^0 \quad 3-57$$

Shema spoja na slici 154c zadovoljava relacije 3-56 i 3-57.

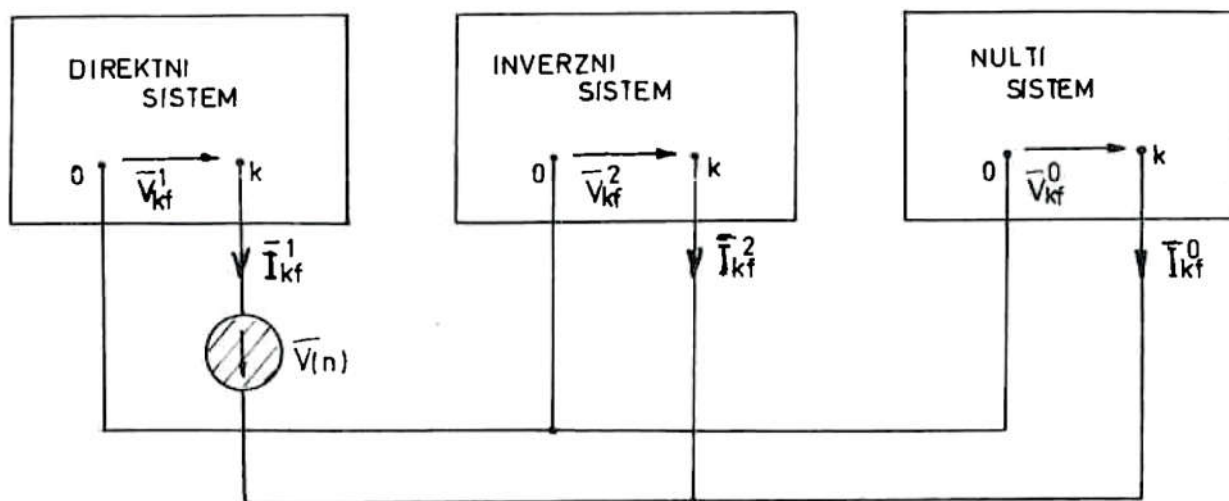
Prilike u sistemima komponenata definiramo sada matričnim jednađžbama 3-24, 3-25 i 3-26. Iz slike 154c uz uvaženje da su struje fiktivnog sistema jedine, slijedi odmah:



a) Prilike u čvoru k



b) Fiktivni sistem u čvoru k



c) Mreža fiktivnog sistema

Slika 154 - Formiranje mreže fiktivnog sistema za dvopolni kratki spoj sa spojem sa zemljom

$$\bar{I}_k^1 = \frac{\bar{V}_{(n)}}{j x_{kk}^1 + j \frac{x_{kk}^2 \cdot x_{kk}^0}{x_{kk}^2 + x_{kk}^0}} = -j \bar{V}_{(n)} \frac{x_{kk}^2 + x_{kk}^0}{x_{kk}^1 x_{kk}^2 + x_{kk}^1 x_{kk}^0 + x_{kk}^2 x_{kk}^0} \quad 3-58$$

Iz relacija 3-25 i 3-26 slijedi dalje:

$$\begin{aligned} \bar{I}_k^2 &= - \frac{\bar{V}_{kf}^2}{j x_{kk}^2} = - \frac{\bar{V}_{kf}^1 + \bar{V}_{(n)}}{j x_{kk}^2} = \frac{x_{kk}^1}{x_{kk}^2} \bar{I}_k^1 + j \frac{\bar{V}_{(n)}}{x_{kk}^2} = \\ &= - j \bar{V}_{(n)} \frac{- x_{kk}^0}{x_{kk}^1 x_{kk}^2 + x_{kk}^1 x_{kk}^0 + x_{kk}^2 x_{kk}^0} \end{aligned} \quad 3-59$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_k^0 &= - \frac{\bar{V}_{kf}^0}{j x_{kk}^0} = - \frac{\bar{V}_{kf}^1 + \bar{V}_{(n)}}{j x_{kk}^0} = \frac{x_{kk}^1}{x_{kk}^0} \bar{I}_k^1 + j \frac{\bar{V}_{(n)}}{x_{kk}^0} = \\ &= - j \bar{V}_{(n)} \frac{- x_{kk}^2}{x_{kk}^1 x_{kk}^2 + x_{kk}^1 x_{kk}^0 + x_{kk}^2 x_{kk}^0} \end{aligned} \quad 3-60$$

Struje i naponi u sistemima komponenata

$$\bar{V}_{if}^1 = - j x_{ik}^1 \bar{I}_k^1 \quad 3-61a$$

$$\bar{V}_{if}^2 = - j x_{ik}^2 \bar{I}_k^2 \quad b$$

$$\bar{V}_{if}^0 = - j x_{ik}^0 \bar{I}_k^0 \quad c$$

$$\bar{I}_{s-t}^1 = \frac{x_{tk}^1 - x_{sk}^1}{x_{s-t}^1} \bar{I}_k^1 \quad 3-62a$$

$$\bar{I}_{s-t}^2 = \frac{x_{tk}^2 - x_{sk}^2}{x_{s-t}^2} \bar{I}_k^2 \quad b$$

$$\bar{I}_{s-t}^0 = \frac{x_{tk}^0 - x_{sk}^0}{x_{s-t}^0} \bar{I}_k^0 \quad c$$

Naponi i struje faza:

$$\begin{aligned} \bar{I}_k^b &= a^2 \bar{I}_k^1 + a \bar{I}_k^2 + \bar{I}_k^0 = \\ &= -j \bar{V}_{(n)} \frac{(a^2 - 1) x_{kk}^2 + (a^2 - a) x_{kk}^0}{x_{kk}^1 x_{kk}^2 + x_{kk}^1 x_{kk}^0 + x_{kk}^2 x_{kk}^0} \end{aligned} \quad 3-63$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_k^c &= a \bar{I}_k^1 + a^2 \bar{I}_k^2 + \bar{I}_k^0 = \\ &= -j \bar{V}_{(n)} \frac{(a - 1) x_{kk}^2 + (a - a^2) x_{kk}^0}{x_{kk}^1 x_{kk}^2 + x_{kk}^1 x_{kk}^0 + x_{kk}^2 x_{kk}^0} \end{aligned} \quad 3-64$$

$$\bar{V}_i^a = \bar{V}_{(n)}^a + \bar{V}_{if}^a = \bar{V}_{(n)} - j (x_{ik}^1 \bar{I}_k^1 + x_{ik}^2 \bar{I}_k^2 + x_{ik}^0 \bar{I}_k^0) \quad 3-65a$$

$$\bar{V}_i^b = \bar{V}_{(n)}^b + \bar{V}_{if}^b = a^2 \bar{V}_{(n)} - j (a^2 x_{ik}^1 \bar{I}_k^1 + a x_{ik}^2 \bar{I}_k^2 + x_{ik}^0 \bar{I}_k^0) \quad b$$

$$\bar{V}_i^c = \bar{V}_{(n)}^c + \bar{V}_{if}^c = a \bar{V}_{(n)} - j (a x_{ik}^1 \bar{I}_k^1 + a^2 x_{ik}^2 \bar{I}_k^2 + x_{ik}^0 \bar{I}_k^0) \quad c$$

$$\bar{I}_{s-t}^a = \frac{x_{tk}^1 - x_{sk}^1}{x_{s-t}^1} \bar{I}_k^1 + \frac{x_{tk}^2 - x_{sk}^2}{x_{s-t}^2} \bar{I}_k^2 + \frac{x_{tk}^0 - x_{sk}^0}{x_{s-t}^0} \bar{I}_k^0 \quad 3-66a$$

$$\bar{I}_{s-t}^b = a^2 \frac{x_{tk}^1 - x_{sk}^1}{x_{s-t}^1} \bar{I}_k^1 + a \frac{x_{tk}^2 - x_{sk}^2}{x_{s-t}^2} \bar{I}_k^2 + \frac{x_{tk}^0 - x_{sk}^0}{x_{s-t}^0} \bar{I}_k^0 \quad b$$

$$\bar{I}_{s-t}^c = a \frac{x_{tk}^1 - x_{sk}^1}{x_{s-t}^1} \bar{I}_k^1 + a^2 \frac{x_{tk}^2 - x_{sk}^2}{x_{s-t}^2} \bar{I}_k^2 + \frac{x_{tk}^0 - x_{sk}^0}{x_{s-t}^0} \bar{I}_k^0 \quad c$$

3.1.5 Program "UKSX"

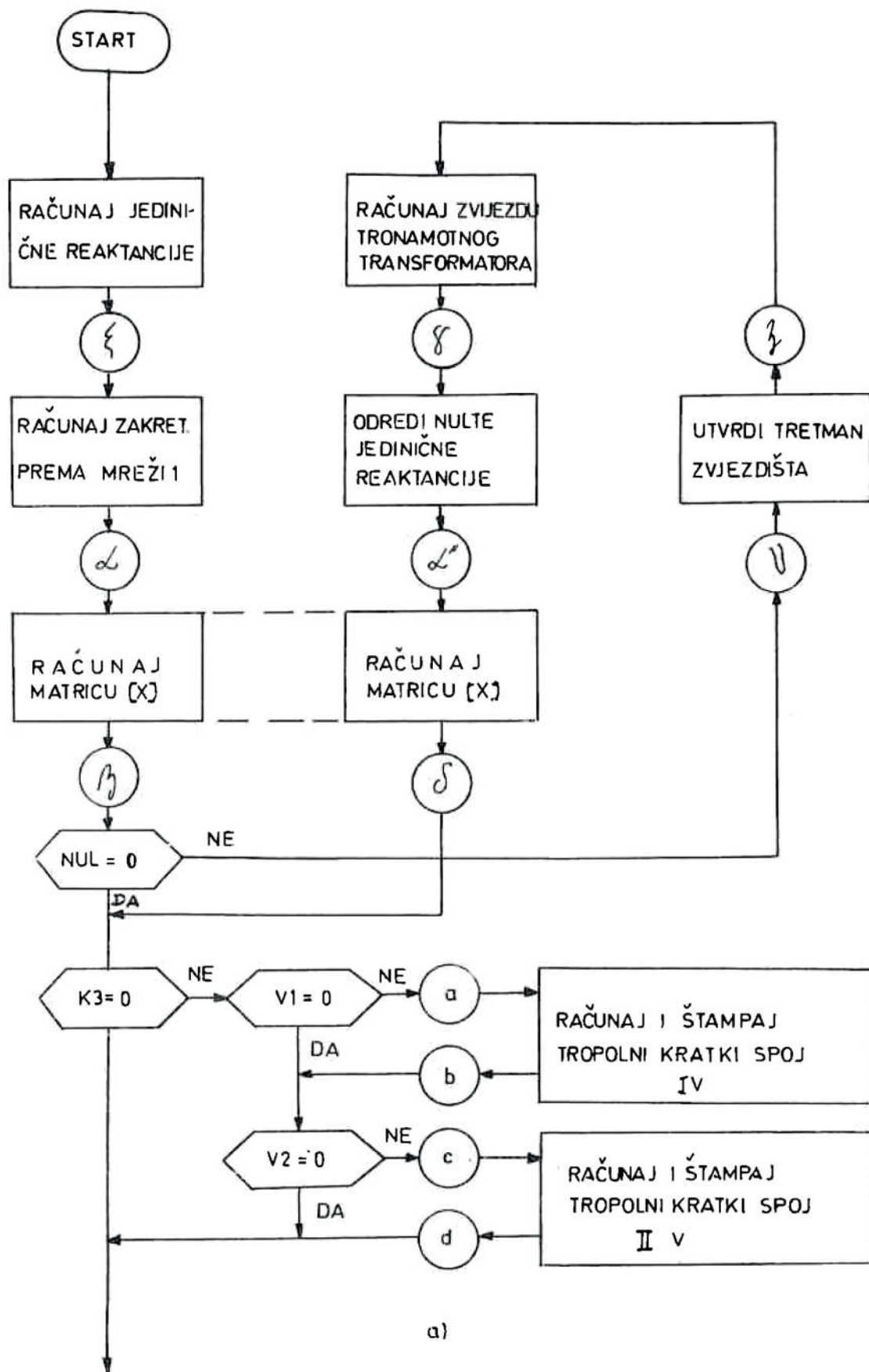
Namjena programa "UKSX" je proračun kratkog spoja u visokonaponskoj mreži. Program se oslanja na matematski model opisan u 3.1.4.3.

3.1.5.1 Organizacija proračuna

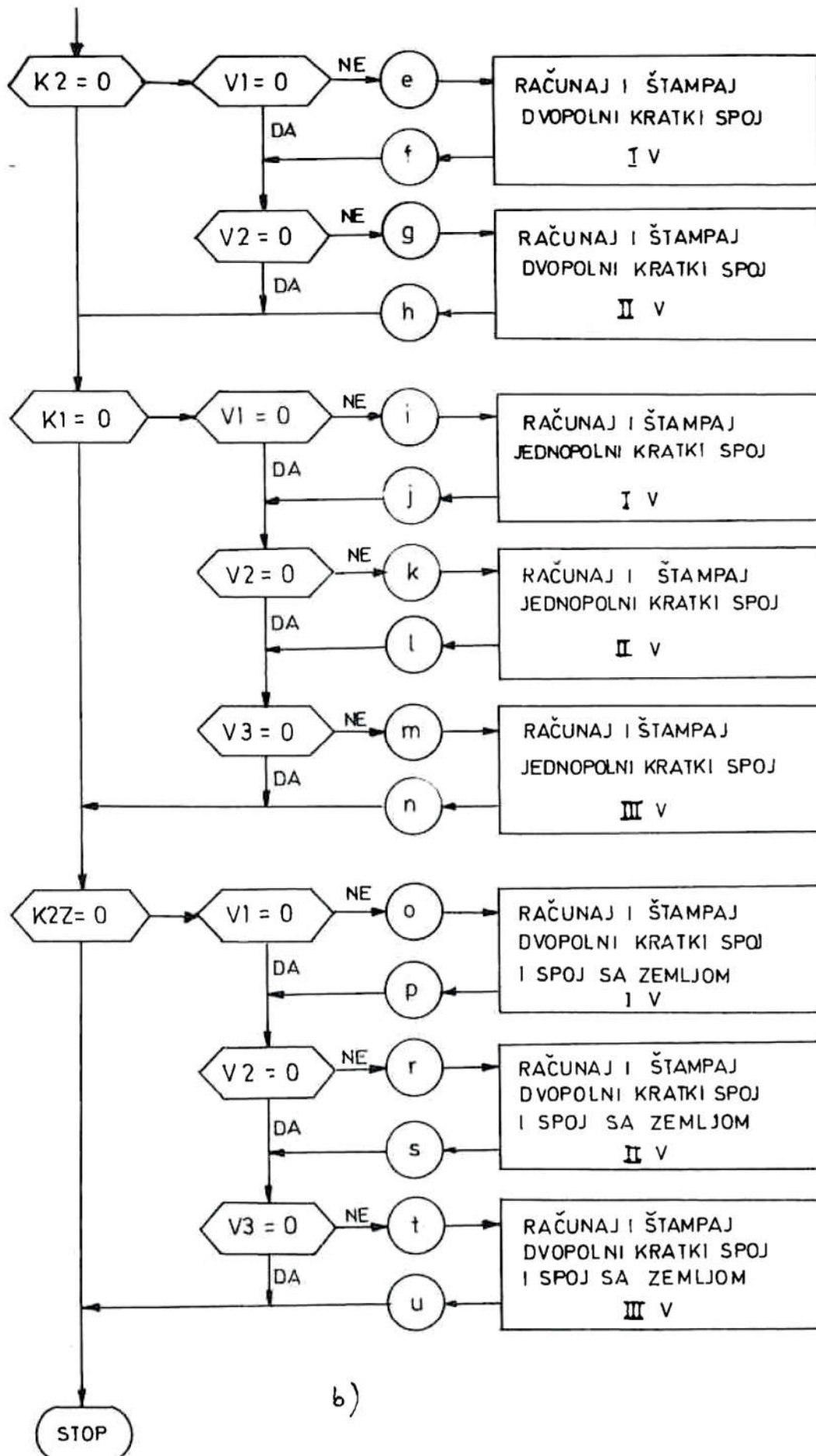
Tok proračuna po programu "UKSX" najbolje je pratiti na blok dijagramu toka (sl.155). Iz učitanih podataka prvo se izračunaju stvarne reaktancije, a zatim se računaju bazne vrijednosti. Jedinične reaktancije se računaju kao omjer stvarnih i baznih. Slijedi računanje matrice $[X]$ direktnog sistema, koja je identična s matricom $[X]$ inverznog sistema, jer računamo subtranzientni period.

Matrica $[X^0]$ računa se samo onda, ako se mora vršiti proračun kratkog spoja, kod kojega se razvija nulta komponenta struje. Reaktancije nultog sistema dobiju se iz reaktancija direktnog sistema, a za generatore i vodove postoji mogućnost da budu i zadane. Ako za generator nulta reaktancija nije zadana, to znači da je generatoru zvijezdište izolirano. Mogućnost zadavanja nulte reaktancije generatora neophodna je, kada se dio mreže uzima u račun preko pojednostavljenog ekvivalenta.

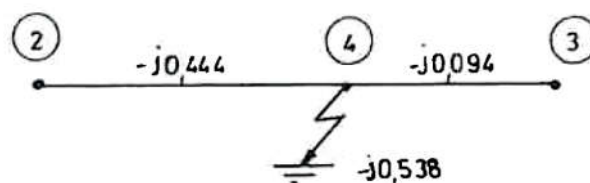
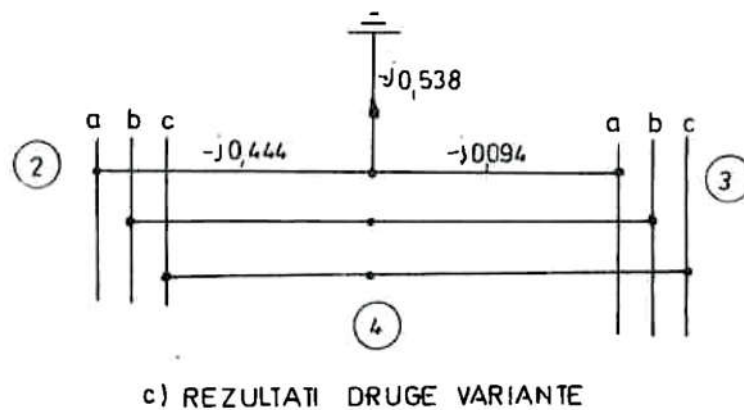
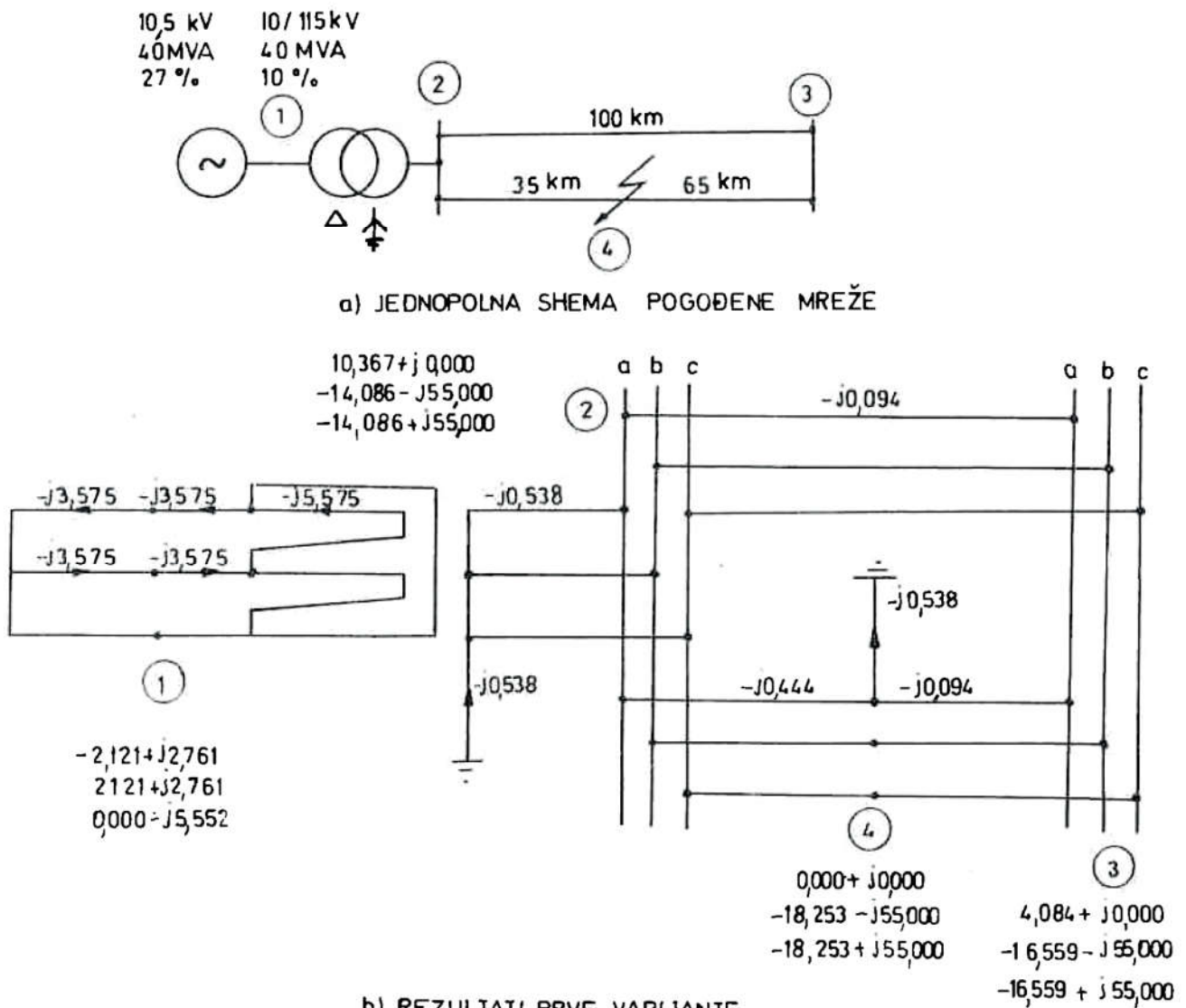
Za transformatore je predviđeno da se nulte reaktancije izvedu iz direktnih reaktancija i one se ne zadaju.



Slika 155 - Blok dijagram toka programa "UKSX"



Slika 155 - Blok dijagram toka programa UKSX"



Slika 156 - Varijante programa "UKSX"

Nakon sredjivanja nultih reaktancija slijedi računanje matrice $[X^0]$ i tako je sve spremno za proračun kratkog spoja. Mogu se računati vrste kratkog spoja po želji i to svaka u više varijanata.

Po prvoj varijanti dobijemo kompletan proračun struja i napona u cijeloj mreži ili u bilo kojoj odabranoj grani ili čvoru i to posebno za svaku fazu. Po drugoj varijanti računa se samo struja na mjestu kratkog spoja i raspodjela faznih struja kroz vodove neposredno vezane na mjesto kratkog spoja. Prva i druga varijanta predviđene su za sve vrste kratkog spoja.

Treća varijanta predviđena je samo za jednopolni kratki spoj i dvopolni kratki spoj sa spojem sa zemljom. Po ovoj varijanti računa se trostruka nulta komponenta struje na mjestu kratkog spoja i njezina raspodjela na vodove neposredno vezane uz mjesto kratkog spoja. Na sl.156 pokazani su na maloj mreži rezultati svih triju varijanata.

3.1.5.2 Pripremni dio programa

Računalo izvodi sve proračune u jediničnim vrijednostima. Međutim, računalu se podaci zadaju u vrijednostima kakvim se normalno raspolaže. To su nazivni naponi strojeva, procentualna reaktancija odnosno napon kratkog spoja i nazivne snage. Za vod zadajemo reaktanciju cijelog voda u omima. Iz ovih podataka računalo treba da izračuna jedinične vrijednosti potrebne za proračun.

Prijelaz sa apsolutnih na jedinične vrijednosti izvodi se preko osnovnih (baznih) vrijednosti. Zato je potrebno odabrati i zadati osnovnu (baznu) snagu, koja onda vrijedi za cijelu mrežu i osnovni (bazni) napon jednog naponskog nivoa. Da bi računalo sve ostalo izradilo samo, potrebno je uz topologiju mreže i uz podatke elemenata mreže zadati još i brojeve mreža ostalih naponskih nivoa uz informaciju u kojoj se mreži nalazi pojedini čvor.

Mrežu treba podijeliti na mreže istog naponskog nivoa. Mreže istog naponskog nivoa, koje su povezane nekom drugom mrežom, smatraju se raznim mrežama. Sada se mreže numeriraju.

Nužno je da se sistemi zaključuju, jer drukčije nije predviđeno, što znači da svi transformatori s kojima su dvije mreže povezane moraju imati isti prijenosni omjer.

Broj 1 treba da dobije mreža, po kojoj smo odabrali osnovni napon U_{B1} . Napon U_{B1} ujedno je i napon, za koji pretpostavljamo da ga je ta mreža imala u momentu nastanka kratkog spoja.

U programima se računa da je jedinični napon $v_{(n)} = 1$, što znači da je

$$\frac{U_{(n)1}}{U_{B1}} = \frac{V_{(n)1}}{V_{B1}} = 1 \quad 3-67$$

Pošto je u programu ugrađeno da je $v_{(n)} = 1$, a U_{B1} je odabran, to se veličinom U_{B1} određuje napon praznog hoda zdrave mreže i obratno.

Odabrani napon U_{B1} određuje bazne napone ostalih dijelova mreže, koji su jednaki naponima praznog hoda u momentu nastanka kratkog spoja. Bazni naponi dijelova mreže računaju se koristeći prijenosne omjere transformatora koji ih povezuju.

Bazna snaga i bazni napon mreže 1 su ulazni podatak. Nakon što su izračunate stvarne vrijednosti, računaju se bazne iz prijenosnih omjera transformatora. Kako računalo uzima mreže po rednom broju, to se ne smije dogoditi da slijedeća mreža nema neposrednu vezu ni s jednom mrežom kojoj su već izračunate osnovne vrijednosti odnosno s mrežom manjeg rednog broja.

Numeriranje čvorova neovisno je o numeriranju mreža i podliježe jedino uvjetima metode korak po korak (vidi "Mreže 1", 9.4.4).

Posebnu poteškoću predstavlja obuhvaćanje programom transformatora raznih grupa spoja i izvedbe (dvonamotnih, tronamotnih i autotransformatora). Trebalo je pronaći način, da se stroju kaže ne samo koji je transformator, nego i kako je taj transformator vezan na mrežu. Pri tome je broj zadanih podataka morao biti što manji.

Problem je riješen tako, da svaka grupa spoja ima svoju šifru, a svaki broj u šifri znači neki određeni spoj namotaja. Kod dvonamotnih i tronamotnih transformatora je usvojeno, da je oznaka za

trokut broj 2, specijalno za autotransformatore s tercijarom broj 3. Za spoj namotaja u zvijezdi bez uzemljenja šifra je nula, a za uzemljenu zvijezdu jedinica.

Na opisani način se za dvonamotne transformatore mogu ispisati slijedeće grupe spoja:

Grupa spoja	00 01 10 22	02 20	01 10	12 21	11
Šifra	22	20	01	21	11

Grupe spoja 00, 22 i 01 odnosno 10 izvedbe sa tri jednofazna transformatora vode se pod šifrom spoja SP = 22. Grupa 02 i 20 vodi se pod šifrom spoja SP = 20, grupa 21 i 12 pod šifrom spoja SP = 21, grupa 01 i 10 pod šifrom spoja SP = 01. Tako su dvonamotni transformatori obuhvaćeni u 5 grupa. Kako vidimo u ovih 5 grupa nisu obuhvaćeni transformatori sa namotajem u spoju cik-cak, niti autotransformatori. Ukoliko se pokaže potreba i ovi se transformatori mogu uključiti u program preko svoje posebne šifre spoja.

Na slici 157 pokazane su šifre spoja za dvonamotne transformatore sa definiranim pozitivnim smjerovima struja.

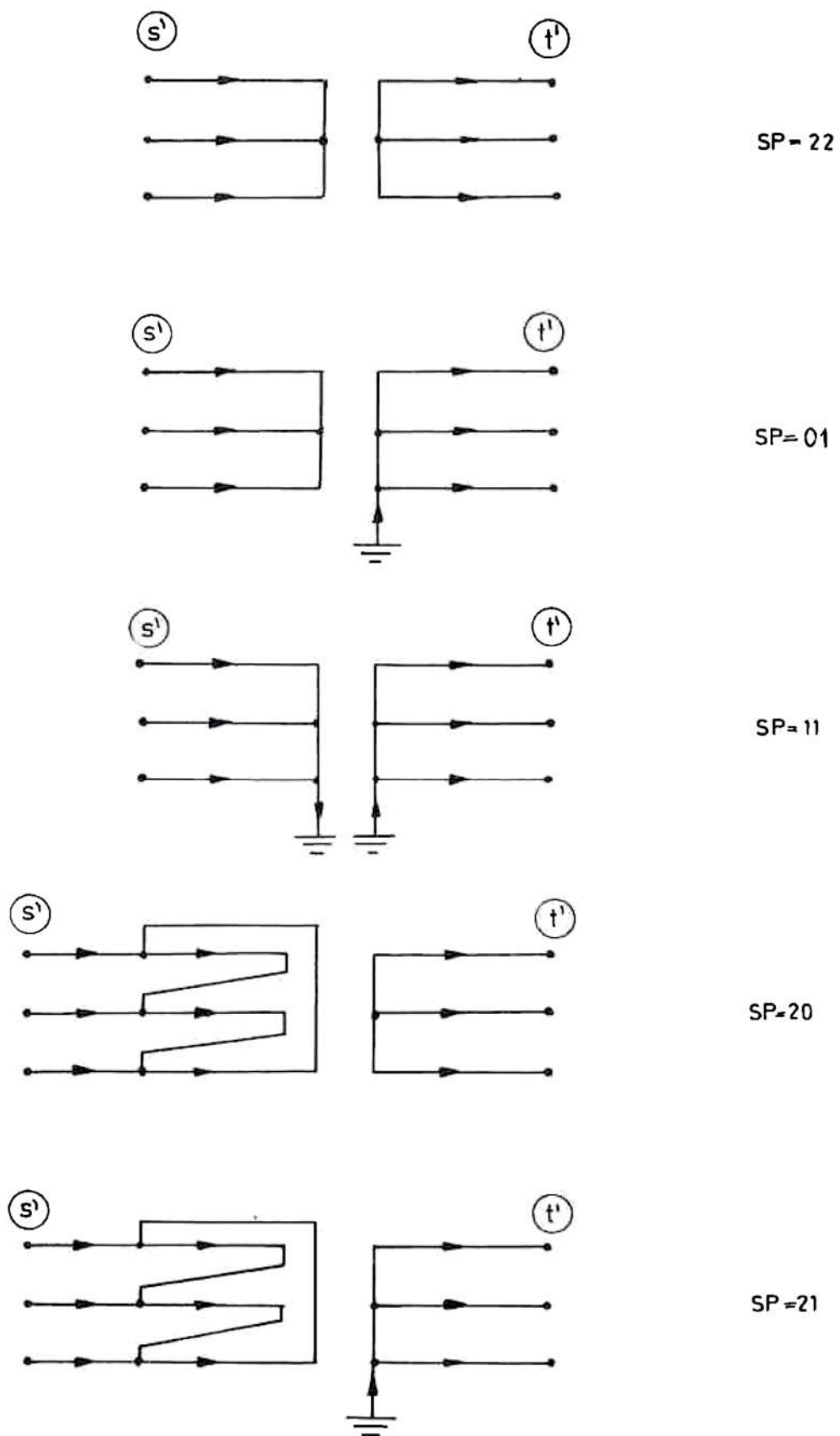
Isti je postupak i za tronamotne transformatore. Kako se svi spojevi transformatora ne pojavljuju jednako često u mreži, odabrani su samo oni spojevi, koji su najvjerojatniji. I ovdje nema poteškoća da se neki transformator uključi u program, kad se za to ukaže potreba.

Za tronamotne transformatore formirane su slijedeće šifre spoja:

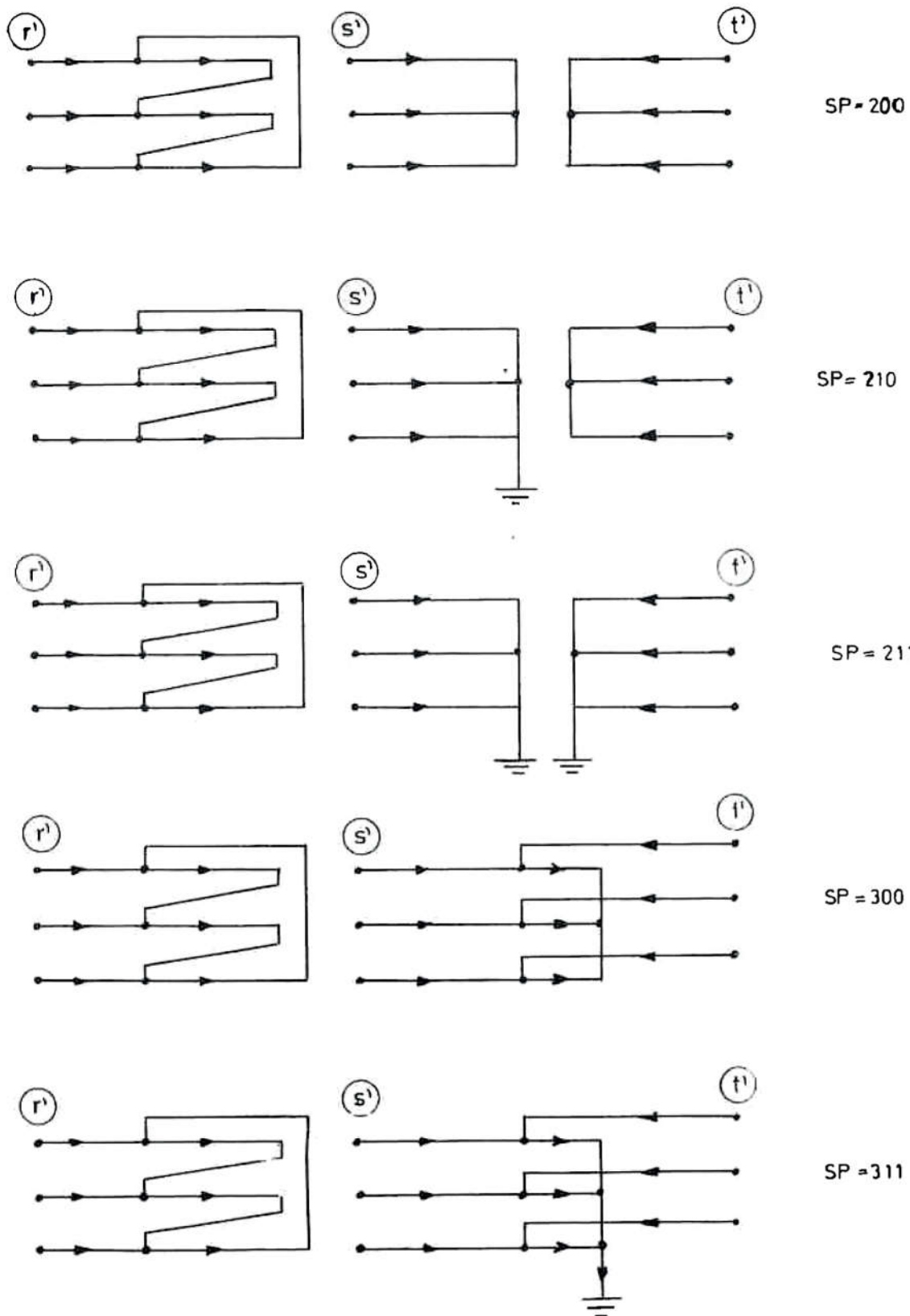
Grupa spoja	200	210 201	211	300	311
Šifra	200	210	211	300	311

Tronamotni transformatori grupirani su također u 5 šifara spoja. Ovdje su uključeni autotransformatori s tercijarom. Grupa spoja 210 i 201 vodi se pod šifrom spoja 210.

Na slici 158 pokazane su šifre spoja za tronamotne transformatore.



Slika 157 - Pozitivni smjerovi struja ovisno
o šifri spoja transformatora



Slika 158 - Pozitivni smjerovi struja ovisno o šifri spoja transformatora

Uz šifru spoja moramo zadati za dvonamotne transformatore brojeve čvorova s' i t' , odnosno za tronamotne transformatore r' , s' i t' . Broj t' je broj čvora na koji je vezan namotaj transformatora, čija se šifra nalazi u SP na mjestu jedinica, broj s' je broj čvora na koji je vezan namotaj transformatora čija se šifra nalazi u SP na mjestu desetica, r' je broj čvora na koji je vezan namotaj transformatora, čija se šifra nalazi u SP na mjestu stotica. Na sl.159 je pokazano za dva slučaja kako su povezani međusobno šifra spoja SP i brojevi čvora r' , s' i t' .

Na slici 160 nalaze se transformatori, koji su obuhvaćeni sa 10 šifara spoja ugrađenim u program.

Tronamotni transformator zadan je sa naponima kratkog spoja e_{k12} , e_{k13} i e_{k23} , nazivnim snagama S_{n1} , S_{n2} i S_{n3} , te nazivnim naponima U_{n1} , U_{n2} i U_{n3} . Kada su nam poznate prolazne snage, označimo ih sa S_{12} , S_{13} i S_{23} , pa onda njih uzimamo za računanje reaktancija. U slučaju da su nam poznate samo nazivne snage, moramo za prolaznu snagu uzeti manju nazivnu snagu.

$$S_{12} = S_{n1} \quad \text{za} \quad S_{n1} < S_{n2}$$

$$S_{12} = S_{u2} \quad \text{za} \quad S_{n2} < S_{n1}$$

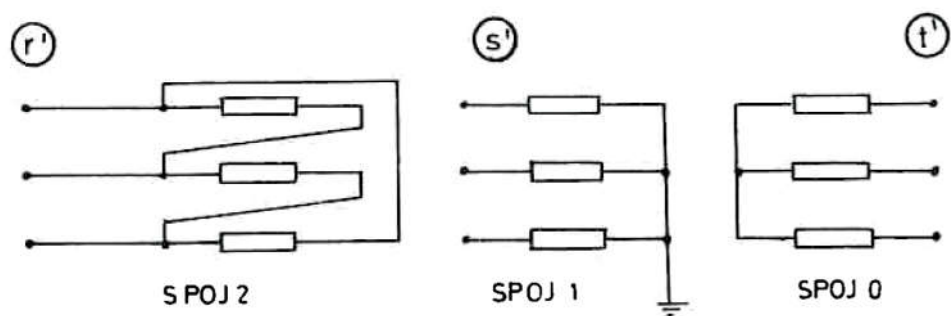
Po poznatim formulama izračunamo X_1 , X_2 i X_3 , tj. reaktancije zvijezde tronamotnog transformatora

$$X_1 = \frac{1}{2} (X_{12} + X_{13} - X_{23}) \quad 3-68a$$

$$X_2 = \frac{1}{2} (X_{12} + X_{23} - X_{13}) \quad b$$

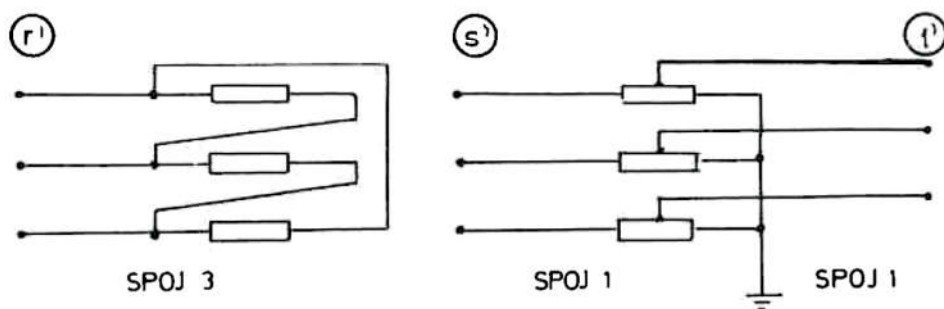
$$X_3 = \frac{1}{2} (X_{13} + X_{23} - X_{12}) \quad c$$

Ekvivalentna shema tronamotnog transformatora ima oblik zvijezde, pa donosi čvor, koji u mreži stvarno ne postoji. Zato se u ovom računu zvijezda transfigurira u trokut, čije su reaktancije X'_{12} ,



ČVOROVI	r'	s'	t'
SPOJ NAMOTAJA	2	1	0

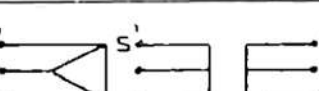
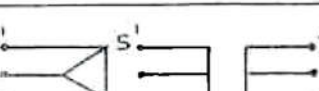
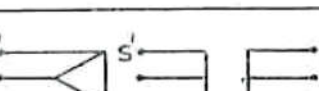
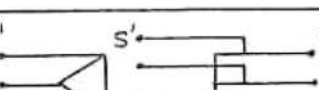
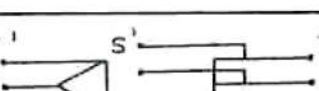
a) GRUPA SPOJA SP=210



ČVOROVI	r'	s'	t'
SPOJ NAMOTAJA	3	1	1

b) GRUPA SPOJA SP=311

Slika 159 - Veza šifre spoja SP i broja čvora mreže r' , s' i t'

SPOJ	SP	GRUPE SPOJA
	22	Yy0, Yy6
	01	Yy0, Yy6
	11	Yy0, Yy6
	20	Yd1, Yd5, Yd7, Yd11
	21	Yd1, Yd5, Yd7, Yd11
	200	Yy0d1, Yy0d5, Yy0d7, Yy0d11 Yy6d1, Yy6d5, Yy6d7, Yy6d11
	210	Yy0d1, Yy0d5, Yy0d7, Yy0d11 Yy6d1, Yy6d5, Yy6d7, Yy6d11
	211	Yy0d1, Yy0d5, Yy0d7, Yy0d11 Yy6d1, Yy6d5, Yy6d7, Yy6d11
	300	Yy0d1, Yy0d5, Yy0d7, Yy0d11
	311	Yy0d1, Yy0d5, Yy0d7, Yy0d11

Slika 160 - Grupe spoja transformatora obuhvaćenih
sa 10 šifara spoja SP

x'_{13} i x'_{23} .

Sredjene formule glase:

$$x'_{12} = x_{12} - \frac{1}{2} \frac{x_{12}^2 - (x_{13} - x_{23})^2}{x_{12} - x_{13} - x_{23}} \quad 3-69a$$

$$x'_{13} = x_{13} - \frac{1}{2} \frac{x_{13}^2 - (x_{12} - x_{23})^2}{x_{13} - x_{23} - x_{12}} \quad b$$

$$x'_{23} = x_{23} - \frac{1}{2} \frac{x_{23}^2 - (x_{12} - x_{13})^2}{x_{23} - x_{12} - x_{13}} \quad c$$

Iz reaktancija direktnog sistema tronamotnog transformatora računaju se reaktancije nultog sistema. Nulte reaktancije se računaju iz ekvivalentne sheme prikazane u obliku zvijezde, pa je zato potrebno poznavati i ove reaktancije. Reaktancije zvijezde se računaju iz već ranije izračunatih reaktancija ekvivalentne sheme u obliku trokuta poznatom pretvorbom.

Ekvivalentna shema nultog sistema u obliku zvijezde također se pretvara u ekvivalentnu shemu u obliku trokuta. Na slici 161 je pokazano kako teče ova transformacija i koji su odnosi sa zadanim veličinama.

U ovaj program su uključeni i autotransformatori s tercijarnim namotajem, što je važno, ako je na tercijar priključena neka mreža ili element mreže. Račun se provodi na isti način kao s tronamotnim transformatorima.

Rezultate proračuna treba u određenom momentu preračunati na stvarnu mrežu.

Tretman zvijezdišta neke mreže ne zađaje se računalu posebno. Tretman zvijezdišta sadržan je u šifri spoja SP transformatora i u nultoj reaktanciji generatora. Treba samo odrediti u kojoj se mreži nalazi čvor vezan za uzemljeni namotaj transformatora, odnosno u kojoj se mreži nalazi uzemljeni generator.

Svaka mreža dobiva oznaku $z_b = 0$ ako je izolirana, a $z_b = 1$ ako je kruto uzemljena.

$$e_{k12} = 10\%$$

$$U_{n1} = 220 \text{ kV}$$

$$S_{n1} = 75 \text{ MVA}$$

$$e_{k23} = 5\%$$

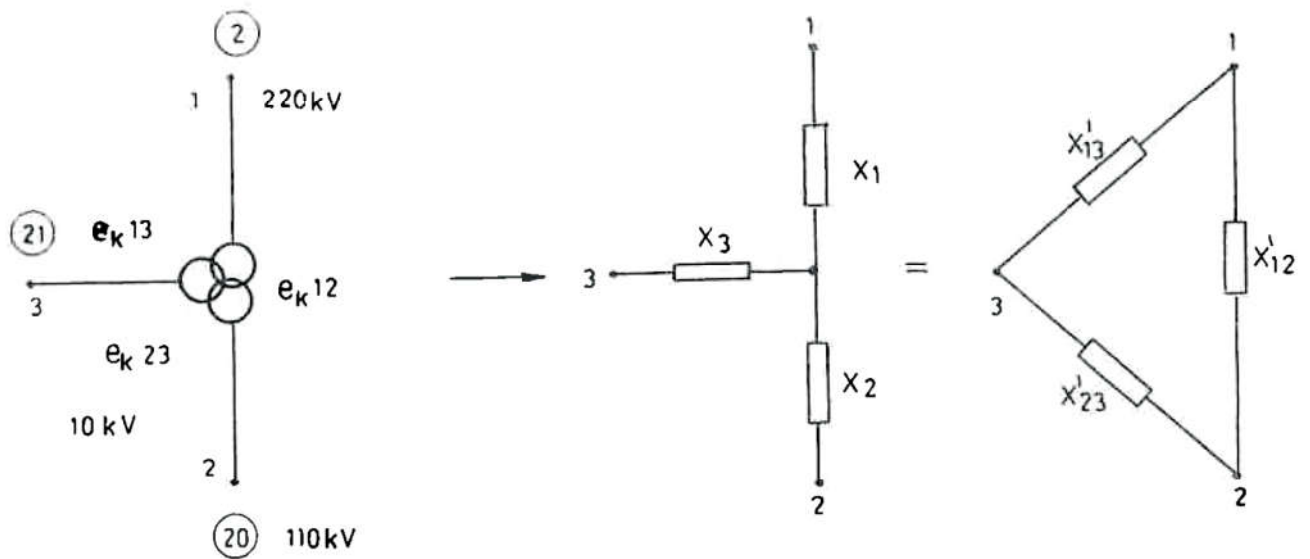
$$U_{n2} = 110 \text{ kV}$$

$$S_{n2} = 60 \text{ MVA}$$

$$e_{k13} = 6\%$$

$$U_{n3} = 10 \text{ kV}$$

$$S_{n3} = 25 \text{ MVA}$$



DIO TABLICE PODATAKA

g	s	t	b(s)	b(t)	x%	U _{MS}	U _{nt}	S _n	T _R
·									
31	2	20	5	5	10	220	110	50	1
32	20	21	6	7	5	110	10	25	2
33	2	21	5	7	6	220	10	25	3
·									
·									

Slika 161 - Ekvivalentna shema tronamotnog transformatora
i pripadni dio liste podataka

Grane se ispituju redom. Ako je $SP = 0$ znači da grana nije transformator, ako je $s \neq 0$ znači da je vod. Za granu kod koje je $s = 0$ ispita se, da li je $X^0 = 0$, a ako nije, Z_b mreže dobija jedinicu.

Grane sa $SP \neq 0$ su transformatori. Ispituje se, da li je SP šifra transformatora koji ima uzemljeno zvijezdište, pa onda Z_b mreže dobije jedinicu.

Priprema ulaznih podataka je vrlo jednostavna za sve kartice, osim za kartice grana, preko kojih se задаje izvedba mreže. Zato je potrebno posebnu pažnju posvetiti upravo ovim karticama, kako ne bi došlo do nesporazuma.

Želja je bila da se s malim brojem kartica zada što veći broj podataka o mreži. Zato je niz kartica grana gusto ispunjen i podliježe raznim pravilima koja treba znati i točno ispuniti. Najbolje je listu grana načiniti posebno i tek onda prenijeti podatke na fortran formule.

Pogledajmo jednu takvu tablicu (sl.162). U prvom stupcu je redni broj grane. U drugom i trećem su brojevi čvorova s i t koje ta grana povezuje. Računalo uzima grane redom kako su poredane kartice, a ove moraju biti tako poredane, da njihovo dodavanje mreži odgovara metodi korak po korak. Osim toga, tri grane tronamotnih transformatora moraju biti poredane jedna iza druge.

U slijedećim rubrikama nalaze se brojevi mreža, u kojima se nalaze čvorovi s i t , a odmah do ovih reaktancije. Reaktancije mogu biti zadane u apsolutnim vrijednostima, a za generatore i transformatore još i procentualno. Apsolutna reaktancija računa se iz izraza

$$X = \frac{X\% U_{nt}^2}{100 S_n}$$

a ako nazivna snaga S_n nije zadana, ovaj se račun preskače i zadana reaktancija uzima se za apsolutnu.

Dalje su zadani nazivni naponi: za generatore jedan nazivni napon, a za transformatore nazivni napon za svaki namotaj. Snage, ako se zadaju, zadaju se samo za transformatore i generatore. Za dvonamo-

tni transformator zadaje se jedna nazivna snaga, a za tronamotni tri snage i to prolazne. U rubrici TR brojevi 1, 2 i 3 kazuju da se radi o granama jednog tronamotnog transformatora i prema 1.2.3 te grane program posebno tretira.

Ostali dio tablice interesantan je za nesimetrične kratke spojeve. Kut Δ određuje fazno zakretanje mreže većeg broja prema mreži manjeg broja. U ovom proračunu nema mreža koje se ne zaključuju i o tome treba voditi računa, te izvršiti potrebne korekcije. Po programu kut zakretanja neke mreže prema mreži 1 traži se do prvog transformatora kojemu je jedan čvor u dotičnoj mreži, a drugi čvor u mreži manjeg broja.

Rubrike r' , s' , t' vezane su uz šifru spoja transformatora SP, te s ovom i kutem Δ daju sve podatke o transformatoru: grupa spoja, tretman zvijezdišta i način na koji je transformator vezan na mrežu.

Zadnja je rubrika X^0 . Za vodove i generatore moguće je zadati nultu reaktanciju u omima. Tada se po programu podrazumjeva da je generator kruto uzemljen (ekvivalent za dio mreže). Nultu reaktanciju generatora nije moguće drukčije zadati. Kada je za vod zadana nulta reaktancija onda će se ova uzeti u račun, a ako nije zadana, računat će se iz direktnih reaktancija prema relaciji

$$X_{s-t}^0 = 3 X_{s-t} \quad 3-70$$

Nulti sistem komponenata zadaje posebne poteškoće. Nije dovoljno odrediti reaktancije nultog sistema svakog elementa mreže, nego je potrebno iz nultih reaktancija formirati nulti sistem komponenata. Pri tome je važno:

- brojevi čvorova nultog sistema moraju biti jednaki odgovarajućim čvorovima direktnog sistema,
- numeriranje nultog sistema mora zadovoljavati uvjete metode korak po korak za formiranje matrice vlastitih i međusobnih impedancija čvora,
- treba težiti da nulti sistem komponenata ima najmanji mogući broj čvorova. To znači, da nije poželjno da se u nultom siste-

mu pojavljuju grane beskonačne impedancije.

Reaktancije nultog sistema za vodove i generatore se zadaju ili se računaju iz reaktancija direktnog sistema. Reaktancije nultog sistema transformatora ne mogu se zadati posebno, nego se po ovom programu moraju izvesti iz reaktancije direktnog sistema. Računalo ovo izvodi tako, da analizira granu po granu direktnog sistema. Tako dobijemo prvi niz nultih reaktancija.

Ako grana nije transformator, onda je vod ili generator. Zatim se ispituje, da li je vod ili generator. Ako je generator, onda nema nultu reaktanciju, ukoliko ova nije specijalno zadana, a ako je vod, onda se ne uključuje njegova nulta reaktancija, ukoliko se vod ne nalazi u uzemljenoj mreži.

Ako je grana transformator, ispituje se da li je SP takav spoj, koji donosi nultu reaktanciju. U ovisnosti o spoju formira se nulta reaktancija. Ovdje je odmah lako uočljivo od kolike su važnosti podaci r' s' t' .

Da li će se u elementu mreže moći razviti nulta komponenta struje i napona, ovisi podjednako o tri uvjeta: o karakteru elementa, o tretmanu zvjezdišta i o načinu povezanosti s dijelom mreže u kojoj je kratki spoj.

Konačna lista direktnih (inverznih) jediničnih reaktancija poređana je onako, kako smo zadali ulazne podatke. Slijedi formiranje matrice direktnog (inverznog) sistema vlastitih i međusobnih reaktancija čvora u metodi korak po korak. Nakon formiranja ove matrice računalo može računati trolepolni i dvopolepolni kratki spoj.

Za računanje jednoplepolnog i dvoplepolnog kratkog spoja sa spojem sa zemljom potrebno je još formirati matricu nultog sistema iz reaktancija nultog sistema.

Prvi niz nultih reaktancija ne odgovara uvjetima metode korak po korak. Iz prvog niza nultih reaktancija formira se sredjeni niz nultih reaktancija. Sada se formira matrica vlastitih i međusobnih reaktancija čvora nultog sistema.

Za računanje jednoplepolnog kratkog spoja i dvoplepolnog kratkog spoja sa spojem sa zemljom računalo koristi matrice direktnog i nultog

sistema i reaktancije elemenata mreže direktnog i nultog sistema.

3.1.5.3 Računanje kratkog spoja

Tropolni kratki spoj je jedini simetrični kvar. Za ovaj kratki spoj računaju se struje i naponi samo za fazu a, koja je u ovom slučaju referentna. Naponi i struje ostalih faza dobiju se jednostavnim množenjem sa a^2 za fazu b, odnosno množenjem sa a za fazu c.

Ostali kratki spojevi su nesimetrični. Relacije 3-24 do 3-66 vrijede za mrežu u kojoj je kratki spoj. Proračun struja i napona u ostaloj mreži traži da se uzme u obzir utjecaj transformacije.

Kut faznog zakretanja struja i napona direktnog, inverznog i nultog sistema istraživane mreže prema pogodjenoj mreži jednak je zbroju kuteva, koje vrše transformatori od pogodjene mreže do istraživane mreže, a označit ćemo ga sa Δ_{bm} . Prema tome je:

$$\Delta_{bm} = \sum \Delta \quad 3-71$$

Δ - fazno zakretanje koje vrši transformator

Δ_{bm} - fazno zakretanje mreže m prema pogodjenoj mreži

Relacije, koje povezuju struje i napone faza sa strujama i naponima komponenata, proširit ćemo u istraživanoj mreži kako slijedi:

$$\bar{I}_{s-t}^a = h \bar{I}_{s-t}^0 + \bar{I}_{s-t}^1 + \bar{I}_{s-t}^2 \quad 3-72a$$

$$\bar{I}_{s-t}^b = h \bar{I}_{s-t}^0 + a^2 \bar{I}_{s-t}^1 e^{j\Delta_{bm}} + a \bar{I}_{s-t}^2 e^{-j\Delta_{bm}} \quad b$$

$$\bar{I}_{s-t}^c = h \bar{I}_{s-t}^0 + a \bar{I}_{s-t}^1 e^{j\Delta_{bm}} + a^2 \bar{I}_{s-t}^2 e^{-j\Delta_{bm}} \quad c$$

$$\bar{V}_i^a = V_{(n)} e^{j\Delta_{bm}} + h \bar{V}_{if}^o + \bar{V}_{if}^1 e^{j\Delta_{bm}} + \bar{V}_{if}^2 e^{-j\Delta_{bm}} \quad 3-73a$$

$$\bar{V}_i^b = a^2 V_{(n)} e^{j\Delta_{bm}} + h \bar{V}_{if}^o + a^2 \bar{V}_{if}^1 e^{j\Delta_{bm}} + a \bar{V}_{if}^2 e^{-j\Delta_{bm}} \quad b$$

$$\bar{V}_i^c = a V_{(n)} e^{j\Delta_{bm}} + h \bar{V}_{if}^o + a \bar{V}_{if}^1 e^{j\Delta_{bm}} + a^2 \bar{V}_{if}^2 e^{-j\Delta_{bm}} \quad c$$

m je broj mreže u kojoj se nalazi čvor s ili čvor t. Ako se radi o vođu, onda su oba čvora u mreži m, a ako se radi o generatoru, onda je s nula sistema, a čvor t se nalazi u mreži m. Kod transformatora nalaze se čvorovi s i t u raznim mrežama. Faktor h iznosi 0, +1 ili -1 i posebno se istražuje.

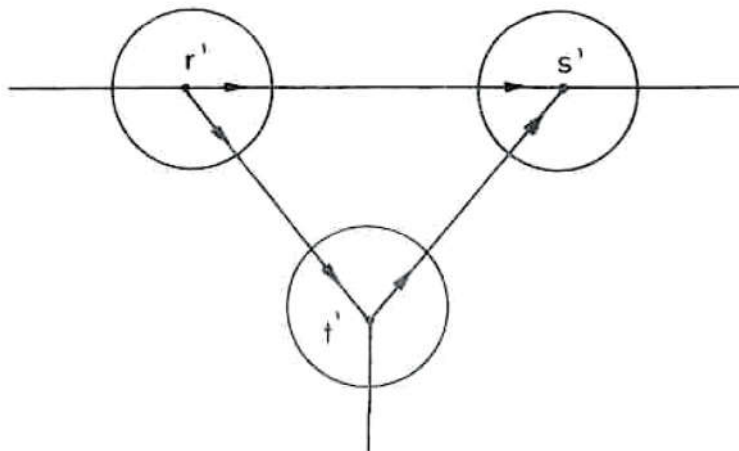
Radi jednostavnijeg računanja uvedeni su za svaki nesimetrični kratki spoj tzv. faktori zakretanja. Faktori zakretanja jednostavno koriste, koliko je to moguće, jednakost ekvivalentnih shema mreža direktnog i inverznog sistema.

U računu tropolnog kratkog spoja po prvoj varijanti računa se najprije struja na mjestu kratkog spoja, a zatim struja u svim granama mreže. Ukoliko je grana transformator, računa se struja na primarnoj i sekundarnoj strani. Tronamotni transformator se ne obrađuje posebno, pa se za njega dobije 6 podataka. Točne struje se dobiju jednostavnim zbrajanjem dviju struja na istoj strani transformatora, kako je objašnjeno na sl.163.

Nakon računanja struja računaju se naponi.

U računu tropolnog kratkog spoja po drugoj varijanti računa se najprije struja na mjestu kratkog spoja, a zatim struja u granama, koje su vezane za mjesto kratkog spoja. U ovoj se varijanti tronamotni transformatori tretiraju posebno, kako bi se dobila samo jedna struja, koju u čvor daje tronamotni transformator. Druga varijanta trovolnog kratkog spoja jedan je od najvažnijih proračuna i najčešće se sprovodi.

Po prvoj varijanti računa dvopolnog kratkog spoja se nakon računanja i štampanja vrijednosti struje kratkog spoja na mjestu kratkog spoja prelazi na računanje struja u cijeloj mreži. Radi



Slika 163 - Ekvivalentna shema tronamotnog transformatora pretvorena u oblik trokuta; zaokružene su po dvije (od šest izračunatih) struje, koje se zbrajaju u konačni rezultat

toga je potrebno znati kut faznog zakretanja mreža prema mreži u kojoj je kratki spoj. Pomoću kuteva zakretanja računaju se faktori zakretanja f_m^a , f_m^b , f_m^c i f_m^c , koji za ovaj kratki spoj pomnoženi s $(-j)$ postaju realne veličine, te faktori f_m^{a1} , f_m^{b1} i f_m^{c1} .

Sada dolazi računanje struja. Odmah se odvajaju transformatori od vodova i generatora. Međutim, dvonamotni transformatori u spoju zvijezda - zvijezda vraćaju se u programu u petlju za vod. Za njih se onda računa struja na strani s. Dvonamotni transformatori s jednim namotajem spregnutim u trokut računaju se posebno.

Struja trokuta računa se iz struje namotaja u zvijezdi, a predznak joj ovisi o grupi spoja i o faktoru H . Za transformatore u spoju Yd5 i Yd7 uzima se $H = -1$, a za transformatore u spoju Yd1 i Yd7 uzima se $H = 1$. Zato se kut transformatora Yd5 i Yd7 mora zadati sa -150° odnosno sa $+150^\circ$.

Tronamotni transformatori se razlikuju samo po tome, da li su

autotransformatori ili ne. Kod ovih transformatora pojavljuju se, osim faktora H , još i faktori H'_t i H'_s , da bi se točno mogla izračunati struja u namotaju trokuta.

Na kraju slijedi računanje napona redom po svim čvorovima.

Druga varijanta računa dvopolnog kratkog spoja je dosta jednostavnija. U ovoj varijanti nisu potrebni ni kutevi ni faktori zakretanja, jer se traže rezultati samo za mrežu pogodjenu kratkim spojem. Odabiranje grana je isto kao kod trolnog kratkog spoja.

Po prvoj varijanti računa jednopolnog kratkog spoja se nakon računanja struje na mjestu kratkog spoja računaju kutevi zakretanja prema mreži u kojoj je kratki spoj i pomoću ovih faktori zakretanja pojedinih mreža. U ovom su kratkom spoju faktori f_m^a , f_m^b i f_m^c realne veličine. Struje se štampaju kao realne i treba ih naknadno množiti sa $(-j)$.

Kod računanja struja odvajaju se najprije transformatori. Zatim odvajamo vodove i generatore, koji se nalaze u mreži sa izoliranim zvijezdištem, te generatore kojima nije zadana nulta reaktancija. Ostaju vodovi i generatori kojima se računaju sve tri komponente struja. Za nultu komponentu važan je faktor h , kojim se određuje predznak. U ovu grupu elemenata mreže dovodi se i dvonamotni transformator u spoju zvijezda - zvijezda sa oba zvijezdišta uzemljena.

Ostali dvonamotni transformatori računaju se na sličan način. Ovdje se vodi računa o tome, da je kod spoja zvijezda-trokut nulta reaktancija vezana između čvora 0 i čvora t' . Dalje se pojavljuje i faktor H , kojim se definira utjecaj grupe spoja na struje namotaja trokuta.

Posebna grupa su tronamotni transformatori, kod kojih se donekle odvajaju transformatori u štednom spoju. Utvrđivanje grupe spoja nešto je kompliciranije, pa je bilo potrebno osim faktora H uvesti i faktore H'_s i H'_t , da bi se mogao provesti točan proračun struja u namotaju spojenom u trokut.

Na kraju se računaju naponi za sve čvorove.

U drugoј varijanti jednopolnog kratkog spoja se nakon računanja struje na mjestu kratkog spoja traže grane, koje su vezane s mjestom kratkog spoja. Razlikuju se vodovi i generatori, a od ovih generatori sa i bez nulte reaktancije. Jednopolni kratki spoj događa se samo u uzemljenoj mreži, pa se i grane vezane za mjesto kratkog spoja također nalaze u uzemljenoj mreži. Ovoj grupi pripada dvonamotni transformator u spoju Yy s oba zvijezdišta uzemljena.

Ostali dvonamotni transformatori dijele se na one, koji nemaju nulte komponente struje i na one kod kojih je to i_{0-k}^0 .

Tronamotni transformatori odvajaju se odmah. Prva grana tronamotnog transformatora ne mora uvijek biti vezana uz čvor k i ako transformator jeste. U tom slučaju vraćamo se za jednu granu natrag. Prema grupi spoja i tretmanu zvijezdišta, te namotaju vezanom uz k, različito računamo nultu komponentu struje.

Treća varijanta jednopolnog kratkog spoja računa struju kratkog spoja na mjestu kratkog spoja. Za razliku od druge varijante, gdje je neposredna raspodjela struje kratkog spoja računata po fazama, ovdje se računa neposredna raspodjela trostruke nulte komponente.

Tok proračuna dvopolnog kratkog spoja sa zemljom po I varijanti se odvija istim redom kao i kod I varijante jednopolnog kratkog spoja.

Na mjestu kratkog spoja računa se direktna, inverzna i nulta komponenta struje, a iz ovih struje faza i struja prema zemlji. Slijedi računanje kuteva zakretanja mreža prema mreži u kojoj je kratki spoj, a zatim računanje faktora zakretanja.

Transformatori se odmah odvajaju od vodova i generatora, za koje utvrđujemo, da li se nalaze u uzemljenoj ili neuzemljenoj mreži. Faktorom h utvrđuje se zakretanje nulte komponente, a faktorom f vraća se nulta komponenta struje u imaginarnu os. U ovoj grupi grana odnosno elemenata računaju se i transformatori u spoju Yy s oba zvijezdišta izolirana ili oba uzemljena.

Slijedeća grupa su dvonamotni transformatori u spoju zvijezda - trokut i transformator u spoju Yy s jednim uzemljenim zvijezdištem, evropske izbedbe. I ovdje se faktorom h određuje zakreta-

nje nulte komponente, a faktorom H utvrđuje smjer struje u namotaju trokuta ovisno o grupi spoja.

Tronamotni transformatori tretirani su sasvim posebno. Sada se opet prelazi na zvijezdu i za ovu se računaju direktna i inverzna komponenta struje. Nulta komponenta struje računa se posebno ovisno o grupi spoja i o tretmanu zvijezdišta. Za autotransformatore računa se posebno struje zajedničkog zamotaja. Račun struja u namoraju spojenom u trokut ovisi o grupi spoja i određuje se pomoću H , H'_t i H'_s kao i kod jednopolnog kratkog spoja.

Na kraju ove varijante računaju se naponi redom za sve čvorove.

Za drugu varijantu dvopolnog kratkog spoja sa spojem sa zemljom postupak je jednak kao kod jednopolnog kratkog spoja. Razlika je jedino u tome, da se računaju posebno direktna, a posebno inverzna komponenta struje i da su izrazi za struje faza drugačiji.

Kod treće varijante dvopolnog kratkog spoja sa spojem sa zemljom takodjer se ponavlja postupak kao kod jednopolnog kratkog spoja III varijante.

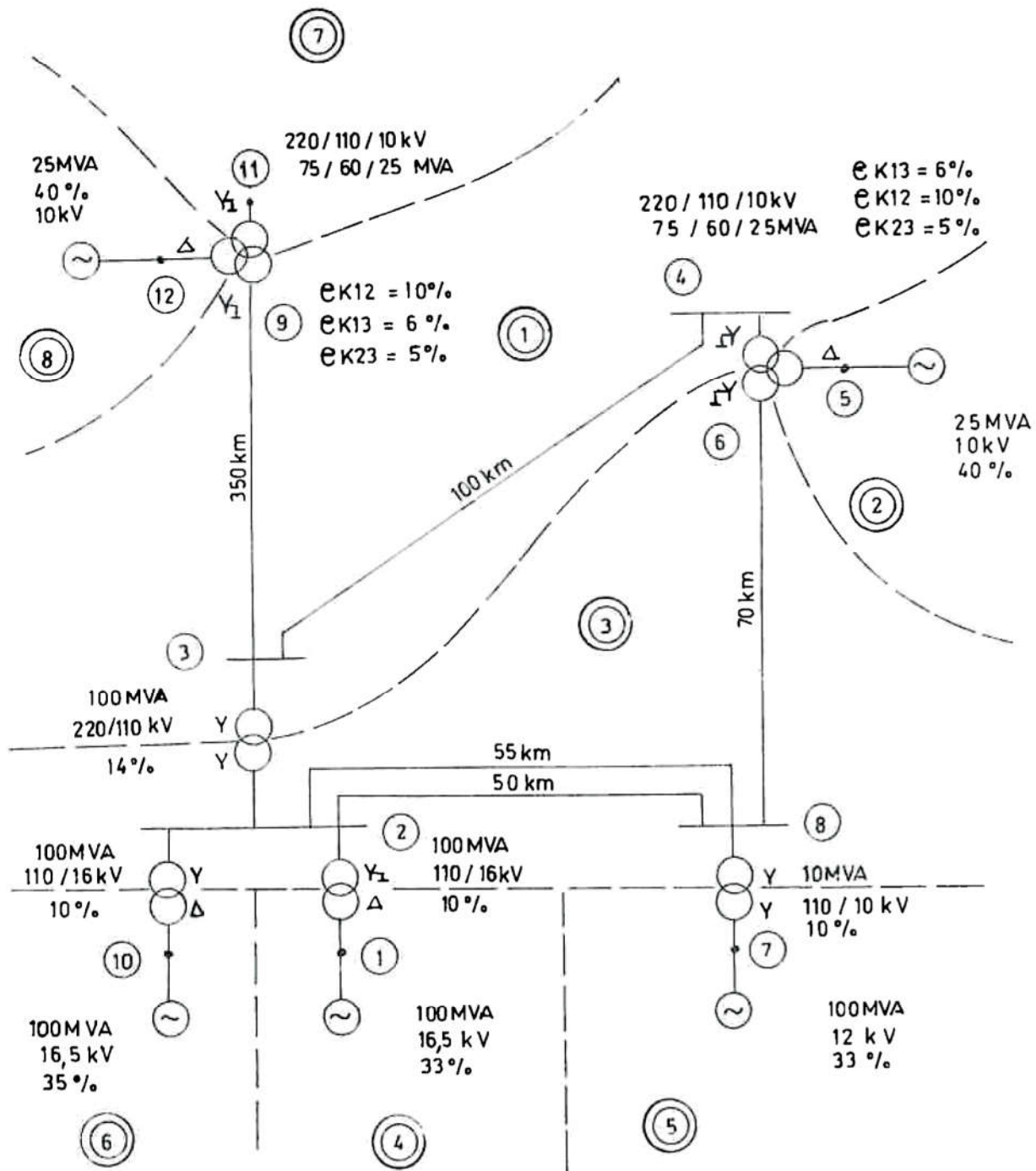
Primjer 3.4 Kroz numerički primjer pokazano je, na jednostavnoj mreži, kako računa elektroničko računalo po programu "UKSX". Izračunate su jedinične, direktne i nulte reaktancije. Računanje matrica prepušteno je stroju, ali je pokazano kako se koriste kod računanja struja.

Na slici 164 nalazi se jednopolna shema zadane mreže. Na ovoj shemi numeriramo čvorove i mreže i na temelju ovih numeracija i podataka o elementima mreže formiramo tablice podataka. Ovdje navodimo samo listu grana uz podatke o broju čvora, mreža i grana te baznih polaznih veličina.

Treba provesti proračun jednopolnog kratkog spoja.

Bazne veličine:

$$S_B = 100 \text{ MVA (po ovom programu automatski zadano)}$$



Slika 164 - Test mreža

Lista grana

g	s	t	b _(s)	b _(t)	X	U _{ns}	U _{nt}	S _n	TR	Δ	r'	s'	t'	SP	X°
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0	1	0	4	33		16,5	100							
2	1	2	4	3	10	16	110	100		150		1	2	21	
3	2	3	3	1	14	110	220	100				2	3	22	
4	3	4	1	1	40										
5	4	5	1	2	6	220	10	25	1	150	5	4	6	211	
6	4	6	1	3	10	220	110	60	2						
7	5	6	2	3	5	10	110	25	3	-150					
8	0	7	0	5	33		12	100							
9	7	8	5	3	10	10	110	100				7	8	22	
10	6	8	3	3	28										
11	2	8	3	3	20										
12	0	5	0	2	40		10	25							
13	2	8	3	3	22										
14	3	9	1	1	140										
15	2	10	3	6	10	110	16	100		150		10	2	20	
16	0	10	0	6	33		16,5	100							
17	9	11	1	7	10	220	110	60	1		12	11	9	211	
18	9	12	1	8	6	220	10	25	2	150					
19	11	12	7	8	5	110	10	25	3	150					
20	0	12	0	8	40		10	25							

$$\begin{aligned}
 G &= 20 & S_B &= 100 \text{ MVA} \\
 N &= 12 & U_{B1} &= 225 \text{ kV} \\
 B &= 8
 \end{aligned}$$

$$U_{B1} = 225 \text{ kV}$$

$$I_{B1} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 225} = 0,257 \text{ kA}$$

$$U_{B2} = 225 \cdot \frac{10}{220} = 10,23 \text{ kV}$$

$$I_{B2} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,23} = 5,645 \text{ kA}$$

$$U_{B3} = 225 \cdot \frac{110}{220} = 112,5 \text{ kV}$$

$$I_{B3} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 112,5} = 0,513 \text{ kA}$$

$$U_{B4} = 112,5 \frac{16}{110} = 16,35 \text{ kV}$$

$$I_{B4} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 16,35} = 3,528 \text{ kA}$$

$$U_{B5} = 112,5 \frac{10}{100} = 10,23 \text{ kV}$$

$$I_{B5} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,23} = 5,645 \text{ kA}$$

$$U_{B6} = 112,5 \frac{16}{110} = 16,35 \text{ kV}$$

$$I_{B6} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 16,8} = 3,528 \text{ kA}$$

$$U_{B7} = 225 \frac{110}{220} = 112,5 \text{ kV}$$

$$I_{B7} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 112,5} = 0,513 \text{ kA}$$

$$U_{B8} = 225 \frac{10}{220} = 10,23 \text{ kV}$$

$$I_{B8} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,23} = 5,645 \text{ kA}$$

Položaj čvorova u mrežama:

Čvor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mreža	4	3	1	1	2	3	5	3	1	6	7	8

Odredjujemo sad kut svake mreže prema mreži 1 i tretman zvijezdišta.

mreža	Δb_m	Z_{bm}
1	0	1
2	150	0
3	0	1
4	150	0
5	150	0
6	150	0
7	0	1
8	150	0

Istražujemo tretman zvjezdišta

<u>$g = 2$</u>	SP = 21	$t' = 2$
	$Z_b(2) = Z_{b3} = 1$	
$g = 5, 6, 7$	SP = 211	$s' = 4$ $t' = 6$
	$Z_b(4) = Z_{b1} = 1$	
	$Z_b(6) = Z_{b3} = 1$	
$g = 17, 18, 19$	SP = 211	$s' = 9$ $t' = 11$
	$Z_b(9) = Z_{b1} = 1$	
	$Z_b(11) = Z_{b7} = 1$	

Ostali Z_{bm} jednaki su nuli.

Računamo jedinične reaktancije direktnog (inverznog) sistema.

g	s	t	x_{s-t}
1	0	1	0,3355
2	1	2	0,0956
3	2	3	0,1338
4	3	4	0,0790
5	4	5	0,4436
6	4	6	0,2051
7	5	6	0,2712
8	0	7	0,4543
9	7	8	0,0956
10	6	8	0,2212
11	2	8	0,1580
12	0	5	1,5296
13	2	8	0,1738
14	3	9	0,2765
15	2	10	0,0956
16	0	10	0,3395
17	9	11	0,2051
18	9	12	0,4426
19	11	12	0,2712
20	0	12	1,5296

Na slici 165 nacrtana je ekvivalentna shema direktnog sistema mreže sa sl.164 s unesenim jediničnim reaktancijama. Ovoj slici je identična shema inverznog sistema.

Računajmo zvijezdu tronamotnih transformatora

Transformator 5, 6, 7

$$\Sigma = 0,4426 + 0,2051 + 0,2712 = 0,9189$$

$$a = 4$$

$$X_a = X_4 = \frac{0,4426 \cdot 0,2051}{0,9189} = 0,0989$$

$$a = 5$$

$$X_a = X_5 = \frac{0,4426 \cdot 0,2712}{0,9189} = 0,1303$$

$$a = 6$$

$$x_a = x_6 = \frac{0,2051 \cdot 0,2712}{0,9189} = 0,0605$$

Transformator 17, 18, 19

$$\Sigma = 0,2051 + 0,4426 + 0,2712 = 0,9189$$

$$a = 9$$

$$x_a = x_9 = \frac{0,2051 \cdot 0,4426}{0,9189} = 0,0989$$

$$a = 12$$

$$x_a = x_{12} = \frac{0,4426 \cdot 0,2712}{0,9189} = 0,1303$$

$$a = 11$$

$$x_a = x_{11} = \frac{0,2712 \cdot 0,2051}{0,9189} = 0,0605$$

Sada možemo računati prvi niz nultih reaktancija

$$\underline{g = 2}$$

$$x_{0-2}^0 = x_{1-2} = 0,0956$$

$$\underline{g = 4}$$

$$x_{3-4}^0 = 3 x_{3-4} = 0,0790 \cdot 3 = 0,2370$$

$$\underline{g = 5, 6, 7}$$

$$x_{0-4}^0 = 0,0989 + 0,1303 + \frac{0,0989 \cdot 0,1303}{0,0605} = 0,4426$$

$$x_{0-6}^0 = 0,1303 + 0,0605 + \frac{0,1303 \cdot 0,0605}{0,0989} = 0,2712$$

$$x_{4-6}^0 = 0,0989 + 0,0605 + \frac{0,0989 \cdot 0,0605}{0,1303} = 0,2051$$

$$\underline{g = 10}$$

$$x_{6-8}^0 = 0,2212 \cdot 3 = 0,6636$$

$$\underline{g = 11}$$

$$x_{2-8}^0 = 0,1580 \cdot 3 = 0,4740$$

$$\underline{g = 13}$$

$$x_{2-8}^O = 0,1738 \cdot 3 = 0,5214$$

$$\underline{g = 14}$$

$$x_{3-9}^O = 0,2765 \cdot 3 = 0,8295$$

$$\underline{g = 17, 18, 9}$$

$$x_{O-9} = 0,4426$$

$$x_{O-11} = 0,2712$$

$$x_{9-11} = 0,2051$$

Iz ovog prvog niza dobijemo sredjene nulte reaktancije

g^O	s	t	x_{s-t}^O
1	0	2	0,0956
2	0	3	∞
3	3	4	0,2370
4	0	4	0,4426
5	0	5	∞
6	0	6	0,2715
7	4	6	0,2051
8	0	7	∞
9	6	8	0,6636
10	2	8	0,4740
11	2	8	0,5214
12	3	9	0,8295
13	0	9	0,4426
14	0	10	∞
15	0	11	0,2712
16	9	11	0,2051

$$P^O = 2 \quad G^O = 16 \quad N^O = 11$$

Sada se može računati matrica $[X^O]$.

Nakon što su izračunate matrice $[X]$ i $[X^O]$ možemo računati struje i napone faza onako, kako to radi elektroničko računalo po programu "UKSX".

Jednopolni kratki spoj računa se od $k = p^O = 2$ do $k = N^O = 11$, s tim da se preskoče umjetno povezani čvorovi 5,7 i 10 (neki čvorovi se radi suvislosti pojedinih djelova mreže po potrebi povezuju inače nepostojećim granama vrlo velike reaktancije, čime se ne utječe na točnost rezultata računa).

$k = 2$ nalazi se u mreži 3

$$i_2^O = \frac{1}{2 x_{22} + x_{22}^O} = \frac{1}{2 \cdot 0,140 + 0,0879} = 2,72$$

$$I_2^O = i_2^O I_b(2) = 2,72 \cdot 0,513 = 1,394 \text{ kA}$$

$$I_2 = 1,394 \cdot 3 = 4,182 \text{ kA}$$

Faktori zakretanja prema mreži 3

Mreža	Δb_m	f_m^a	f_m^b	f_m^c
1	0	2	- 1	- 1
2	150	- $\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	0
3	0	2	- 1	- 1
4	150	- $\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	0
5	150	- $\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	0
6	150	- $\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	0
7	0	2	- 1	- 1
8	150	2	- 1	- 1

Struje u mreži računamo po redosljedu i nizu grana iz liste podataka, koji ostaje nepromjenjen u nizu reaktancija direktnog sistema.

$$\underline{g = 1} \quad s = 0 \quad \Delta b_{(t)} = \Delta b_{(1)} = \Delta b_4 = 150$$

$$SP = 0 \quad t = 1 \quad z_{b(t)} = z_{b(1)} = z_{b4} = 0$$

$$i_{s-t} = \frac{x_{tk}}{x_{s-t}} i_k^o = \frac{x_{12}}{x_{o-1}} i_2^o = \frac{0,109}{0,3355} 2,72 = 0,882$$

$$I_{o-1}^a = i_{s-t} f_{(t)}^a I_{B(t)} = 0,882 (-\sqrt{3}) 3,528 = -5,394 \text{ kA}$$

$$I_{o-1}^b = i_{s-t} f_{(t)}^b I_{B(t)} = 0,882 \cdot \sqrt{3} \cdot 3,528 = 5,394 \text{ kA}$$

$$I_{o-1}^c = i_{s-t} f_{(t)}^c I_{B(t)} = 0,882 \cdot 0 \cdot 3,528 = 0$$

$$\underline{g = 2} \quad s' = 1 \quad \Delta b_{(s')} = \Delta b_{(1)} = \Delta b_4 = 150$$

$$SP = 21 \quad t' = 2 \quad \Delta b_{(t')} = \Delta b_{(2)} = \Delta b_3 = 0$$

$$i_{s'-t'} = \frac{x_{t'k} - x_{s'k}}{x_{s-t}} i_k^o = i_{1-2} = \frac{x_{22} - x_{12}}{x_{12}} i_2^o =$$

$$= \frac{0,140 - 0,109}{0,0956} 2,72 = 0,882$$

$$i_{o-t'}^o = \frac{x_{t'k}^o}{x_{o-t'}^o} i_k^o = i_{o-2}^o = \frac{x_{22}^o}{x_{o-2}^o} 2,72 = \frac{0,0879}{0,0956} 2,72 = 2,5$$

Struje na strani čvora t'

$$I_{1-2}^a = [i_{s'-t'} f_{(t')}^a + i_{o-t'}^o] I_{B(t')} =$$

$$= (0,882 \cdot 2 + 2,5) 0,513 = 2,188 \text{ kA}$$

$$I_{1-2}^b = [i_{s'-t'} f_{(t')}^b + i_{o-t'}^o] I_{B(t')} =$$

$$= [0,882 (-1) + 2,5] 0,513 = 0,828 \text{ kA}$$

$$I_{1-2}^C = [i_{s'-t'} f_{(t')}^C + i_{o-t'}^O] I_{B(t')} =$$

$$= [0,882 (-1) + 2,5] 0,513 = 0,828 \text{ kA}$$

Struje na strani čvora s'

$$I_{1-2}^a = i_{s'-t'} f_{(s')}^a I_{B(s')} = 0,882 \cdot (-\sqrt{3}) 2,528 = - 5,394 \text{ kA}$$

$$I_{1-2}^b = i_{s'-t'} f_{(s')}^b I_{B(s')} = 0,882 \cdot \sqrt{3} \cdot 3,528 = 5,394 \text{ kA}$$

$$I_{1-2}^C = i_{s'-t'} f_{(s')}^C I_{B(s')} = 0,882 \cdot 0 \cdot 3,528 = 0$$

Struje u namotaju trokuta:

$$I_{\Delta}^a = - \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{I_{1-2}^a}{I_{b(2)}} I_{B(1)} = - \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{2,188}{0,513} 3,528 = - 8,685 \text{ kA}$$

$$I_{\Delta}^b = - \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{I_{1-2}^b}{I_{b(2)}} I_{B(1)} = - \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{0,825}{0,513} 3,528 = - 3,29 \text{ kA}$$

$$I_{\Delta}^C = - \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{I_{1-2}^C}{I_{b(2)}} I_{B(1)} = - \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{0,828}{0,513} 3,528 = - 3,29 \text{ kA}$$

Struja kroz uzemljenje zvijezdišta:

$$I_{z2} = 2,188 + 0,828 + 0,828 = 3,845 \text{ kA}$$

$$\underline{g = 3} \quad s = s' = 2 \quad \Delta b_{(2)} = \Delta b_3 = 0 \quad I_{B3} = 0,513 \text{ kA}$$

$$SP = 22 \quad t = t' = 3 \quad \Delta b_{(3)} = \Delta b_1 = 0 \quad I_{B1} = 0,257 \text{ kA}$$

$$I_{s-t} = \frac{X_{tk} - X_{sk}}{X_{s-t}} i_k^O = \frac{X_{32} - X_{22}}{X_{2-3}} i_2^O = \frac{0,1248 - 0,14}{0,1338} 2,72 = - 0,309$$

Struja na strani čvora t

$$I_{2-3}^a = 2 i_{s-t} I_{B(t)} = - 2 \cdot 0,309 \cdot 0,257 = - 0,159 \text{ kA}$$

$$I_{2-3}^b = - i_{s-t} I_{B(t)} = 0,309 \cdot 0,257 = 0,0794 \text{ kA}$$

$$I_{2-3}^c = - i_{s-t} I_{B(t)} = 0,309 \cdot 0,257 = 0,0794 \text{ kA}$$

Struja na strani čvora s

$$I_{2-3}^a = 2 i_{s-t} I_{B(s)} = - 2 \cdot 0,309 \cdot 0,513 = - 0,317 \text{ kA}$$

$$I_{2-3}^b = - i_{s-t} I_{B(s)} = - (-309) 0,513 = 0,1585 \text{ kA}$$

$$I_{2-3}^c = - i_{s-t} I_{B(s)} = 0,1585 \text{ kA} \quad \text{itd.}$$

Nakon računanja struja slijedi računanje napona. Napone računamo redom za sve čvorove od 1 do N.

Računajmo napon u čvoru 1

$$\bar{v}_{1f} = - j X_{12} \bar{i}_k^o = (-j) 0,109 (-j) 2,72 = -0,2965$$

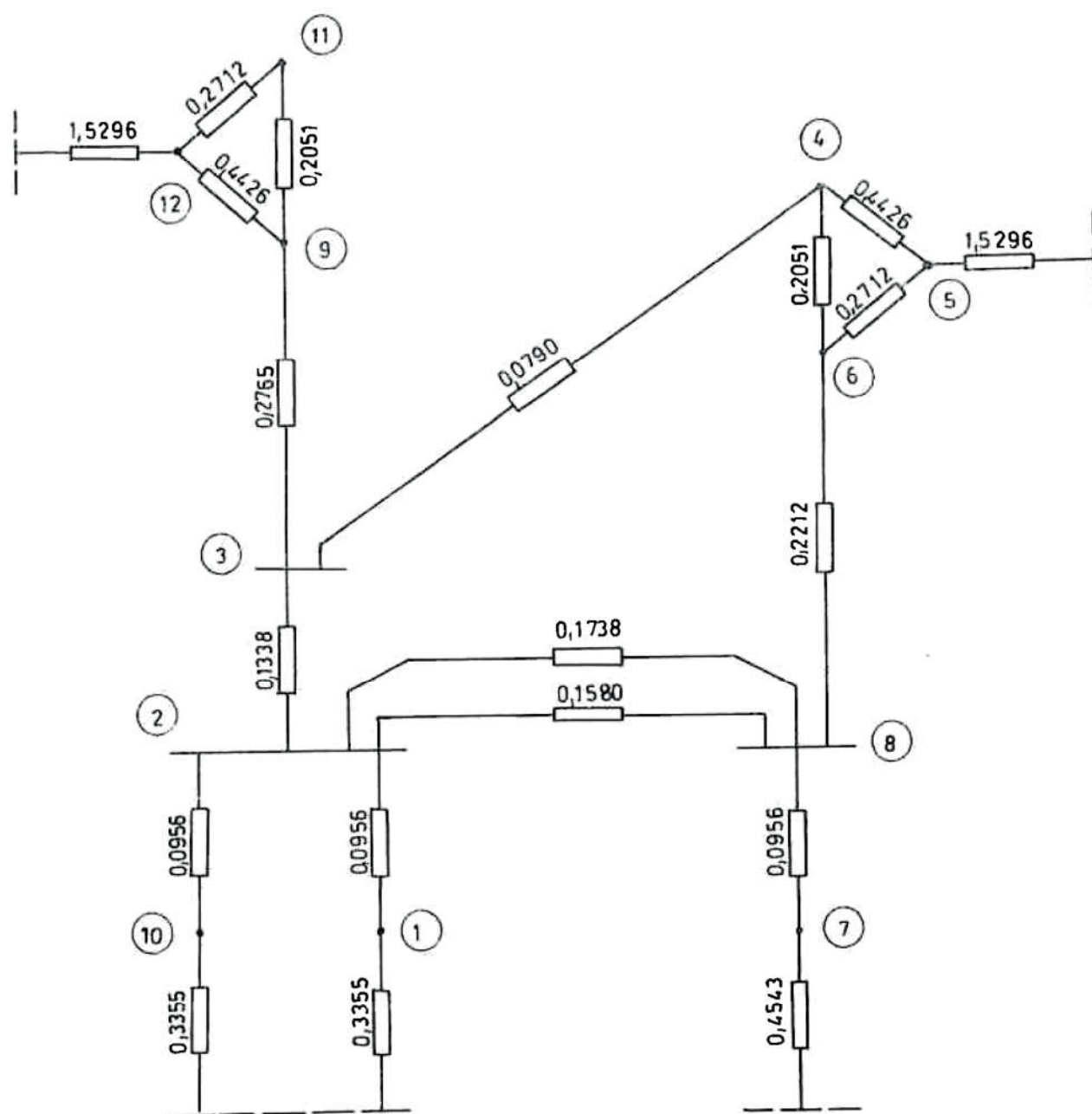
$$\bar{v}_{1f}^o = 0$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_1^a &= \left[f_{(1)}^{a1} + \bar{v}_{1f} f_{(1)}^a + h \bar{v}_{1f}^o \right] U_{B(1)} \frac{1}{\sqrt{3}} = \\ &= \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} + (-0,2965) (-\sqrt{3}) \right] 16,35 \frac{1}{\sqrt{3}} = -3,336 + j 4,725 \end{aligned}$$

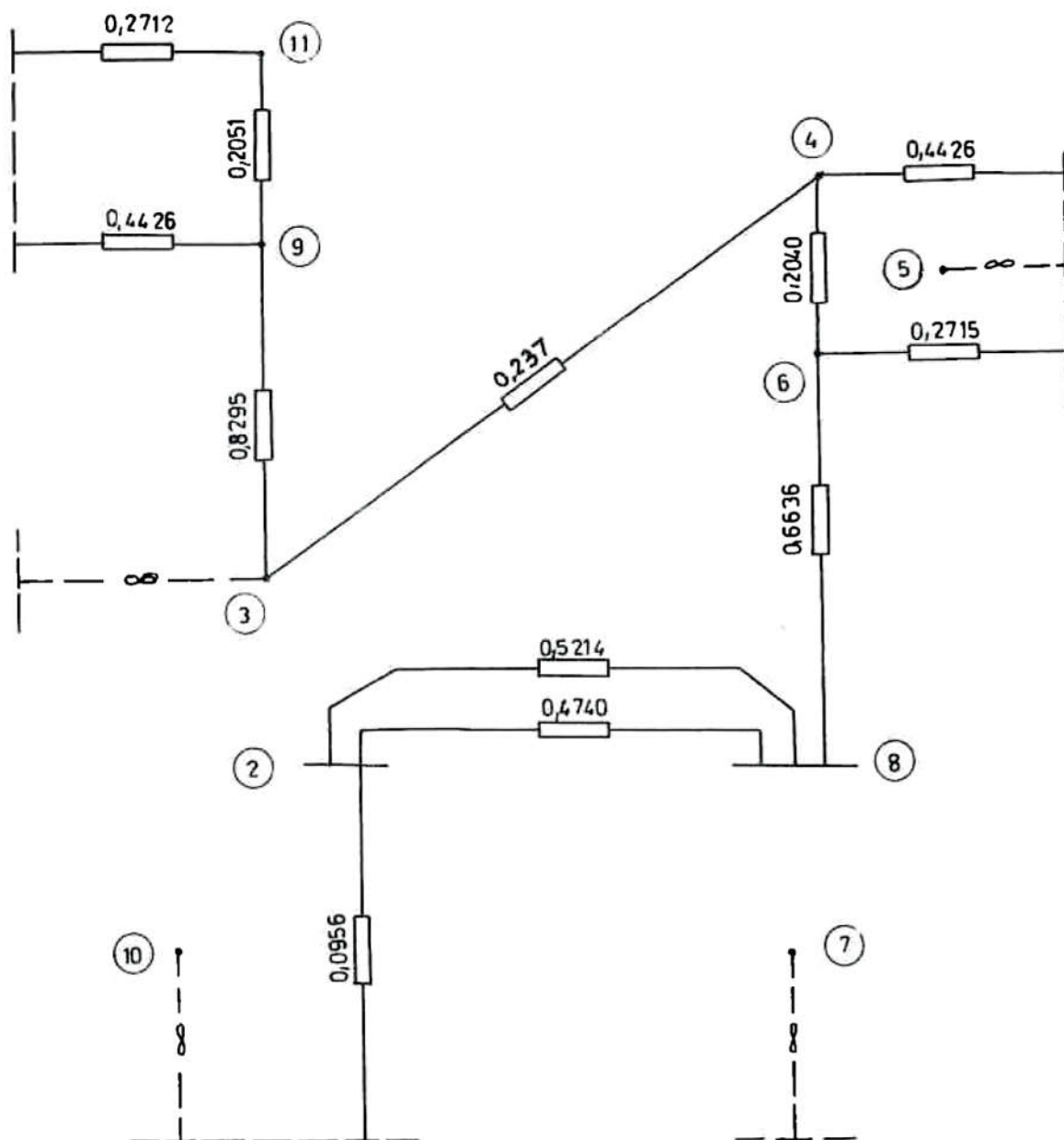
$$\begin{aligned} \bar{V}_1^b &= \left[f_{(1)}^{b1} + \bar{v}_{1f} f_{(1)}^b + h \bar{v}_{1f}^o \right] U_{B(1)} \frac{1}{\sqrt{3}} = \\ &= \left[\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} + (-0,2965) \sqrt{3} \right] 16,35 \frac{1}{\sqrt{3}} = 3,336 + j 4,725 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_1^c &= \left[f_{(1)}^{c1} + \bar{v}_{1f} f_{(1)}^c + h \bar{v}_{1f}^o \right] U_{B(1)} \frac{1}{\sqrt{3}} = \\ &= \left[-j + (-0,2965) \cdot 0 \right] U_{B(1)} \frac{1}{\sqrt{3}} = 0 -j 9,45 \end{aligned}$$

itd.



Slika 165 - Direktni sistem test mreže



Slika 166 - Nulti sistem test mreže

3.1.6 Račun kratkog spoja na istosmjernom mrežnom analizatoru

Istosmjerni mrežni analizator pruža jednostavnu, dovoljno točnu i ekonomičnu mogućnost određivanja struja i napona kratkog spoja u originalnoj mreži direktnim mjerenjem struja i napona na "umanjenom" modelu.

Na ispravnost rezultata utječu točnost modeliranja originala i točnost mjerenja. Struje odnosno naponi mjere se preciznim instrumentima, što greške s ovog izvora svodi u dozvoljene granice. Loše rezultate možemo očekivati većinom od lošeg preslikavanja elemenata mreže, odnosno od lošeg modeliranja mreže kao cjeline.

Upotreba istosmjernog mrežnog analizatora u analizi izmjenične mreže je ograničena na specijalne slučajeve. Istosmjerni mrežni analizator, kao sredstvo za proračun kratkog spoja, dovoljno je točan, ako mreža ispunjava jedan od uvjeta

- | | |
|--------------------------|-------|
| a) $R/X < 0,3$ | 3-74a |
| b) $R/X > 3$ | b |
| c) $R/X = \text{konst.}$ | c |

U slučaju a) zanemariv je djelatni otpor. Reaktancije mreže modeliraju se djelatnim otporima analizatora. Mreže visokih i vrlo visokih napona odgovaraju ovom uvjetu.

U slučaju b) zanemariva je reaktancija. Djelatni otpori mreže modeliraju se djelatnim otporima analizatora. Neke mreže niskog napona odgovaraju ovom uvjetu.

U slučaju c), radi jednakosti faznih kuteva struja, geometrijsko zbrajanje struja prelaži u aritmetičko, što dozvoljava preslikavanje na istosmjerni model. Apsolutne vrijednosti impeancija mreže modeliraju se djelatnim otporima analizatora. Unutar mreže jednog naponskog nivoa približno jednake izbedbe vodova ovaj uvjet može biti zadovoljen.

Za preslikavanje originalne mreže na model i za preračunavanje električnih veličina modela u originalne, potrebno je mjerilo za napon, snagu, struju i impedanciju. Dvije od ovih veličina

se biraju, a ostale proizlaze iz odabranih. Obično se odabiru mjerila za napon i snagu i to tako, da ne budu ugroženi elementi analizatora kod simuliranja kratkog spoja na bilo kojem mjestu u mreži (vidi "Mreže I" 8.1).

Označimo sa f_V , f_S , f_I i f_Z mjerila za napon, snagu, struju i impedanciju. Indeksom m označit ćemo veličine modela, a indeksom M veličine stvarne mreže. Pri tome ćemo raditi s faznim veličinama, jer ćemo modelirati jednofaznu ekvivalentnu shemu za određenu vrstu kratkog spoja. Definiramo:

$$\begin{aligned} V_M &= f_V V_m & 3-75a \\ S_M &= f_S S_m & b \\ I_M &= f_I I_m & c \\ Z_M &= f_Z R_m & d \end{aligned}$$

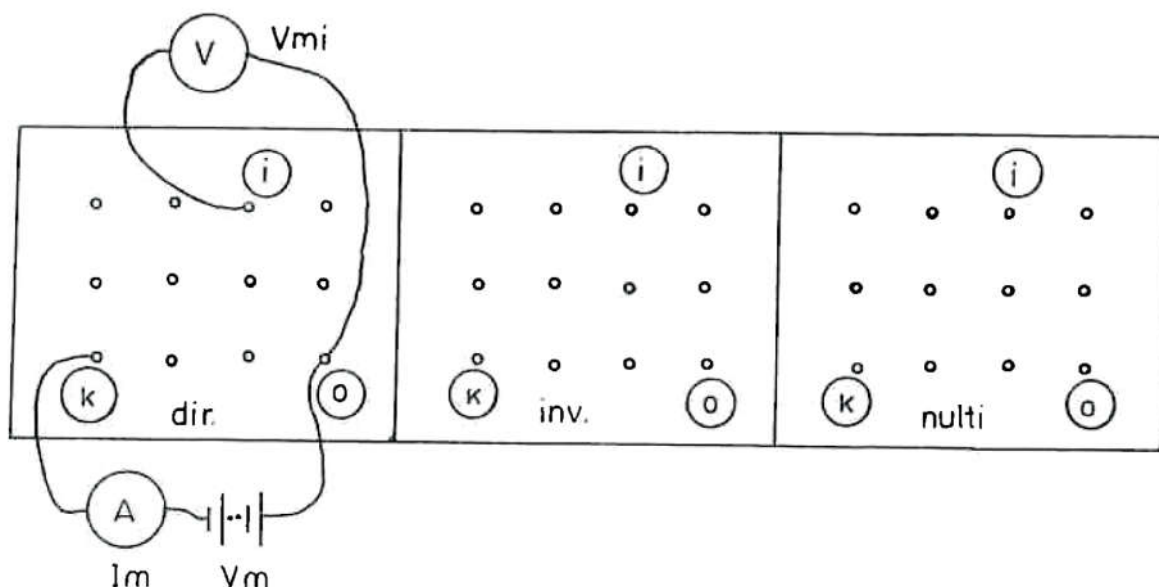
Neka su odabrani f_V i f_S . Tada je:

$$\begin{aligned} f_I &= \frac{I_M}{I_m} = \frac{S_M V_m}{V_M S_m} = \frac{f_S}{f_V} & 3-76a \\ f_Z &= \frac{Z_M}{R_m} = \frac{V_M^2 S_m}{S_M V_m^2} = \frac{f_V^2}{f_S} & b \end{aligned}$$

Matematski modeli kratkog spoja postavljeni i razradjeni u 3.1.4.3 mogu se postaviti na istosmjernom mrežnom analizatoru. Treba samo modelirati posebno fiktivnu mrežu direktnog sistema, fiktivnu mrežu inverznog sistema i fiktivnu mrežu nultog sistema.

Ovdje ćemo postaviti modele kratkog spoja za slučaj $R/X < 0,3$. To znači, da ćemo modelirati reaktancije. Zato u ovom slučaju ne smijemo zaboraviti, da struje u originalnoj mreži zaostaju za naponom za 90° .

Tropolni kratki spoj analiziramo na modelu direktnog sistema komponentata (sl.167). Iz poznate vrijednosti istosmjernog izvora i mjerenih vrijednosti možemo zaključiti na prilike za vrijeme tro-
polnog kratkog spoja u čvoru K.



Slika 167 - Model trofaznog kratkog spoja u čvoru K
na istosmjernom mrežnom analizatoru

Iz poznate vrijednosti istosmjernog izvora i mjerenih vrijednosti možemo zaključiti na prilike u originalnoj mreži za vrijeme trofaznog kratkog spoja u čvoru K.

$$\bar{I}_K^a = -j I_m f_I \quad 3-77$$

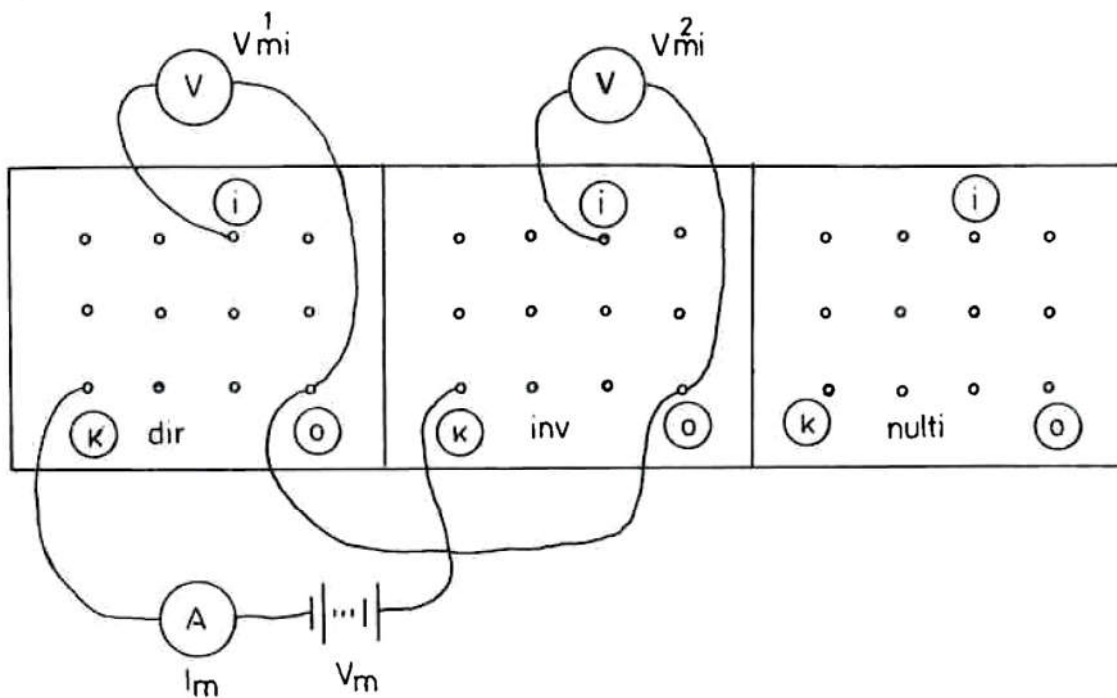
$$S_K = 3 V_m I_m f_S \quad 3-78$$

$$\bar{V}_{Mi}^a = (V_m - V_{mi}) f_V \quad 3-79$$

Dvopolni kratki spoj analiziramo na modelu direktnog i inverznog sistema komponenata (sl.168). Iz poznate vrijednosti istosmjernog izvora i mjerenih vrijednosti možemo zaključiti na prilike u originalnoj mreži za vrijeme dvopolnog kratkog spoja u čvoru K.

$$\bar{I}_K^b = -\bar{I}_K^c = \sqrt{3} I_m f_I \quad 3-80$$

$$S_K = 3 \sqrt{3} V_m I_m f_S \quad 3-81$$



Slika 168 - Model dvopolnog kratkog spoja u čvoru K
na istosmjernom mrežnom analizatoru

$$\bar{V}_{Mi}^a = (V_m - V_{mi}^1 + V_{mi}^2) f_V \quad 3-82a$$

$$\bar{V}_{Mi}^b = (a^2 V_m - a^2 V_{mi}^1 + a V_{mi}^2) f_V \quad b$$

$$\bar{V}_{Mi}^c = (a V_m - a V_{mi}^1 + a^2 V_{mi}^2) f_V \quad c$$

U slučaju kada je $x^1 = x^2$, nije potrebno modelirati mrežu inverznog sistema. Model dvopolnog kratkog spoja identičan je tada modelu trolnog kratkog spoja. Razlike su u preračunavanju izmjerenih vrijednosti. Tada je naime:

$$\bar{I}_K^c = -\bar{I}_K^b = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m f_I \quad 3-83$$

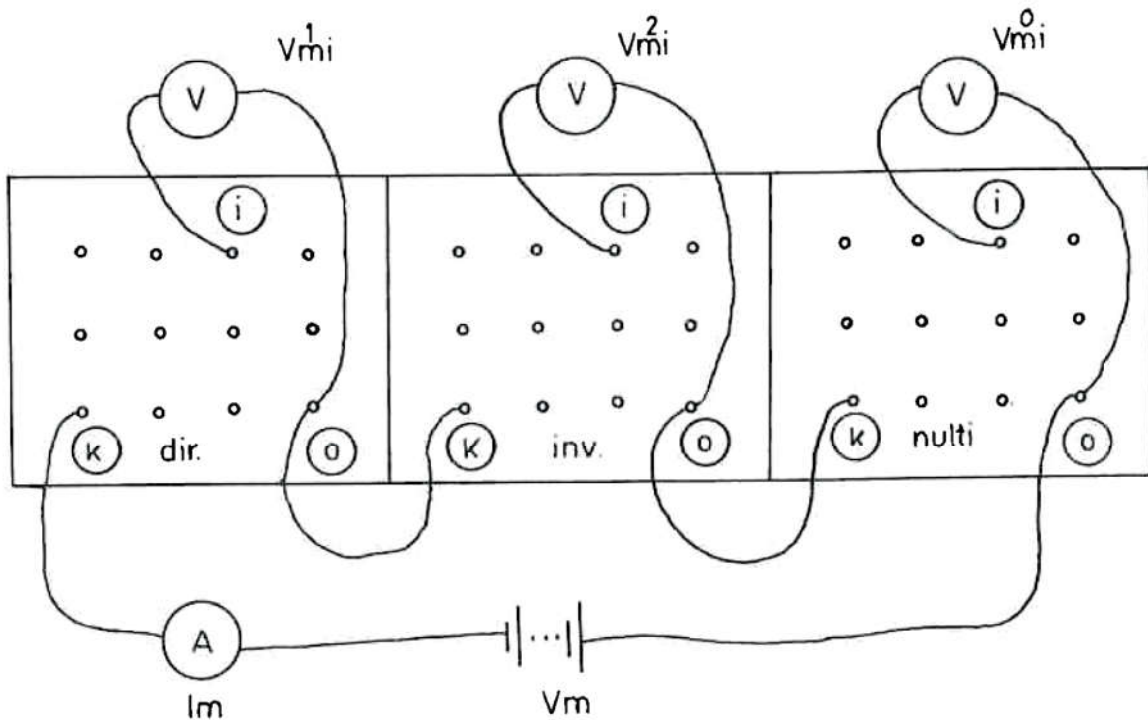
$$S_K = \frac{3\sqrt{3}}{2} V_m I_m f_S \quad 3-84$$

$$\bar{V}_{Mi}^a = V_m f_V \quad 3-85a$$

$$\bar{V}_{Mi}^b = [a^2 V_m - (a^2 - a) V_{mi}] f_V \quad 3-85b$$

$$\bar{V}_{Mi}^c = [a V_m - (a - a^2) V_{mi}] f_V \quad c$$

Jednopolni kratki spoj analiziramo na modelu direktnog, inverznog i nultog sistema komponenta (sl.169). Iz poznate vrijednosti istosmjernog izvora i mjerenih vrijednosti možemo zaključiti na prilike u mreži za vrijeme jednopolnog kratkog spoja u čvoru K.



Slika 169 - Model jednopolnog kratkog spoja u čvoru K na istosmjernom mrežnom analizatoru

$$\bar{I}_K = -j 3 I_m f_I \quad 3-86$$

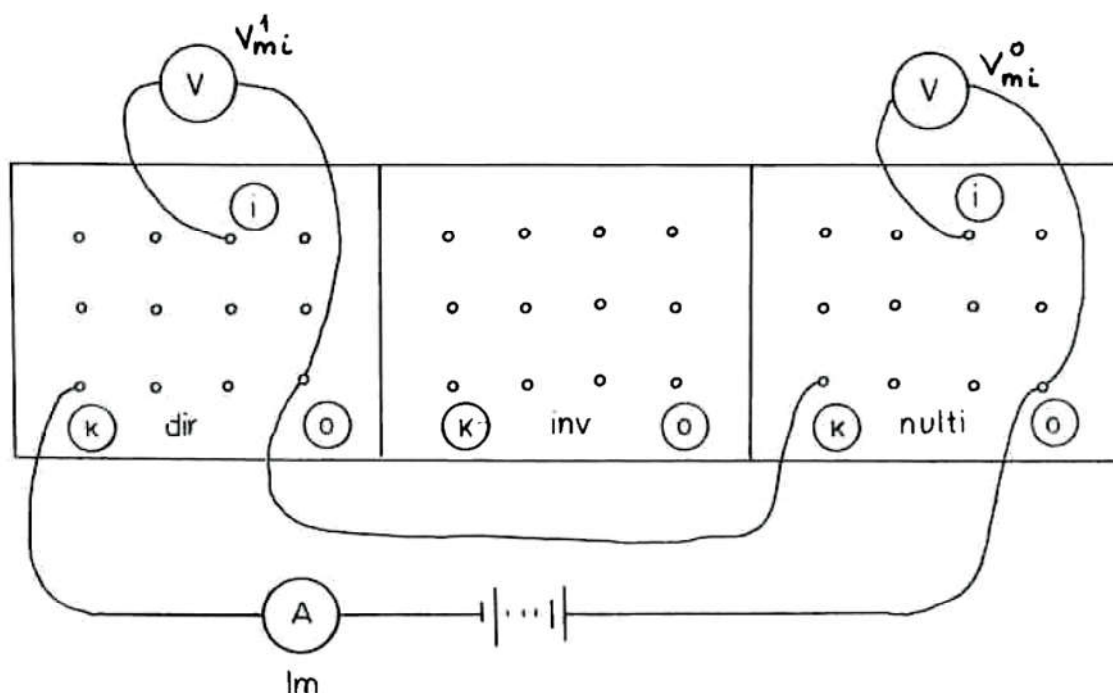
$$S_K = 9 V_m I_m f_S \quad 3-87$$

$$\bar{V}_{Mi}^a = (V_m - V_{mi}^1 - V_{mi}^2 - V_{mi}^0) f_V \quad 3-88a$$

$$\bar{V}_{Mi}^b = (a^2 V_m - a^2 V_{mi}^1 - a V_{mi}^2 - V_{mi}^0) f_V \quad b$$

$$\bar{V}_{Mi}^c = (a V_m - a V_{mi}^1 - a^2 V_{mi}^2 - V_{mi}^o) f_V \quad c$$

U slučaju kada je $X^1 = X^2$, dovoljno je modelirati mreže direktnog i nultog sistema. Tada je model jednopolnog kratkog spoja jednak onome sa slike 170.



Slika 170 - Model jednopolnog kratkog spoja na istosmjernom mrežnom analizatoru kada je $X^1 = X^2$

Preračunavanje je slijedeće (k_u je faktor uzemljenja):

$$\bar{I}_k = -j 3 I_m f_I \frac{1 + k_u}{2 + k_u} \quad 3-89$$

$$S_k = 9 V_m I_m f_S \frac{1 + k_u}{2 + k_u} \quad 3-90$$

$$\bar{V}_{Mi}^a = [V_m - (2 V_{mi}^1 + V_{mi}^o) \frac{1 + k_u}{2 + k_u}] f_V \quad 3-91a$$

$$\bar{V}_{Mi}^b = [a^2 V_m + (V_{mi}^1 - V_{mi}^o) \frac{1 + k_u}{2 + k_u}] f_V \quad b$$

$$\bar{V}_{Mi}^c = a V_m + (V_{mi}^1 - V_{mi}^0) \frac{1 + k_u}{2 + k_u} f_V \quad c$$

Obrazloženje:

Umjesto
$$I_m' = \frac{V_m}{2 R_m^1 + R_m^0}$$

Mjerimo
$$I_m = \frac{V_m}{R_m^1 + R_m^0}$$

Zato je
$$I_m' = I_m \frac{R_m^1 + R_m^0}{2R_m^1 + R_m^0}$$

Padovi napona izazvani strujom I_m' odnose se prema padovima napona izazvanim strujom I_m u istom omjeru, pa je:

$$V_{mi}' = V_{mi} \frac{R_m^1 + R_m^0}{2 R_m^1 + R_m^0}$$

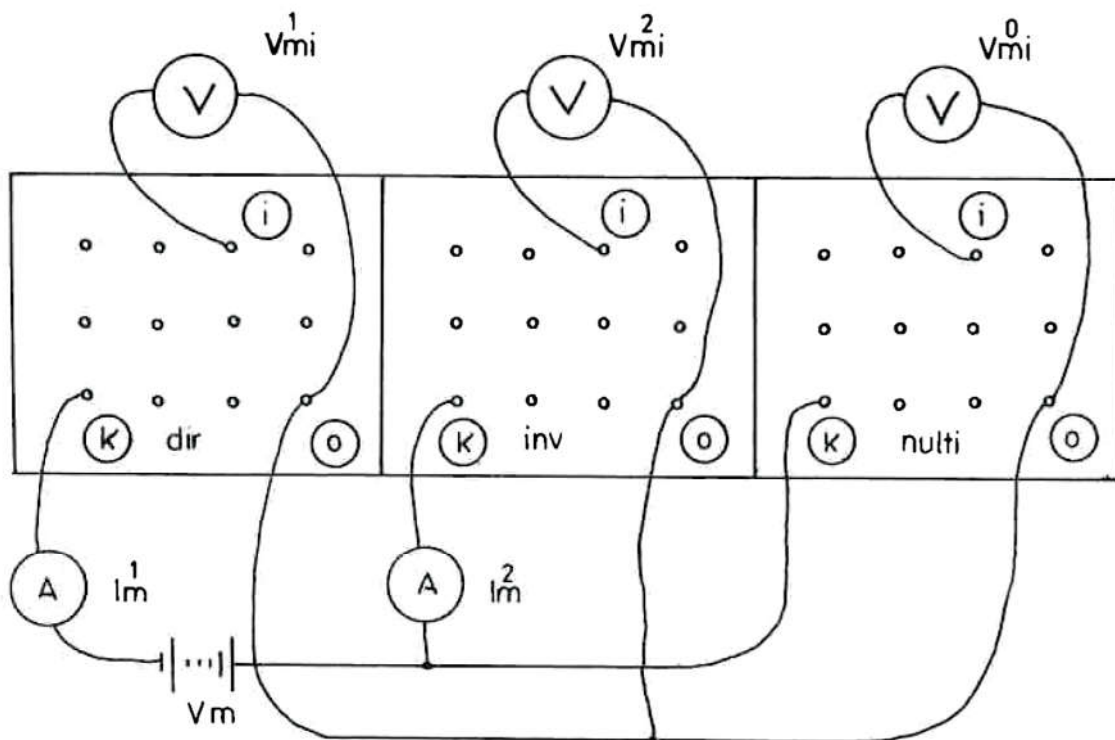
Faktor uzemljenja k_u lako dobijemo mjerenjem ulaznog otpora R_{kk}^1 i R_{kk}^0 , što je svakako jednostavnije od modeliranja još jednog sistema komponenata.

Dvopolni kratki spoj sa spojem sa zemljom analiziramo na modelu direktnog, inverznog i nultog sistema komponenata. Iz poznate vrijednosti istosmjernog izvora V_m i mjerenih vrijednosti zaključujemo na električne prilike u mreži za vrijeme dvopolnog kratkog spoja i spoja sa zemljom (sl.171).

Dovoljna su dva ampermetra, jer $I_m^0 = I_m^1 - I_m^2$.

$$\bar{I}_k^b = -j [(a^2 - 1) I_m^1 - (a - 1) I_m^2] f_I \quad 3-92$$

$$\bar{I}_k^c = -j [(a - 1) I_m^1 - (a^2 - 1) I_m^2] f_I \quad 3-93$$



Slika 171 - Model dvopolnog kratkog spoja sa spojem sa zemljom u čvoru K na istosmjernom mrežnom analizatoru

$$S_k = 3 V_m \sqrt{2,25(I_m^1 - I_m^2)^2 + 0,75(I_m^1 + I_m^2)^2} f_S \quad 3-94$$

$$\bar{V}_{Mi}^a = (V_m - V_{mi}^1 + V_{mi}^2 + V_{mi}^0) f_V \quad 3-95a$$

$$\bar{V}_{Mi}^b = (a^2 V_m - a^2 V_{mi}^1 + a V_{mi}^2 + V_{mi}^0) f_V \quad b$$

$$\bar{V}_{Mi}^c = (a V_m - a V_{mi}^1 + a^2 V_{mi}^2 + V_{mi}^0) f_V \quad c$$

Napomena uz slike 167 do 171: modele mreža direktnog, inverznog i nultog sistema komponenata treba zamisliti s druge strane ploče analizatora. Na prednjoj strani ploče pristupačni su čvorovi mreža komponenata.

Račun kratkog spoja u mreži sa zanemarenom reaktancijom ili kada je $R/X = \text{konst.}$ provest ćemo na isti način, samo treba voditi računa

čuna da je preračunavanje na stvarne struje drukčije. Preračunavanje napona ostaje nepromjenjeno.

Kada je $R/X > 3$, relacije 3-77, 3-80, 3-86 prelaze u:

Tropolni kratki spoj

$$\bar{I}_k^a = I_m f_I \quad 3-96$$

Dvopolni kratki spoj

$$\bar{I}_k^c = - \bar{I}_k^b = j \sqrt{3} I_m f_I \quad 3-97$$

Jednopolni kratki spoj

$$\bar{I}_k = 3 I_m f_I \quad 3-98$$

Dvopolni kratki spoj sa spojem sa zemljom

$$\bar{I}_k^b = [(a^2 - 1)I_m^1 - (a - 1)I_m^2] f_I \quad 3-99$$

$$\bar{I}_k^c = [(a - 1)I_m^1 - (a^2 - 1)I_m^2] f_I \quad 3-100$$

Kada je $R/X = \text{konst.}$ relacije 3-77, 3-80, 3-86 prelaze u:

Tropolni kratki spoj

$$\bar{I}_k^a = I_m (\cos \varphi + j \sin \varphi) f_I \quad 3-101$$

Dvopolni kratki spoj

$$\bar{I}_k^c = - \bar{I}_k^b = j \sqrt{3} I_m (\cos \varphi + j \sin \varphi) f_I \quad 3-102$$

Jednopolni kratki spoj

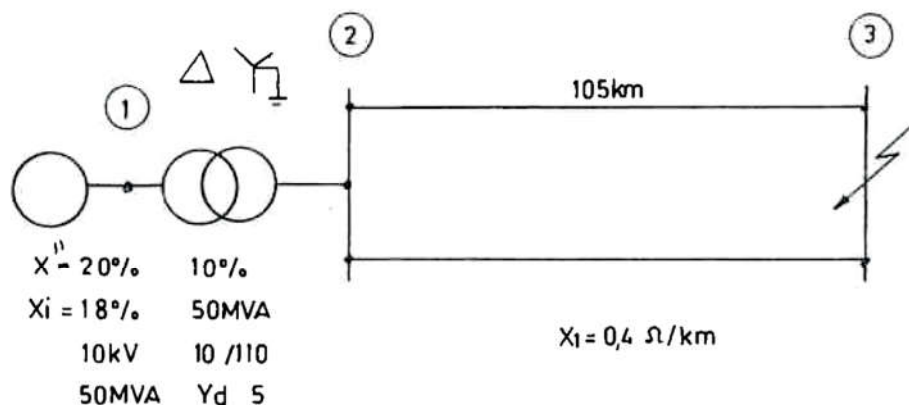
$$\bar{I}_k^a = 3 I_m (\cos \varphi + j \sin \varphi) f_I \quad 3-103$$

Dvopolni kratki spoj sa spojem sa zemljom

$$\bar{I}_k^a = [(a^2 - 1)I_m^1 - (a-1)I_m^2] (\cos \varphi + j \sin \varphi) f_I \quad 3-104$$

$$\bar{I}_k^c = [(a - 1)I_m^1 - (a^2-1)I_m^2] (\cos \varphi + j \sin \varphi) f_I \quad 3-105$$

Primjer 3.5 Zadana je mreža prema slici 172. Na postojeći analizator treba postaviti zadanu mrežu i analizirati u režimu kratkog spoja. Pretpostaviti sve vrste kratkog spoja u čvoru 3.



Slika 172 - Zadana mreža

Poznato: $V_m = 4,5 \text{ V}$
 $I_m = 200 \text{ mA}$

Mrežu ćemo preračunati na naponski nivo 110 kV:

$$X_{VI} = X_{VII} = 0,4 \cdot 105 = 42 \text{ } |\Omega|$$

$$X_{VI}^0 = X_{VII}^0 = 126 \text{ } |\Omega|$$

$$x_T = 0,1 \frac{110^2}{50} = 24,2 \quad |\Omega|$$

$$x_G^i = 0,18 \frac{10^2}{50} \left(\frac{110}{10}\right)^2 = 43,56 \quad |\Omega|$$

$$x_G'' = 0,2 \frac{10^2}{50} \left(\frac{110}{10}\right)^2 = 48,4 \quad |\Omega|$$

Maksimalna očekivana snaga u zadanoj mreži kod kratkog spoja je 900 MVA. Sada određujemo mjerila:

Za napon:

$$f_V = \frac{V_M}{V_m} = \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 4,5} = 14,113 \cdot 10^3$$

$$f_S = \frac{S_M}{S_m} = \frac{900 \cdot 10^6}{4,5 \cdot 200 \cdot 10^{-3}} = 1000 \cdot 10^6$$

$$f_I = \frac{f_S}{f_V} = \frac{1000 \cdot 10^6}{14,113 \cdot 10^3} = 70,857 \cdot 10^3$$

$$f_Z = \frac{f_V^2}{f_S} = \frac{14,113 \cdot 10^6}{1000 \cdot 10^6} = 0,19917676$$

Računamo djelatne otpore analizatora s kojima ćemo simulirati sisteme komponenata mreže.

$$R_{VI} = R_{VII} = \frac{42}{0,19917676} = 210,68 \quad |\Omega|$$

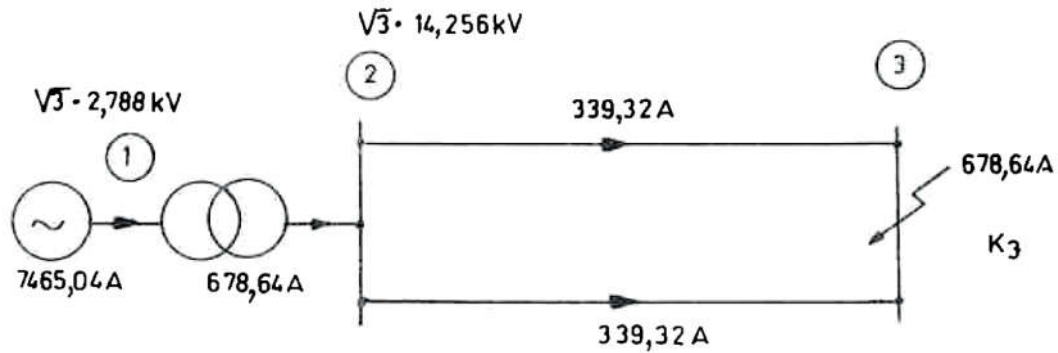
$$R_{VI}^O = R_{VII}^O = 632,04 \quad |\Omega|$$

$$R_T = \frac{24,2}{0,19917676} = 121,5 \quad |\Omega|$$

$$R_G'' = \frac{48,4}{0,19917676} = 244,0 \quad |\Omega|$$

$$R_G^2 = \frac{43,56}{0,19917676} = 218,7 \quad |\Omega|$$

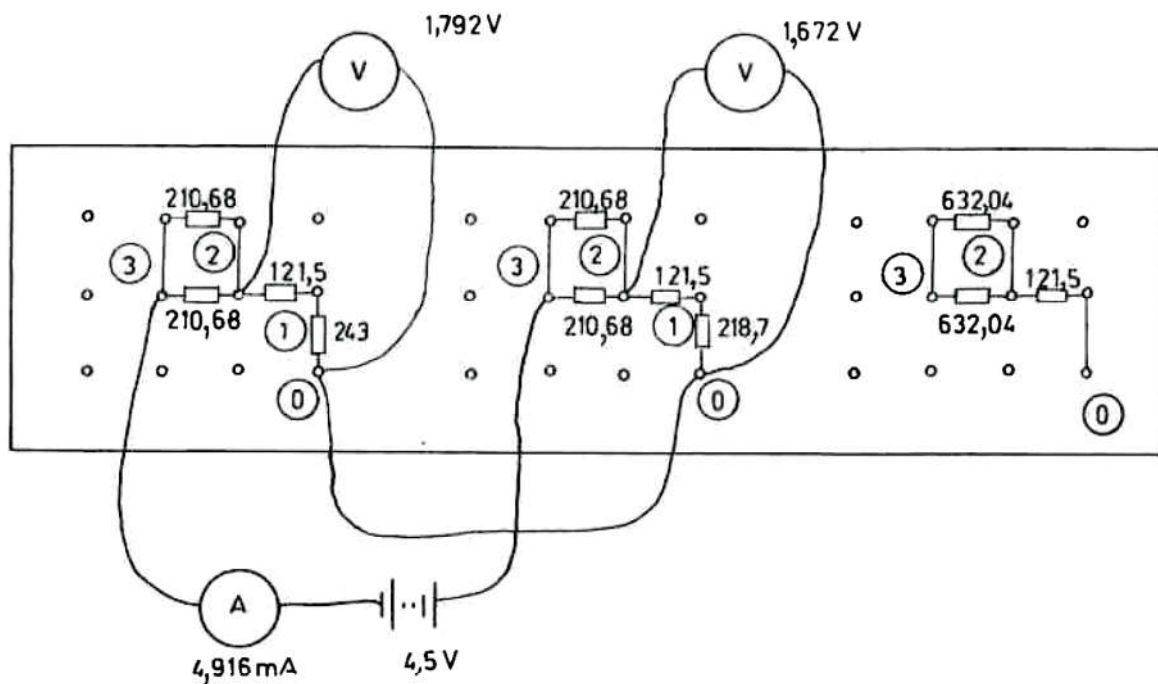
Na slici 174 upisane su vrijednosti, koje smo dobili preračunavanjem mjerenih vrijednosti na analizatoru.



Slika 174 - Struje i naponi troleznog kratkog spoja
u čvoru 3 mreže sa slike 172

Dvopolni kratki spoj u čvoru 3

Mjerenja kod ovog kratkog spoja pokazana su na slici 175.



Slika 175 - Dvopolni kratki spoj u čvoru 3 mreže sa sl.172

Rezultati mjerenja na analizatoru jesu:

$$I_m = 4,916 \quad |mA|$$

$$V_{m1}^1 = 1,194 \quad |V|$$

$$V_{m1}^2 = 1,075 \quad |V|$$

$$V_{m2}^1 = 1,792 \quad |V|$$

$$V_{m2}^2 = 1,672 \quad |V|$$

$$V_{m3}^1 = 2,31 \quad |V|$$

$$V_{m3}^2 = 2,19 \quad |V|$$

Ove rezultate pretvaramo u stvarne vrijednosti originalne mreže.

$$\bar{I}_k^c = - \bar{I}_k^b = \sqrt{3} \cdot 4,916 \cdot 10^{-3} \cdot 70,857 \cdot 10^3 = 603,33 \quad |A|$$

$$S_k = 3 \sqrt{3} \cdot 4,5 \cdot 4,913 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 10^6 = 114,95 \quad |MVA|$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_{M1}^a &= [(4,5 - 1,194) e^{-j150} + 1,075 e^{j150}] \frac{10}{110} 14,113 \cdot 10^3 = \\ &= - 4,87 - j 1,431 \quad |kV| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_{M1}^b &= [a^2(4,5 - 1,194) e^{-j150} + a 1,075 e^{j150}] \cdot \\ &\cdot \frac{10}{100} 14,113 \cdot 10^3 = 0 + j 2,862 \quad |kV| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_{M1}^c &= [a(4,5 - 1,194) e^{-j150} + a^2 1,075 e^{j150}] \cdot \\ &\cdot \frac{10}{100} 14,113 \cdot 10^3 = 4,87 - j 1,431 \quad |kV| \end{aligned}$$

$$\bar{V}_{M2}^a = (4,5 - 1,792 + 1,672) 14,113 \cdot 10^3 = 61,815 \quad |kV|$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_{M2}^b &= (a^2 4,5 - a^2 1,792 + a 1,672) 14,113 \cdot 10^3 = \\ &= - 30,907 - j 12,659 \quad |kV| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{V}_{M2}^c &= (a_{4,5} - a_{1,792} + a_{1,672}^2) 14,13 \cdot 10^3 = \\ &= - 30,907 + j 12,659 \quad |kV|\end{aligned}$$

$$\bar{V}_{M3}^a = (4,5 - 2,31 + 2,19) 14,113 \cdot 10^3 = 61,815 \quad |kV|$$

$$\begin{aligned}\bar{V}_{M3}^b &= (a_{4,5}^2 - a_{2,31}^2 + a_{2,19}) 14,113 \cdot 10^3 = \\ &= - 30,907 \quad |kV|\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{V}_{M3}^c &= (a_{4,5} - a_{2,31} + a_{2,19}^2) 14,113 \cdot 10^3 = \\ &= - 30,907 \quad |kV|\end{aligned}$$

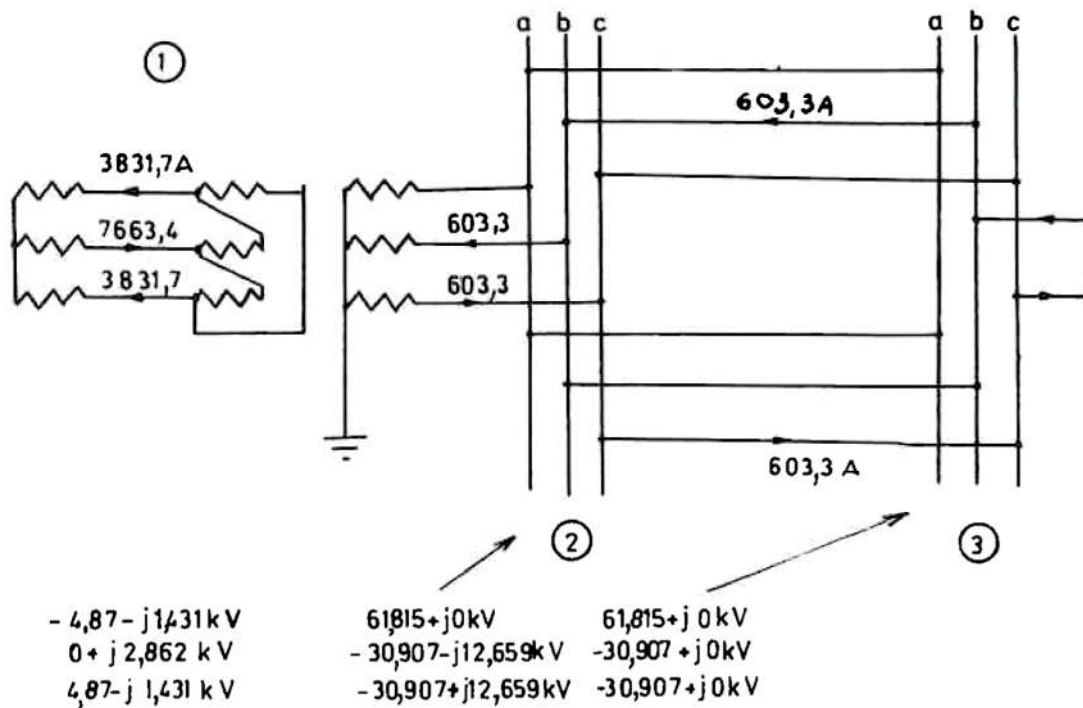
Struje na strani 10 kV :

$$\begin{aligned}\bar{I}_M^a &= 4,916 \cdot 10^{-3} (e^{-j150} - e^{j150}) (-j) \frac{110}{10} 70,857 \cdot 10^3 = \\ &= - 3831,7 \quad |A|\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_M^b &= 4,916 \cdot 10^{-3} (a^2 e^{-j150} - a e^{j150}) (-j) \frac{110}{10} \cdot \\ &\cdot 70,857 \cdot 10^3 = 7663,4 \quad |A|\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_M^c &= 4,916 \cdot 10^{-3} (a e^{-j150} - a^2 e^{j150}) (-j) \frac{110}{10} \cdot \\ &\cdot 70,857 \cdot 10^3 = - 3831,7 \quad |A|\end{aligned}$$

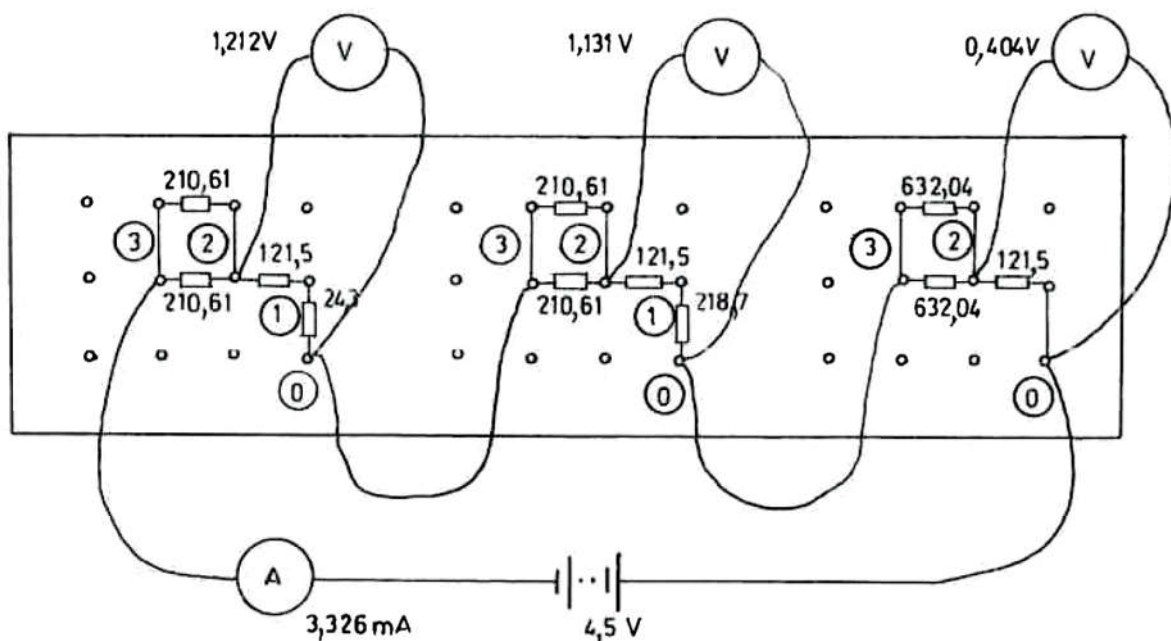
Na slici 176 upisane su vrijednosti, koje smo dobili preračunavanjem mjerenih vrijednosti na analizatoru.



Slika 176 - Struje i naponi dvopolnog kratkog spoja u čvoru 3 mreže sa slike 172

Jednopolni kratki spoj u čvoru 3

Mjerenja kod ovog kratkog spoja pokazana su na slici 177.



Slika 177 - Jednopolni kratki spoj u čvoru 3 mreže sa sl.172

Rezultati mjerenja na analizatoru jesu:

$$I_M = 3,326 \text{ |mA|}$$

$$V_{m1}^1 = 0,808 \text{ |V|}$$

$$V_{m1}^2 = 0,727 \text{ |V|}$$

$$V_{m1}^0 = 0 \text{ |V|}$$

$$V_{m2}^1 = 1,212 \text{ |V|}$$

$$V_{m2}^2 = 1,131 \text{ |V|}$$

$$V_{m2}^0 = 0,404 \text{ |V|}$$

$$V_{m3}^1 = 1,563 \text{ |V|}$$

$$V_{m3}^2 = 1,482 \text{ |V|}$$

$$V_{m3}^0 = 1,45 \text{ |V|}$$

Ove rezultate pretvaramo u stvarne vrijednosti originalne mreže.

$$\bar{I}_k^a = -j \ 3 \cdot 3,326 \cdot 10^{-3} \cdot 70,857 \cdot 10^3 = -j \ 707,01 \text{ |A|}$$

$$\bar{V}_{M1}^a = [(4,5 - 0,808) e^{-j150} - 0,727 e^{j150}] \frac{10}{110} \cdot$$

$$\cdot 14,113 \cdot 10^3 = -3,294 - j \ 2,835 \text{ |kV|}$$

$$\bar{V}_{M1}^b = [a^2 (4,5 - 0,808) e^{-j150} - a \ 0,727 e^{j150}] \cdot$$

$$\cdot \frac{10}{100} \ 14,1 \cdot 10^3 = 0 + j \ 5,67 \text{ |kV|}$$

$$\bar{V}_{M1}^c = [a (4,5 - 0,808) e^{-j150} - a^2 \ 0,727 e^{j150}] \cdot$$

$$\cdot \frac{10}{110} \ 14,13 \cdot 10^3 = 3,294 - j \ 2,835 \text{ |kV|}$$

$$\bar{V}_{M2}^a = (4,5 - 1,212 - 1,131 - 0,404) 14,13 \cdot 10^3 = 24,74 \text{ |kV|}$$

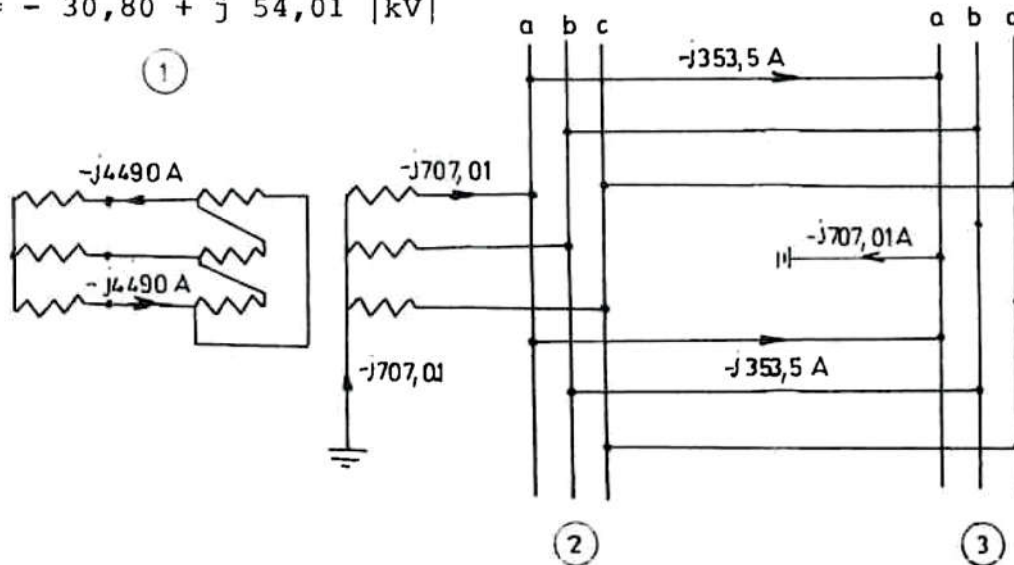
$$\begin{aligned} \bar{V}_{M2}^b &= (a^2 4,5 - a^2 1,212 - a 1,131 - 0,404) 14,13 \cdot 10^3 = \\ &= -20,92 - j 54,03 \text{ |kV|} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_{M2}^c &= (a 4,5 - a 1,212 - a^2 1,131 - 0,404) \cdot 14,13 \cdot \\ &\cdot 10^3 = -20,92 + j 54,03 \text{ |kV|} \end{aligned}$$

$$\bar{V}_{M3}^a = (4,5 - 1,563 - 1,482 - 1,455) 14,113 \cdot 10^3 = 0 \text{ |kV|}$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_{M3}^b &= (a^2 4,5 - a^2 1,212 - a 1,482 - 1,45) 14,1 \cdot 10^3 = \\ &= -30,80 - j 53,01 \text{ |kV|} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_{M3}^c &= (a 4,5 - a 1,563 - a^2 1,482 - 1,456) 14,113 \cdot 10^3 = \\ &= -30,80 + j 54,01 \text{ |kV|} \end{aligned}$$



-3,294-j2,835 kV	24,74+j0 kV	0 kV
0 +j5,67 kV	-20,92-j54,03 kV	-30,8-j54,0,7 kV
3,294-j5,67 kV	-20,92+j54,03 kV	-30,8+j54,0,7 kV

Slika 178 - Struje i naponi jednofaznog kratkog spoja u čvoru 3 mreže sa slike 172

Struje na strani 10 kV :

$$\bar{I}_M^a = 3,326 \cdot 10^{-3} (e^{-j150} + e^{j150}) (-j) \frac{110}{10} 70,857 \cdot$$

$$\cdot 10^3 = j 4490,12 \text{ |A|}$$

$$\bar{I}_M^b = 3,326 \cdot 10^{-3} (a^2 e^{-j150} + a e^{j150}) (-j) \cdot$$

$$\cdot \frac{110}{10} 70,857 \cdot 10^3 = 0 \text{ |A|}$$

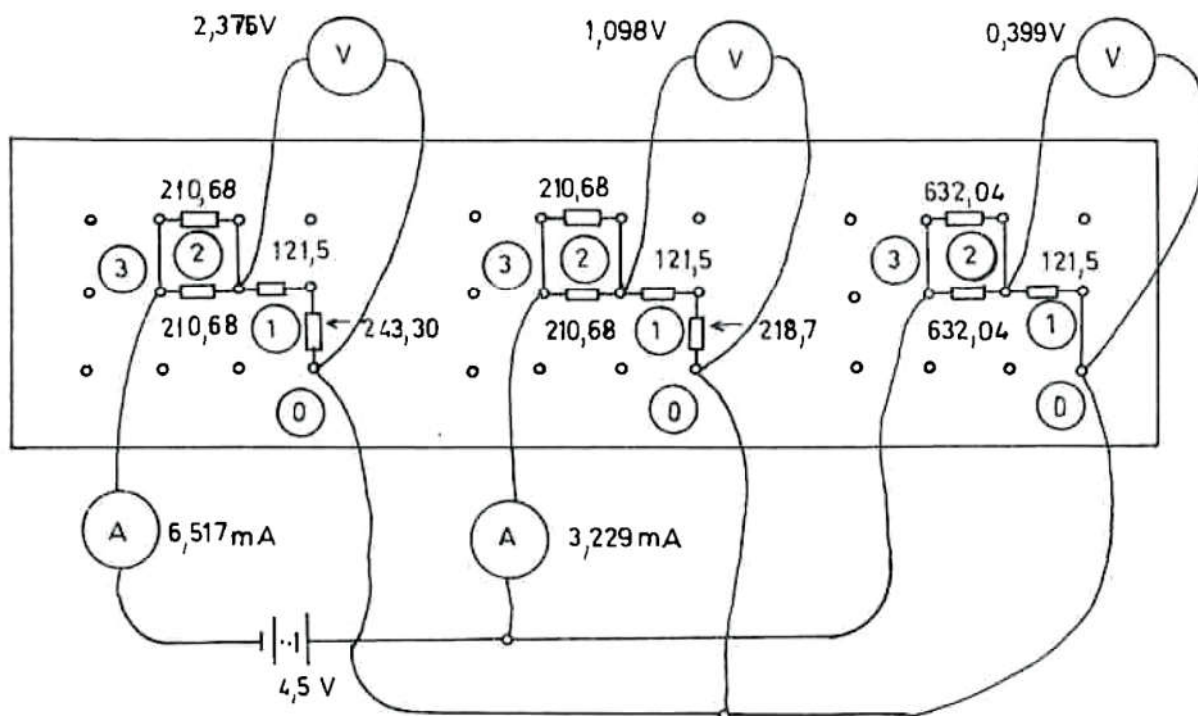
$$\bar{I}_M^c = 3,326 \cdot 10^{-3} (a e^{-j150} + a^2 e^{j150}) (-j) \cdot$$

$$\cdot \frac{110}{10} \cdot 70,857 \cdot 10^3 = -j 4490,12 \text{ |A|}$$

Na sl.178 upisane su vrijednosti, koje smo dobili preračunavanjem mjerenih vrijednosti na analizatoru.

Dvopolni kratki spoj sa spojem sa zemljom u čvoru 3

Mjerenja kod ovog kratkog spoja pokazana su na slici 179.



Slika 179 - Dvopolni kratki spoj sa spojem sa zemljom u čvoru 3 mreže sa slike 172

Rezultati mjerenja na analizatoru jesu:

$$I_m^1 = 6,517 \text{ mA}$$

$$I_m^2 = 3,229 \text{ mA}$$

$$I_m^O = 3,288 \text{ mA}$$

$$V_{m1}^1 = 1,583 \text{ V}$$

$$V_{m1}^2 = 0,706 \text{ V}$$

$$V_{m1}^O = 0 \text{ V}$$

$$V_{m2}^1 = 2,375 \text{ V}$$

$$V_{m2}^2 = 1,098 \text{ V}$$

$$V_{m2}^O = 0,399 \text{ V}$$

$$V_{m3}^1 = 3,061 \text{ V}$$

$$V_{m3}^2 = 1,439 \text{ V}$$

$$V_{m3}^O = 1,439 \text{ V}$$

Ove rezultate pretvaramo u stvarne vrijednosti originalne mreže.

$$\bar{I}_k^b = -j (a^2 6,517 - a 3,229 - 3,288) 10^{-3} \cdot 70,857 \cdot$$

$$\cdot 10^3 = -598,05 + j 349,5 \text{ A}$$

$$\bar{I}_k^c = -j (a 6,517 - a^2 3,229 - 3,288) 10^{-3} \cdot 70,857 \cdot$$

$$\cdot 10^3 = 598,05 + j 349,5 \text{ A}$$

$$3 I_k^O = \bar{I}_k^b + \bar{I}_k^c = j 699,0 \text{ A}$$

$$\bar{V}_{M1}^a = [(4,5 - 1,583) e^{-j150} + 0,706 e^{j150}] \frac{10}{110} \cdot$$

$$= 14,113 \cdot 10^3 = -4,026 - j 1,418 \text{ |kV|}$$

$$\bar{V}_{M1}^b = [a^2(4,5 - 1,583) e^{-j150} + a 0,706 e^{j150}] \cdot$$

$$\cdot \frac{10}{110} 14,113 \cdot 10^3 = 0 + j 2,84 \text{ |kV|}$$

$$\bar{V}_{M1}^c = [a(4,5 - 1,583) e^{-j150} + a^2 0,706 e^{j150}] \cdot$$

$$\cdot \frac{10}{110} 14,113 \cdot 10^3 = 4,025 - j 1,418 \text{ |kV|}$$

$$\bar{V}_{M2}^a = (4,5 - 2,375 + 1,098 + 0,399) 14,113 \cdot 10^3 =$$

$$= 51,11 \text{ |kV|}$$

$$\bar{V}_{M2}^b = (a^2 4,5 - a^2 2,375 + a 1,098 + 0,399) \cdot$$

$$\cdot 14,113 \cdot 10^3 = -17,11 - j 12,55 \text{ |kV|}$$

$$\bar{V}_{M2}^c = (a 4,5 - a 2,374 + a^2 1,098 + 0,399) 14,113 \cdot$$

$$\cdot 10^3 = -17,11 + j 12,55 \text{ |kV|}$$

$$\bar{V}_{M3}^a = (4,5 - 3,061 + 1,439 + 1,439) 14,113 \cdot 10^3 =$$

$$= 60,926 \text{ |kV|}$$

$$\bar{V}_{M3}^b = (a^2 4,5 - a^2 3,061 + a 1,439 + 1,439) 14,113 \cdot$$

$$\cdot 10^3 = 0 \text{ |kV|}$$

$$\bar{V}_{M3}^c = (a 4,5 - a 3,061 + a^2 1,439 + 1,439) 14,113 \cdot$$

$$\cdot 10^3 = 0 \text{ |kV|}$$

Struja na strani 10 kV

$$\bar{I}_M^a = (6,517 e^{-j150} - 3,229 e^{j150}) \cdot 10^{-3} \cdot$$

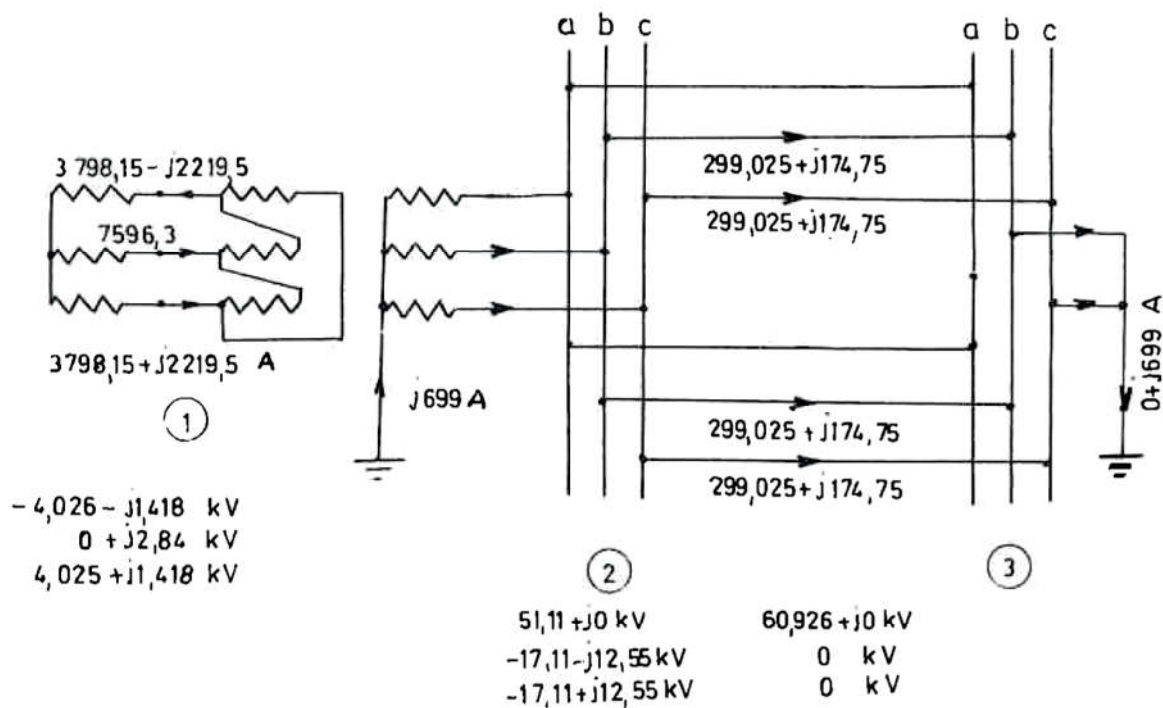
$$\cdot \frac{110}{10} 70,857 \cdot 10^3 = -3798,148 + j 2219,5 \text{ [A]}$$

$$\bar{I}_M^b = (6,517 a^2 e^{-j150} - 3,229 a e^{j150}) \cdot 10^{-3} (-j) \cdot$$

$$\cdot \frac{110}{10} 70,857 \cdot 10^3 = 7596,3 + j 0 \text{ [A]}$$

$$\bar{I}_M^c = (6,517 a e^{-j150} - a^2 3,229 e^{j150}) \cdot 10^{-3} (-j) \cdot$$

$$\cdot \frac{110}{10} 70,857 \cdot 10^3 = -3798,15 - j 2219,5 \text{ [A]}$$



Slika 180 - Struje i naponi dvopolnog kratkog spoja sa spojem sa zemljom u čvoru 3 mreže sa slike 172

Na sl.180 upisane su vrijednosti, koje smo dobili preračunavanjem mjerenih vrijednosti na analizatoru.

3.1.7 Kratki spoj na dvostrukom vodu

3.1.7.1 Primjena p,q transformacije

Primjena simetričnih komponenata u računu kratkog spoja rezultira ekvivalentnim shemama u kojima su sistemi komponenata direktnog, inverznog i nultog sistema međusobno povezani ovisno o vrsti kratkog spoja. Pod određenim uvjetima ovi su sistemi međusobno nezavisni, što i opravdava primjenu simetrične transformacije.

Zavisnost sistema komponenata javlja se kod dvostrukih vodova radi nepotpunog prepleta. Vandijagonalni članovi matrice uzdužnih konstanti i matrice poprečnih konstanti dvostrukog voda su veličine nižeg reda prema dijagonalnim članovima, pa ih možemo zanemariti. Iznimka je međusobna admitancija, a pogotovo međusobna impedancija nultih sistema. Veličina međusobne nulte impedancije kreće se između direktne (inverzne) i nulte vlastite impedancije pojedinog voda.

Pojava međusobne impedancije u ekvivalentnoj shemi nultog sistema interesantna je za jednopolni kratki spoj i za dvopolni kratki spoj sa spojem sa zemljom. Ovdje će biti pokazan tok proračuna na dva načina. Po prvom načinu koristi se transfiguracija, pa ga možemo nazvati klasičnim. Po drugom načinu dijagonalizira se matrica konstanti nultog sistema dvostrukog voda primjenom odgovarajuće transformacije.

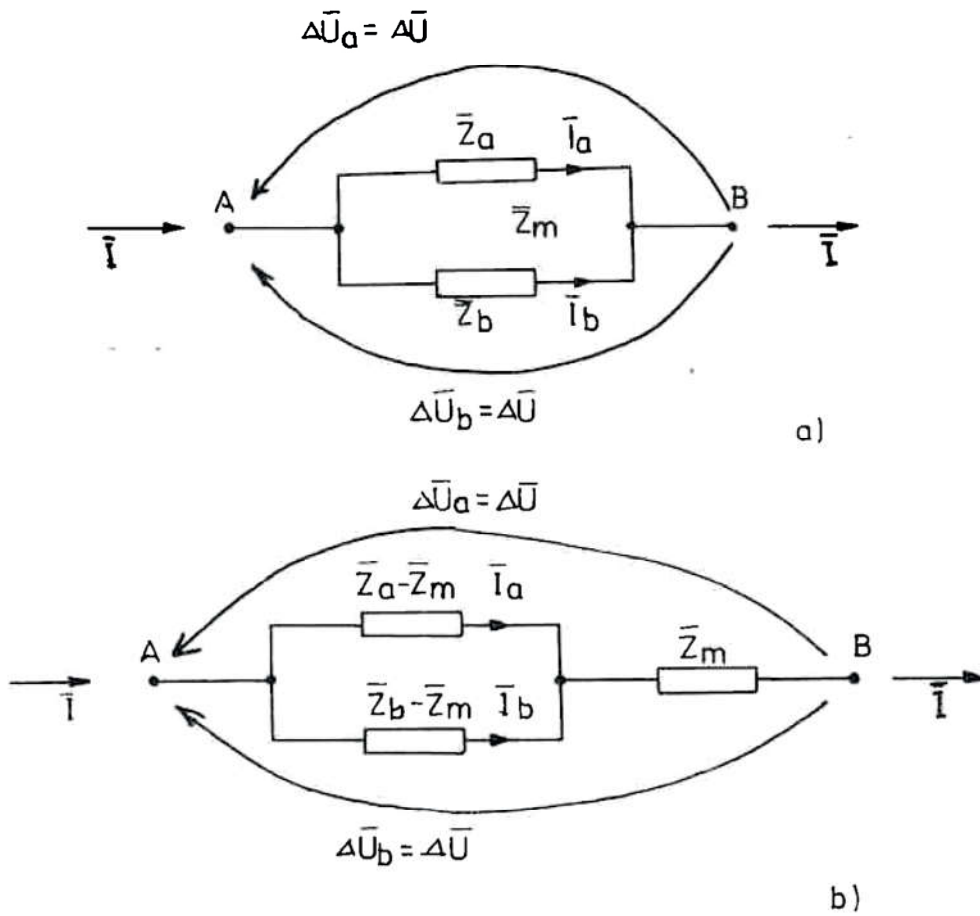
Za sklop prema slici 181a i za sklop prema slici 182a možemo postaviti jednadžbe:

$$\Delta \bar{U}_a = \bar{Z}_a \bar{I}_a + \bar{Z}_m \bar{I}_b \quad 3-106a$$

$$\Delta \bar{U}_b = \bar{Z}_m \bar{I}_a + \bar{Z}_b \bar{I}_b \quad b$$

$$\bar{I} = \bar{I}_a + \bar{I}_b \quad c$$

Uvrstimo izraz $\bar{I}_b = \bar{I} - \bar{I}_a$ u 3-106a i izraz $\bar{I}_a = \bar{I} - \bar{I}_b$ u 3-106b. Dobit ćemo jednadžbe:



Slika 181 - Transfiguracija paralelnih grana u sklop bez međusobnog utjecaja

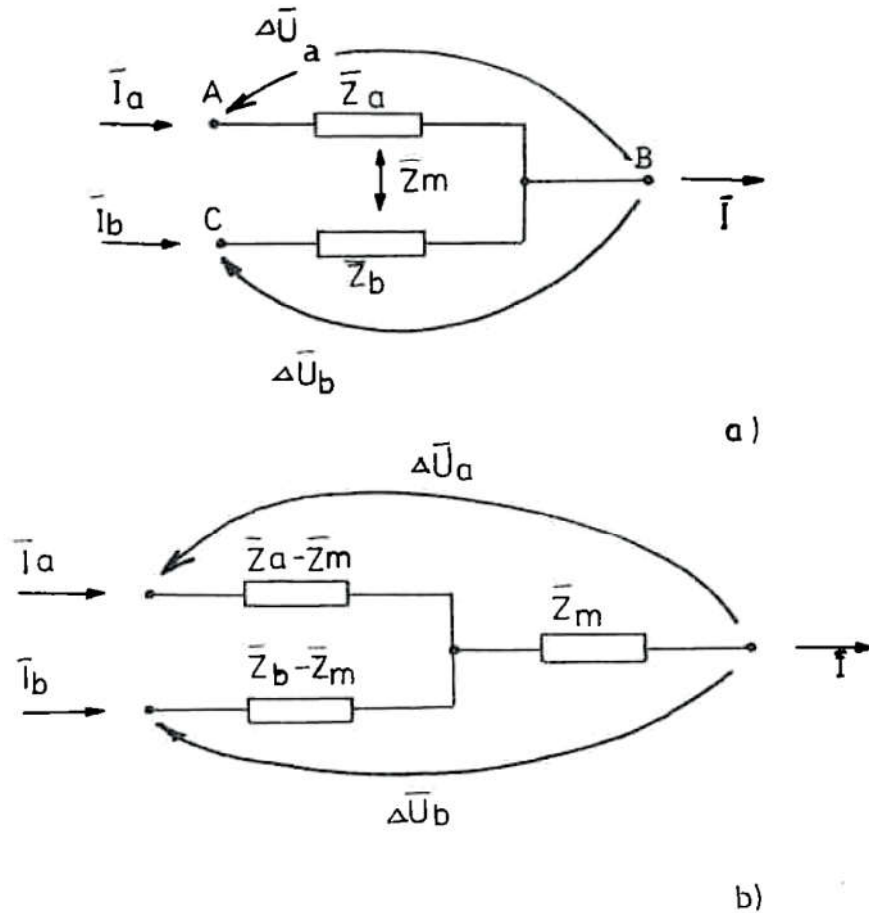
$$\Delta \bar{U}_a = (\bar{Z}_a - \bar{Z}_m) \bar{I}_a + \bar{Z}_m \bar{I} \quad 3-107a$$

$$\Delta \bar{U}_b = (\bar{Z}_b - \bar{Z}_m) \bar{I}_b + \bar{Z}_m \bar{I} \quad b$$

Jednadžbe 3-107a i b mogu se interpretirati sklopovima pokazanim na slici 181b odnosno 182b, u kojima nema međusobnog utjecaja među impedancijama.

Sklop sa slike 1.b možemo dalje transfigurirati u impedanciju

$$\bar{Z} = \frac{\bar{Z}_a \bar{Z}_b - \bar{Z}_m^2}{\bar{Z}_a + \bar{Z}_b - \bar{Z}_m} \quad 3-108$$



Slika 182 - Transfiguracija grabljastog sklopa u sklop bez međusobnog utjecaja

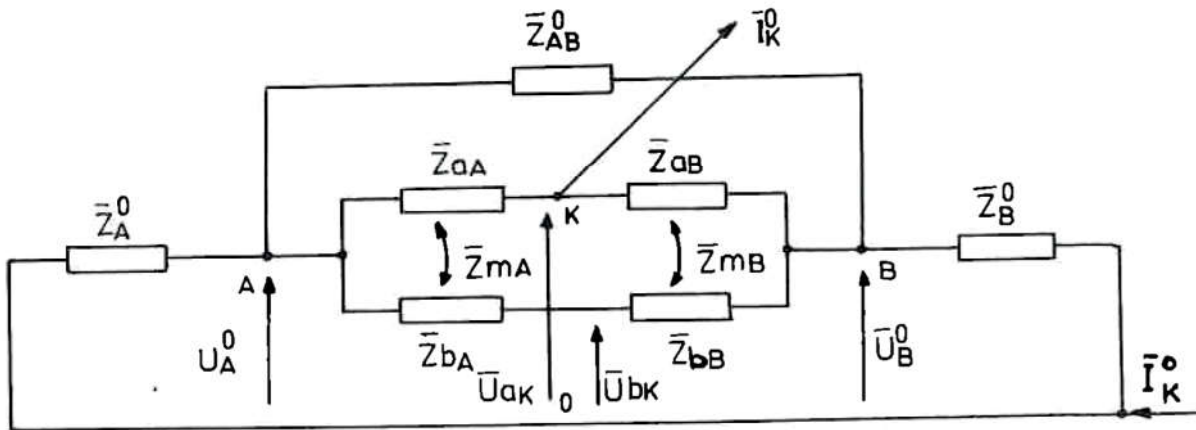
a za $\bar{Z}_a = \bar{Z}_b = \bar{Z}_s$ izraz 3-108 prelazi u

$$\bar{Z} = \frac{1}{2} (\bar{Z}_s + \bar{Z}_m) \quad 3-109$$

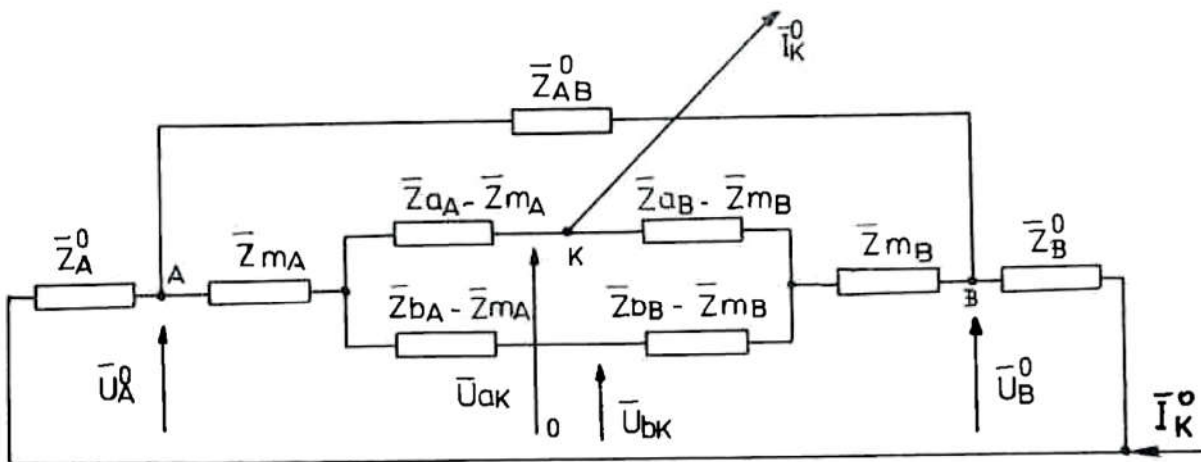
Sklop sa slike 182b ne možemo dalje transfigurirati.

Saznanja o transfiguraciji sklopa sa slike 181a i slike 182a primijenit ćemo u analizi jednopolnog kratkog spoja i dvopolnog kratkog spoja sa spojem sa zemljom. U oba slučaja nulti sistem ima istu ekvivalentnu shemu.

Analizirajmo prilike kod kratkog spoja na jednoj trojki dvostrukog dalekovoda uvažavajući međusobni utjecaj vodova. Ako u računu kratkog spoja zanemarimo poprečne grane, izgledati će ekvivalent-



a)



b)

$\bar{Z}_A^0$, $\bar{Z}_B^0$, $\bar{Z}_{AB}^0$ - nulti sistem izvan voda reduciran na čvorove A i B

$\bar{Z}_{aA}$, $\bar{Z}_{bA}$, $\bar{Z}_{mA}$ - dionica voda na strani A

$\bar{Z}_{aB}$, $\bar{Z}_{bB}$, $\bar{Z}_{mB}$ - dionica voda na strani B

Slika 183 - Nulti sistem komponenata. Kratki spoj u čvoru K na vodu a

na shema nultog sistema prema slici 183a. Na slici 183b pokazan je nulti sistem nakon transfiguracije, u kojoj su vodovi oslobođeni međusobnog utjecaja klasičnim postupkom.

Jednadžbe 3-106 možemo napisati u matričnom obliku:

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{U}_a \\ \Delta \bar{U}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_a & Z_m \\ \bar{Z}_m & \bar{Z}_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \end{bmatrix} \quad 3-110a$$

odnosno

$$[\Delta \bar{U}^{ab}] = [\bar{Z}^{ab}] [\bar{I}^{ab}] \quad b$$

Na sistem jednadžbi 3-110 primjenit ćemo $[T]$ transformaciju, koja transformira a,b sistem u p,q sistem.

$$[T] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad 3-111a$$

$$[T]^{-1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad b$$

$$[\Delta \bar{U}^{ab}] = [T] [\Delta \bar{U}^{pq}] \quad 3-112a$$

$$[\bar{I}^{ab}] = [T] [\bar{I}^{pq}] \quad b$$

Uvrstimo 3-112 u jednadžbu 3-110b i uvažimo da je

$$[\Delta \bar{U}^{pq}] = [\bar{Z}^{pq}] [\bar{I}^{pq}] \quad 3-113$$

Nakon sredjivanja dobijemo:

$$[\bar{Z}^{pq}] = \frac{1}{2} \begin{array}{|c|c|} \hline \bar{Z}_a + \bar{Z}_b + 2\bar{Z}_m & \bar{Z}_a - \bar{Z}_b \\ \hline \bar{Z}_a - \bar{Z}_b & \bar{Z}_a + \bar{Z}_b - 2\bar{Z}_m \\ \hline \end{array} \quad 3-114$$

Sistemi su nezavisni kada je $\bar{Z}_a = \bar{Z}_b = \bar{Z}_s$. Tada je:

$$[\bar{z}^{pq}] = \begin{array}{|c|c|} \hline \bar{z}_a + \bar{z}_m & \\ \hline & \bar{z}_a - \bar{z}_m \\ \hline \end{array} \quad 3-115$$

Izvedba dvostrukog voda je u pravilu takova, da se može koristiti relacija 3-115.

Relacija 3-112a i b u stvari znače:

$$\Delta \bar{U}_a = \frac{1}{\sqrt{2}} (\Delta \bar{U}_p + \Delta \bar{U}_q) \quad 3-116a$$

$$\Delta \bar{U}_b = \frac{1}{\sqrt{2}} (\Delta \bar{U}_p - \Delta \bar{U}_q) \quad b$$

$$\bar{I}_a = \frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{I}_p + \bar{I}_q) \quad 3-117a$$

$$\bar{I}_b = \frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{I}_p - \bar{I}_q) \quad b$$

odnosno $\Delta \bar{U}_p = \frac{1}{\sqrt{2}} (\Delta \bar{U}_a - \Delta \bar{U}_b) \quad 3-118a$

$$\Delta \bar{U}_q = \frac{1}{\sqrt{2}} (\Delta \bar{U}_a - \Delta \bar{U}_b) \quad b$$

$$\bar{I}_p = \frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{I}_a + \bar{I}_b) \quad 3-119a$$

$$\bar{I}_q = \frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{I}_a - \bar{I}_b) \quad b$$

[T] transformaciju primjenimo na nulti sistem sa slike 183a tako, da električne veličine u točkama A, B i K izrazimo u p,q komponentama.

Na mjestu A :

$$\bar{U}_{aA}^0 = \bar{U}_{bA}^0 = \bar{U}_A^0 \quad 3-120a$$

$$\bar{U}_{pA} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{U}_{aA}^0 + \bar{U}_{bA}^0) \quad b$$

$$\bar{U}_{qA} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{U}_{aA}^O + \bar{U}_{bA}^O) \quad c$$

$$\bar{I}_{pA} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{I}_{aA}^O + \bar{I}_{bA}^O) \quad d$$

Slijedi: $\bar{U}_{pA} = \sqrt{2} \bar{U}_A^O \quad 3-121a$

$$\bar{U}_{qA} = 0 \quad b$$

$$\bar{I}_{pA} = \frac{1}{\sqrt{2}} \bar{I}_A^O \quad c$$

Na mjestu B: $\bar{U}_{aB}^O = \bar{U}_{bB}^O = \bar{U}_B^O \quad 3-122a$

$$\bar{U}_{pB} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{U}_{aB}^O + \bar{U}_{bB}^O) \quad b$$

$$\bar{U}_{qB} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{U}_{aB}^O - \bar{U}_{bB}^O) \quad c$$

$$\bar{I}_{pB} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{I}_{aB}^O + \bar{I}_{bB}^O) \quad d$$

Slijedi: $\bar{U}_{pB} = \sqrt{2} \bar{U}_B^O \quad 3-123a$

$$\bar{U}_{qB} = 0 \quad b$$

$$\bar{I}_{pB} = \frac{1}{\sqrt{2}} \bar{I}_B^O \quad c$$

Na mjestu K: $\bar{U}_{aK}^O = \frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{U}_{pK} + \bar{U}_{qK}) = \bar{U}_K^O \quad 3-124a$

$$\bar{I}_{aK} = \bar{I}_K^O \quad b$$

$$\bar{I}_{bK} = 0 \quad c$$

$$\bar{I}_{pK} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{I}_{aK}^o + \bar{I}_{bK}^o) = \frac{1}{\sqrt{2}} \bar{I}_{aK}^o = \frac{1}{\sqrt{2}} \bar{I}_K^o \quad d$$

$$\bar{I}_{qK} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{I}_{aK}^o - \bar{I}_{bK}^o) = \frac{1}{\sqrt{2}} \bar{I}_{aK}^o = \frac{1}{\sqrt{2}} \bar{I}_K^o \quad e$$

$$\text{Slijedi: } \frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{U}_{pK} + \bar{U}_{qK}) = \bar{U}_K^o \quad 3-125a$$

$$\bar{I}_{pK} = \frac{1}{\sqrt{2}} \bar{I}_K^o \quad b$$

$$\bar{I}_{qK} = \frac{1}{\sqrt{2}} \bar{I}_K^o \quad c$$

[T] transformaciju primjenimo još i na padove napona:

$$\Delta \bar{U}_{aA}^o = \bar{Z}_A \bar{I}_{aA}^o + \bar{Z}_{mA} \bar{I}_{bA}^o$$

$$\Delta \bar{U}_{bA}^o = \bar{Z}_A \bar{I}_{bA}^o + \bar{Z}_{mA} \bar{I}_{aA}^o$$

$$\pm \text{-----}$$

$$(\Delta \bar{U}_{aA}^o + \Delta \bar{U}_{bA}^o) = \bar{Z}_A (\bar{I}_{aA}^o + \bar{I}_{bA}^o) + \bar{Z}_{mA} (\bar{I}_{bA}^o + \bar{I}_{aA}^o) / \sqrt{2}$$

$$\Delta \bar{U}_{pA} = (\bar{Z}_A + \bar{Z}_{mA}) \bar{I}_{pA} \quad 3-126a$$

$$(\Delta \bar{U}_{aA}^o - \Delta \bar{U}_{bA}^o) = \bar{Z}_A (\bar{I}_{aA}^o - \bar{I}_{bA}^o) + \bar{Z}_{mA} (\bar{I}_{bA}^o - \bar{I}_{aA}^o) / \sqrt{2}$$

$$\Delta \bar{U}_{qA} = (\bar{Z}_A - \bar{Z}_{mA}) \bar{I}_{qA} \quad b$$

i analogno na strani B :

$$\Delta \bar{U}_{pB} = (\bar{Z}_B + \bar{Z}_{mB}) \bar{I}_{pB} \quad c$$

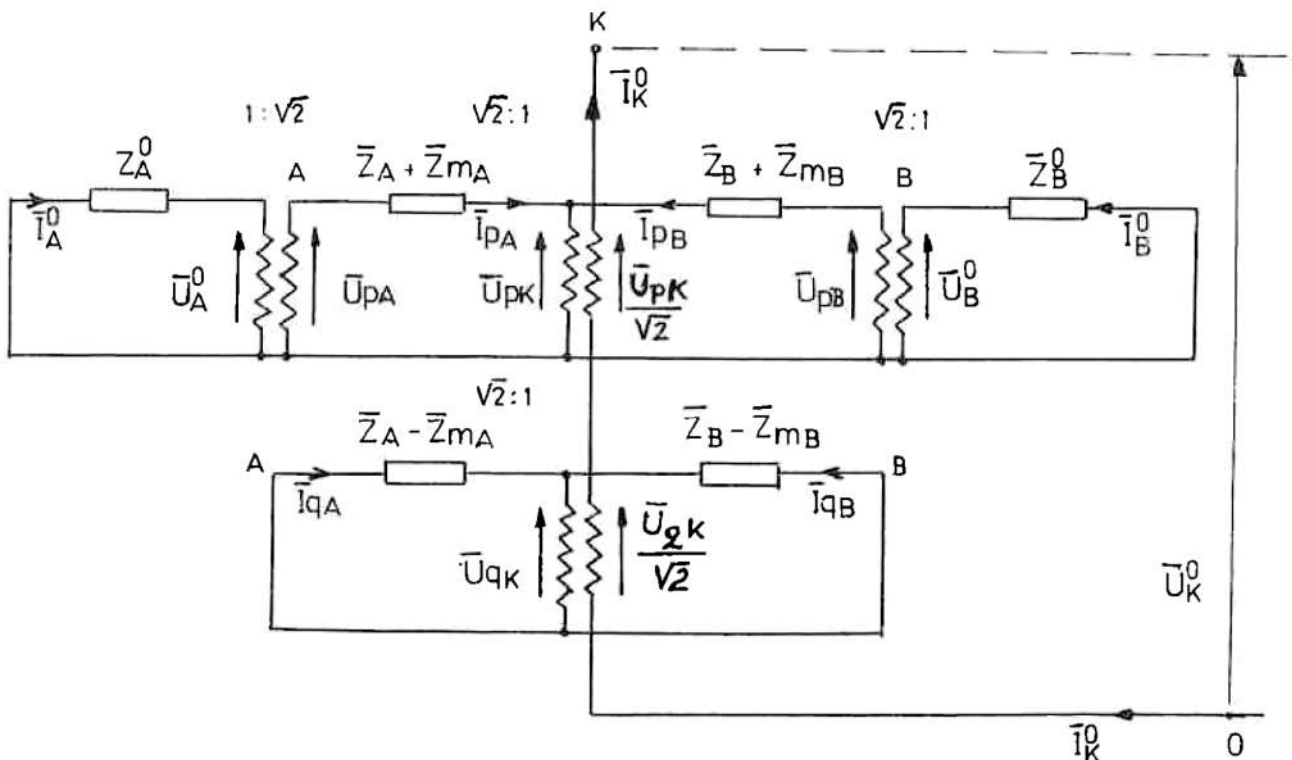
$$\Delta \bar{U}_{qB} = (\bar{Z}_B - \bar{Z}_{mB}) \bar{I}_{qB} \quad d$$

Relacije 3-126 mogli smo odmah ispisati primjenjujući relaciju 3-115.

Sisteme komponenata p i q moramo povezati tako, da budu zadovoljene relacije 3-121, 3-123 i 3-125. To je izvedeno u ekvivalentnoj shemi na slici 184 pomoću idealnih transformatora.

Nulti sistem komponenata uključen je između 0 i K. Odnosi originala, u ovom slučaju nultog sistema i sistema p,q komponenata, dani su preko relacije 3-125. Da se udovolji ovim relacijama potrebno je uključiti idealne transformatore prijenosnog omjera $\sqrt{2}:1$.

Transformaciji u p,q komponente podvrgnut je samo dvostruki vod A-B. Izvan ovog voda nulti sistem komponenata ostaje nepromijenjen. Veza između transformiranog dvostrukog voda A-B i ostalog dijela nultog sistema ostvaruje se u čvorovima A i B uz uvažavanje relacija 3-121 i 3-123. Obzirom na ove relacije, u čvorovima A i B potrebno je također postaviti idealne transformatore prijenosnog omjera $\sqrt{2}:1$ (vidi sliku 184).



Slika 184 - Uključivanje p,q sistema voda u ekvivalentnu shemu nultog sistema

Nulti sistem komponenata sa slike 184 sada treba preračunati na naponski nivo originala, tj. na naponski nivo u kojem se nalazi čvor K, da bismo se riješili idealnih transformatora i tako olakšali proračun struje $\bar{I}_K^O$. Preračunate (reducirane) impedancije označit ćemo sa dvije crtice.

$$\bar{Z}_A^{O''} = \bar{Z}_A^O (\sqrt{2})^2 \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 = \bar{Z}_A^O \quad 3-127a$$

$$\bar{Z}_B^{O''} = \bar{Z}_B^O (\sqrt{2})^2 \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 = \bar{Z}_B^O \quad b$$

$$\bar{Z}_{AB}^{O''} = \bar{Z}_{AB}^O (\sqrt{2})^2 \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 = \bar{Z}_{AB}^O \quad c$$

$$(\bar{Z}_A + \bar{Z}_{mA})'' = (\bar{Z}_A + \bar{Z}_{mA}) \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{\bar{Z}_A + \bar{Z}_{mA}}{2} \quad d$$

$$(\bar{Z}_B + \bar{Z}_{mB})'' = (\bar{Z}_B + \bar{Z}_{mB}) \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{\bar{Z}_B + \bar{Z}_{mB}}{2} \quad e$$

$$(\bar{Z}_A - \bar{Z}_{mA})'' = (\bar{Z}_A - \bar{Z}_{mA}) \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{\bar{Z}_A - \bar{Z}_{mA}}{2} \quad f$$

$$(\bar{Z}_B - \bar{Z}_{mB})'' = (\bar{Z}_B - \bar{Z}_{mB}) \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{\bar{Z}_B - \bar{Z}_{mB}}{2} \quad g$$

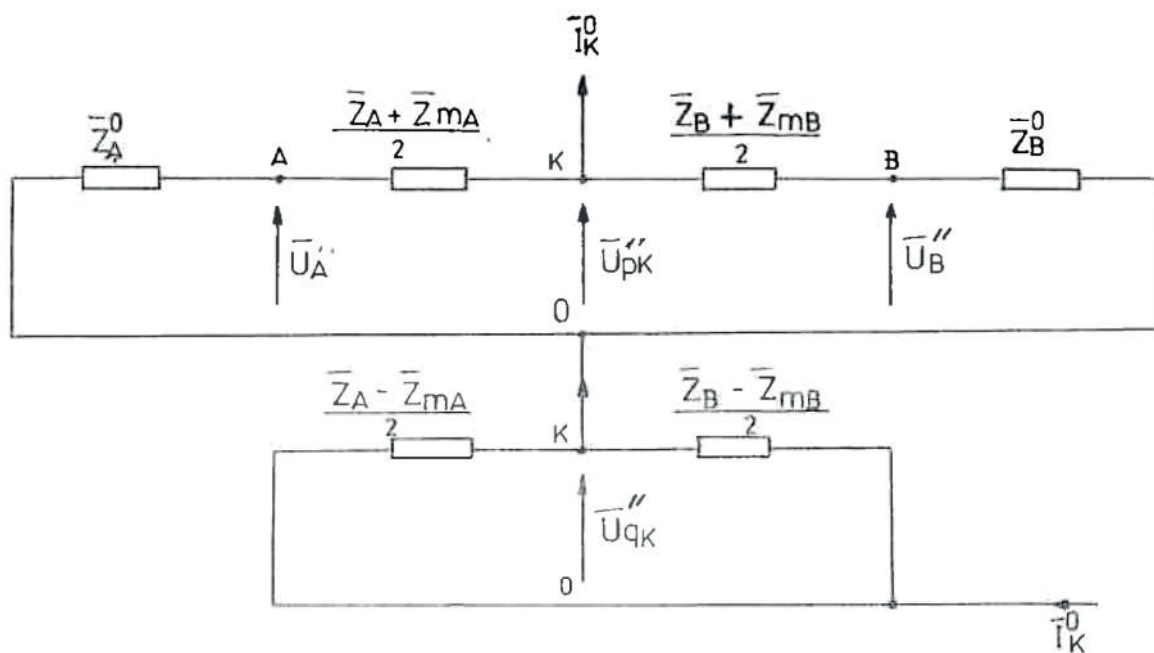
Ekvivalentna shema preračunatog (reduciranog) nultog sistema na naponski nivo originala pokazana je na slici 185.

Struje i napone reducirane mreže sa slike 185 treba natrag preračunati na struje i napone sa slike 184 ovisno o prijenosnim omjerima transformatora. Dakle:

$$\bar{U}_{pA} = \sqrt{2} \bar{U}_A'' \quad 3-128a$$

$$\bar{U}_{pB} = \sqrt{2} \bar{U}_B'' \quad b$$

$$\bar{I}_{pA} = \frac{1}{\sqrt{2}} \bar{I}_{pA}'' \quad c$$



Slika 185 - Mreža sa slike 184 reducirana na naponski nivo nultog sistema

$$\bar{I}_{pB} = \frac{1}{\sqrt{2}} \bar{I}_{pB}'' \quad d$$

$$\bar{U}_{pK} = \sqrt{2} \bar{U}_{pK}'' \quad e$$

$$\bar{U}_{qK} = \sqrt{2} \bar{U}_{qK}'' \quad f$$

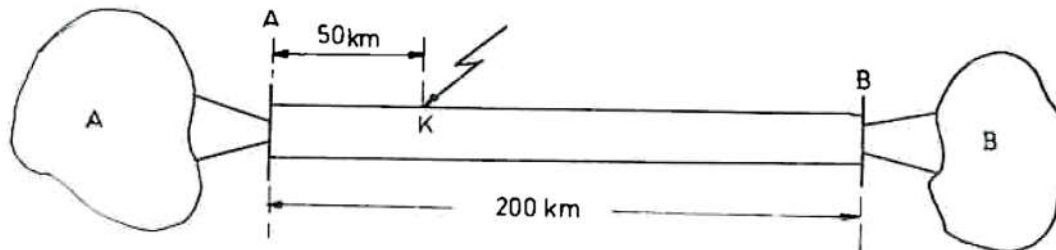
$$\bar{I}_{pK} = \frac{1}{\sqrt{2}} \bar{I}_{pK}'' \quad g$$

$$\bar{I}_{qK} = \frac{1}{\sqrt{2}} \bar{I}_{qK}'' \quad h$$

$$\bar{I}_A = \bar{I}_A'' \quad i$$

$$\bar{I}_B = \bar{I}_B'' \quad j$$

Primjer 3.6 Dvije mreže povezane su dvostrukim dalekovodom 220 kV dužine 200 km, Na udaljenosti 50 km od A došlo je do jednopolnog kratkog spoja (vidi sliku 186). Treba usporediti oba načina proračuna.



Slika 186 - Kratki spoj na dvostrukom vodu, koji spaja dvije mreže

Mreža A :

$$\bar{Z}_A^1 = j 50 |\Omega|$$

$$\bar{Z}_A^2 = j 50 |\Omega|$$

$$\bar{Z}_A^0 = j 75 |\Omega|$$

Mreža B :

$$\bar{Z}_B^1 = j 35 |\Omega|$$

$$\bar{Z}_B^2 = j 35 |\Omega|$$

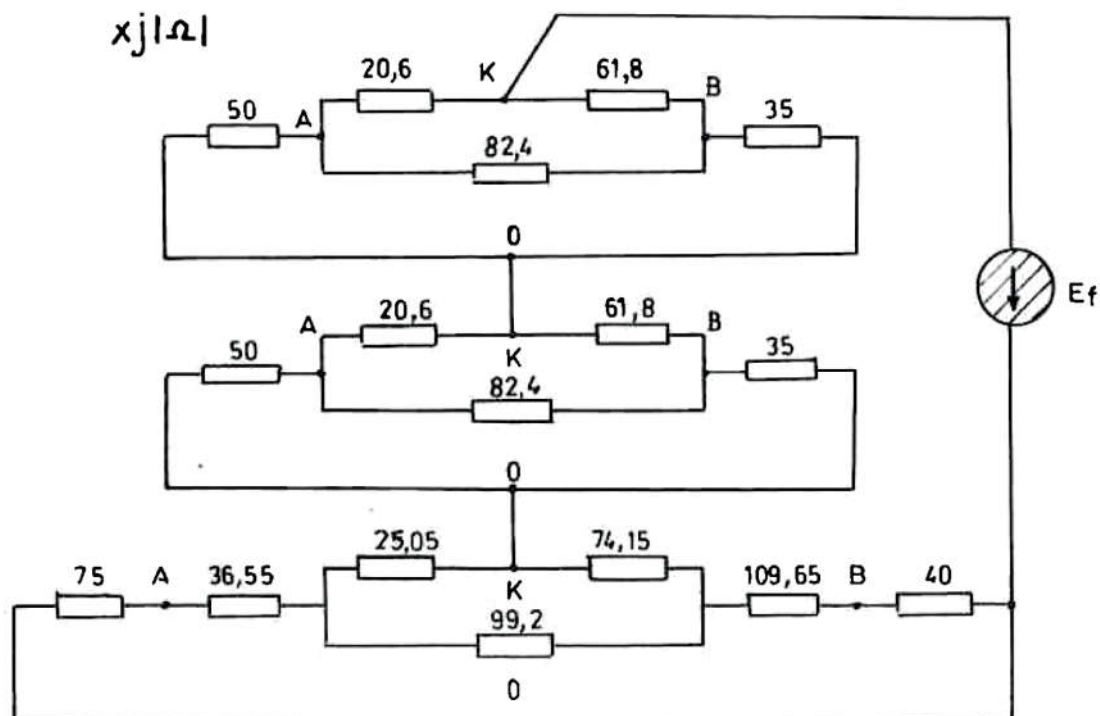
$$\bar{Z}_B^0 = j 40 |\Omega|$$

Za dvostruki dalekovod A-B poznata nam je matrica jediničnih vlastitih i međusobnih impedancija za simetrične komponente, tj. matrica $[\bar{Z}^{012,012}]$.

$$[\bar{Z}^{012,012}] =$$

	0	1	2	0	1	2	
0	0,342	0,015	-0,002	0,261	0,011	0,002	Ω/km
	1,232	-0,018	-0,013	0,731	-0,003	0,007	
1	-0,002	0,081	-0,023	0,011	-0,011	0,000	
	-0,013	0,412	0,014	0,003	0,008	0,015	
2	0,015	0,023	0,081	0,002	0,000	0,012	
	-0,018	0,014	0,412	-0,007	0,015	0,007	
0	0,261	0,002	0,011	0,342	0,015	-0,002	
	0,731	-0,007	-0,003	1,232	-0,018	-0,013	
1	0,011	0,000	-0,011	-0,002	0,081	-0,023	
	-0,003	0,015	0,008	-0,013	0,412	0,014	
2	0,002	0,012	0,000	0,015	0,023	0,081	
	-0,007	0,007	0,015	-0,018	0,014	0,412	

Radi lakšeg računanja zanemarit ćemo i djelatne otpore vodova. Oba voda imaju iste konstante.



Slika 187 - Ekvivalentna shema fiktivnog sistema komponenata jednopolnog kratkog spoja mreže sa sl.186

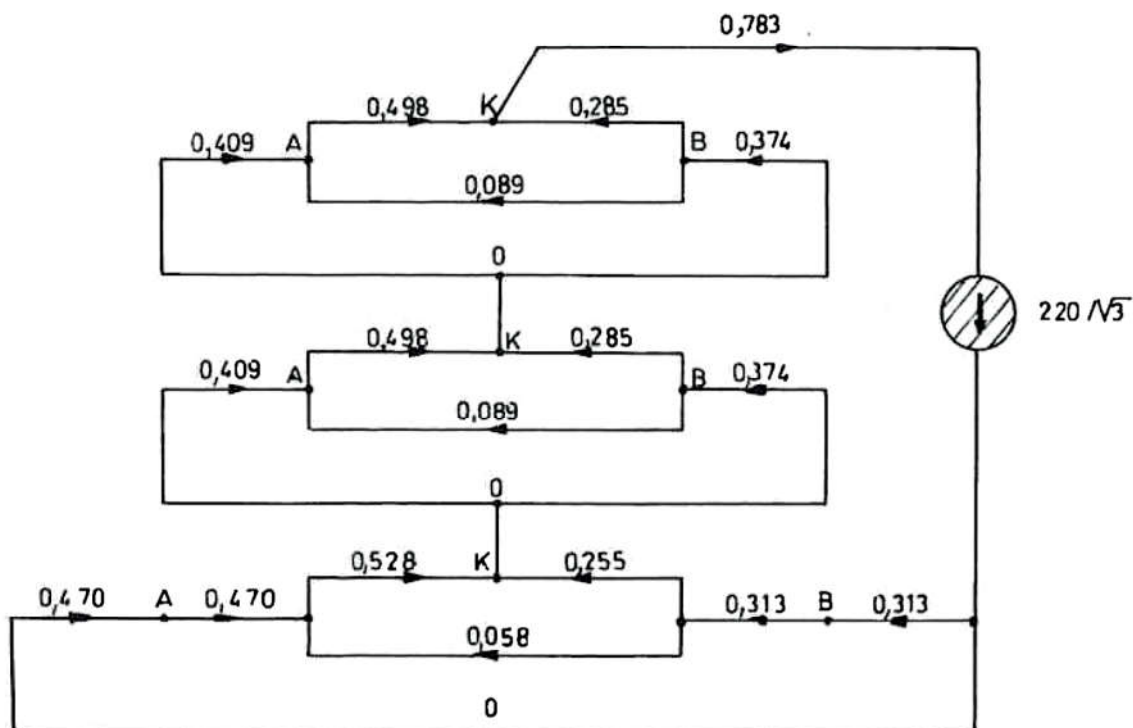
Na slici 187 nalazi se ekvivalentna shema fiktivnog sistema za jednopolni kratki spoj. Nulti sistem komponenata oslobođen je međusobnog utjecaja na klasičan način, tj. po pokazanoj prvoj metodi.

Proračun struja i napona u ekvivalentnoj shemi možemo lako izvesti koristeći teoreme transfiguracije.

Nakon transfiguracije direktnog, inverznog i nultog sistema računamo nultu komponentu struje:

$$I_K^0 = \frac{220 / \sqrt{3}}{39,213 + 39,213 + 83,905} = 0,783 \text{ kA}$$

Raspodjela struje I_K^0 pokazana je na slici 188. Slijedi proračun struja i napona faza po pravilima transformacije u simetričnim komponentama.



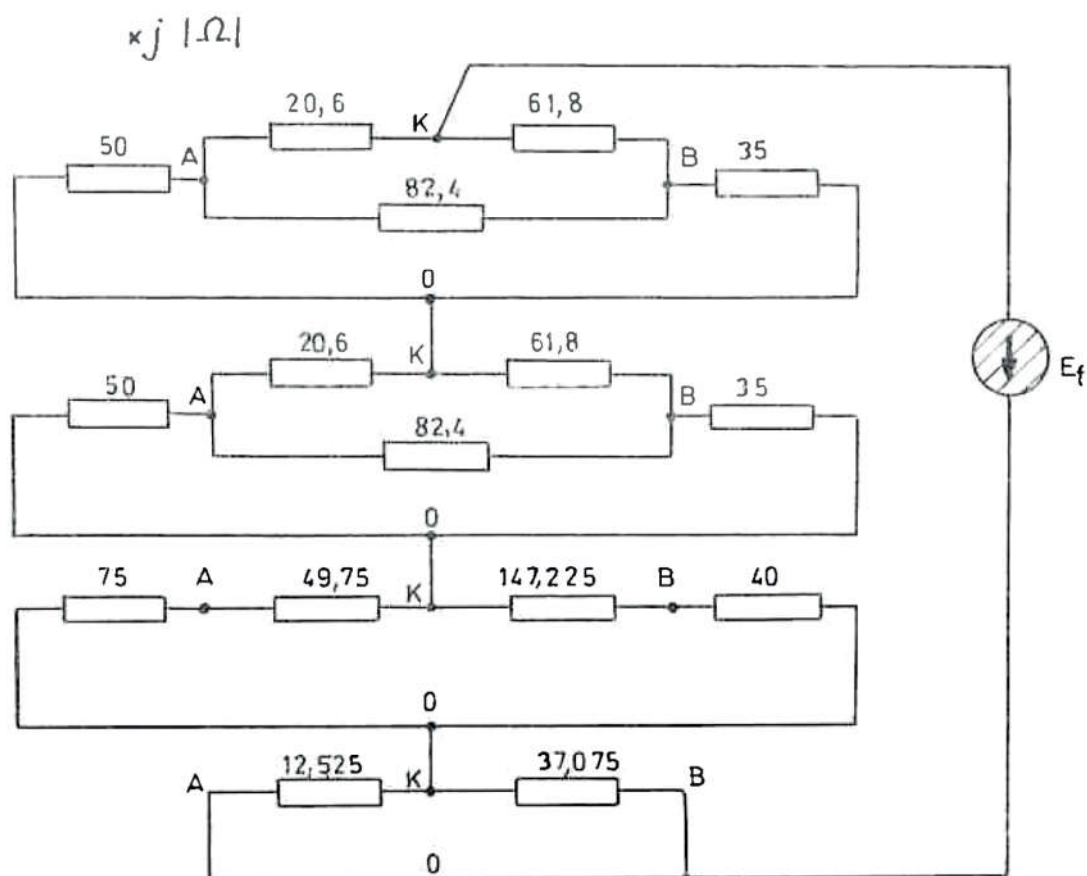
Slika 188 - Raspodjela struje $\bar{I}_K^0$ u mreži sa slike 187

Prelazimo na drugu metodu računanja, tj. metodu u kojoj koristimo p, q transformaciju. Na slici 189 nacrtana je ekvivalentna shema fiktivnog sistema za jednopolni kratki spoj u kojoj je nulti sistem postavljen prema slici 185.

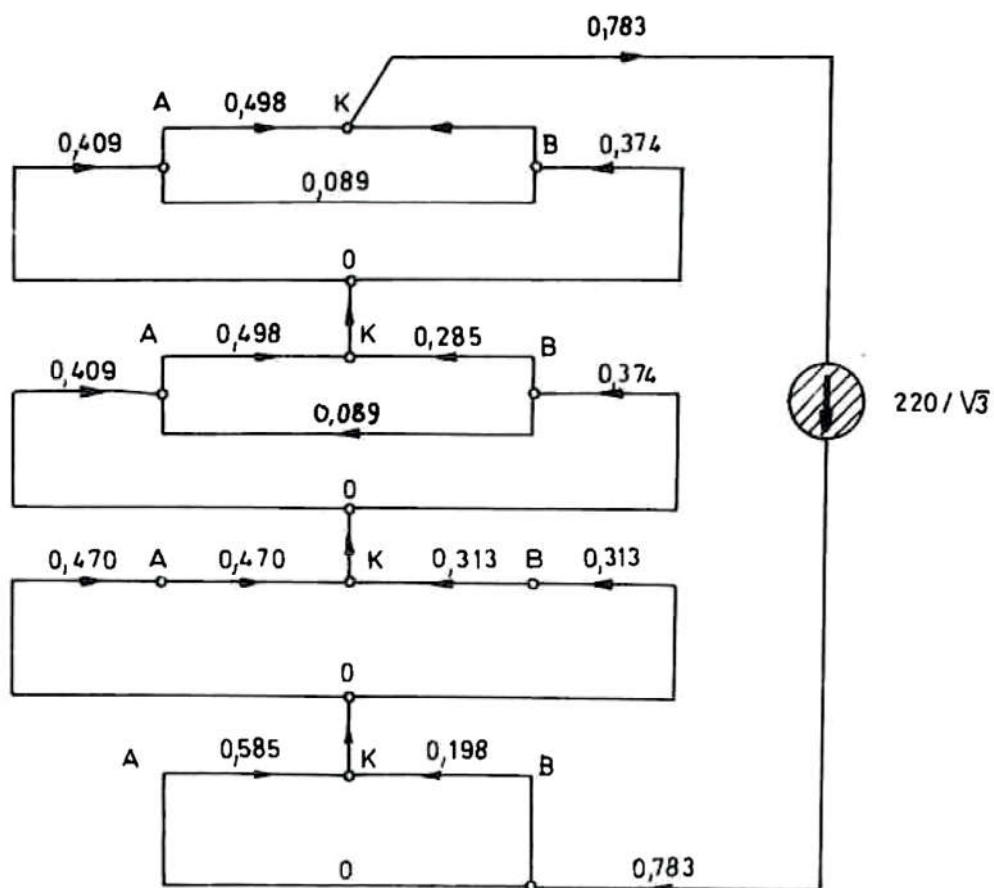
Nakon transfiguracije računamo nultu komponentu struje:

$$I_K^0 = \frac{220/\sqrt{3}}{39,213 + 39,213 + 74,622 + 9,362} = 783 \text{ kA}$$

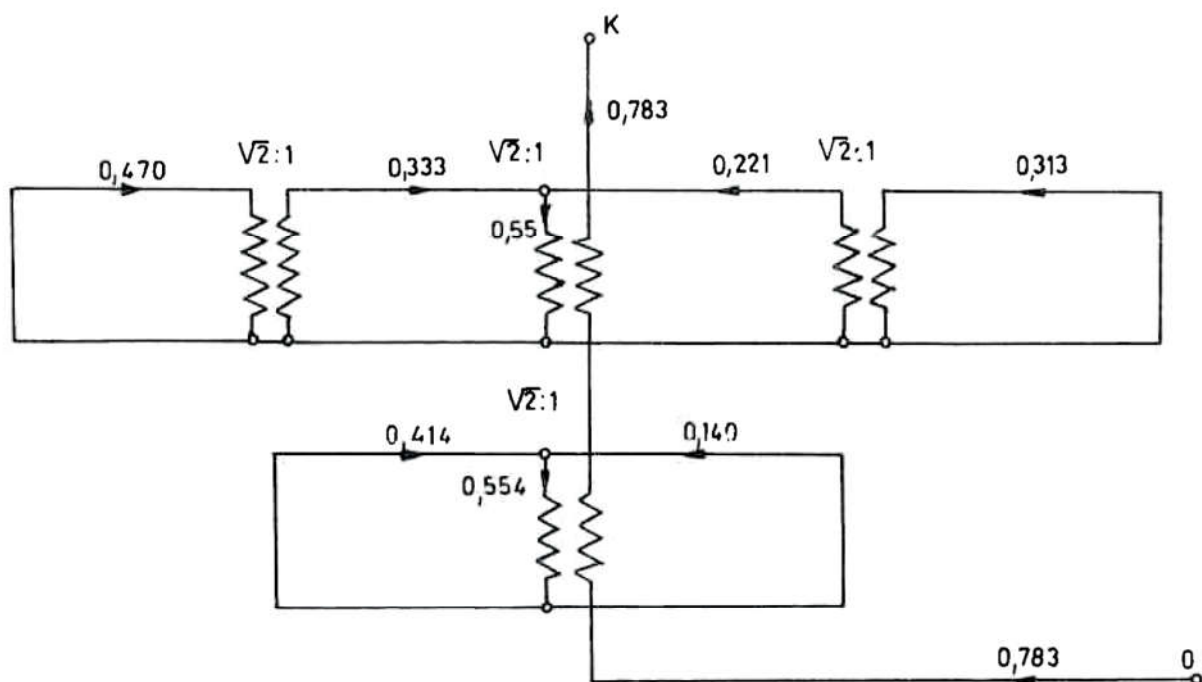
Raspodjela struje I_K^0 pokazana je na slici 190. Iz ove raspodjele, prema relacijama 3-128a-j, prelazimo u nultom sistemu natrag u nereducirani p, q sistem, što je pokazano na slici 191.



Slika 189 - Ekvivalentna shema fiktivnog sistema komponenata jednopolnog kratkog spoja mreže sa slike 186



Slika 190 - Raspodjela struje u mreži sa sl.189. Sistem p,q reduciran na naponski nivo nultog sistema



Slika 191 - Raspodjela struje u mreži sa sl.189. Sistemi p,q nereducirani.

Tek sada možemo izračunati struje i napone voda za nulti sistem simetričnih komponentata.

$$I_{aA} = \frac{1}{\sqrt{2}} (0,333 + 0,414) = 0,528 \quad |kA|$$

$$I_{aB} = \frac{1}{\sqrt{2}} (0,221 + 0,140) = 0,255 \quad |kA|$$

$$I_{bA} = \frac{1}{\sqrt{2}} (0,333 - 0,414) = -0,058 \quad |kA|$$

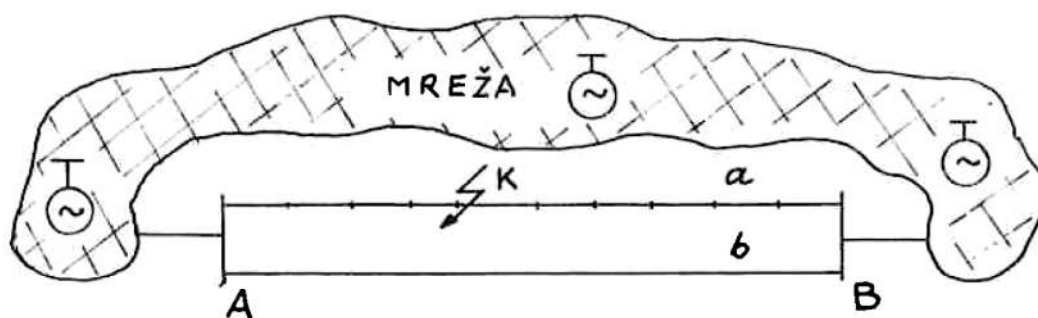
$$I_{bB} = \frac{1}{\sqrt{2}} (0,221 - 0,140) = 0,058 \quad |kA|$$

Dobili smo iste struje kao po prvoj metodi. Slijedi proračun struja i napona faza po pravilima za simetrične komponente.

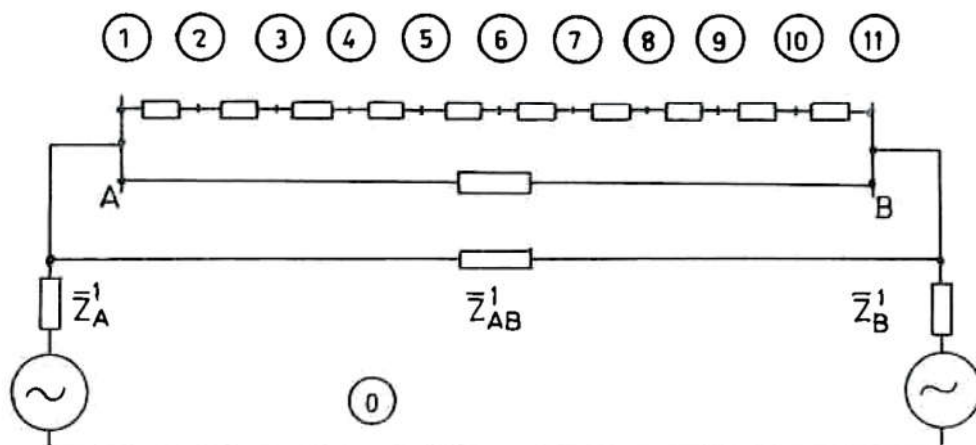
3.1.7.2 Program "KSDV"

Izloženu računsku metodu koristit ćemo dalje za izradu programa "KSDV". To je program za proračun raspodjele trostruke nulte komponente struje jednopolnog kratkog spoja i dvopolnog kratkog spoja sa spojem sa zemljom duž dvostrukog dalekovoda na kojem je kratki spoj. Ovaj račun nam je potreban kod određivanja utjecaja dvostrukih visokonaponskih vodova na vodove telekomunikacija.

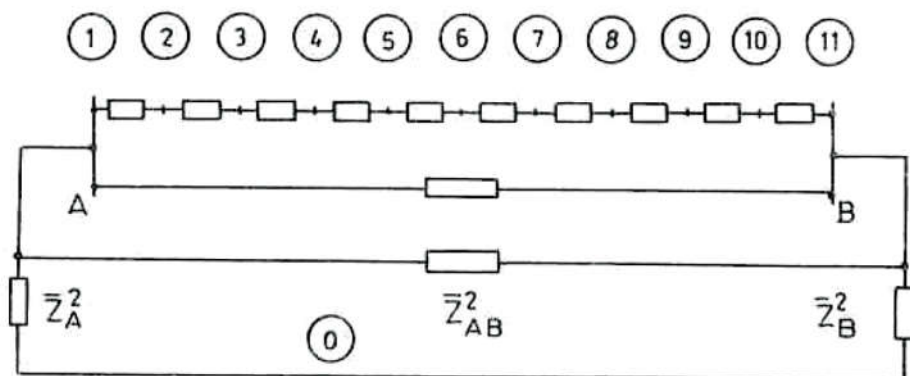
Cijeli račun se sastoji iz dva dijela. Najprije treba mrežu komponentata gledanu iz čvora A i B reducirati na čvorove A i B. To načinimo za direktni, inverzni i nulti sistem. Mreža prema slici



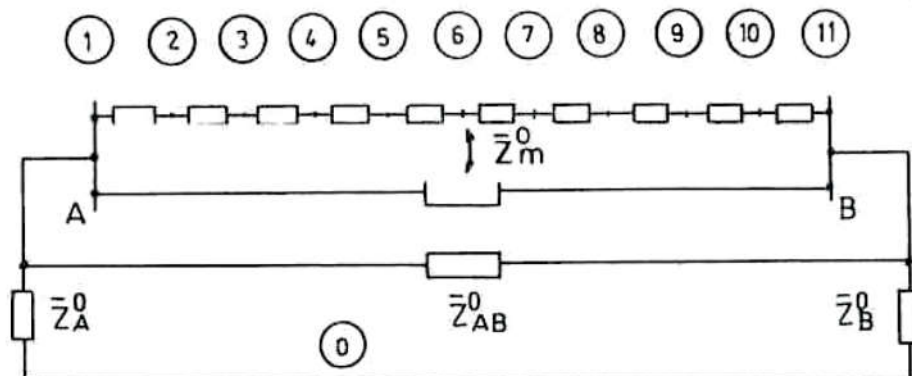
Slika 192 - Opći slučaj dvostrukog voda u mreži



Slika 193a - Direktni sistem mreže sa sl.192



Slika 193b - Inverzni sistem mreže sa sl.192



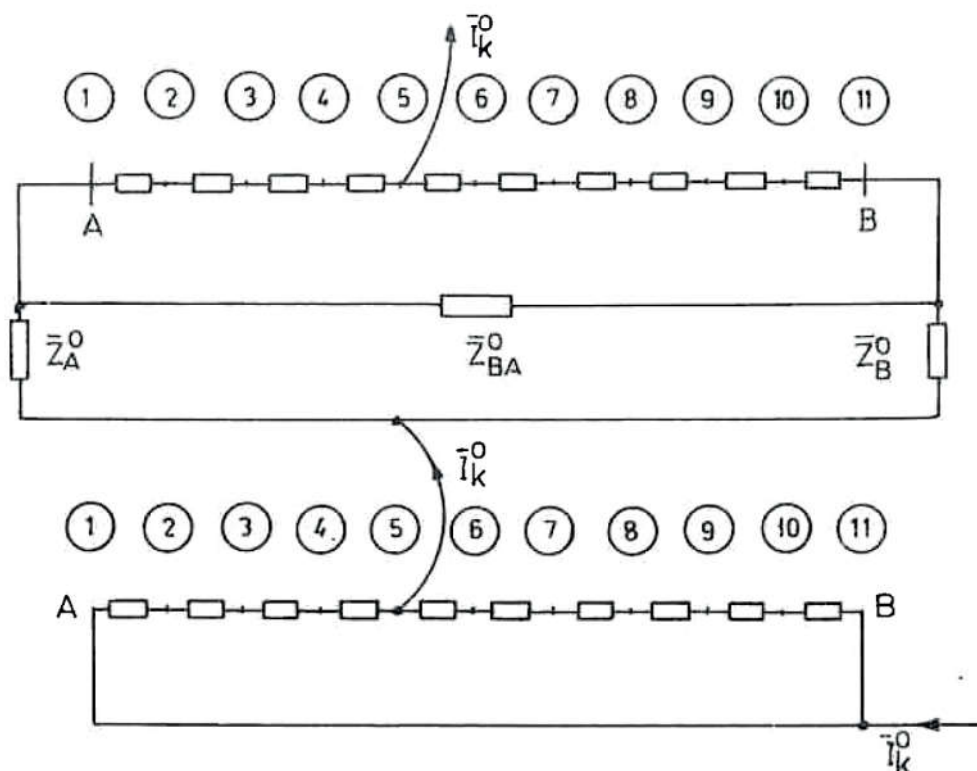
Slika 193c - Nulti sistem mreže sa sl.192

192 biti će nadomještена sa tri impedancije u svakom sistemu komponenata tj. sa $\bar{z}_A^1, \bar{z}_A^2, \bar{z}_A^0, \bar{z}_B^1, \bar{z}_B^2, \bar{z}_B^0, \bar{z}_{AB}^1, \bar{z}_{AB}^2, \bar{z}_{AB}^0$. Nakon toga ispitivani vod podijelimo na dionice i tako odredimo duž voda čvorove u kojima ćemo računati kratki spoj.

Na slici 193 nacrtane su ekvivalentne sheme sistema komponenata mreže sa slike 192. Medjusobni utjecaj vodova a i b uvažen je samo u nultom sistemu komponenata. Vod a je podijeljen na 10 dionica.

Nulti sistem komponenata oslobađamo medjusobnog utjecaja vodova a i b primjenom p,q transformacije prema relacijama 3-121, 3-123 i 3-125. Na slici 194 pokazan je nulti sistem sa slike 193 nakon transformacije u p,q sistem i to za kratki spoj (jednopolni ili dvopolni sa spojem sa zemljom) u čvoru 5.

Rastavljanje nultog sistema u p i q sisteme rezultira povećanjem sistema komponenata od 3 (direktni, inverzni i nulti) na 4 (direktni, inverzni, p i q sistem). Za svaki od ova 4 sistema moramo izračunati njegovu matricu vlastitih i medjusobnih impedancija čvora.



Slika 194 - Nulti sistem mreže sa sl.193c rastavljen u p,q komponente. Kratki spoj u čvoru 5

Nakon proračuna matrica računa se struja $3 \bar{I}_k^0$, koja se razlikuje za jednopolni i dvopolni kratki spoj sa zemljom. Za obje vrste kratkog spoja vrijedi

$$\bar{Z}_{kk}^0 = \bar{Z}_{kk}^p + \bar{Z}_{kk}^q$$

pa za jednopolni kratki spoj izraz za struju $3 \bar{I}_k^0$ glasi:

$$3 \bar{I}_k^0 = \frac{3 \bar{E}_f}{\bar{Z}_{kk}^1 + \bar{Z}_{kk}^2 + \bar{Z}_{kk}^p + \bar{Z}_{kk}^q} \quad 3-130$$

a za dvopolni kratki spoj sa spojem sa zemljom:

$$3 \bar{I}_k^0 = \frac{-3 \bar{E}_f \bar{Z}_{kk}^2}{\bar{Z}_{kk}^1 \bar{Z}_{kk}^2 + \bar{Z}_{kk}^1 (\bar{Z}_{kk}^p + \bar{Z}_{kk}^q) + \bar{Z}_{kk}^2 (\bar{Z}_{kk}^p + \bar{Z}_{kk}^q)} \quad 3-131$$

Za proračun raspodjele trostruke nulte komponente struje $3 \bar{I}_k^0$ na vodu koristimo samo matrice $[\bar{Z}^p]$ i $[\bar{Z}^q]$ i impedancije grana ovih komponenata.

Promatrajmo p-sistem reduciran na nivo originala, tj. na nivo nultog sistema. Jedina struja čvora je struja $\bar{I}_k^0$, pa matrična jednadžba za p-sistem glasi:

$$\begin{bmatrix} \bar{E}_1^p \\ \bar{E}_2^p \\ \dots \\ \bar{E}_k^p \\ \dots \\ \bar{E}_N^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{11}^p & \bar{Z}_{12}^p & \dots & \bar{Z}_{1k}^p & \dots & \bar{Z}_{1N}^p \\ \bar{Z}_{21}^p & \bar{Z}_{22}^p & \dots & \bar{Z}_{2k}^p & \dots & \bar{Z}_{2N}^p \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{Z}_{k1}^p & \bar{Z}_{k2}^p & \dots & \bar{Z}_{kk}^p & \dots & \bar{Z}_{kN}^p \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{Z}_{N1}^p & \bar{Z}_{N2}^p & \dots & \bar{Z}_{Nk}^p & \dots & \bar{Z}_{NN}^p \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ -\bar{I}_k^0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}$$

iz čega slijedi:

$$\bar{E}_1^p = - \bar{Z}_{1k}^p \bar{I}_k^o$$

$$\bar{E}_2^p = - \bar{Z}_{2k}^p \bar{I}_k^o$$

.....

$$\bar{E}_k^p = - \bar{Z}_{kk}^p \bar{I}_k^o$$

.....

$$\bar{E}_N^p = - \bar{Z}_{Nk}^p \bar{I}_k^o$$

3-133

pa je struja kroz bilo koju granu p-sistema:

$$\bar{I}_{s-t}^p = \frac{\bar{E}_s^p - \bar{E}_t^p}{\bar{Z}_{s-t}^p} = \frac{\bar{Z}_{tk}^p - \bar{Z}_{sk}^p}{\bar{Z}_{s-t}^p} \bar{I}_k^o$$

3-134

Analogno vrijedi i za q sistem:

$$\begin{bmatrix} \bar{E}_1^q \\ \bar{E}_2^q \\ \dots \\ \bar{E}_k^q \\ \dots \\ \bar{E}_N^q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{11}^q & \bar{Z}_{12}^q & \dots & \bar{Z}_{1k}^q & \dots & \bar{Z}_{1N}^q \\ \bar{Z}_{21}^q & \bar{Z}_{22}^q & \dots & \bar{Z}_{2k}^q & \dots & \bar{Z}_{2N}^q \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{Z}_{k1}^q & \bar{Z}_{k2}^q & \dots & \bar{Z}_{kk}^q & \dots & \bar{Z}_{kN}^q \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{Z}_{N1}^q & \bar{Z}_{N2}^q & \dots & \bar{Z}_{Nk}^q & \dots & \bar{Z}_{NN}^q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ -\bar{I}_k^o \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}$$

3-135

iz čega slijedi

$$\begin{aligned}
 \bar{E}_1^q &= - \bar{Z}_{1k}^q \bar{I}_k^o \\
 \bar{E}_2^q &= - \bar{Z}_{2k}^q \bar{I}_k^o \\
 &\dots\dots\dots \\
 \bar{E}_k^q &= - \bar{Z}_{kk}^q \bar{I}_k^o \\
 &\dots\dots\dots \\
 \bar{E}_N^q &= - \bar{Z}_{Nk}^q \bar{I}_k^o
 \end{aligned}
 \tag{3-136}$$

pa je struja kroz bilo koju granu q sistema

$$\bar{I}_{s-t}^q = \frac{\bar{E}_s^q - \bar{E}_t^q}{\bar{Z}_{s-t}^q} = \frac{\bar{Z}_{tk}^q - \bar{Z}_{sk}^q}{\bar{Z}_{s-t}^q} \bar{I}_k^o
 \tag{3-137}$$

Prelazimo sa reduciranog u stvarni p i q sistem. Veza izmedju ne-reduciranog i reduciranog p i q sistema ostvarena je preko idealnih transformatora $\sqrt{2} : 1$. Zato je u stvarnom p i q sistemu:

$$\bar{I}_{s-t}^p = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\bar{Z}_{tk}^p - \bar{Z}_{sk}^p}{\bar{Z}_{s-t}^p} \bar{I}_k^o
 \tag{3-138}$$

$$\bar{I}_{s-t}^q = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\bar{Z}_{tk}^q - \bar{Z}_{sk}^q}{\bar{Z}_{s-t}^q} \bar{I}_k^o
 \tag{3-139}$$

Struje nultog sistema dvostrukog voda računamo po pravilima p i q transformacije.

Za vod a, tj. za vod na kojemu je kratki spoj:

$$\begin{aligned}\bar{I}_{s-t}^{o(a)} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{I}_{s-t}^p + \bar{I}_{s-t}^q) = \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\bar{Z}_{tk}^p - \bar{Z}_{sk}^p}{\bar{Z}_{s-t}^p} + \frac{\bar{Z}_{tk}^q - \bar{Z}_{sk}^q}{\bar{Z}_{s-t}^q} \right) \bar{I}_k^o\end{aligned}\quad 3-140$$

Za vod b, tj. za vod na kojem nije kratki spoj:

$$\begin{aligned}\bar{I}_{s-t}^{o(b)} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{I}_{s-t}^p - \bar{I}_{s-t}^q) = \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\bar{Z}_{tk}^p - \bar{Z}_{sk}^p}{\bar{Z}_{s-t}^p} - \frac{\bar{Z}_{tk}^q - \bar{Z}_{sk}^q}{\bar{Z}_{s-t}^q} \right) \bar{I}_k^o\end{aligned}\quad 3-141$$

Prilikom reduciranja p i q sistema na nivo originala, tj. na nivo nultog sistema, nulti sistem ostale mreže gledane iz čvorova A i B ostao je nepromijenjen, jer je to upravo nulti sistem, dio mreže koji nije podlegao p i q transformaciji, što se računski ostvaruje redukcijom preko dva idealna transformatora obrnutog prijenosnog odnosa (vidi sliku 191). Kako se nulti sistem mreže izvan dvostrukog dalekovoda pojavljuje samo vezan za p sistem, to se struje u ekvivalentnim impedancijama nultog sistema mreže računaju iz matrice $[\bar{Z}^p]$ i impedancije p sistema prema relaciji:

$$\bar{I}_{s-t}^o = \frac{\bar{Z}_{tk}^p - \bar{Z}_{sk}^p}{\bar{Z}_{s-t}^p} \bar{I}_k^o \quad 3-142$$

Prema programu "KSDV" elektroničkom računalu zadajemo podatke reducirane mreže i ispitivanog dalekovoda

X_A, X_B, X_{AB} - reaktancije direktnog (inverznog) sistema komponenta mreže,

x_A^0, x_B^0, x_{AB}^0 - reaktancije nultog sistema komponenata mreže
 x_1 - jedinična reaktancija voda direktnog (inverznog) sistema
 x_1^0 - jedinična reaktancija voda nultog sistema
 x_{1m}^0 - jedinična međusobna reaktancija vodova nultog sistema
 l - duljina dalekovoda
 n - broj dionica

Iz ulaznih podataka računalo formira liste podataka. Broj čvorova N i broj grana G određeni su podatkom o broju dionica n . Na slici 195 pokazane su liste podataka kako ih formira računalo.

Numeriranje čvorova ovisi o primjenjenoj metodi za računanje matrice reaktancije čvora. U programu "KSDV" primjenjena je metoda korak po korak. Čvor A dobija broj 1, a čvor B broj $n+1$. Ostali brojevi pripadaju brojevima dionica i to tako, da svaka dionica povezuje dva čvora s i t uz uvjet:

$$s + 1 = t \quad 3-143$$

Za isto mjesto u mreži vrijedi isti broj u svim sistemima komponentata. Kako u q sistemu gubimo dva čvora, prvi i zadnji, to za formiranje matrice treba ovaj sistem prenumerirati, a kod korištenja matrice voditi računa o ovoj prenumeraciji.

Podatke reaktancija dionica voda stroj računa iz ulaznih podataka:

$$x_{s-t} = \frac{l}{n} x_1 \quad 3-144$$

$$x_{s-l}^p = \frac{l}{n} \frac{x_1^0 + x_{1m}^0}{2} \quad 3-145$$

$$x_{s-t}^q = \frac{l}{n} \frac{x_1^0 - x_{1m}^0}{2} \quad 3-146$$

Iz lista podataka računaju se matrice $[X]$, $[X^p]$ i $[X^q]$.

g	$s-t$	X_{s-t}
1	0-1	X_A
2	1-2	X_{1-2}
.	...	...
$n+1$	$(N-1)-N$	$X_{(N-1)-N}$
$n+2$	1-N	X_{A-B}
$n+3$	1-N	X_{AB}
G	0-N	X_B

$$G = n + 4$$

$$N = n + 1$$

g^p	$s-t$	X_{s-t}^p
1	0-1	X_A^o
2	1-2	X_{1-2}^p
.	...	...
$n+1$	$(N-1)-N$	$X_{(N-1)-N}^p$
$n+2$	1-N	X_{AB}^o
G^p	0-N	X_B^o

$$G^p = n + 3$$

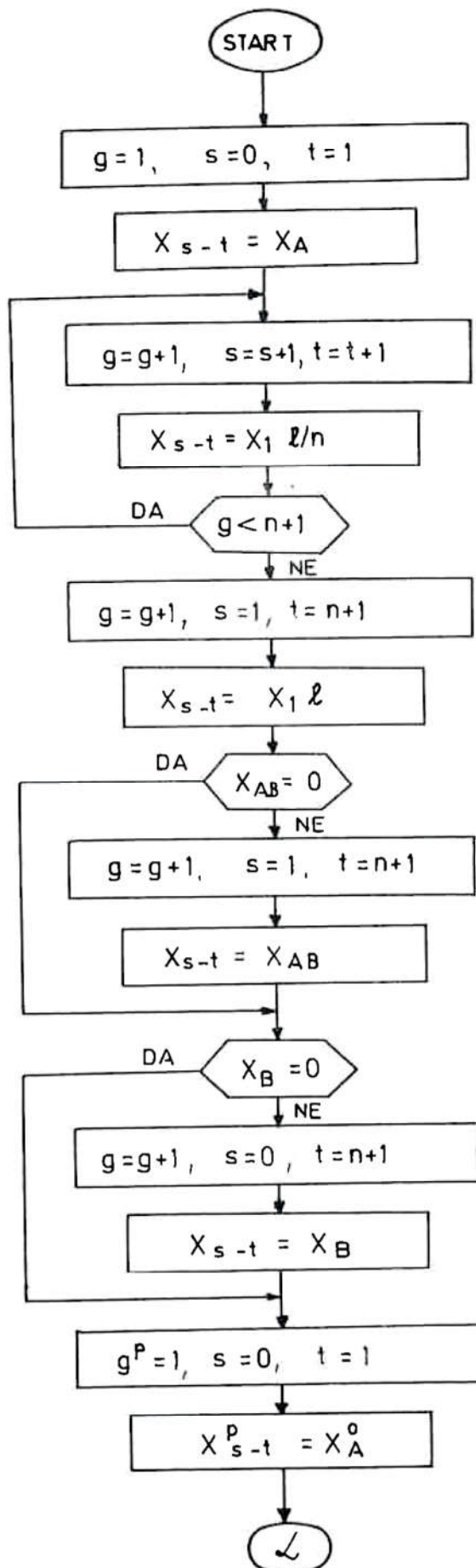
$$N^p = n + 1$$

g^q	$s-t$	X_{s-t}^q
1	0-2	X_{0-2}^q
2	2-3	X_{2-3}^q
.	...	...
$n-1$	$(N-2)-(N-1)$	$X_{(N-2)-(N-1)}^q$
G^q	0-(N-1)	$X_{0-(N-1)}^q$

$$G^q = n$$

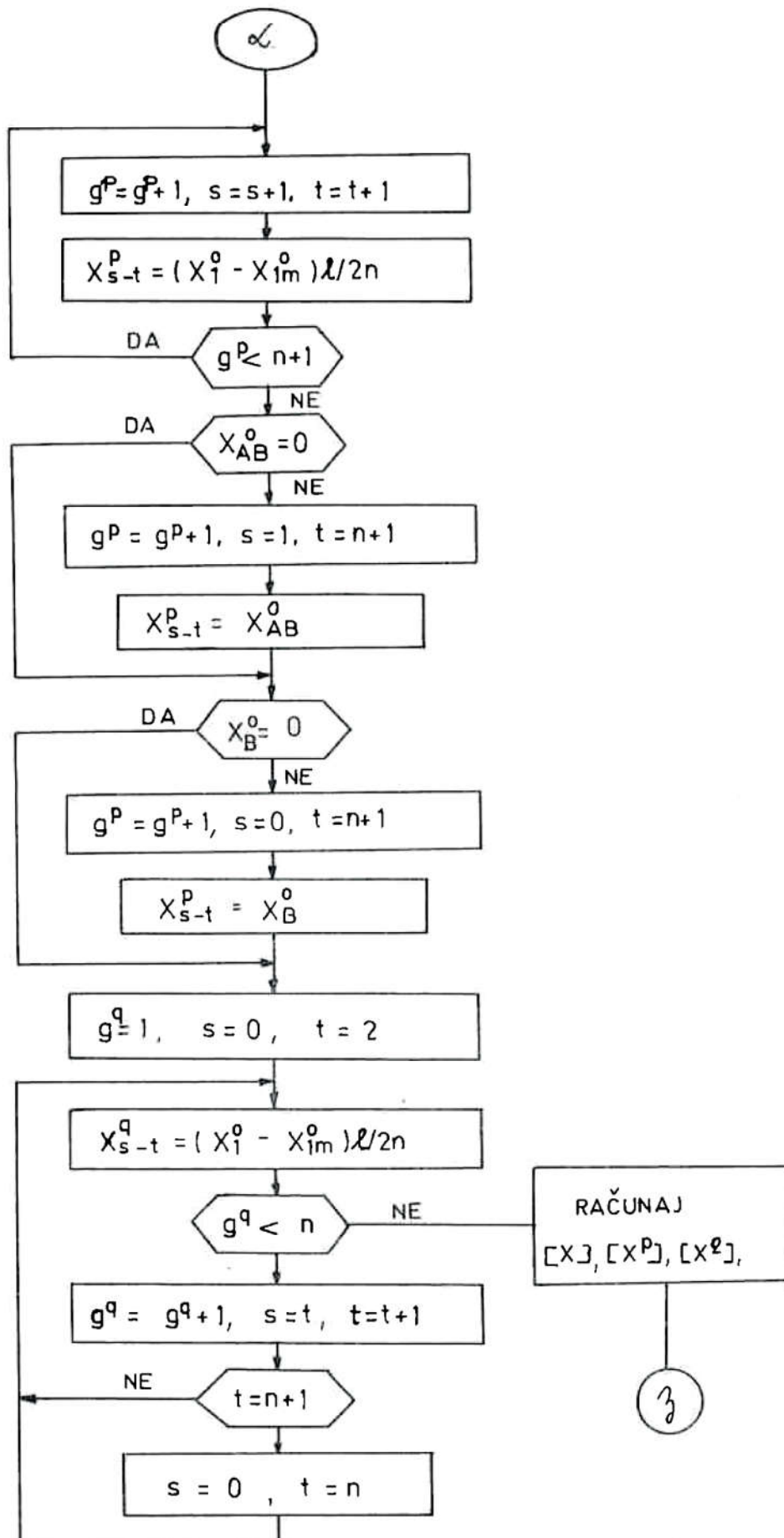
$$N^q = n - 1$$

Slika 195 - Liste podataka za direktni, p i q sistem, koje formira računalo po programu "KSDV"



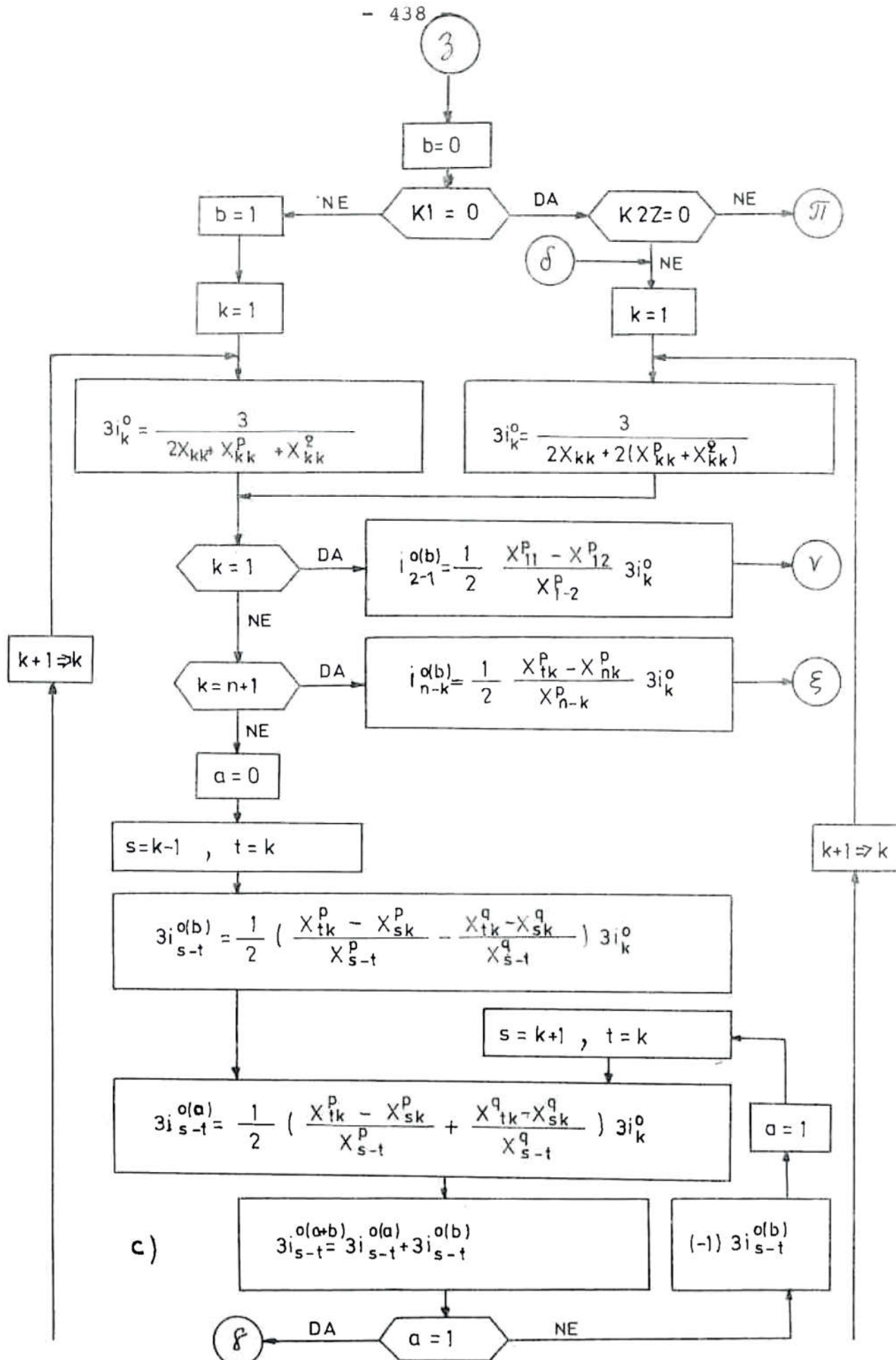
a)

Slika 196 - Dijagram toka programa "KSDV"

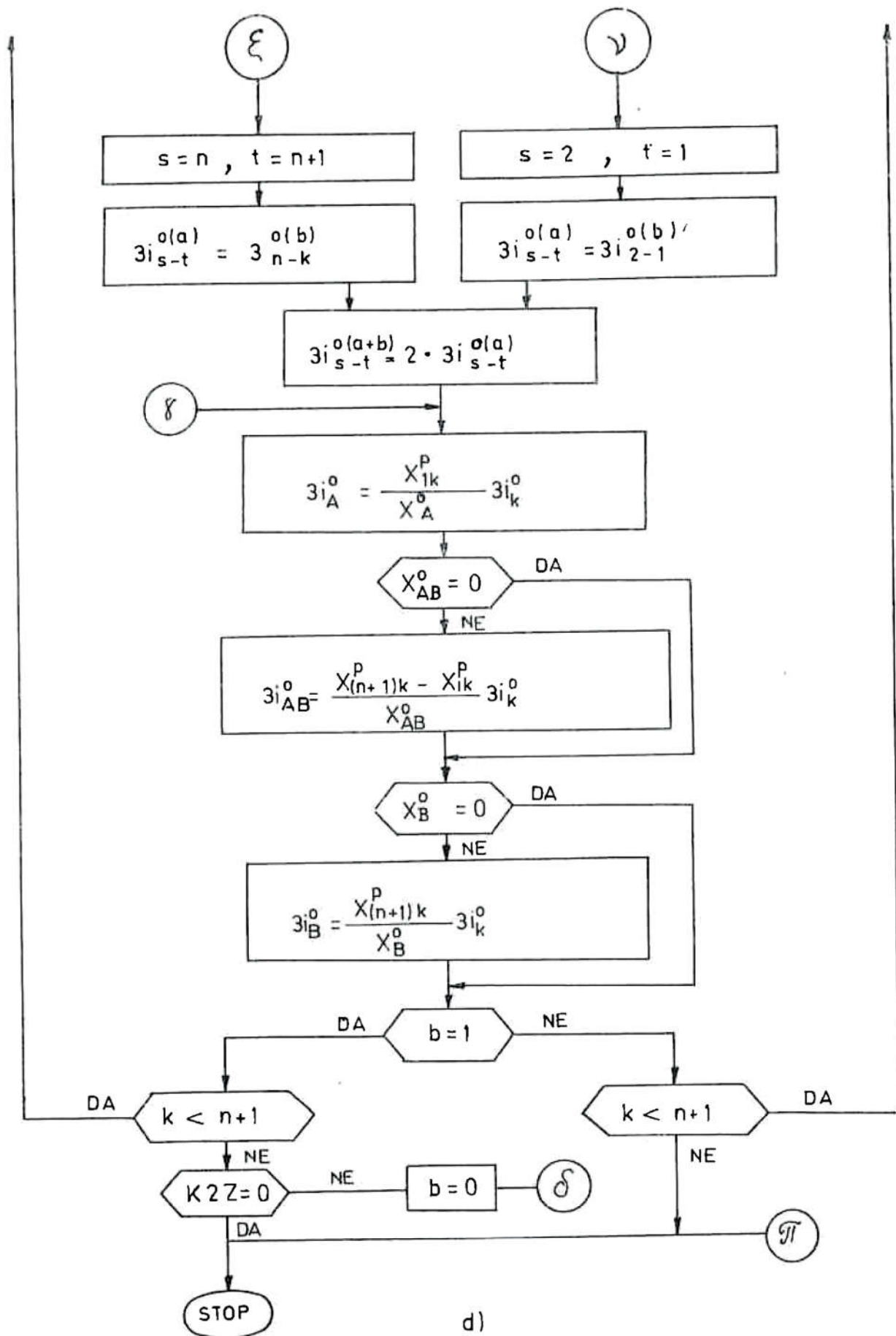


b)

Slika 196 - Dijagram toka programa "KSDV"



Slika 196 - Dijagram toka programa "KSDV"



Slika 196 - Dijagram toka programa "KSDV"

Dijagram toka na sl.196 pokazuje kako su u programu "KSDV" korištene relacije 3-129 do 3-142. Treba obratiti pažnju da se računa subtranzientni period, da su zanemareni djelatni otpori i poprečne grane i da je neposredno prije poremećaja pretpostavljena mreža bila u idealnom praznom hodu.

Dijagram toka se dijeli na dva dijela. U prvom dijelu se formiraju liste podataka sistema komponenata iz ulaznih podataka i računaju matrice. Računa se direktni, p i q sistem. U drugom dijelu računa se struja jednopolnog kratkog spoja i njezina raspodjela ili trostruka nulta komponenta struje dvopolnog kratkog spoja sa spojem sa zemljom i njezina raspodjela ili jedno i drugo već prema želji. Drugi dio se može kompletno preskočiti, ako se želi štampati matrice mreže i ništa više.

U dijagram toka na sl.196 nisu uključeni neki detalji kao i zahtjevi za štampanje, o čemu treba voditi računa kod programiranja.

Program "KSDV" možemo lako proširiti, ako na početku dodamo potprograme za računanje jediničnih vrijednosti i za redukciju mreže, a na kraju potprogram za prijelaz iz jediničnih vrijednosti u stvarne.

Primjer 3.7 Zadatak iz primjera 3.6 izradit ćemo na način prikazan u prethodnom tekstu, tj. uz korištenje matričnog računa.

Zadano je:

$$\begin{array}{lll} X_A = 50 \, |\Omega| & X_B = 35 \, |\Omega| & X_{AB} = \infty \, |\Omega| \\ X_A^O = 75 \, |\Omega| & X_B^O = 40 \, |\Omega| & X_{AB}^O = \infty \, |\Omega| \\ X_1 = 0,42 \, |\Omega/\text{km}| & X_1^O = 1,232 \, |\Omega/\text{km}| & X_{1m}^O = 0,731 \, |\Omega/\text{km}| \end{array}$$

$$\ell = 200 \, \text{km} \qquad n = 4$$

Računamo reaktancije dionica voda:

$$X_{s-t} = \frac{200}{4} 0,42 = 21 \, |\Omega|$$

$$x_{s-t}^p = \frac{200}{4} \frac{1,232 + 0,731}{2} = 49,075 \quad |\Omega|$$

$$x_{s-t}^q = \frac{200}{4} \frac{1,232 - 0,731}{2} = 12,525 \quad |\Omega|$$

a nakon toga liste podataka radi proračuna matrica:

direktni (inverzni) sistem $G = 7 \quad N = 5$

g	s	t	$x_{s-t} \quad \Omega $
1	0	1	50
2	1	2	21
3	2	3	21
4	3	4	21
5	4	5	21
6	1	5	84
7	0	5	35

p-sistem $G^p = 6 \quad N^p = 5$

g^p	s	t	$x_{s-t}^p \quad \Omega $
1	0	1	75
2	1	2	49,075
3	2	3	49,075
4	3	4	49,075
5	4	5	49,075
6	0	5	40

q-sistem $G^q = 4 \quad N^q = 3$

g^q	s	t	s'	t'	$x_{s-t}^q \quad \Omega $
1	0	2	0	1	12,525
2	2	3	1	2	12,525
3	3	4	2	3	12,525
4	0	4	0	3	12,525

Računamo matrice metodom korak po korak, Rezultat je:

$$[X^1] =$$

	1	2	3	4	5
1	30,315	26,181	22,047	17,913	13,780
2	26,181	39,554	31,927	24,300	16,673
3	22,047	31,927	41,807	30,687	19,567
4	17,913	24,300	30,687	38,074	22,461
5	13,780	16,673	19,567	22,461	25,354

$$[X^P] =$$

	1	2	3	4	5
1	56,931	45,107	33,284	21,460	9,637
2	45,107	74,622	55,063	35,503	15,943
3	33,284	55,063	76,841	49,545	22,250
4	21,460	35,503	49,545	63,587	28,554
5	9,637	15,943	22,250	28,554	34,860

$$[X^q] =$$

	2	3	4
2	9,394	6,262	3,131
3	6,262	12,525	6,262
4	3,131	6,262	9,394

Računamo trostruku nultu komponentu struje na mjestu jednopolnog kratkog spoja redom za sve čvorove. Npr. za čvor 2 :

$$3 \bar{I}_2^0 = \frac{3 \cdot 220 / \sqrt{3}}{2 \cdot 39,554 + 74,622 + 9,394} = 2,339 \quad |kA|$$

$$3 \bar{I}_{1-2}^0(a) = \frac{1}{2} \left(\frac{74,622 - 45,107}{49,075} + \frac{9,394 - 0}{12,525} \right) 2,339 = 1,58 \quad |kA|$$

$$3 \bar{I}_{3-2}^0(a) = \frac{1}{2} \left(\frac{74,622 - 55,063}{49,075} + \frac{9,394 - 6,262}{12,525} \right) 2,339 = 0,759 \quad |kA|$$

$$3 \bar{I}_{1-2}^{o(b)} = \frac{1}{2} \left(\frac{74,622 - 45,107}{49,075} - \frac{9,394 - 0}{12,525} \right) 2,339 = - 0,174 \text{ |kA|}$$

$$3 \bar{I}_{0-1}^o = \frac{45,107}{75} 2,339 = 1,407 \text{ |kA|}$$

$$3 \bar{I}_{0-5}^o = \frac{15,943}{40} 2,339 = 0,932 \text{ |kA|}$$

$$3 \bar{I}_{3-2}^{o(a+b)} = 0,759 + 0,174 = 0,933 \text{ |kA|}$$

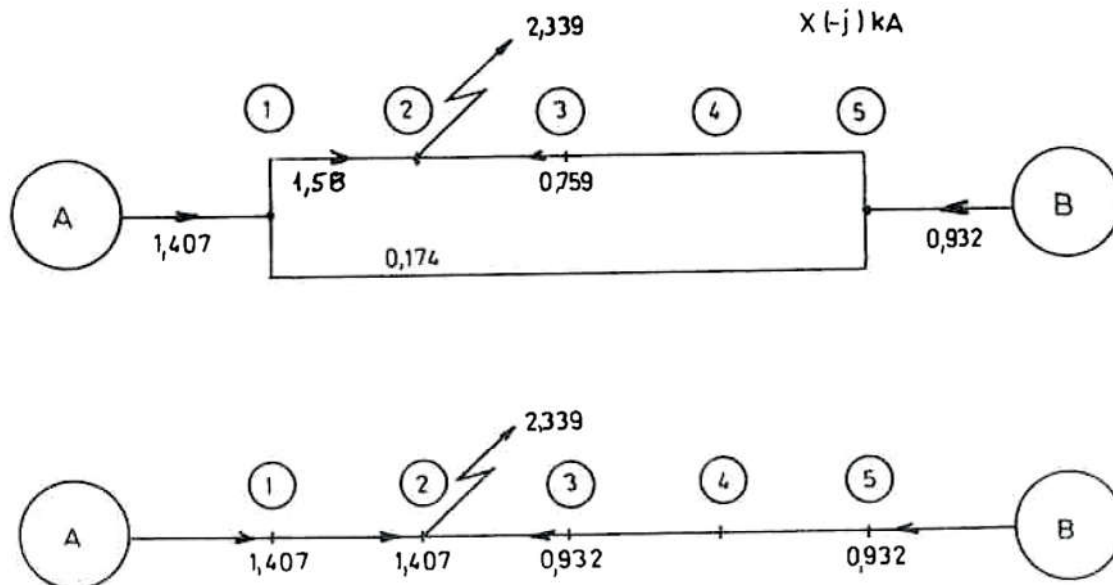
$$3 \bar{I}_{1-2}^{o(a+b)} = 1,58 - 0,174 = 1,407 \text{ |kA|}$$

Rezultati su uneseni u jednopolnu shemu na sl.197. Za utjecaj dalekovoda na okolinu mjerodavna je raspodjela na sl.197b.

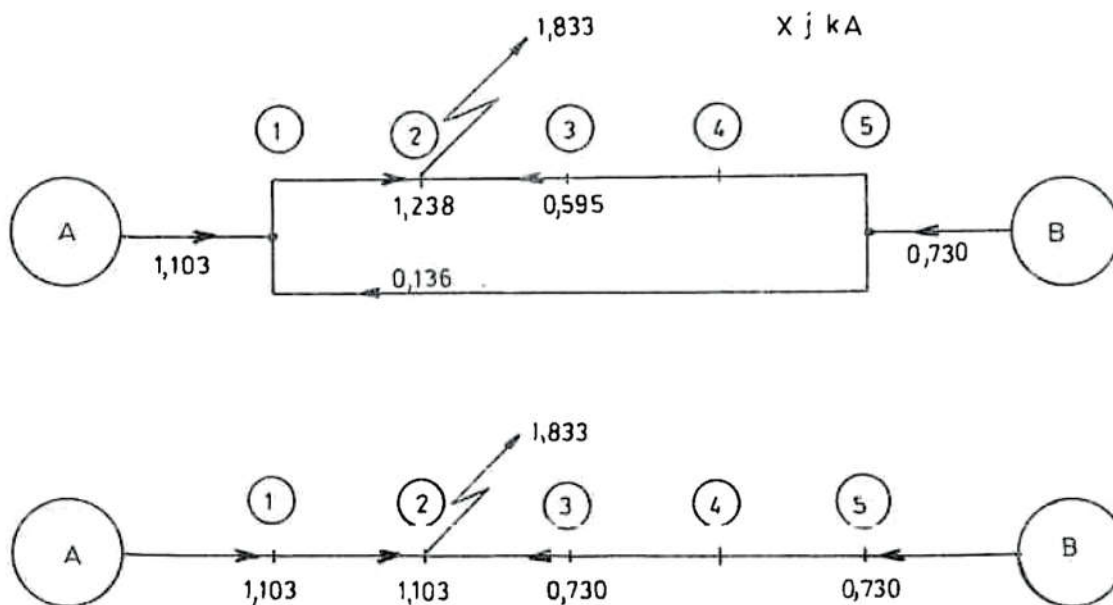
Na sl.198 nalaze se rezultati proračuna kada je u čvoru 2 došlo do dvopolnog kratkog spoja sa spojem sa zemljom.

Na slikama 199 i 200 nacrtane su krivulje raspodjele trostruke nulte komponente struje dvostrukog dalekovoda sa i bez međusobnog utjecaja.

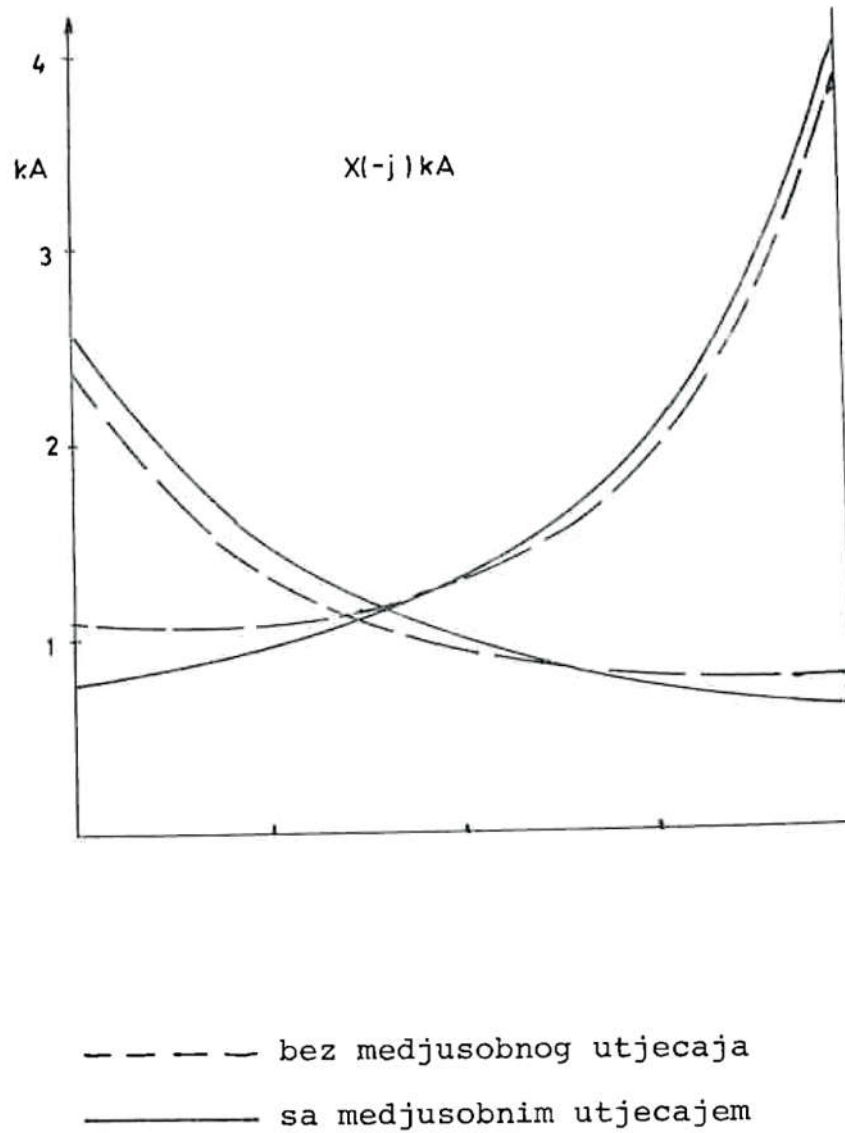
Da bi se ustanovilo kada treba očekivati maksimalni utjecaj trostruke nulte komponente struje na tt liniju koja se približuje dvostrukom vodu, trebalo bi još analizirati stanje koje nastaje kada je jedna trojka dvostrukog voda isključena. U tom slučaju će utjecati i činjenica, da li je druga trojka voda samo isključena ili je još i obostrano uzemljena.



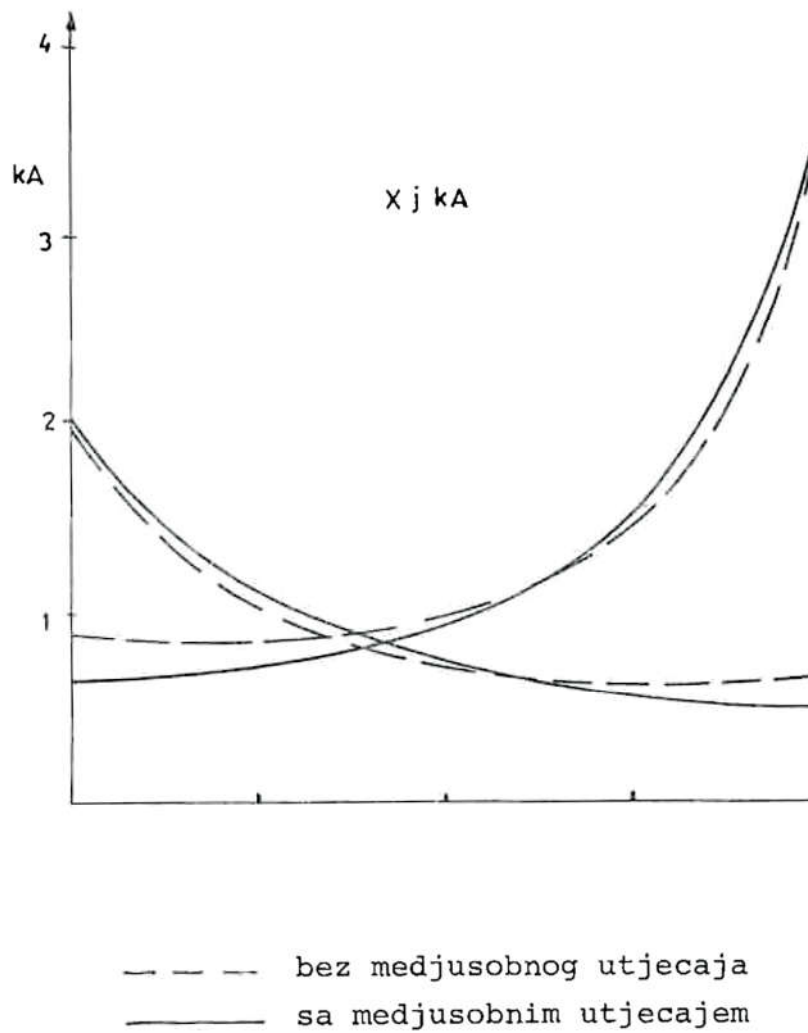
Slika 197 - Jednopolni kratki spoj u čvoru 2



Slika 198 - Dvopolni kratki spoj sa spojem sa zemljom u čvoru 2



Slika 199 - Krivulje raspodjele trostruke nulte komponente struje za jednopolni kratki spoj na dvostrukom vođu prema zadatku iz primjera 3.7



Slika 200 - Krivulja raspodjele trostruke nulte komponente struje za dvopolni kratki spoj sa spojem sa zemljom na dvostrukom vodu prema zadatku iz primjera 3.7

3.2 ZEMLJOSPOJ

U mrežama uzemljenim preko petersenke i u mrežama sa izoliranim zvjezdištem (sl.115d i e) tropolni i dvopolni kratki spoj predstavljaju kvar sa istim posljedicama kao i u efektivno uzemljenoj mreži. U oba slučaja dominantne su struje kratkog spoja i efekti usljed ovih struja. Stoga je i tehnika računanja ovih kvarova istovjetna u svim mrežama bez obzira na tretman zvjezdišta.

Dozemni spoj jedne faze sa zemljom izazvati će u izoliranoj mreži i mreži uzemljenoj preko petersenke sasvim druge posljedice nego u efektivno uzemljenoj mreži ili mreži uzemljenoj preko malog djelatnog odnosno induktivnog otpora. Zato smo ovaj dozemni spoj, za razliku od jednopolnog kratkog spoja, nazvali zemljospoj.

Za vrijeme zemljospoja dolazi do povišenja napona zdravih faza prema zemlji i do pomaka nultočke sistema. Potencijal zvjezdišta prema zemlji postaje jednak faznom naponu.

Dvopolni kratki spoj sa istovremenim spojem sa zemljom predstavlja u izoliranoj mreži dvopolni kratki spoj, a dvostruki zemljospoj na raznim mjestima u mreži jednu varijantu dvopolnog kratkog spoja. Slično je i sa mrežama uzemljenim preko petersenke.

Već na početku ovog poglavlja, u dijelu koji govori o tretmanu zvjezdišta trofazne mreže, istaknuto je značenje faktora uzemljenja k_u . Kako je faktor k_u kompleksna veličina, pokazani su naponi i struje na dijagramima (sl.117 - 120) u ovisnosti od apsolutne vrijednosti k_u i od faznog kuta $\varphi_1 - \varphi_2$. Lako je zaključiti da analiza prilika u mreži za vrijeme zemljospoja može također biti vrlo interesantna s obzirom da na faktor k_u , osim načina uzemljenja, vrlo bitno utječe konfiguracija i parametri mreže. Uostalom, zemljospoj je kvar, koji se tolerira neko vrijeme u mreži, pa veličine napona i struje treba promatrati uz uvažavanje i ove činjenice.

3.2.1 Nultočka sistema

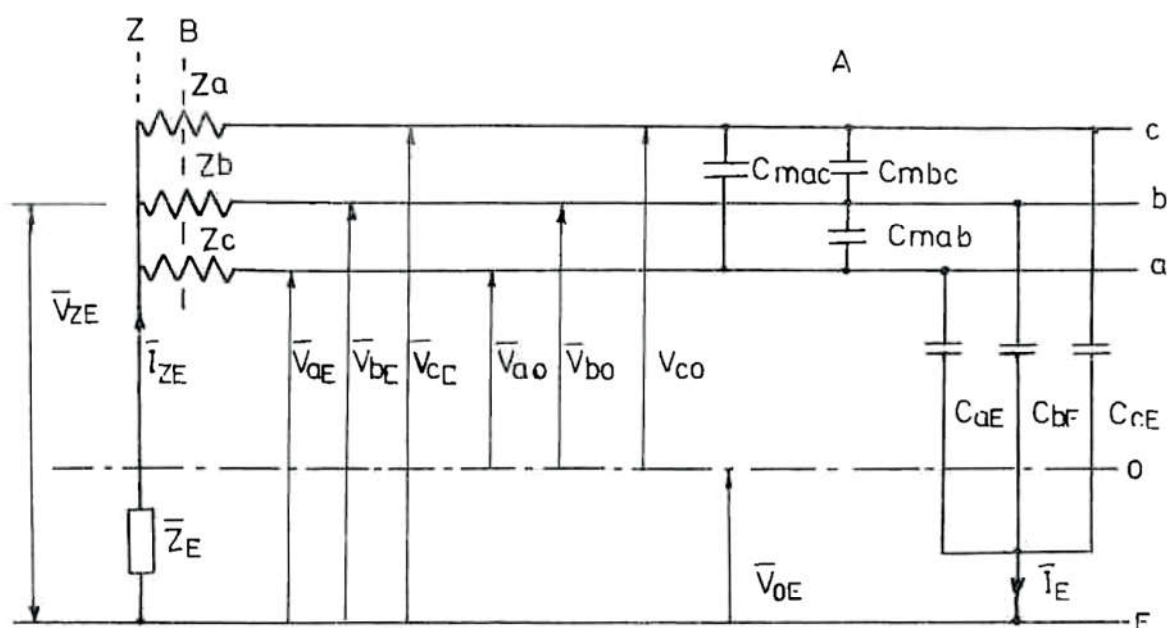
Trokut linijskih napona osigurava potrošačima dobavu električne energije u normalnom pogonu. Trokut nije idealno istostraničan radi nesimetričnog opterećenja faza i nesimetrične izvedbe voda. Idealno istostraničan je jedino trokut elektromotornih sila generatora. Kod nesimetričnih kvarova može doći do potpune deformacije trokuta linijskih napona.

Trokut linijskih napona i naponi prema zemlji vezani su nabojima na vodičima i zemlji, preko međusobnih i dozemnih kapaciteta, u jednu električnu cjelinu. Zemlja je dio sistema, četvrta elektroda, na kojoj je suma naboja u normalnom pogonu jednaka nuli. Zbog svoje uloge zemlja je pogodna da bude referentna točka sistema.

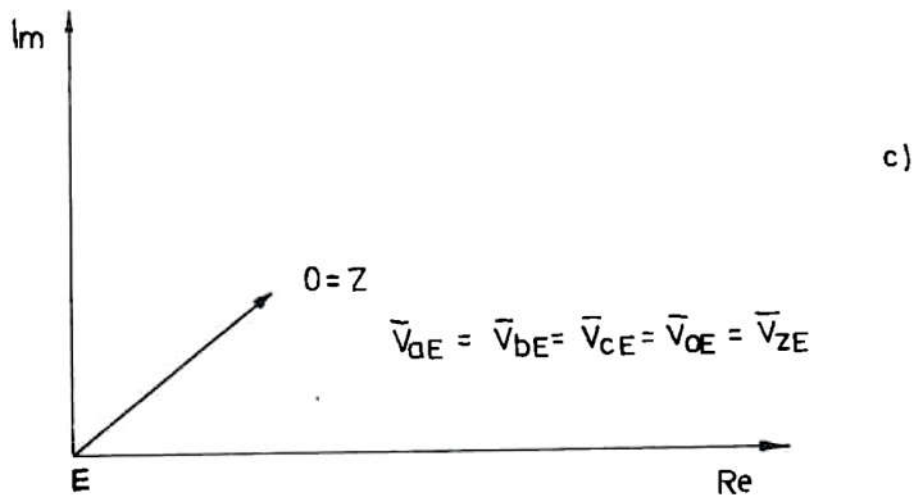
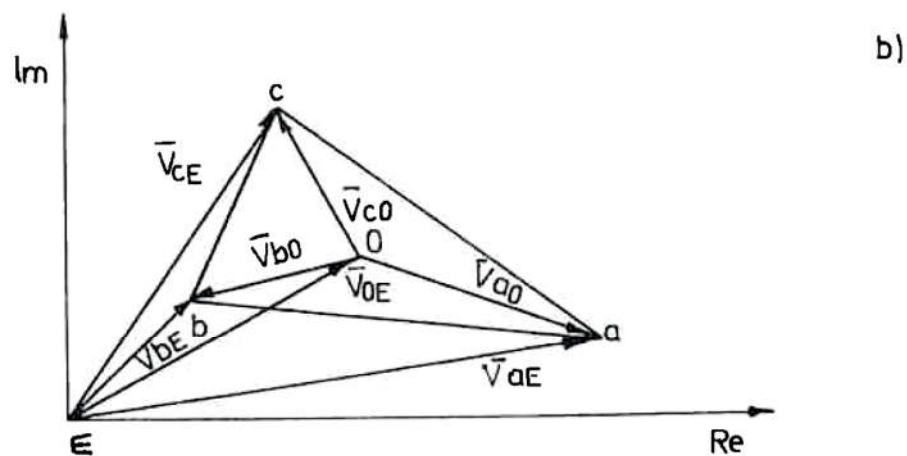
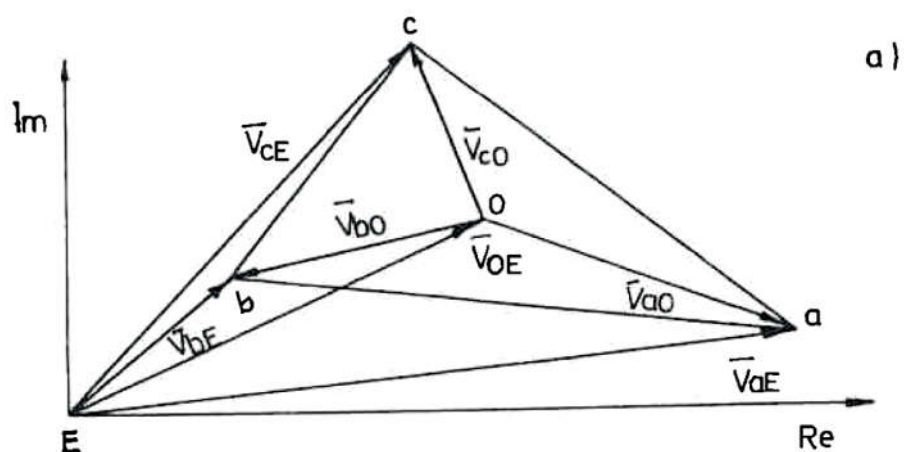
Pretpostavimo u točki A jednostavne mreže (sl.201) bilo kakav trokut linijskih napona (sl.202a). Općenito za svaku točku sistema, pa tako i za točku A, vrijedi relacija:

$$\bar{V}_{aE} \bar{Y}_a + \bar{V}_{bE} \bar{Y}_b + \bar{V}_{cE} \bar{Y}_c = \bar{I}_E \quad 3-147$$

gdje je uz zanemaren odvod:



Slika 201 - Shema jednostavne mreže uz definiciju pojmova



Slika 202 - Vektori napona mreže, a) naponi na mjestu A, b) naponi na mjestu B, c) naponi na mjestu Z

$$\bar{Y}_a = j \omega C_{aE} \quad 3-148a$$

$$\bar{Y}_b = j \omega C_{bE} \quad b$$

$$\bar{Y}_c = j \omega C_{cE}$$

C_{aE} , C_{bE} i C_{cE} su dozemni kapaciteti voda.

Suma napona triju faza iste točke mreže prema zemlji može, a ne mora biti jednaka nuli. Također i dozemni kapaciteti faza mogu, a ne moraju biti međusobno jednaki. Struja $\bar{I}_E$ jednaka je nuli uvijek, kada ne postoji povratni put struji (jedno ili više neposredno ili posredno uzemljenih zvjezdista). Ako je mreža (uključujući potrošače) simetrično izvedena, a napon također simetričan, neće teći struja $\bar{I}_E$ ni onda, ako postoji mogućnost da se ova struja zatvori preko uzemljenog zvjezdista.

U trokutu napona sa sl.202a) definirajmo još točku označenu sa 0 preko relacije

$$\bar{V}_{a0} + \bar{V}_{b0} + \bar{V}_{c0} = 0 \quad 3-149$$

Točka O, koju ćemo nazvati nultočkom, neutralnom točkom ili nulom sistema, predstavlja geometrijsko težište trokuta napona.

U trokutu napona sa sl.202a) mogla bi se definirati još jedna točka, označena sa S, pomoću relacije

$$\bar{V}_{aS} \bar{Y}_a + \bar{V}_{bS} \bar{Y}_b + \bar{V}_{cS} \bar{Y}_c = 0 \quad 3-150$$

Točka S nazvana je električno težište trokuta napona. Ona se poklapa s točkom E, kada je $\bar{I}_E$ jednako nuli. Točka S neće u našim daljnjim razmatranjima igrati nikakovu ulogu.

Iz trokuta napona slijedi

$$\bar{V}_{aE} = \bar{V}_{0E} + \bar{V}_{a0} \quad 3-151a$$

$$\bar{V}_{bE} = \bar{V}_{0E} + \bar{V}_{b0} \quad b$$

$$\bar{V}_{cE} = \bar{V}_{0E} + \bar{V}_{c0} \quad c$$

Pomnožimo 3-151a, b i c sa $\bar{Y}_a$, $\bar{Y}_b$ odnosno $\bar{Y}_c$ i dobivene jednačbe zbrojimo. Dobit ćemo

$$\begin{aligned} \bar{V}_{aE} \bar{Y}_a + \bar{V}_{bE} \bar{Y}_b + \bar{V}_{cE} \bar{Y}_c &= \bar{V}_{OE} (\bar{Y}_a + \bar{Y}_b + \\ &+ \bar{Y}_c) + \bar{V}_{a0} \bar{Y}_a + \bar{V}_{b0} \bar{Y}_b + \bar{V}_{c0} \bar{Y}_c = \bar{I}_E \end{aligned} \quad 3-152$$

Za slučaj da je $\bar{Y}_a = \bar{Y}_b = \bar{Y}_c = \bar{Y}_E$, uzevši u obzir izraz 3-149 vrijedi

$$(\bar{V}_{aE} + \bar{V}_{bE} + \bar{V}_{cE}) \bar{Y}_E = \bar{V}_{OE} 3 \bar{Y}_E = \bar{I}_E \quad 3-153$$

a uz zanemaren odvod

$$\bar{I}_E = \bar{V}_{OE} 3 j \omega C_Z \quad 3-154$$

gdje je C_Z dozemni kapacitet.

Uz simetrične dozemne kapacitete, struja $\bar{I}_E$ jednaka je naponu nultočke prema zemlji pomnoženom s trostrukom dozemnom admitancijom. Napon $\bar{V}_{OE}$, tzv. pomak nultočke prema potencijalu zemlje i iznos struje $\bar{I}_E$ u čvrstoj su međusobnoj vezi.

U trofaznoj mreži susrećemo se s trofaznom zvijezdom impedancija generatora, transformatora, potrošača, itd. Između napona zvjezdišta prema zemlji i napona nultočke sistema prema zemlji postoji bitna razlika.

- nultočka sistema je matematski pojam definiran u svakoj točki sistema,
- zvjezdište (generatora, transformatora, potrošača, itd.) je materijalna točka i o naponu zvjezdišta možemo govoriti samo onda, ako to zvjezdište stvarno postoji.

3.2.2 Mreža s izoliranim zvjezdištem

Problemi oko napona nultočke sistema i napona zvjezdišta najviše su izraženi upravo u ovakovim mrežama.

Radi izoliranog zvjezdišta prekinut je strujni krug struje $\bar{I}_E$, pa u odgovarajuće jednačbe treba unijeti $\bar{I}_E = 0$.

Relacija 3-152 prelazi u

$$\begin{aligned}\bar{V}_{aE} \bar{Y}_a + \bar{V}_{bE} \bar{Y}_b + \bar{V}_{cE} \bar{Y}_c &= \bar{V}_{0E} (\bar{Y}_a + \bar{Y}_b + \bar{Y}_c) + \\ &+ \bar{V}_{a0} \bar{Y}_a + \bar{V}_{b0} \bar{Y}_b + \bar{V}_{c0} \bar{Y}_c = 0\end{aligned}\quad 3-155$$

što daje

$$\bar{V}_{0E} = - \frac{\bar{V}_{a0} \bar{Y}_a + \bar{V}_{b0} \bar{Y}_b + \bar{V}_{c0} \bar{Y}_c}{\bar{Y}_a + \bar{Y}_b + \bar{Y}_c} \quad 3-156$$

Napon nultočke prema zemlji ovisi isključivo o naponima faza prema nuli sistema (simetriji trokuta) i simetričnosti dozemnih admitancija.

Neka je trokut napona simetričan. Tada je

$$\begin{aligned}\bar{V}_{0E} &= - \frac{\bar{V}_{a0} \bar{Y}_a + a^2 \bar{V}_{a0} \bar{Y}_b + a \bar{V}_{a0} \bar{Y}_c}{\bar{Y}_a + \bar{Y}_b + \bar{Y}_c} = \\ &= - \frac{\bar{V}_{a0} (\bar{Y}_a + a^2 \bar{Y}_b + a \bar{Y}_c)}{\bar{Y}_a + \bar{Y}_b + \bar{Y}_c}\end{aligned}\quad 3-157$$

Neka je trokut napona nesimetričan, a dozemne admitancije jednake. Tada je prema 3-156

$$\bar{V}_{0E} = - \frac{1}{3} (\bar{V}_{a0} + \bar{V}_{b0} + \bar{V}_{c0}) = 0 \quad 3-158$$

što je u skladu sa relacijom 3-154 kada je $\bar{I}_E = 0$.

Napon nultoečke izolirane mreže jednak je nuli u svakoj točki mreže, u kojoj su međusobno jednake dozemne admitancije.

Relacija 3-155 pruža nam još jedno obavještenje za slučaj jednakih dozemnih admitancija

$$\bar{V}_{0E} = \frac{1}{3} (\bar{V}_{aE} + \bar{V}_{bE} + \bar{V}_{cE}) = 0 \quad 3-159$$

što znači da je napon nultog sistema komponenata takodjer jednak nuli.

Napon zvjezdišta računamo po poznatoj formuli

$$\bar{V}_{ZE} = \frac{\bar{V}_{aE}/\bar{Z}_a + \bar{V}_{bE}/\bar{Z}_b + \bar{V}_{cE}/\bar{Z}_c}{1/\bar{Z}_a + 1/\bar{Z}_b + 1/\bar{Z}_c} \quad 3-160$$

$\bar{Z}_a$, $\bar{Z}_b$ i $\bar{Z}_c$ su impedancije trofazne zvijezde priključene u promatranom čvoru mreže

Za slučaj da je $\bar{Z}_a = \bar{Z}_b = \bar{Z}_c$ relacija 3-160 prelazi u

$$\bar{V}_{ZE} = \frac{1}{3} (\bar{V}_{aE} + \bar{V}_{bE} + \bar{V}_{cE}) \quad 3-161$$

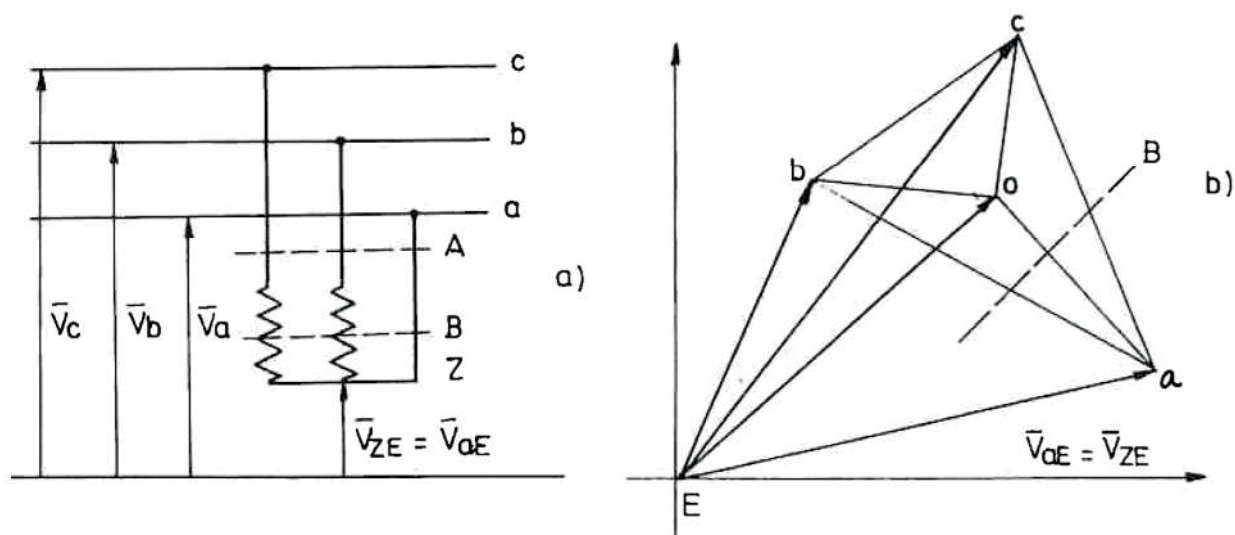
Ako su uvjeti relacije 3-159 i relacije 3-161 zadovoljeni, onda je napon zvjezdišta jednak nuli.

Razmatranja ćemo pokazati na slici 203.

Idući od A preko B prema Z smanjivati će se trokut linijskih napona, ali tako da će uvijek biti $\bar{V}_{ZE} = \bar{V}_{aE}$.

U slučaju $\bar{Z}_a = \bar{Z}_b = \bar{Z}_c$ smanjivat će se takodjer trokut linijskih napona, ako od A idemo preko B prema Z, ali će na koncu postati

$$\bar{V}_{ZE} = \bar{V}_{0E} \quad 3-162$$



Slika 203 - Nesimetrični trokut napona i nesimetrična zvijezda impedancija

Kako je to pokazano na slici 202c.

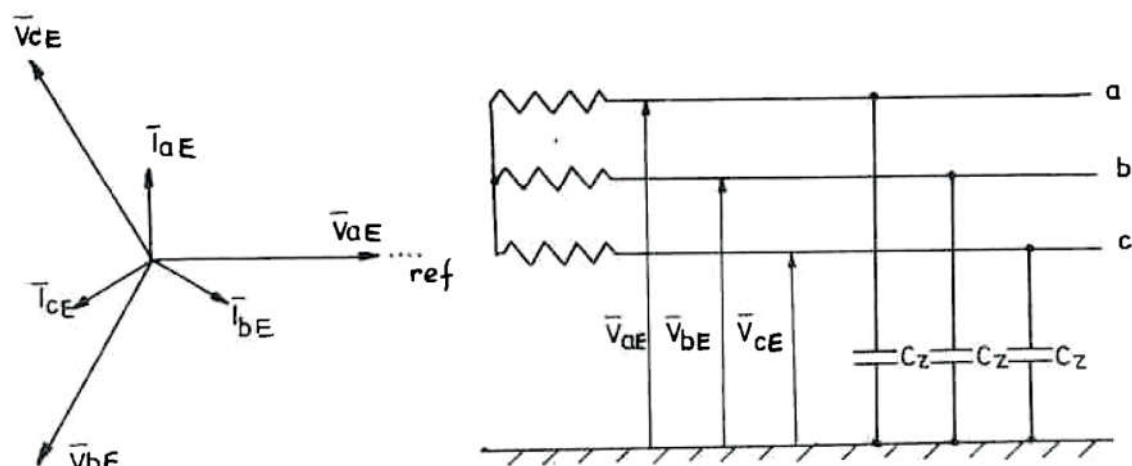
U daljnjem tekstu promatrat ćemo mrežu izoliranog zvjezdišta (izoliranu mrežu) u normalnom pogonu kao mrežu simetrične izvedbe, simetričnih potrošača i simetričnih napona. Na slici 204 pokazani su odnosi napona i struja u takvoj mreži. Padovi napona u mreži na uzdužnim impedancijama uslijed struja normalnog pogona su relativno mali, a pogotovo su mali padovi napona prouzrokovani strujama kroz dozemne kapacitete. Zato možemo zanemariti sve uzdužne padove napona, odnosno premostiti sve uzdužne impedancije a da pri tome kvalitativno razmatranje odnosa u mreži ne izgubi na vrijednosti. Mrežu tada možemo predstaviti trofaznom shemom kao na sl.104b. (isto ovo razmatranje dovelo je i do trofazne sheme mreže na slici 206). Svi kapaciteti mreže mogu se sada koncentrirati u jednoj točki.

Kroz dozemni kapacitet faza teče struja

$$\bar{I}_{aE} = \bar{V}_{aE} j \omega C_z \quad 3-163a$$

$$\bar{I}_{bE} = \bar{V}_{bE} j \omega C_z = a^2 \bar{V}_{aE} j \omega C_z \quad b$$

$$\bar{I}_{cE} = \bar{V}_{cE} j \omega C_z = a \bar{V}_{aE} j \omega C_z \quad c$$



Slika 204 - Naponi i struje u normalnom pogonu mreže sa izoliranim zvjezdištem

Apsolutna vrijednost dozemne struje u svakoj fazi iznosi

$$I_f = U_f \omega C_z \quad 3-164$$

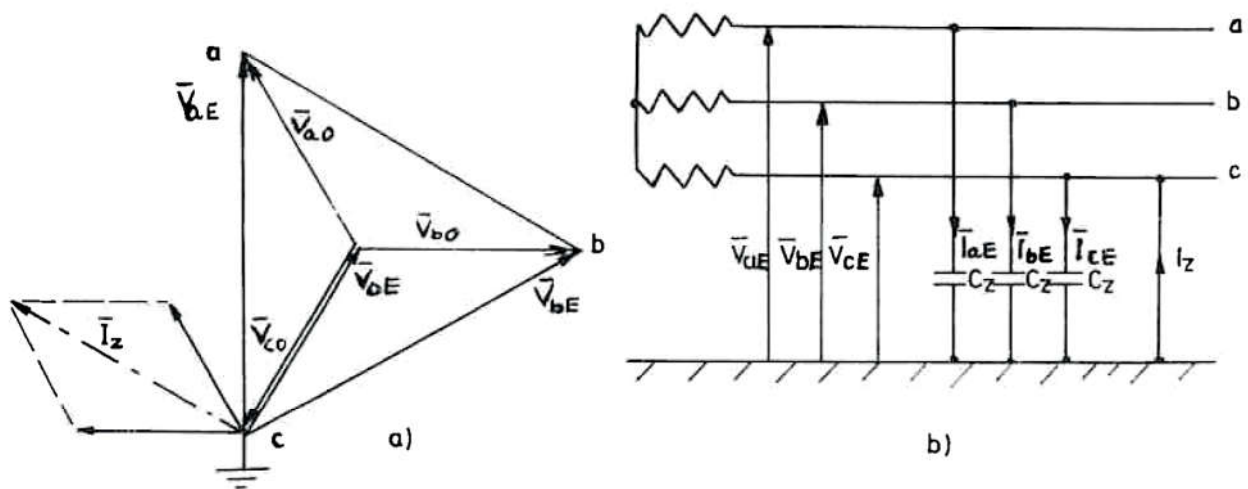
dok je suma dozemnih struja u svakoj točki mreže jednaka nuli.

3.2.2.1 Dozemni spoj jedne faze sa zemljom - zemljospoj

Prilike u mreži za vrijeme zemljospoja pogledajmo na slici 205. Faza c ima spoj sa zemljom, pa je napon ove faze prema zemlji jednak nuli. Nas interesira napon zdravih faza prema zemlji i struja na mjestu zemljospoja.

Medjusobni naponi vodiča nisu se poremetili, pa potrošači ovu pojavu neće osjetiti. Ipak će uzemljenje jedne faze dovesti, uslijed pomaka potencijala nultocke, do sekundarnih pojava, od kojih je najvažnija pojava struje zemljospoja $\vec{I}_z$ kroz spoj zemlje s vodičem.

Napon nultocke dobit ćemo, ako u relaciju 3-156 stavimo da je $\vec{Y}_c = \infty$. Dobijemo



Slika 205 - Dozemni spoj faze c u izoliranoj mreži

$$\begin{aligned}\bar{V}_{0E} &= - \frac{\bar{V}_{a0} \bar{Y}_a + \bar{V}_{b0} \bar{Y}_b + \bar{V}_{c0} \bar{Y}_c}{\bar{Y}_a + \bar{Y}_b + \bar{Y}_c} = \\ &= - \frac{\bar{V}_{a0} \bar{Y}_a / \bar{Y}_c + \bar{V}_{b0} \bar{Y}_b / \bar{Y}_c + \bar{V}_{c0}}{\bar{Y}_a / \bar{Y}_c + \bar{Y}_b / \bar{Y}_c + 1} = \\ &= - \bar{V}_{c0}\end{aligned}$$

3-165

Napon nultoeke na mjestu zemljospoja prema zemlji jednak je negativnom naponu pgodjene faze prema nultoecki.

Relacija 3-151 daje nam napone zdravih faza prema zemlji

$$\bar{V}_{aE} = - \bar{V}_{c0} + \bar{V}_{a0} \quad 3-166a$$

$$\bar{V}_{bE} = - \bar{V}_{c0} + \bar{V}_{b0} \quad b$$

Kroz dozemne admitancije faza a i b teče struja $\bar{I}_E$, čiji je povratni put zavoren upravo preko mjesta zemljospoja.

$$\bar{I}_E = \bar{V}_{aE} \bar{Y}_a + \bar{V}_{bE} \bar{Y}_b \quad 3-167$$

Kada je trokut napona simetričan izlazi

$$\bar{V}_{0E} = -a \bar{V}_{a0} \quad 3-168$$

$$\bar{V}_{aE} = -a \bar{V}_{a0} + \bar{V}_{a0} = (1 - a) \bar{V}_{a0} \quad 3-169$$

$$\bar{V}_{bE} = -a \bar{V}_{a0} + a^2 \bar{V}_{a0} = (a^2 - a) \bar{V}_{a0} \quad 3-170$$

a ukupna struja kroz kapacitete

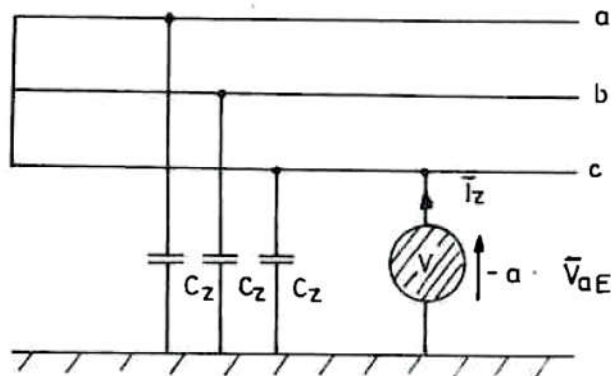
$$\begin{aligned} \bar{I}_E &= [(1 - a) \bar{V}_{a0} + (a^2 - a) \bar{V}_{a0}] \bar{Y}_z = \\ &= (1 - 2a + a^2) \bar{V}_{a0} \bar{Y}_z = -3a \bar{V}_{a0} \bar{Y}_z = \\ &= -3a \bar{V}_{a0} j \omega C_z = 3 \bar{V}_{a0} \omega C_z e^{j30} \end{aligned} \quad 3-171$$

To je ujedno struja kroz mjesto zemljospoja u smjeru od zemlje prema mjestu kvara, odnosno od zemlje prema pogodjenoj fazi. Apolutna vrijednost struje iznosi

$$I_z = U_f 3 \omega C_z \quad 3-172$$

I ovdje možemo postaviti fiktivni sistem sa fiktivnim generatorom na mjestu kvara. Napon fiktivnog generatora je po iznosu jednak naponu koji je na mjestu kvara vladao prije nastanka kratkog spoja, a protivnog je predznaka. U mreži treba premostiti sve elektromotorne sile (sl.206).

Radi svih prije učinjenih zanemarenja i radi sada premoštenih elektromotornih sila, sve tri faze našle su se na istom potencijalu - a $\bar{V}_{aE}$, a dozemni kapaciteti spojeni su paralelno. Stoga



Slika 206 - Fiktivni sistem zemljospoja

struja na mjestu kvara iznosi

$$\bar{I}_z = -a \bar{V}_{a0} j \omega 3 C_z = 3 \bar{V}_{a0} \omega C_z e^{j30} \quad 3-173$$

Ovaj izraz jednak je izrazu 3-171.

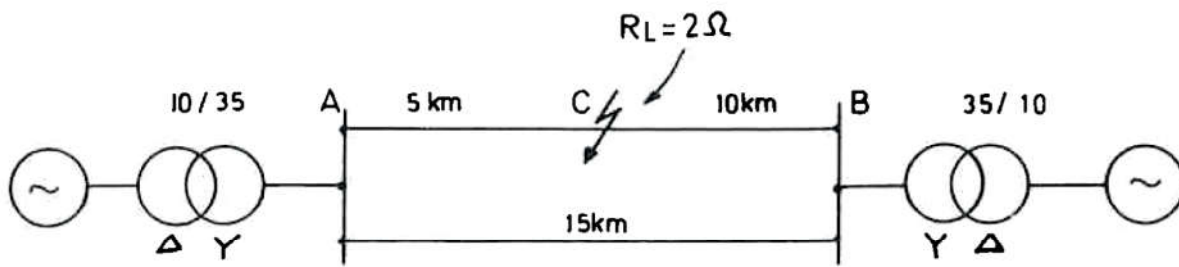
Dozemni kapaciteti u ekvivalentnoj shemi sistema komponentata imaju prvorazredni značaj. Ostale kapacitete (direktnog i inverznog prema nuli i međusobne kapacitete svih sistema) možemo zanemariti.

Primjer 3.8 Na slici 207 nalazi se jednopolna shema neke izolirane mreže. U točki C došlo je do zemljospoja preko luka. Potrebno je izračunati struju zemljospoja.

Račun ćemo provesti u metodi otpora. Cijelu mrežu reduciramo na naponski nivo 35 kV.

$$X_{GA} = X_{GB} = 1 \frac{10^2}{10} \left(\frac{35}{10}\right)^2 = 122,5 \quad |\Omega|$$

$$X_{GAi} = X_{GBi} = 0,2 \frac{10^2}{10} \left(\frac{35}{10}\right)^2 = 24,5 \quad |\Omega|$$



10 MVA

100 % 10 MVA

10 kV 10 %

20 %

$R_1 = 0,2 \Omega/\text{km}$

$X_1 = 0,38 \Omega/\text{km}$

$C_{Z1} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ F/km}$

10 MVA

10 MVA 100 %

10 % 10 kV

20 %

Slika 207 - Zemljospoj u točki C zadane mreže

$$X_{TA} = X_{TB} = 0,1 \frac{35^2}{10} = 12,25 \quad |\Omega|$$

$$R_{A-B} = 0,2 \cdot 15 = 3 \quad |\Omega|$$

$$X_{A-B} = 0,38 \cdot 15 = 5,7 \quad |\Omega|$$

$$B_{ZA-B} = 314 \cdot 5 \cdot 10^{-9} \cdot 15 = 0,236 \cdot 10^{-4} \quad |S|$$

$$R_{A-C} = 0,2 \cdot 5 = 1 \quad |\Omega|$$

$$X_{A-C} = 0,38 \cdot 5 = 1,9 \quad |\Omega|$$

$$B_{ZA-C} = 314 \cdot 5 \cdot 10^{-9} \cdot 5 = 0,079 \cdot 10^{-4} \quad |S|$$

$$R_{C-B} = 0,2 \cdot 10 = 2 \quad |\Omega|$$

$$X_{C-B} = 0,38 \cdot 10 = 3,8 \quad |\Omega|$$

$$B_{ZC-B} = 314 \cdot 5 \cdot 10^{-9} \cdot 10 = 0,157 \cdot 10^{-4} \quad |S|$$

$$R_L = 2 \quad |\Omega|$$

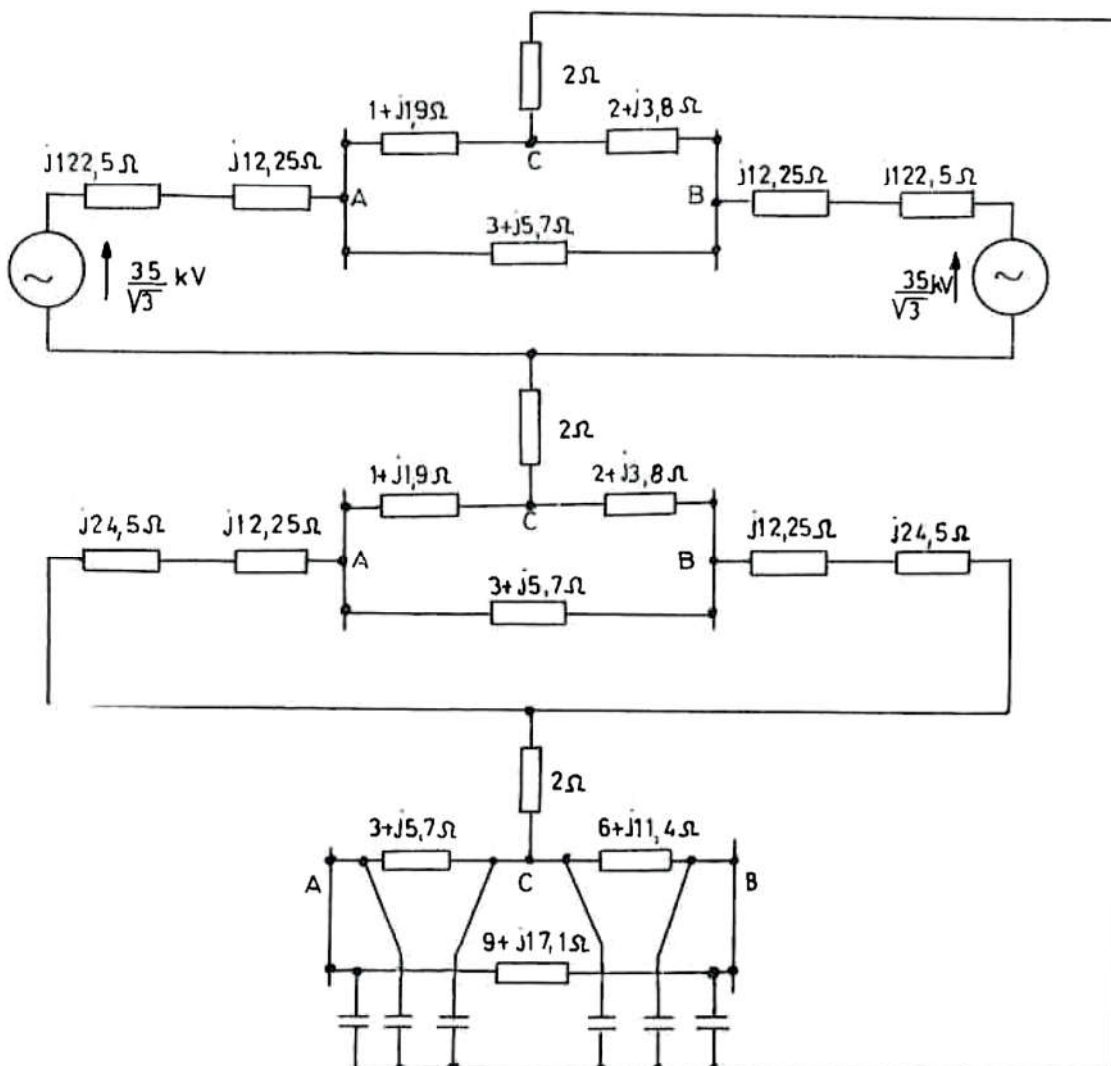
Dozemne susceptancije podijelimo na početak i kraj voda, zbrojimo i pretvorimo u dozemne reaktancije:

$$X_{zA} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{0,236 + 0,079} = 63492 \quad |\Omega|$$

$$X_{zB} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{0,236 + 0,151} = 50891 \quad |\Omega|$$

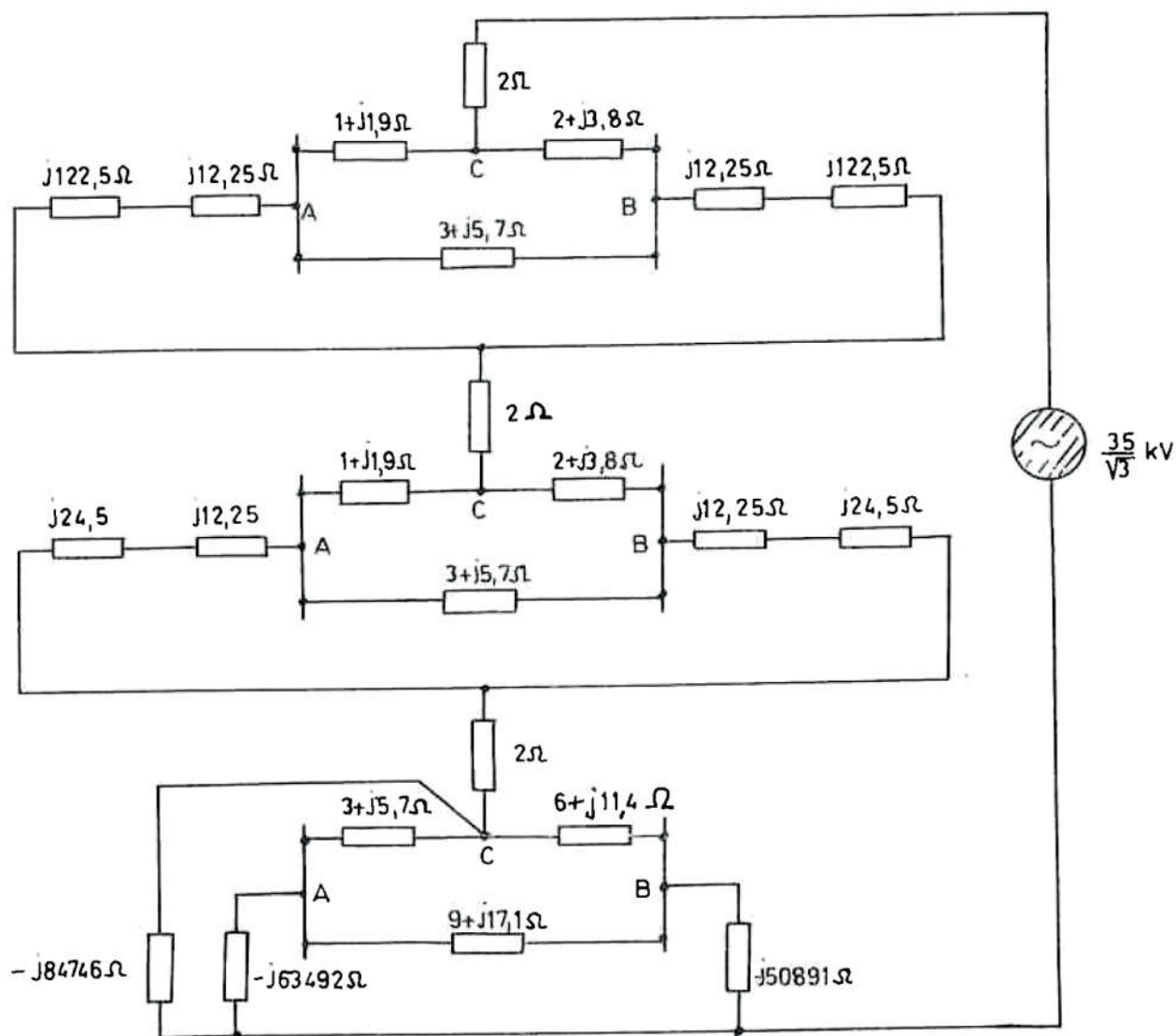
$$X_{zC} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{0,079 + 0,157} = 84746 \quad |\Omega|$$

Sve ove veličine unesemo u ekvivalentnu shemu na slici 208 odnosno na slici 209.



Slika 208 - Ekvivalentna shema sistema komponenata

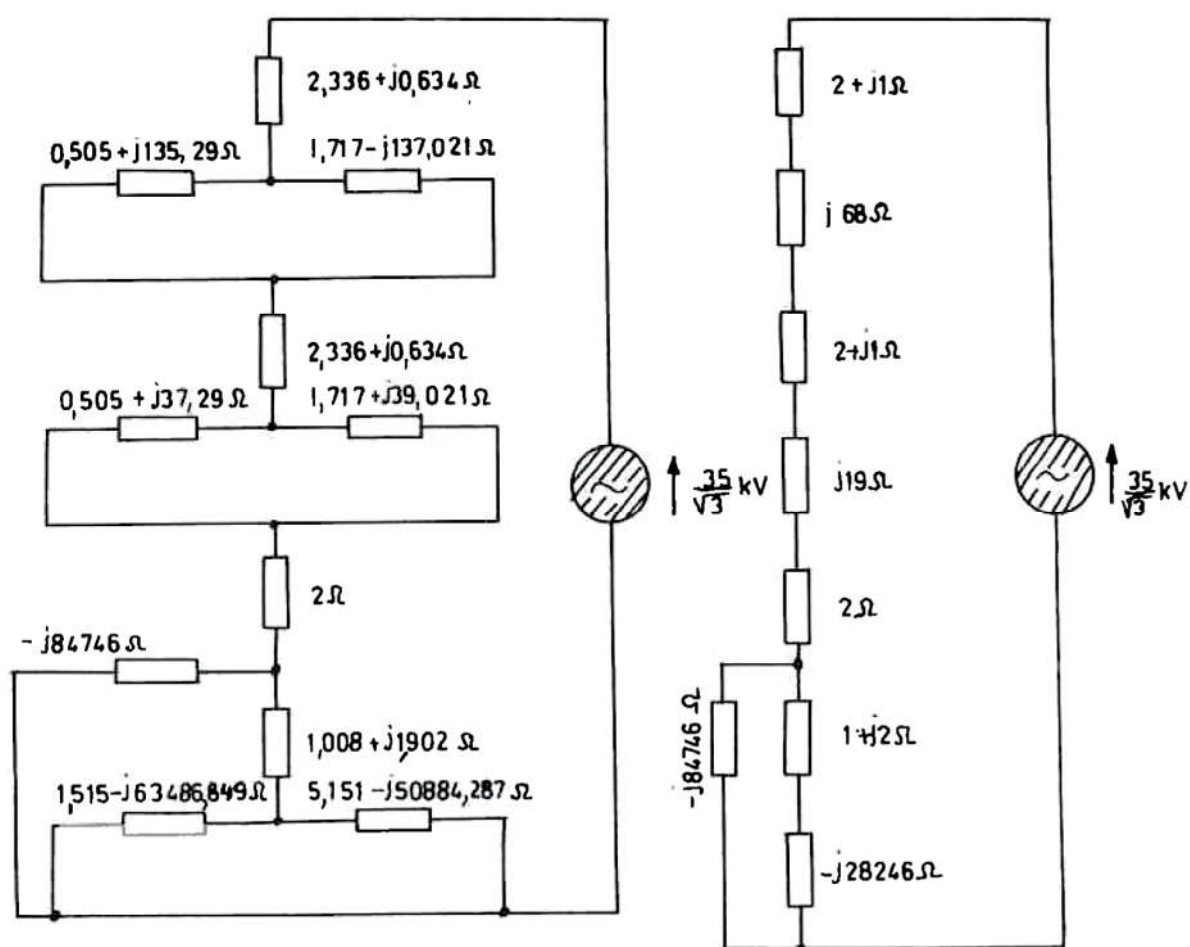
Dozemni kapaciteti su kapaciteti nultog sistema komponentata (vidi "Mreže I" 4.4.5).



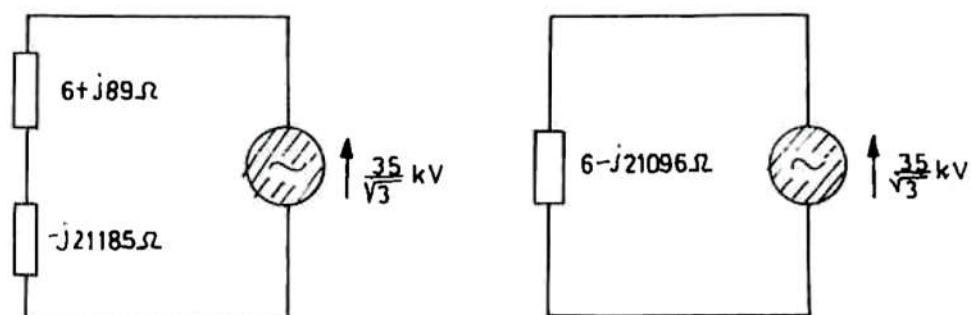
Slika 209 - Ekvivalentna shema fiktivnog sistema komponentata

Pretvorba mreže sa slike 209 pokazana je dalje na sl.210 i 211. Utjecaj djelatnog otpora vodova je veličina, koju odmah možemo zanemariti. Takodjer možemo zanemariti i otpor električnog luka. Struja zemljospoja iznosi:

$$\bar{I}_z = 3 \frac{35 \cdot 10^3}{\sqrt{3} (-j21096)} = j 2,877 \text{ |A|}$$



Slika 210 - Pretvorba fiktivnog sistema



Slika 211 - Fiktivni sistem sveden na jednu impedanciju

Ako zanemarimo sve konstante osim kapaciteta, struja zemljospoja iznosi:

$$\bar{I}_z = 3 \frac{35}{\sqrt{3}} 10^3 j 0,471 \cdot 10^{-4} = j 2,852 |A|$$

Vidimo da su razlike u rezultatima računanja minimalne. U rasprostranjenoj mreži rasti će iznos B_z , pa će $-j X_z$ postajati sve manji. Ukoliko pretpostavimo da se impedancija direktnog i inverznog sistema neće mijenjati proporcionalno sa dužinom vodova (više vodova, više petlji), to će kapacitivna struja kvara sve više rasti i u jednom momentu će postati veća od dopuštene.

Nagla promjena napona prema zemlji u trenutku nastanka zemljospoja izaziva prijelaznu pojavu, koja traje do uspostave novog stacionarnog stanja. Električni luk, preko kojeg se najčešće uspostavlja spoj jedne faze sa zemljom, tretiran je u prethodnom primjeru kao linearni omski otpor. U stvarnosti je električni luk nelinearni otpor, koji se osim toga u svakoj poluperiodi, ovisno o momentalnoj visini napona, ponovno pali i gasi. Time izazvane nagle promjene struje izazivaju u brzom uzastopnom slijedu "intermitirajuće" prenaponske pojave vrlo visoke amplitude. Zbog toga je neophodno pogon u režimu zemljospoja svesti na najkraće moguće vrijeme, a koje s druge strane ovisi o vremenu potrebnom za identifikaciju voda na kojem je zemljospoj.

3.2.2.2 Dozemni spoj dviju faza - dvostruki zemljospoj

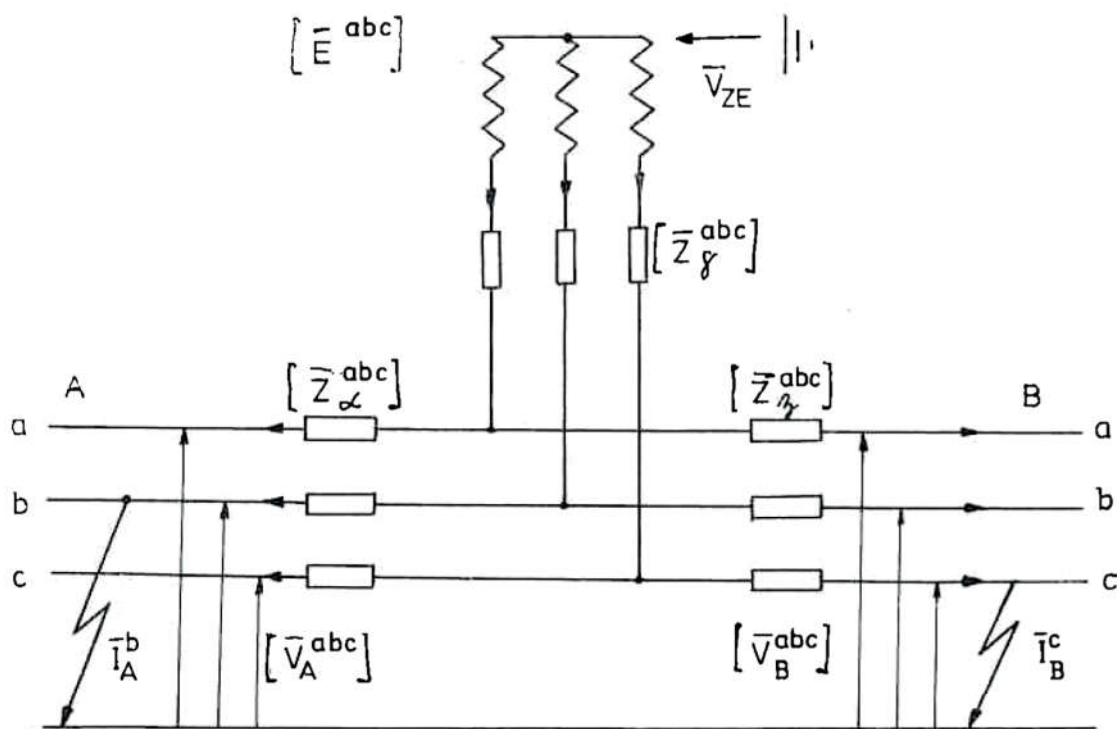
Za vrijeme zemljospoja su zdrave faze mreže izložene povišenom naponu prema zemlji i prenaponima. Ako se zemljospoj na vrijeme ne otkloni, lako može na nekom slabom mjestu probiti izolacija zdrave faze. Pojava se naziva dvostruki zemljospoj. Karakteristično je postojanje zemljospoja u isto vrijeme na dva različita mjesta u mreži i na dvije različite faze.

Struje koje teku za vrijeme dvostrukog zemljospoja su reda veličine struja kratkog spoja, pa su u računanju prilika za vrijeme ovog

kvara zanemarljivi dozemni kapaciteti. U slučaju, kada dvostruki zemljospoj nastane na istom mjestu u mreži, imamo iste prilike kao kod dvopolnog kratkog spoja.

Struje dvostrukog zemljospoja uvijek su manje, a u najgorem slučaju jednake, od struja dvopolnog kratkog spoja, što je i dokazano u slijedećem tekstu.

Dva različita mjesta kvara u mreži uvelike kompliciraju proračun. Na jednostavnoj radijalnoj mreži pokazat ćemo trofazno postavljanje problema u metodi petlje (sl.212).



Slika 212 - Radijalna mreža pogodjena dvostrukim zemljospojem

Mjesto kvara A daje uvjete

$$\bar{I}_A^a = 0$$

3-174a

$$\bar{I}_A^c = 0 \quad b$$

$$\bar{V}_A^b = 0 \quad c$$

Mjesto kvara B daje uvjete

$$\bar{I}_B^a = 0 \quad d$$

$$\bar{I}_B^b = 0 \quad e$$

$$\bar{V}_B^c = 0 \quad f$$

Zvezdište je izolirano, pa je suma struja koje teku u zemlju jednaka nuli

$$\bar{I}_A^b + \bar{I}_B^c = 0 \quad g$$

Jednadžbe u metodi petlje, pisane u matričnom obliku, glase

$$\begin{aligned} [\bar{E}^{abc}] &= [\bar{Z}_{\gamma}^{abc}] ([\bar{I}_A^{abc}] + [\bar{I}_B^{abc}]) + \\ &+ [\bar{Z}_{\alpha}^{abc}] [\bar{I}_A^{abc}] + [\bar{V}_A^{abc}] - [\bar{V}_{ZE}^{abc}] \end{aligned} \quad 3-175a$$

$$\begin{aligned} [\bar{E}^{abc}] &= [\bar{Z}_{\delta}^{abc}] ([\bar{I}_B^{abc}] + [\bar{I}_A^{abc}]) + \\ &+ [\bar{Z}_{\beta}^{abc}] [\bar{I}_B^{abc}] + [\bar{V}_B^{abc}] - [\bar{V}_{ZE}^{abc}] \end{aligned} \quad b$$

Ispišimo jednadžbe uvažavajući uvjete. Dobijemo 6 jednadžbi sa 6 nepoznanica. Nepoznanice jesu

$$\bar{I}_A^b, \bar{V}_A^a, \bar{V}_A^c, \bar{V}_B^a, \bar{V}_B^b, \bar{V}_{ZE}$$

jer ćemo pretpostaviti simetrične elektromotorne sile.

$$\begin{bmatrix} \bar{E}^a \\ a^2 \bar{E}^a \\ a \bar{E}^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{z}_{\gamma\gamma} & \bar{z}_{\gamma m} & \bar{z}_{\gamma m} \\ \bar{z}_{\gamma m} & \bar{z}_{\gamma\gamma} & \bar{z}_{\gamma m} \\ \bar{z}_{\gamma m} & \bar{z}_{\gamma m} & \bar{z}_{\gamma\gamma} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{I}_A^b \\ -\bar{I}_A^b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{z}_{\alpha\alpha} & \bar{z}_{\alpha m} & \bar{z}_{\alpha m} \\ \bar{z}_{\alpha m} & \bar{z}_{\alpha\alpha} & \bar{z}_{\alpha m} \\ \bar{z}_{\alpha m} & \bar{z}_{\alpha m} & \bar{z}_{\alpha\alpha} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{I}_A^b \\ 0 \end{bmatrix} + \\
 + \begin{bmatrix} \bar{V}_A^a \\ 0 \\ \bar{V}_A^c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{V}_{ZE} \\ \bar{V}_{ZE} \\ \bar{V}_{ZE} \end{bmatrix} \quad 3-176a$$

$$\begin{bmatrix} \bar{E}^a \\ a^2 \bar{E}^a \\ a \bar{E}^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{z}_{\gamma\gamma} & \bar{z}_{\gamma m} & \bar{z}_{\gamma m} \\ \bar{z}_{\gamma m} & \bar{z}_{\gamma\gamma} & \bar{z}_{\gamma m} \\ \bar{z}_{\gamma m} & \bar{z}_{\gamma m} & \bar{z}_{\gamma\gamma} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{I}_A^b \\ -\bar{I}_A^b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{z}_{\beta\beta} & \bar{z}_{\beta m} & \bar{z}_{\beta m} \\ \bar{z}_{\beta m} & \bar{z}_{\beta\beta} & \bar{z}_{\beta m} \\ \bar{z}_{\beta m} & \bar{z}_{\beta m} & \bar{z}_{\beta\beta} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\bar{I}_A^b \end{bmatrix} + \\
 + \begin{bmatrix} \bar{V}_B^a \\ \bar{V}_B^b \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{V}_{ZE} \\ \bar{V}_{ZE} \\ \bar{V}_{ZE} \end{bmatrix} \quad 3-176b$$

Sada riješimo ove jednadžbe bilo kojim postupkom za rješavanje sistema linearinih jednadžbi. Rezultat je:

$$\bar{I}_A^b = \frac{(a^2 - a) \bar{E}^a}{2 \bar{z}_{\gamma\gamma} + \bar{z}_{\alpha\alpha} + \bar{z}_{\beta\beta} - 2 \bar{z}_{\gamma m}} \quad 3-177$$

$$\bar{V}_A^a = \frac{3 \bar{z}_{\gamma\gamma} + (1-a) \bar{z}_{\alpha\alpha} + (1-a^2) \bar{z}_{\beta\beta} - 3 \bar{z}_{\gamma m} + (a-a^2) \bar{z}_{\alpha m}}{2 \bar{z}_{\gamma\gamma} + \bar{z}_{\alpha\alpha} + \bar{z}_{\beta\beta} - 2 \bar{z}_{\gamma m}} \bar{E}^a \quad 3-178$$

$$\bar{V}_A^c = \frac{(\bar{Z}_{\beta\beta} + \bar{Z}_{\alpha m})(a - a^2)}{2 \bar{Z}_{\gamma\gamma} + \bar{Z}_{\alpha\alpha} + \bar{Z}_{\beta\beta} - 2 \bar{Z}_{\gamma m}} \bar{E}^a \quad 3-179$$

$$\bar{V}_B^a = \frac{3 \bar{Z}_{\gamma\gamma} + (1-a)\bar{Z}_{\alpha\alpha} + (1-a^2)\bar{Z}_{\beta\beta} - 3 \bar{Z}_{\gamma m} + (a^2-a)\bar{Z}_{\beta m}}{2 \bar{Z}_{\gamma\gamma} + \bar{Z}_{\alpha\alpha} + \bar{Z}_{\beta\beta} - 2 \bar{Z}_{\gamma m}} \bar{E}^a \quad 3-180$$

$$\bar{V}_B^b = \frac{(a^2 - a)(\bar{Z}_{\alpha\alpha} + \bar{Z}_{\beta m})}{2 \bar{Z}_{\gamma\gamma} + \bar{Z}_{\alpha\alpha} + \bar{Z}_{\beta\beta} - 2 \bar{Z}_{\gamma m}} \bar{E}^a \quad 3-181$$

$$\bar{V}_{ZE} = \frac{\bar{Z}_{\gamma\gamma} - a \bar{Z}_{\alpha\alpha} - a^2 \bar{Z}_{\beta\beta} - \bar{Z}_{\gamma m}}{2 \bar{Z}_{\gamma\gamma} + \bar{Z}_{\alpha\alpha} + \bar{Z}_{\beta\beta} - 2 \bar{Z}_{\gamma m}} \bar{E}^a \quad 3-182$$

Uvažimo da je za slučaj $\bar{Z}^1 = \bar{Z}^2$ pretvorba impedancija u sisteme komponentata slijedeća

$$\bar{Z}_{\gamma\gamma} = \frac{1}{3} (\bar{Z}_\gamma^0 + 2 \bar{Z}_\gamma^1)$$

$$\bar{Z}_{\gamma m} = \frac{1}{3} (\bar{Z}_\gamma^0 - \bar{Z}_\gamma^1)$$

$$\bar{Z}_{\alpha\alpha} = \frac{1}{3} (\bar{Z}_\alpha^0 + 2 \bar{Z}_\alpha^1)$$

$$\bar{Z}_{\alpha m} = \frac{1}{3} (\bar{Z}_\alpha^0 - \bar{Z}_\alpha^1)$$

$$\bar{Z}_{\beta\beta} = \frac{1}{3} (\bar{Z}_\beta^0 - 2 \bar{Z}_\beta^1)$$

$$\bar{Z}_{\beta m} = \frac{1}{3} (\bar{Z}_\beta^0 - \bar{Z}_\beta^1)$$

Relacije 3-177 do 3-182 možemo izraziti u simetričnim komponentama

$$\bar{I}_A^b = \frac{(a^2 - a)}{2 \bar{Z}_\gamma^1 + \frac{1}{3} (\bar{Z}_\alpha^0 + \bar{Z}_\beta^0) + \frac{2}{3} (\bar{Z}_\alpha^1 + \bar{Z}_\beta^1)} \bar{E}^a \quad 3-183$$

$$\bar{I}_B^c = \frac{(a - a^2)}{2 \bar{z}_\gamma^1 + \frac{1}{3} (\bar{z}_\alpha^0 + \bar{z}_\beta^0) + \frac{2}{3} (\bar{z}_\alpha^1 + \bar{z}_\beta^1)} \bar{E}^a \quad 3-184$$

$$\bar{V}_A^a = \frac{3 \bar{z}_\gamma^1 + \frac{1}{3} (1-a^2) (\bar{z}_\alpha^0 + \bar{z}_\beta^0) + (2-3a+a^2) \bar{z}_\alpha^1 + 2(1-a^2) \bar{z}_\beta^1}{2 \bar{z}_\gamma^1 + \frac{1}{3} (\bar{z}_\alpha^0 + \bar{z}_\beta^0) + \frac{2}{3} (\bar{z}_\alpha^1 + \bar{z}_\beta^1)} \bar{E}^a \quad 3-185$$

$$\bar{V}_A^c = \frac{\frac{1}{3} (\bar{z}_\alpha^0 + \bar{z}_\beta^0) - (\bar{z}_\alpha^1 - 2 \bar{z}_\beta^1) (a - a^2)}{2 \bar{z}_\gamma^1 + \frac{1}{3} (\bar{z}_\alpha^0 + \bar{z}_\beta^0) + \frac{2}{3} (\bar{z}_\alpha^1 + \bar{z}_\beta^1)} \bar{E}^a \quad 3-186$$

$$\bar{V}_B^a = \frac{3 \bar{z}_\gamma^1 + \frac{1}{3} (1-a) (\bar{z}_\alpha^0 + \bar{z}_\beta^0) + 2(1-a) \bar{z}_\alpha^1 + (2-3a^2+a) \bar{z}_\beta^1}{2 \bar{z}_\gamma^1 + \frac{1}{3} (\bar{z}_\alpha^0 + \bar{z}_\beta^0) + \frac{2}{3} (\bar{z}_\alpha^1 + \bar{z}_\beta^1)} \bar{E}^a \quad 3-187$$

$$\bar{V}_B^b = \frac{\frac{1}{3} (\bar{z}_\alpha^0 + \bar{z}_\beta^0) + (2 \bar{z}_\alpha^1 - \bar{z}_\beta^1) (a^2 - a)}{2 \bar{z}_\gamma^1 + \frac{1}{3} (\bar{z}_\alpha^0 + \bar{z}_\beta^0) + \frac{2}{3} (\bar{z}_\alpha^1 + \bar{z}_\beta^1)} \bar{E}^a \quad 3-188$$

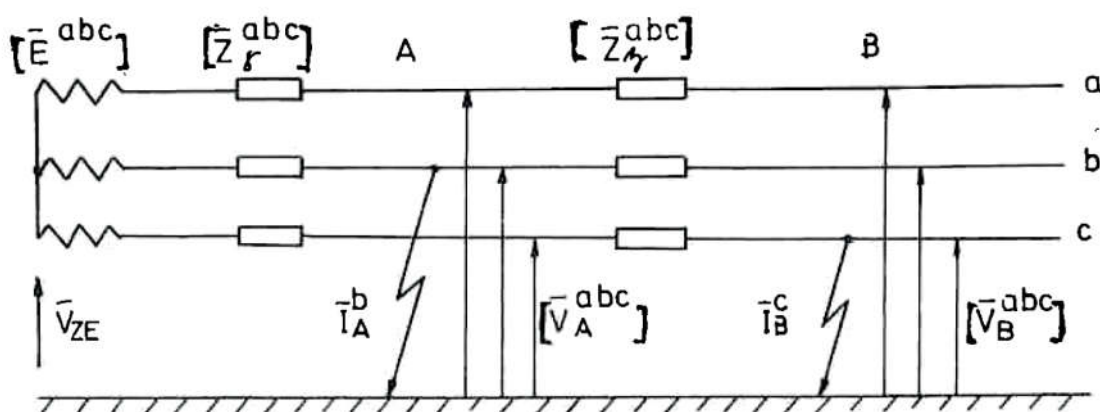
$$\bar{V}_{ZE} = \frac{\bar{z}_\gamma^1 - \frac{a}{3} (\bar{z}_\alpha^0 + a \bar{z}_\beta^0) - \frac{2a}{3} (\bar{z}_\alpha^1 + a \bar{z}_\beta^1)}{2 \bar{z}_\gamma^1 + \frac{1}{3} (\bar{z}_\alpha^0 + \bar{z}_\beta^0) + \frac{2}{3} (\bar{z}_\alpha^1 + \bar{z}_\beta^1)} \bar{E}^a \quad 3-189$$

Ako je

$$[\bar{z}_\alpha^{abc}] = [0]$$

mreža sa slike 212 prelazi u mrežu sa slike 213, a relacije 3-183 do 3-189 prelaze u

$$\bar{I}_A^b = \frac{(a^2 - a)}{2 \bar{z}_\gamma^1 + \frac{1}{3} (\bar{z}_\beta^0 + 2 \bar{z}_\beta^1)} \bar{E}^a \quad 3-190$$



Slika 213 - Radijalni vod pogodjen dvostrukim zemljospojem

$$\bar{I}_B^c = \frac{(a - a^2)}{2 \bar{Z}_\gamma^1 + \frac{1}{3} (\bar{Z}_\beta^0 + 2 \bar{Z}_\beta^1)} \bar{E}^a \quad 3-191$$

$$\bar{V}_A^a = \frac{3 \bar{Z}_\gamma^1 + \frac{1}{3} (1 - a^2) (\bar{Z}_\beta^0 + 2 \bar{Z}_\beta^1)}{2 \bar{Z}_\gamma^1 + \frac{1}{3} (\bar{Z}_\beta^0 + 2 \bar{Z}_\beta^1)} \bar{E}^a \quad 3-192$$

$$\bar{V}_A^c = \frac{\frac{1}{3} (\bar{Z}_\beta^0 + 2 \bar{Z}_\beta^1) (a - a^2)}{2 \bar{Z}_\gamma^1 + \frac{1}{3} (\bar{Z}_\beta^0 + 2 \bar{Z}_\beta^1)} \bar{E}^a \quad 3-193$$

$$\bar{V}_B^a = \frac{3 \bar{Z}_\gamma^1 + \frac{1}{3} (1 - a) \bar{Z}_\beta^0 + (2 - 3a^2 + a) \bar{Z}_\beta^1}{2 \bar{Z}_\gamma^1 + \frac{1}{3} (\bar{Z}_\beta^0 + 2 \bar{Z}_\beta^1)} \bar{E}^a \quad 3-194$$

$$\bar{V}_B^b = \frac{\frac{1}{3} (\bar{Z}_\beta^0 - \bar{Z}_\beta^1) (a^2 - a)}{2 \bar{Z}_\gamma^1 + \frac{1}{3} (\bar{Z}_\beta^0 + 2 \bar{Z}_\beta^1)} \bar{E}^a \quad 3-195$$

$$\bar{V}_{ZE} = \frac{\bar{Z}_\gamma^1 - \frac{a^2}{3} (\bar{Z}_\beta^0 + 2 \bar{Z}_\beta^1)}{2 \bar{Z}_\gamma^1 + \frac{1}{3} (\bar{Z}_\beta^0 + 2 \bar{Z}_\beta^1)} \bar{E}^a \quad 3-196$$

U slučaju da je $[\bar{Z}_{\alpha}^{abc}] = [0]$ i $[\bar{Z}_{\beta}^{abc}] = [0]$ (sl.214) kvar se svodi na dvopolni kratki spoj. Zemlja, osim uloge posrednika u ostvarenju dvopolnog kratkog spoja, nema nikakvu drugu ulogu, jer je zvjezdište mreže izolirano i ne dozvoljava da se razvije nulta komponenta struje. Relacije 3-183 do 3-189, odnosno relacije 3-190 do 3-196 prelaze u

$$\bar{I}_A^b = \frac{a^2 - a}{2 \bar{Z}_Y^1} \bar{E}^a \quad 3-197$$

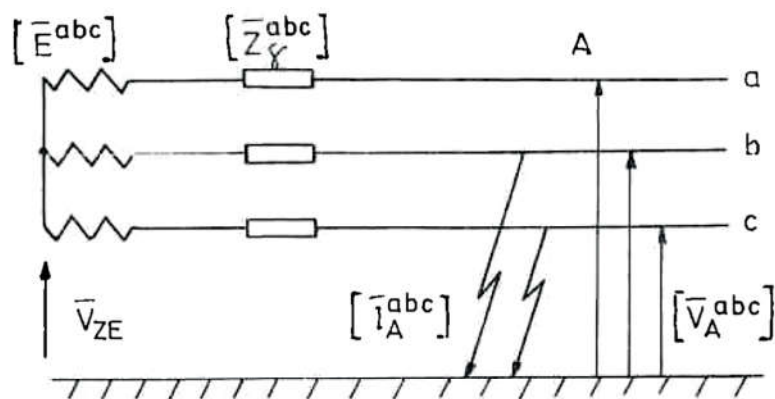
$$\bar{I}_A^c = \frac{a - a^2}{2 \bar{Z}_Y^1} \bar{E}^a \quad 3-198$$

$$\bar{V}_A^a = \frac{3}{2} \bar{E}^a \quad 3-199$$

$$\bar{V}_A^b = 0 \quad 3-200$$

$$\bar{V}_A^c = 0 \quad 3-201$$

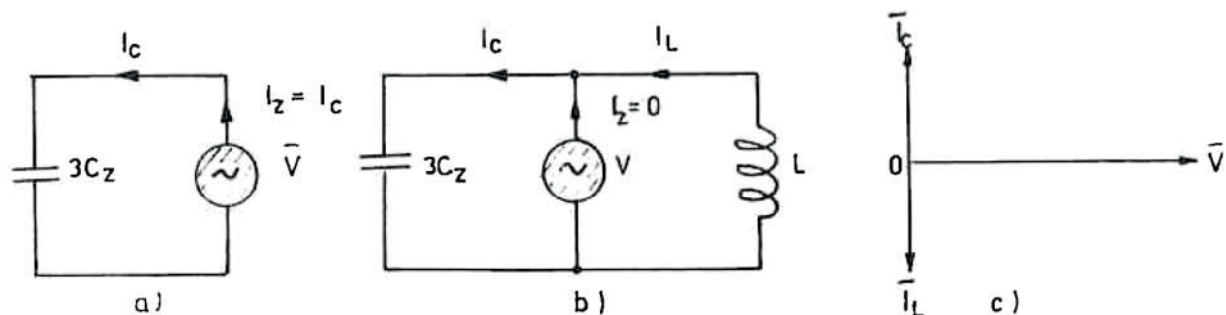
$$\bar{V}_{ZE} = \frac{1}{2} \bar{E}^a \quad 3-202$$



Slika 214 - Dvostruki zemljospoj na istom mjestu u mreži

3.2.3 Mreža uzemljena preko petersenke

Sliku 206 možemo još dalje pojednostavniti tako, da tri paralelno spojena dozemna kapaciteta zbrojimo, pa će fiktivni sistem poprimiti izgled prikazan na sl.215a.



Slika 215 - Princip djelovanja petersenke

Ako fiktivni generator opteretimo još i induktivitetom L takvim, da je zadovoljen uvjet

$$I_z = 3 V \omega C_z = \frac{V}{\omega L} \quad 3-203$$

slijedi, da je

$$\omega L = \frac{1}{3 \omega C_z} \quad 3-204$$

Novo stanje je prikazano na slici 215b. Fiktivni generator će napajati kondenzator $3C_z$ i induktivitet L strujama jednakim po iznosu, a suprotnim po fazi (sl.215c), pa će rezultirajuća struja kroz generator biti jednaka nuli, odnosno rezultirajuća impedancija na fiktivni generator priključenog opterećenja beskonačno velika, što odgovara stanju paralelne rezonancije.

Kako fiktivni generator predstavlja upravo mjesto zemljospoja stvarne mreže, možemo zaključiti, da na mjestu zemljospoja neće teći nikakva struja.

Ovu okolnost iskoristio je Petersen. Po njegovoj zamisli kompenziraju se kapacitivne struje zemljospoja na mjestu zemljospoja postavljanjem induktiviteta između zvjezdišta transformatora i zemlje. Taj induktivitet je po njemu dobio naziv petersenov svitak ili kraće perersenka.

U glavanski povezanom dijelu mreže mora biti primijenjena najmanje jedna petersenka. Ako je primijenjeno više njih, uvjet 3-204 se odnosi na sumu induktiviteta svih petersenki.

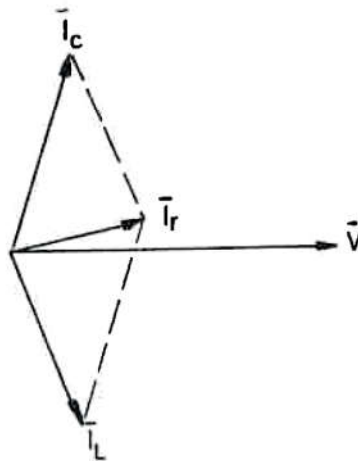
Postavljanjem petersenovog svitka uklonila se je najneugodnija posljedica zemljospoja, a to je razorno djelovanje struje, najčešće u vidu električnog luka, na mjestu zemljospoja.

Ako je zemljospoj ostvaren putem električnog luka (češći slučaj), ovaj će se kod primjene petersenke spontano ugasiti, pošto je $I_z = 0$. Zbog toga se mreža, u kojoj su primijenjene perersenke, često zove i gašena mreža. Ukoliko se radi o trajnom zemljospoju, tj. o čvrstom ("metalnom") spoju jedne faze sa zemljom, na mjestu zemljospoja neće teći nikakva struja i neće biti zagrijavanja, opasnosti od napona dodira i slično. Takav pogon se može tolerirati sve do pronalaženja mjesta kvara, pri čemu treba imati na umu, da povišenje napona "zdravih" faza prema zemlji na vrijednost linijskog napona predstavlja povećani napor za izolaciju i opasnost od pojave dvostrukog zemljospoja.

Logično je, a prema 3-204 i očigledno, da induktivitet L uvijek mora biti uskladjen s dozemnim kapacitetima galvanski povezanih vodova gašene mreže. Do promjene dozemnog kapaciteta može doći u skokovima isključivanjem i uključivanjem pojedinih vodova, ali također u manjim razmjerima i zbog promjene provjesa vodiča uslijed promjene temperature. Možemo dakle očekivati, da uvjet 3-204 neće biti potpuno ispunjen radi nedovoljno točnog prilagodjenja induktiviteta L u svakom trenutku. Osim toga, struje zemljospoja, koje cirkuliraju u krugu perersenka-zemlja-dozemni kapaciteti-vodovi-petersenka, izazivati će i djelatne gubitke, pa će imati i djelatnu komponentu u odnosu na napon. Ta se djelatna komponenta ne može kompenzirati.

Ako zbrojimo djelatnu komponentu uslijed gubitaka i nekompenzirani ostatak uslijed netočne podešenosti petersenke, dobivamo

"struju ostatka" I_r , koja unatoč primjeni petersenke teče na mjestu zemljospoja (sl.216). Povoljna je okolnost što je struja ostatka pretežno djelatna, pa se njen prolaz kroz nulu približno poklapa sa prolazom napona kroz nulu. Usljed toga će se električni luk moći spontano ugasiti i kod struje ostatka sve do nekih 100 A, dok je spontano gašenje kapacitivne struje luka preko 5 A već gotovo nemoguće.



Slika 216 - Struja ostatka gašene mreže

Kapacitivne dozemne struje, kao i struja ostatka, proporcionalne su ukupnoj dužini dalekovoda, koji su galvanski spojeni, kao i nazivnom naponu mreže. Pomak neutralne točke ne prenosi se, naime, kroz transformatore. Kod rasprostranjenih mreža s velikim dužinama vodova struje ostatka su toliko velike, da se luk više ne gasi sam od sebe.

Osim toga kod mreža visokog napona 220 kV i više, izolacija postaje krupna stavka u cijeni mreže. Kruto uzemljeno zvjezdište omogućuje sniženje izolacionog nivoa, čime se postižu uštede u investicijama.

U složenim mrežama s većim brojem stanica, vodova i napojnih točaka postoji mogućnost, da se odvajanjem formiraju dvije ili više galvanski odvojene cjeline. Svaki odvojeni dio mora ostati

kompenziran, pa o tome treba voditi računa kod određivanja broja i rasporeda petersenki.

Petersenovi svitci izvode se sa željeznom jezgrom, u kotlu sličnom transformatorskom, koji je napunjen transformatorskim uljem. Osnovne karakteristične veličine su nazivni napon mreže u kojoj će se primijeniti, nazivna (maksimalna) struja kompenzacije i opseg regulacije. Regulacija je obično u relativno grubim stupnjevima u intervalu od $0,5 I_n$ do I_n . Promjena položaja vrši se u beznaponskom stanju.

Druga je izvedba s kontinuiranom regulacijom pod opterećenjem (pomična željezna jezgra). U tom slučaju regulacija može biti automatska. Zvezdište sistema stavlja se pod izvjesni izmjenični mjerni napon, a iz veličine i faznog kuta pripadne struje automatski regulator zaključuje na podešenost petersenke i po potrebi vrši korekciju udešenja.

Postoje i drugi sistemi rezonantnog uzemljenja zvezdišta, npr. Bauch-ov transformator.

Danas se petersenke i njima slični sistemi sve manje primjenjuju, a umjesto toga prevladava kruto uzemljenje zvezdišta (u mrežama napona 60 kV i više) ili uzemljenje preko "malog otpora" (mreže ispod 60 kV). Zato se mogu navesti slijedeći razlozi:

- primjena petersenke zahtijeva trajni nadzor uklopnog stanja i prilagođavanje induktiviteta svakoj promjeni,
- primjena petersenki smanjuje očekivane amplitude unutarnjih pogonskih, komutacionih prenapona u usporedbi s tim amplitudama u izoliranoj mreži, ali ne u tolikoj mjeri kao kruto i njemu slično uzemljenje zvezdišta,
- otkrivanje mjesta kvara u izoliranoj ili gašenoj mreži je složeno i dugotrajno,
- u vrlo rasprostranjenim galvanski povezanim mrežama su struje ostatka prevelike, a da bi se petersenke mogle uspješno primjenjivati,
- razvoj brzih zaštitnih uređaja i uvođenje brzog automatskog ponovnog uklopa u sprezi s krutim uzemljenjem zvezdišta donosi značajne prednosti u odnosu na pogon gašene mreže,

- povišenje napona zdravih faza za vrijeme trajanja zemljospoja povećava rizik za pojavu novog kvara.

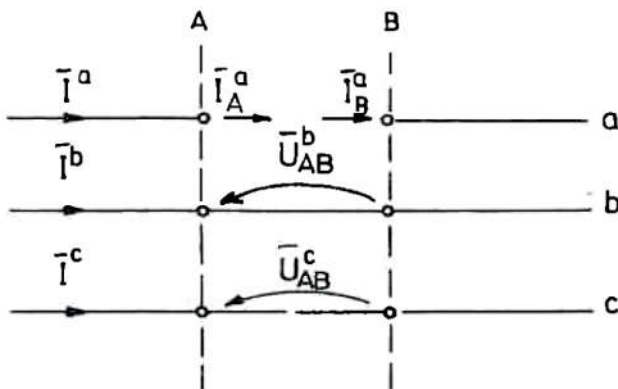
3.3 NESIMETRIČNI PREKIDI

Nesimetrični prekid voda može nastati namjerno i nenamjerno. U svim slučajevima prekinut je strujni krug i nema električnog luka. Posljedice su: velika nesimetrija struja, nesimetrični padovi napona, te izvitopereni trokuti napona u mreži. Ovakav pogon ima štetne posljedice za generatore i potrošače (vidi 3.3.3), ukoliko mreža nije zamkasta.

3.3.1 Prekid faze

Prekid faze nastaje u slučaju kada pri ukapčanju sklopke ne uhvati jedan pol ili kad se otpoji most jedne faze na rasteretnom stupu, a bez pojave električnog luka.

Na slici 217 nacrtano je mjesto prekida faze.



Slika 217 -
Mjesto prekida
faze

Uvjeti na mjestu prekida jesu:

$$\bar{I}_A^a = \bar{I}_B^a = 0$$

3-205a

$$\bar{U}_{AB}^b = 0$$

b

$$\bar{U}_{AB}^c = 0$$

c

Ove uvjete izrazimo simetričnim komponentama:

$$\bar{I}_A^1 + \bar{I}_A^2 + \bar{I}_A^0 = \bar{I}_B^1 + \bar{I}_B^2 + \bar{I}_B^0 = 0 \quad 3-206$$

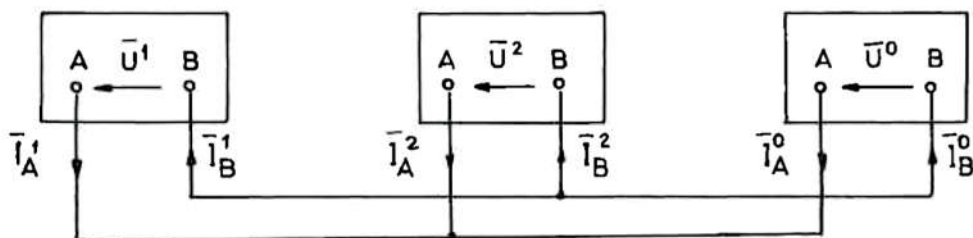
$$\bar{U}_{AB}^1 = \frac{1}{3} (\bar{U}_{AB}^a + a \bar{U}_{AB}^b + a^2 \bar{U}_{AB}^c) = \frac{1}{3} \bar{U}_{AB}^a \quad 3-207a$$

$$\bar{U}_{AB}^2 = \frac{1}{3} (\bar{U}_{AB}^a + a^2 \bar{U}_{AB}^b + a \bar{U}_{AB}^c) = \frac{1}{3} \bar{U}_{AB}^a \quad b$$

$$\bar{U}_{AB}^0 = \frac{1}{3} (\bar{U}_{AB}^a + \bar{U}_{AB}^b + \bar{U}_{AB}^c) = \frac{1}{3} \bar{U}_{AB}^a \quad c$$

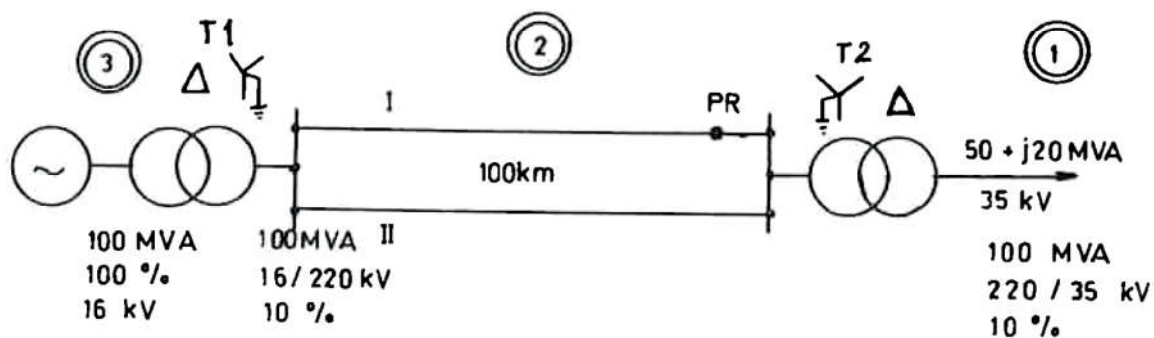
$$\bar{U}_{AB}^1 = \bar{U}_{AB}^2 = \bar{U}_{AB}^0 \quad 3-208$$

Relacije 3-206 i 3-208 daju uvjete za povezivanje sistema komponentenata na mjestu prekida. To je ostvareno prema slici 218.



Slika 218 - Povezivanje sistema komponenata kod prekida faze

Primjer 3.9 Zadana je mreža prema slici 219. Na mjestu PR došlo je do prekida faze a voda I dalekovoda 2x220 kV. U momentu prekida na potrošačkim sabirnicama vladao je napon 35 kV. Interesira nas napon potrošača.



Slika 219 - Zadana mreža

Odaberimo: $S_B = 100 \text{ [MVA]}$

$U_{B1} = 36 \text{ [kV]}$

Slijedi: $Z_{B1} = 12,25 \text{ } [\Omega]$

$Z_{B2} = 484 \text{ } [\Omega]$

$Z_{B3} = 2,56 \text{ } [\Omega]$

Računamo impedancije mreže u jediničnim vrijednostima

$$x_G = \frac{1 \cdot 16^2 \cdot 100}{100 \cdot 16^2} = 1,0$$

$$x_{T1} = x_{T2} = \frac{0,1 \cdot 220^2 \cdot 100}{100 \cdot 220^2} = 0,1$$

$$x_{V1} = x_{V2} = \frac{0,42 \cdot 100}{484} = 0,087$$

$$\bar{z}_p = \frac{1}{0,5 - j0,2} = 1,724 + j 0,69$$

Zadan je napon na potrošaču $u_p = 1$, pa je struja potrošača:

$$\bar{i}_p = \frac{1}{1,72 + j0,69} = 0,501 - j0,201$$

Računamo elektromotornu silu generatora:

$$\begin{aligned} \bar{e} &= 1 + (0,501 - j0,201) j (1,0 + 0,1 + \\ &+ 0,044 + 0,1) = 1,261 + j0,623 \end{aligned}$$

Pretpostavljamo da je za vrijeme poremećaja elektromotorna sila generatora ostala nepromijenjena i jednaka onoj iz normalnog pogona.

Na sl.220 nacrtana je ekvivalentna shema inverznog sistema gledana iz točaka A i B. Kroz sheme a,b i c pokazana je transformacija inverznog sistema u jednu impedanciju.

Na sl.221 nacrtana je ekvivalentna shema nultog sistema gledana iz točaka A i B. Kroz sheme a,b i c pokazana je transformacija nultog sistema u jednu impedanciju.

Povezujemo sada sisteme komponenata prema slici 218. To je učinjeno na slici 222. Na slici 222a predstavljena je cijela shema, dok je na slici 222b između A i B uključen paralelni spoj inverznog i nultog sistema

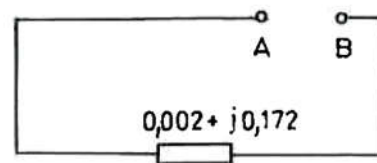
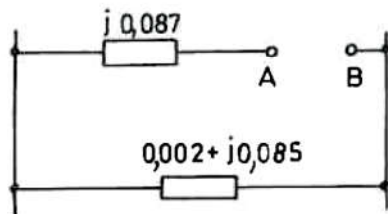
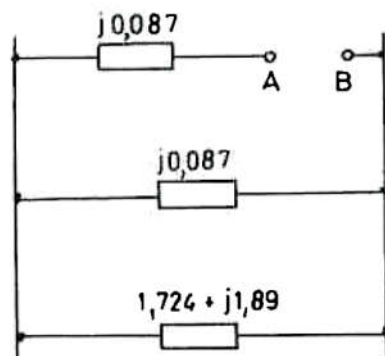
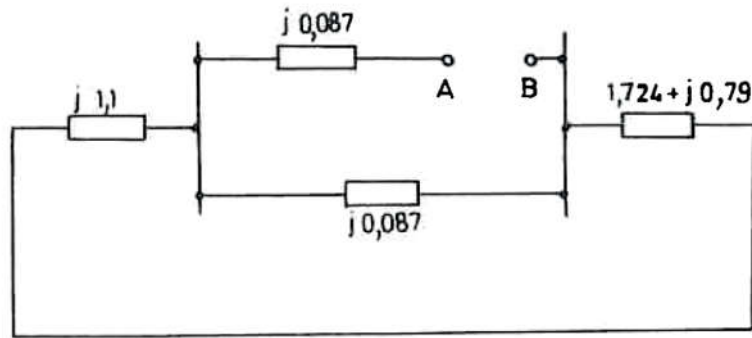
$$\bar{z}_{PR} = \frac{(0,002 + j0,172)j0,374}{0,002 + j0,546} = j 0,117$$

Ukupna impedancija strujnog kruga za vrijeme poremećaja

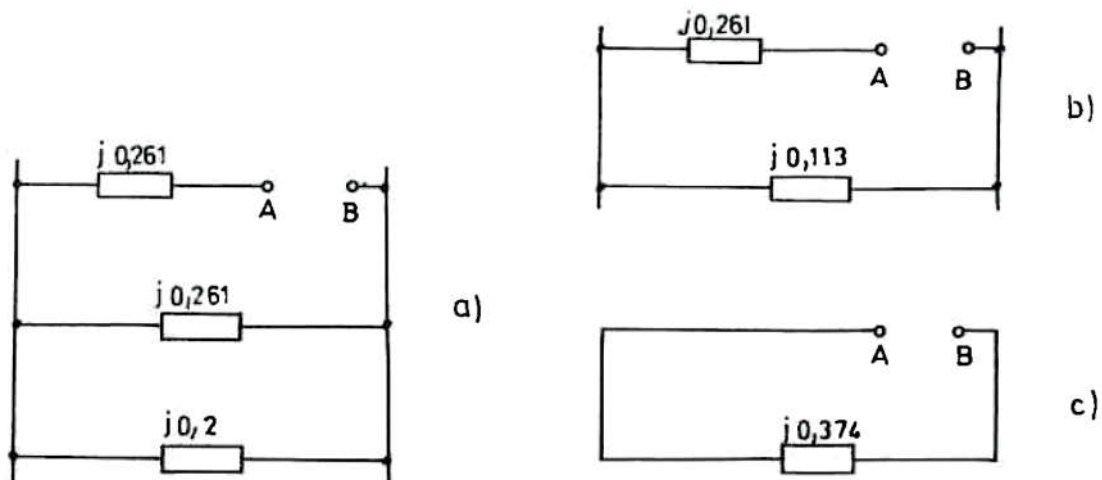
$$\bar{z}_u = 1,724 + j 1,951$$

a struja:

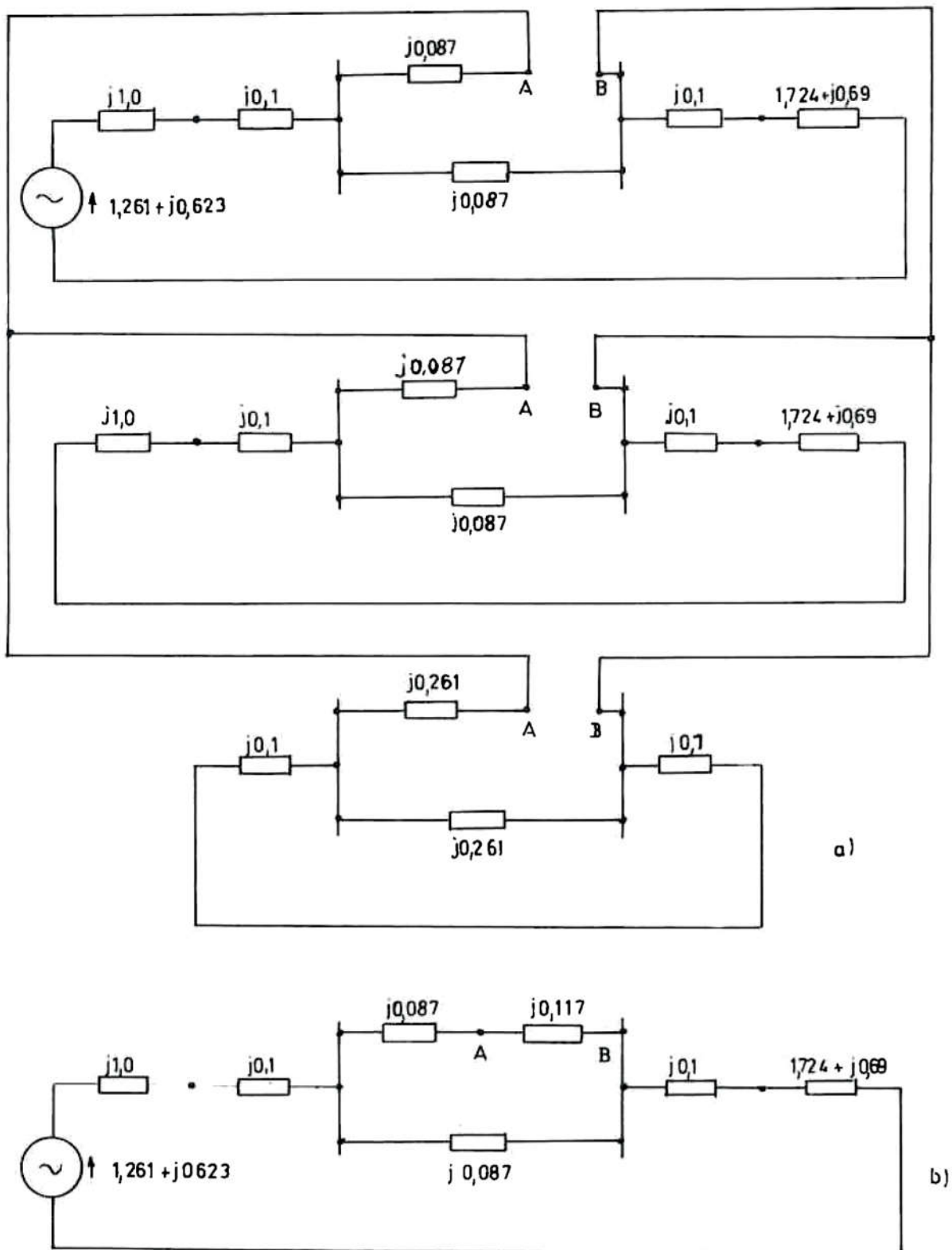
$$\bar{i} = \frac{1,261 + j 0,623}{1,724 + j 1,951} = 0,477 - j 0,208$$



Slika 220 - Inverzni sistem



Slika 221 - Nulti sistem



Slika 222 - Sistem komponenata kod prekida faze na mjestu PR u mreži sa slike 219

Slijedi raspodjela ove struje na sisteme komponenata, kako bi se za svaki element mreže mogle izračunati struje po fazama.

Najprije se ukupna struja raspodjeljuje na vod I i II:

$$\bar{i}_I = (0,477 - j 0,208) \frac{0,087}{0,292} = 0,142 - j 0,062$$

$$\bar{i}_{II} = 0,335 - j 0,146$$

Ovo unesemo u ekvivalentnu shemu na slici 223a.

Struja $\bar{i}_I$ raspoređuje se na inverzni i nulti sistem komponenata takodjer u omjeru impedancija ovih komponenata

$$\begin{aligned}\bar{i}^2 &= (0,142 - j 0,062) \frac{j 0,374}{0,002 + j 0,546} = \\ &= 0,097 - j 0,043\end{aligned}$$

$$\bar{i}^0 = 0,045 - j 0,019$$

Inverznu struju podijelimo na struju voda II i potrošača

$$\begin{aligned}\bar{i}_{II}^2 &= (0,097 - j 0,043) \frac{1,724 + j 1,89}{1,724 + j 1,977} = \\ &= 0,093 - j 0,043\end{aligned}$$

$$\bar{i}_p^2 = 0,004$$

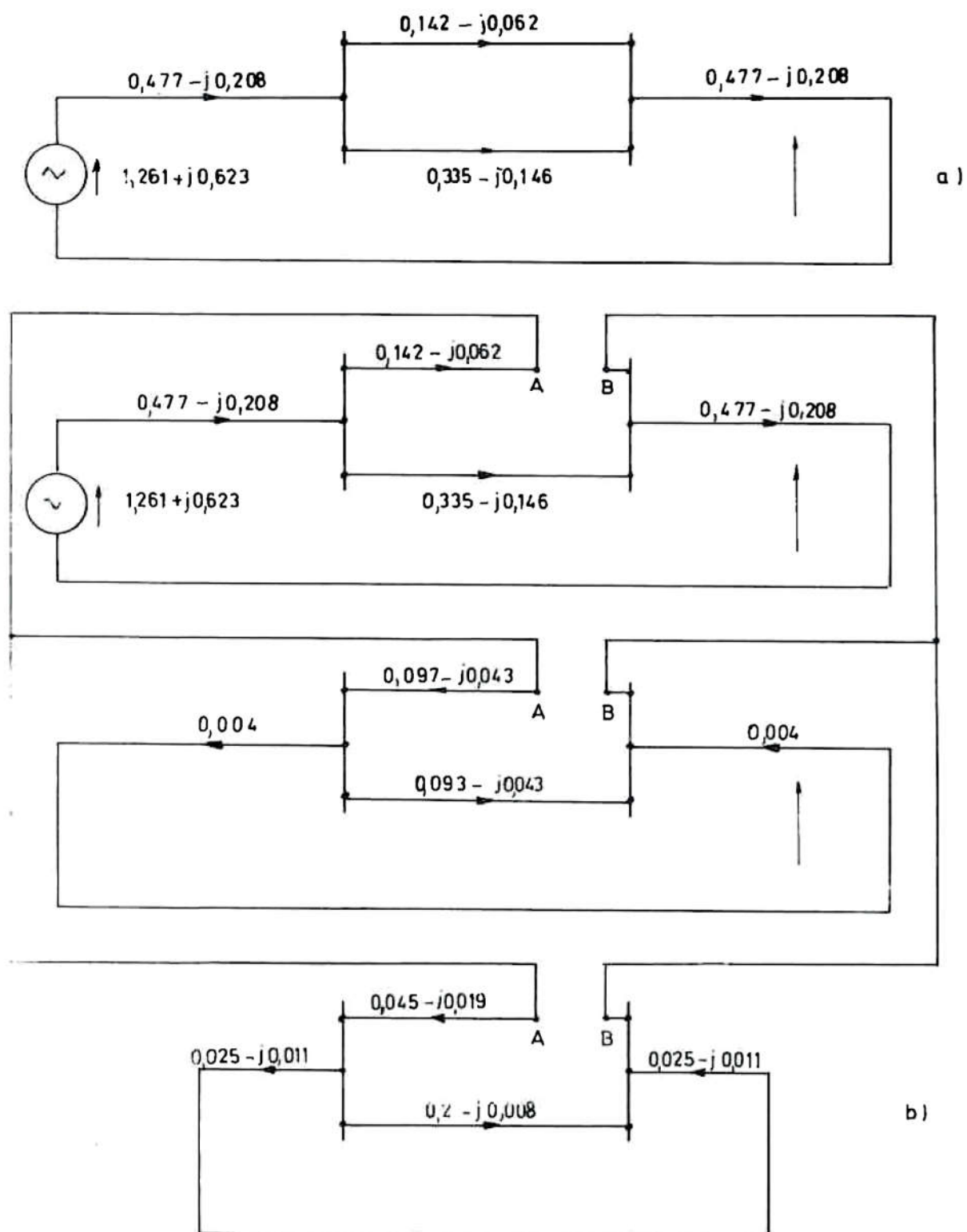
Nultu struju raspodijelimo takodjer

$$\bar{i}_{II}^0 = (0,045 - j 0,019) \frac{0,2}{0,461} = 0,02 - j 0,008$$

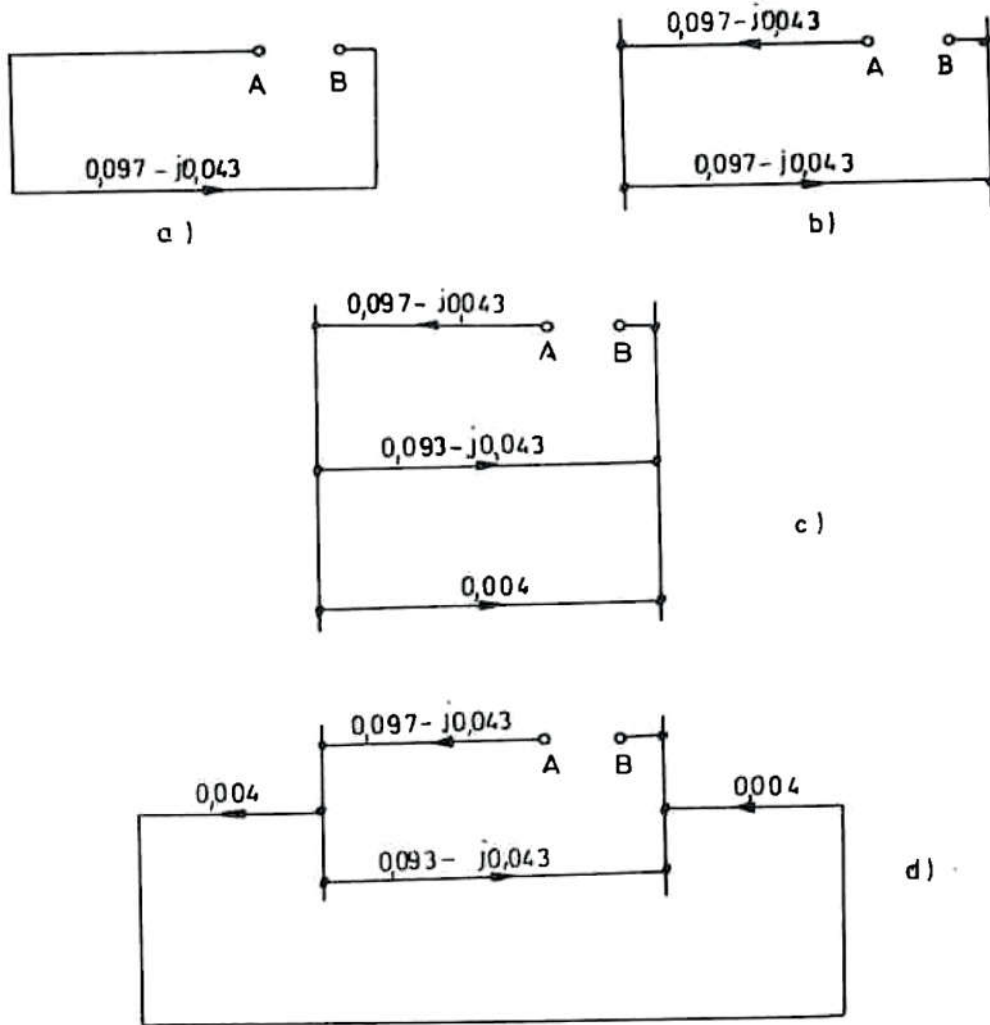
$$\bar{i}_p^0 = 0,025 - j 0,011$$

Pregled raspodjele struja pokazan je na slikama 223a i b.

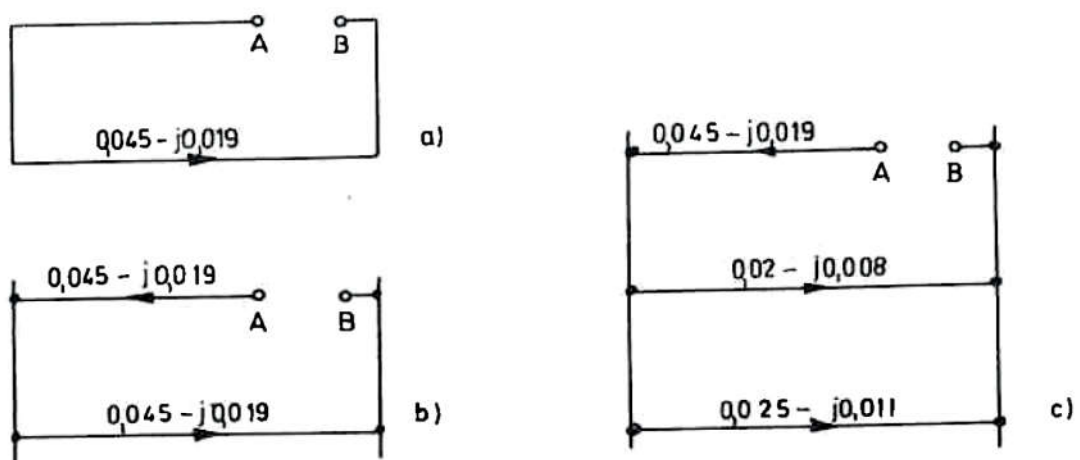
Sada možemo računati napone i struje faza na bilo kojem mjestu



Slika 223 - Raspodjela struje u sistemu komponenta kod prekida jedne faze na mjestu PR u mreži sa slike 219



Slika 224 - Odredjivanje raspodjele struje inverznog sistema na sl.223b



Slika 225 - Odredjivanje raspodjele struje nultog sistema na sl.223b

u mreži. Tako npr. napon na potrošaču:

$$\bar{v}^1 = (0,477 - j0,208)(1,724 + j0,69) = 0,966 - j0,029$$

$$\bar{v}^2 = 0,004(1,724 + j0,69) = 0,007 + j0,003$$

$$\bar{v}^a = 0,073 - j0,032$$

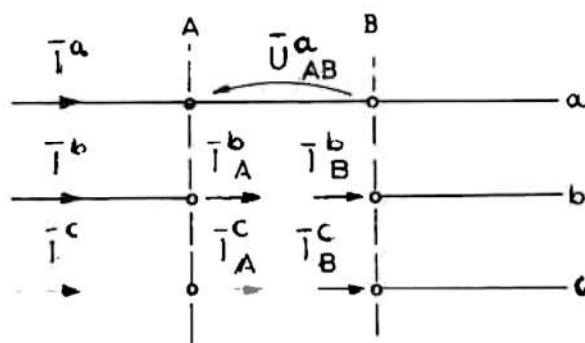
$$\begin{aligned}\bar{v}^b &= (-0,5 - j0,866)(0,966 - j0,029) + \\ &\quad + (-0,5 + j0,866)(0,007 + j0,003) = \\ &= -0,492 - j0,819\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{v}^c &= (-0,5 + j0,866)(0,966 - j0,029) + \\ &\quad + (-0,5 - j0,866)(0,007 + j0,003) = \\ &= -0,482 + j0,843\end{aligned}$$

3.3.2 Prekid dvaju faza

Prekid dvaju faza nastaje u slučaju, kada pri iskapčanju sklopke ne iskopča jedan pol ili kad se otpoje dva mosta na rasteretnom stupu, a bez pojave električnog luka.

Na slici 226 nacrtano je mjesto prekida dvaju faza



Slika 226 - Mjesto prekida dvaju faza

Uvjeti na mjestu prekida jesu:

$$\bar{U}_{AB}^a = 0$$

$$\bar{I}_A^b = \bar{I}_B^b = 0 \quad b$$

$$\bar{I}_A^c = \bar{I}_B^c = 0 \quad c$$

Ove uvjete izrazimo simetričnim komponentama:

$$\bar{U}_{AB}^1 + \bar{U}_{AB}^2 + \bar{U}_{AB}^0 = 0 \quad 3-210$$

$$\bar{I}_A^1 = \frac{1}{3} (\bar{I}_A^a + a \bar{I}_A^b + a^2 \bar{I}_A^c) = \frac{1}{3} \bar{I}_A^a \quad 3-211a$$

$$\bar{I}_A^2 = \frac{1}{3} (\bar{I}_A^a + a^2 \bar{I}_A^b + a \bar{I}_A^c) = \frac{1}{3} \bar{I}_A^a \quad b$$

$$\bar{I}_A^0 = \frac{1}{3} (\bar{I}_A^a + \bar{I}_A^b + \bar{I}_A^c) = \frac{1}{3} \bar{I}_A^a \quad c$$

$$\bar{I}_B^1 = \frac{1}{3} (\bar{I}_B^a + a \bar{I}_B^b + a^2 \bar{I}_B^c) = \frac{1}{3} \bar{I}_B^a \quad 3-212a$$

$$\bar{I}_B^2 = \frac{1}{3} (\bar{I}_B^a + a^2 \bar{I}_B^b + a \bar{I}_B^c) = \frac{1}{3} \bar{I}_B^a \quad b$$

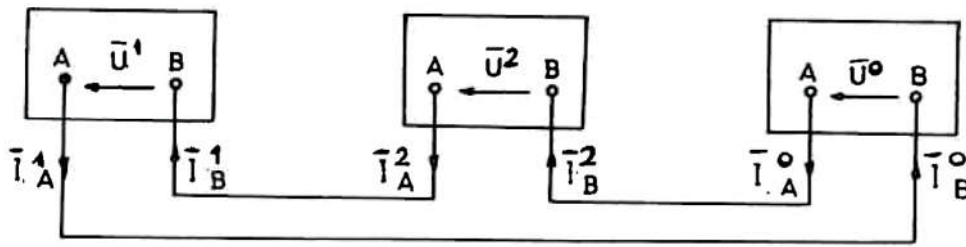
$$\bar{I}_B^0 = \frac{1}{3} (\bar{I}_B^a + a \bar{I}_B^b + a^2 \bar{I}_B^c) = \frac{1}{3} \bar{I}_B^a \quad c$$

Slijedi zaključak:

$$\bar{I}_A^1 = \bar{I}_A^2 = \bar{I}_A^0 \quad 3-213$$

$$\bar{I}_B^1 = \bar{I}_B^2 = \bar{I}_B^0 \quad 3-214$$

Relacije 3-210, 3-213 i 3-214 daju uvjete za povezivanje sistema komponenata na mjestu prekida dviju faza. To se može ostvariti prema slici 227.



Slika 227 - Povezivanje sistema komponenata kod prekida dviju faza

Primjer 3.10 Za zadanu mrežu na slici 219 u primjeru 3.9 izračunaj napon potrošača kod prekida dvaju faza na mjestu PR.

Na sl.328a nacrtana je ekvivalentna shema sistema komponenata za vrijeme kvara. Na sl.228b je ista shema s time da su inverzni i nulti sistem uključeni u direktni sistem na mjestu kvara. Impedancija kvara iznosi:

$$\bar{z}_{PR} = 0,002 + j 0,172 + j 0,374 = 0,002 + j 0,546$$

Računamo ukupnu impedanciju strujnog kruga za vrijeme poremećaja

$$\bar{z}_u = 1,618 + j 1,89$$

Računamo struju:

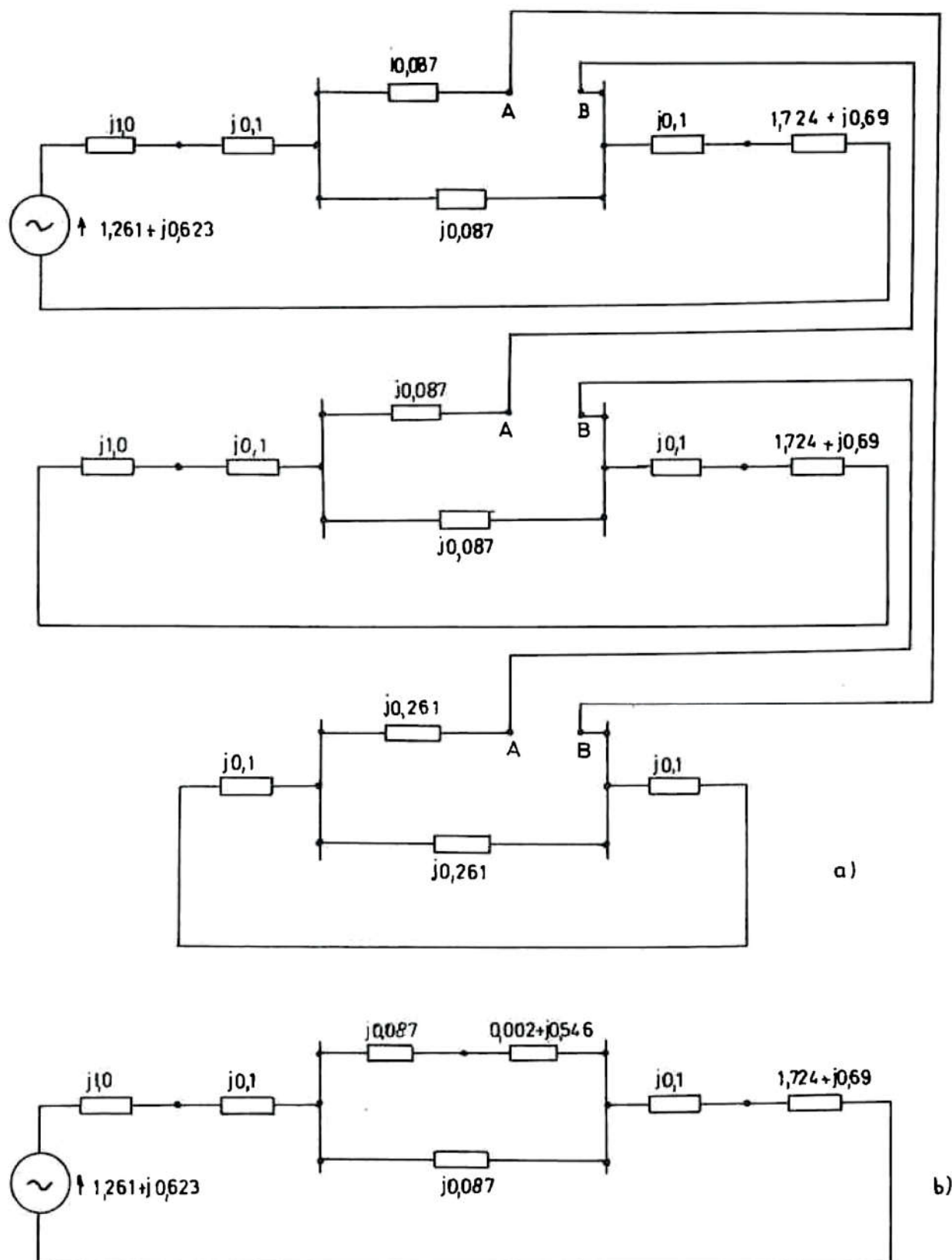
$$\bar{i} = \frac{1,261 + j 0,623}{1,618 + j 1,89} = 0,519 - j 0,222$$

Struju voda raspodijelimo na vod I i vod II:

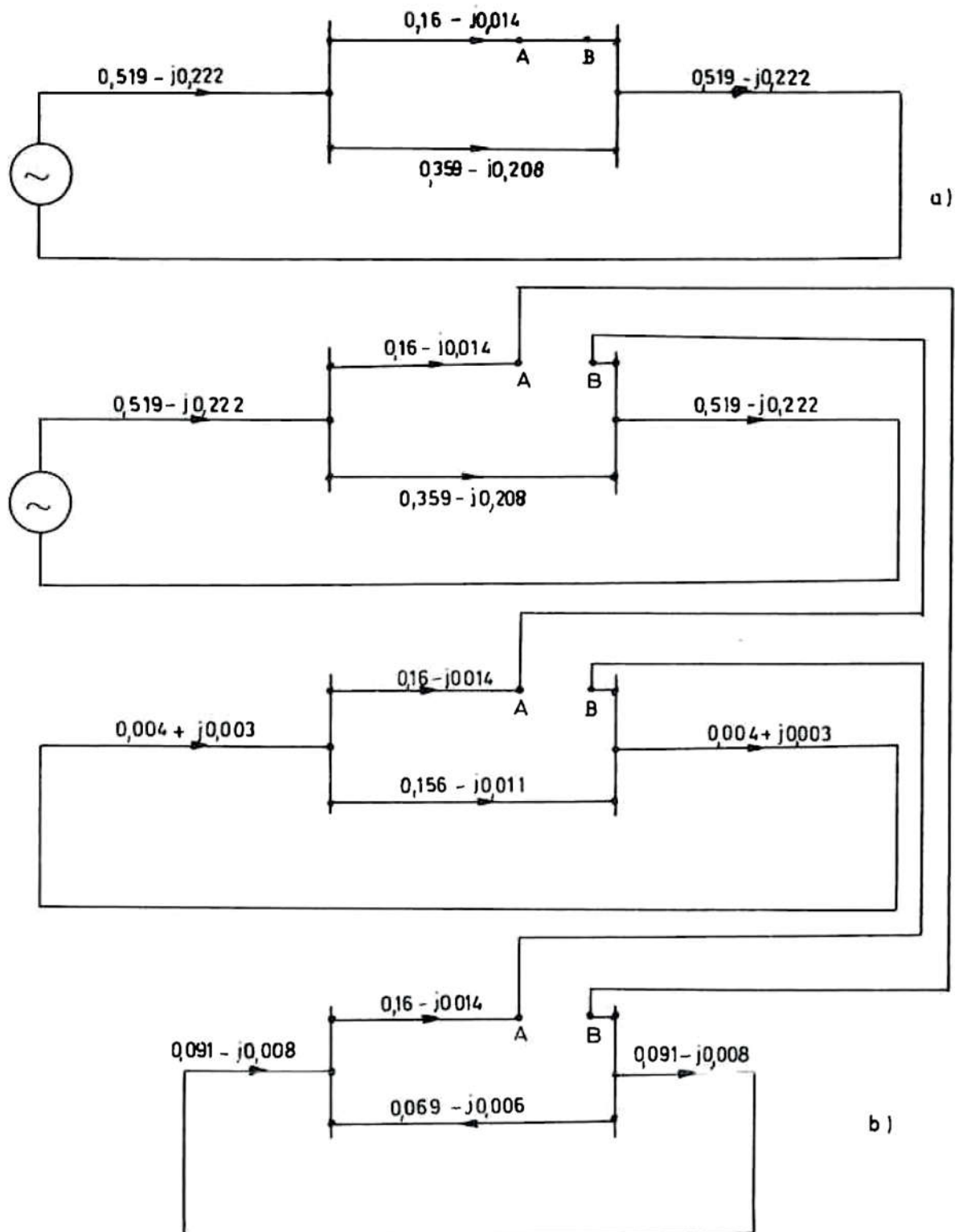
$$\bar{i}_I = (0,519 - j 0,222) \frac{j 0,087}{0,002 + j 0,72} = 0,16 - j 0,014$$

$$\bar{i}_{II} = 0,359 - j 0,208$$

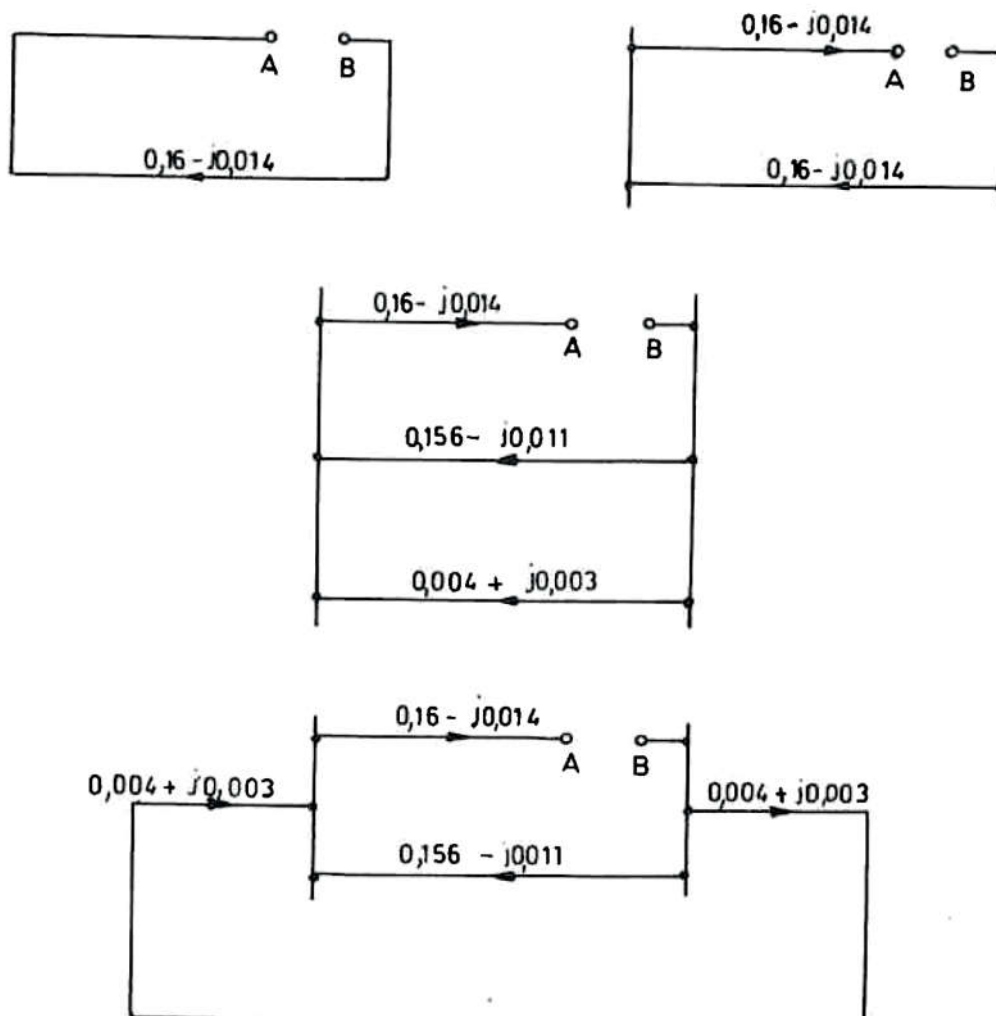
Ovo unesemo u ekvivalentnu shemu na slici 229a. Struja $\bar{i}_I$ teče kroz inverzni i nulti sistem komponenata.



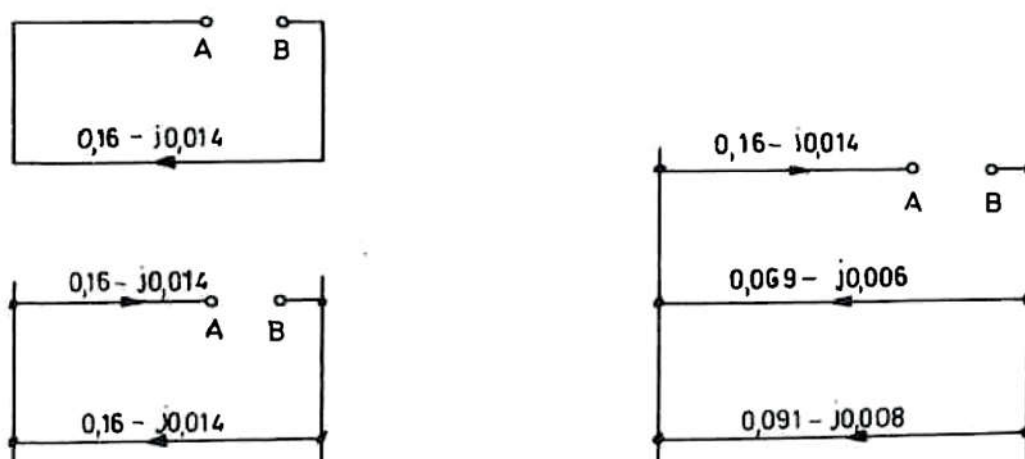
Slika 228 - Sistem komponenata kod prekida dvaju faza na mjestu PR u mreži sa slike 219



Slika 229 - Raspodjela struje u sistemu komponentata kod prekida dvaju faza na mjestu PR u mreži sa slike 219



Slika 230 - Odredjivanje raspodjele struje inverznog sistema u mreži komponenata na sl.229b



Slika 231 - Odredjivanje raspodjele struje nultog sistema u mreži komponenata na slici 229b

Inverznu struju podijelimo na struju voda i struju potrošača:

$$\bar{I}_p^2 = (0,16 - j 0,014) \frac{j 0,087}{1,724 + j 1,977} = 0,004 + j 0,003$$

$$\bar{I}_{VII} = 0,156 - j 0,011$$

Nultu struju raspodijelimo na struju voda i transformatora

$$\bar{I}_{VII}^0 = (0,16 - j 0,014) \frac{0,2}{0,461} = 0,069 - j 0,006$$

$$\bar{I}_T^0 = 0,091 - j 0,008$$

Sada možemo računati napone i struje faza na bilo kojem mjestu u mreži. Tako je npr. napon na potrošaču:

$$\bar{V}_p^1 = (0,519 - j 0,222)(1,724 + j 0,69) = 1,048 - j 0,025$$

$$\bar{V}_p^2 = (0,004 + j 0,003)(1,724 + j 0,69) = 0,005 + j 0,008$$

$$\bar{V}^a = 1,053 - j 0,017$$

$$\begin{aligned} \bar{V}^b &= (-0,5 - j 0,866)(1,048 - j 0,025) + (-0,5 + \\ &+ j 0,866)(0,005 + j 0,008) = -0,556 - j 0,895 \end{aligned}$$

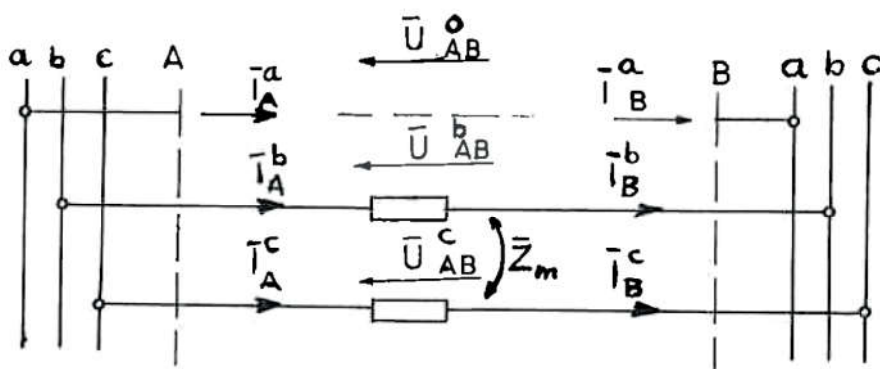
$$\begin{aligned} \bar{V}^c &= (-0,5 + j 0,866)(1,048 - j 0,025) + (-0,5 - j 0,866)(0,005 + \\ &+ j 0,008) = -0,498 + j 0,921 \end{aligned}$$

3.3.3 Iskapćanje jedne faze voda

Iskapćanje jedne faze voda ili jednopolno iskapćanje voda događa se u mreži, u kojoj na nekim vodovima raspolažemo sa jednopolnim automatskim ponovnim uključivanjem (jednopolno APU). Kada

na vodu nastane jednopolni kratki spoj, automatika isključi samo fazu u kvaru i to na vrijeme, koje je potrebno da se dejonizira zrak na mjestu kvara.

Na slici 232 nacrtana je trofazna shema voda, kojemu je iskopčana jedna faza.



$$\bar{I}_A^b = \bar{I}_B^b = \bar{I}^b$$

$$\bar{I}_A^c = \bar{I}_B^c = \bar{I}^c$$

$$\bar{Z}_m = 0$$

Slika 232 - Iskopčana faza voda

Uvjeti na mjestu prekida glase:

$$\bar{I}_A^a = \bar{I}_B^a = 0 \quad 3-215a$$

$$\bar{U}_{AB}^b = \bar{I}^b \bar{Z} \quad b$$

$$\bar{U}_{AB}^c = \bar{I}^c \bar{Z} \quad c$$

Ove uvjete izrazimo simetričnim komponentama

$$\bar{I}_A^1 + \bar{I}_A^2 + \bar{I}_A^0 = 0 \quad 3-216a$$

$$\bar{I}_B^1 + \bar{I}_B^2 + \bar{I}_B^0 = 0 \quad b$$

$$a^2 \bar{U}_{AB}^1 + a \bar{U}_{AB}^2 + \bar{U}_{AB}^0 = (a^2 \bar{I}^1 + a \bar{I}^2 + \bar{I}^0) \bar{Z} \quad 3-217a$$

$$a \bar{U}_{AB}^1 + a^2 \bar{U}_{AB}^2 + \bar{U}_{AB}^0 = (a \bar{I}^1 + a^2 \bar{I}^2 + \bar{I}^0) \bar{Z} \quad b$$

Ako odbijemo drugu jednađžbu od prve i sredimo, dobit ćemo:

$$\bar{U}_{AB}^1 - \bar{I}^1 \bar{Z} = \bar{U}_{AB}^2 - \bar{I}^2 \bar{Z}$$

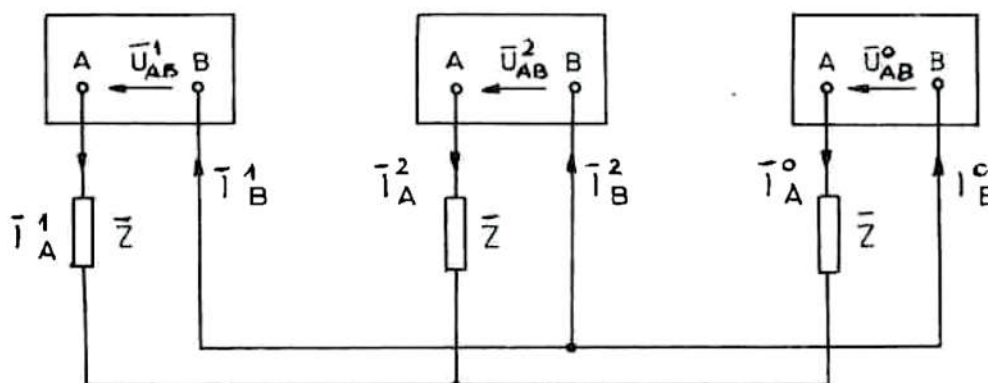
Ako zbrojimo jednađžbe 3-217, dobit ćemo:

$$\bar{U}_{AB}^1 - \bar{I}^1 \bar{Z} = \bar{U}_{AB}^0 - \bar{I}^0 \bar{Z}$$

Slijedi:

$$\bar{U}_{AB}^1 - \bar{I}^1 \bar{Z} = \bar{U}_{AB}^2 - \bar{I}^2 \bar{Z} = \bar{U}_{AB}^0 - \bar{I}^0 \bar{Z} \quad 3-218$$

Zahtjevima prema relacijama 3-216 i 3-218 udovoljava povezivanje sistema komponenata prema slici 233.



$$\bar{I}_A^1 = \bar{I}_B^1 = \bar{I}^1$$

$$\bar{I}_A^2 = \bar{I}_B^2 = \bar{I}^2$$

$$\bar{I}_A^0 = \bar{I}_B^0 = \bar{I}^0$$

Slika 233 - Povezivanje sistema komponenata kod jednopolnog iskapčanja voda

Primjer 3.11 Za zadanu mrežu na slici 219 u primjeru 3.9 izračunaj napon potrošača kod jednopolnog iskapčanja voda.

Na slici 234a nacrtana je ekvivalentna shema sistema komponenata kod iskopčane faze a na oba kraja voda, a na slici 234b je ista

ta shema s time da je u direktnom sistemu izmedju A i B (na mjestu kvara) uključena impedancija kvara.

Računamo impedanciju kvara:

$$\bar{z}_{PR}^2 = 0,002 + j0,172 + j0,087 = 0,002 + j0,259$$

$$\bar{z}_{PR}^0 = j0,374 + j0,087 = j0,461$$

$$\bar{z}_{PR} = j0,087 + \frac{(0,002+j0,259)j0,461}{0,002+j0,72} = 0,001 + j 0,252$$

Računamo ukupnu impedanciju strujnog kruga za vrijeme poremećaja:

$$\begin{aligned}\bar{z}_u &= j1,0 + j0,1 + j0,069 + j0,1 + 1,724 + j0,69 = \\ &= 1,724 + j 1,959\end{aligned}$$

Sada možemo računati struju:

$$\bar{i} = \frac{1,261 + j 0,623}{1,724 + j 1,959} = 0,498 - j 0,206$$

Struju voda raspodijelimo na vod I i vod II:

$$\bar{i}_I = (0,498 - j 0,206) \frac{0,087}{0,339} = 0,128 - j 0,053$$

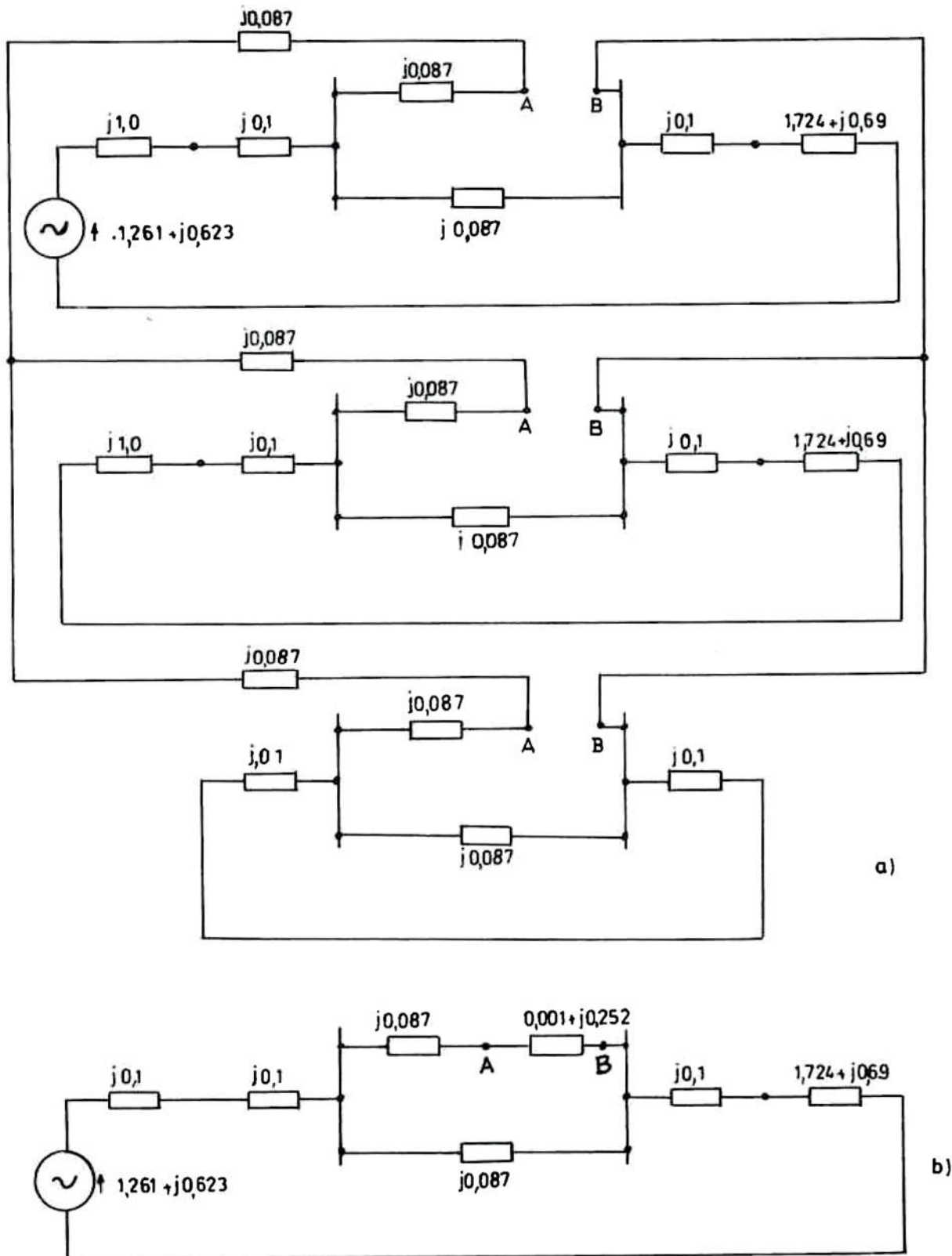
$$\bar{i}_{II} = 0,37 - j0,153$$

Ovo unesemo u ekvivalentnu shemu na slici 235a

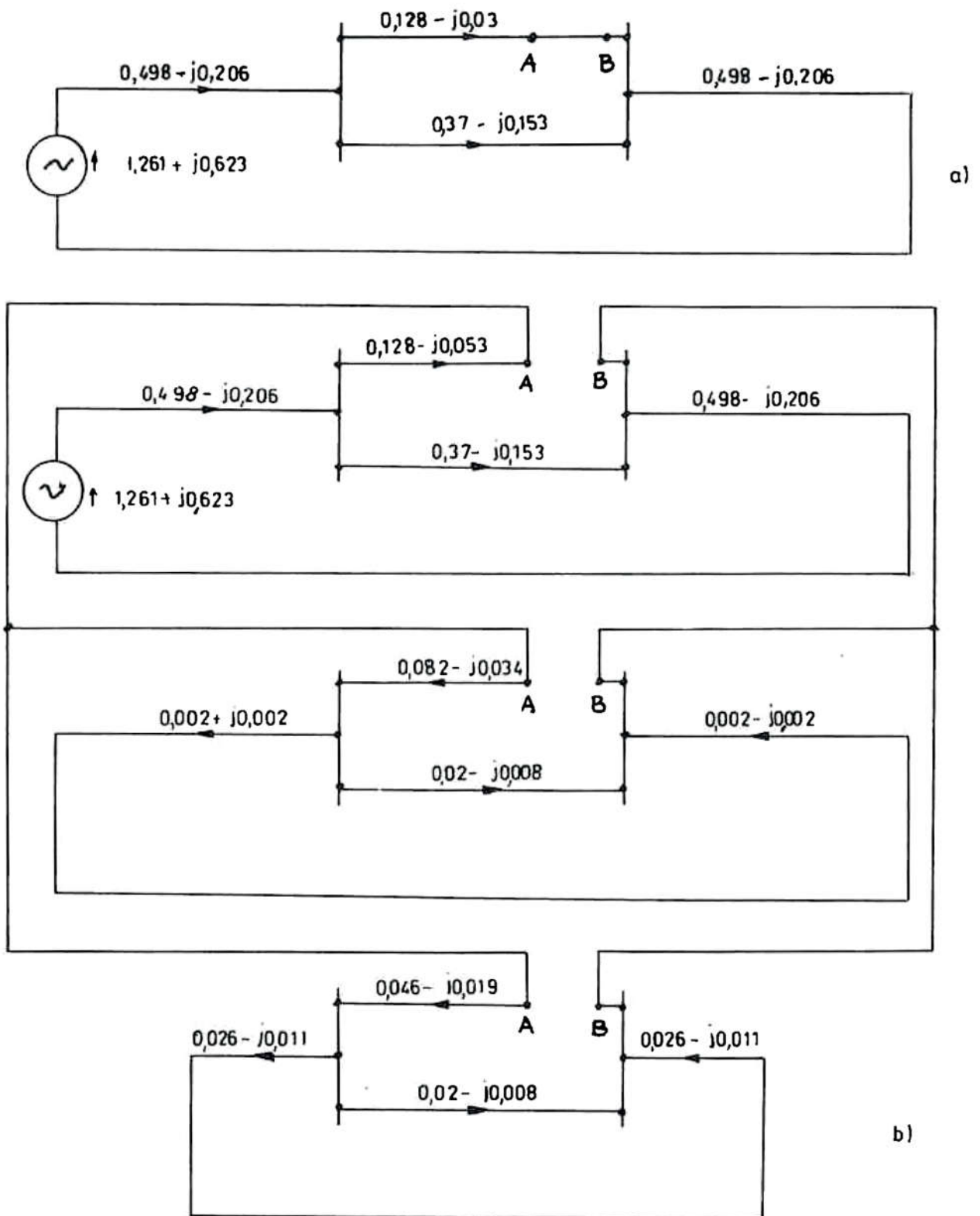
Struja $\bar{i}_I$ raspoređuje se na inverzni i nulti sistem

$$\bar{i}^2 = (0,128 - j 0,053) \frac{j 0,461}{0,002 + j0,72} = 0,082 - j 0,034$$

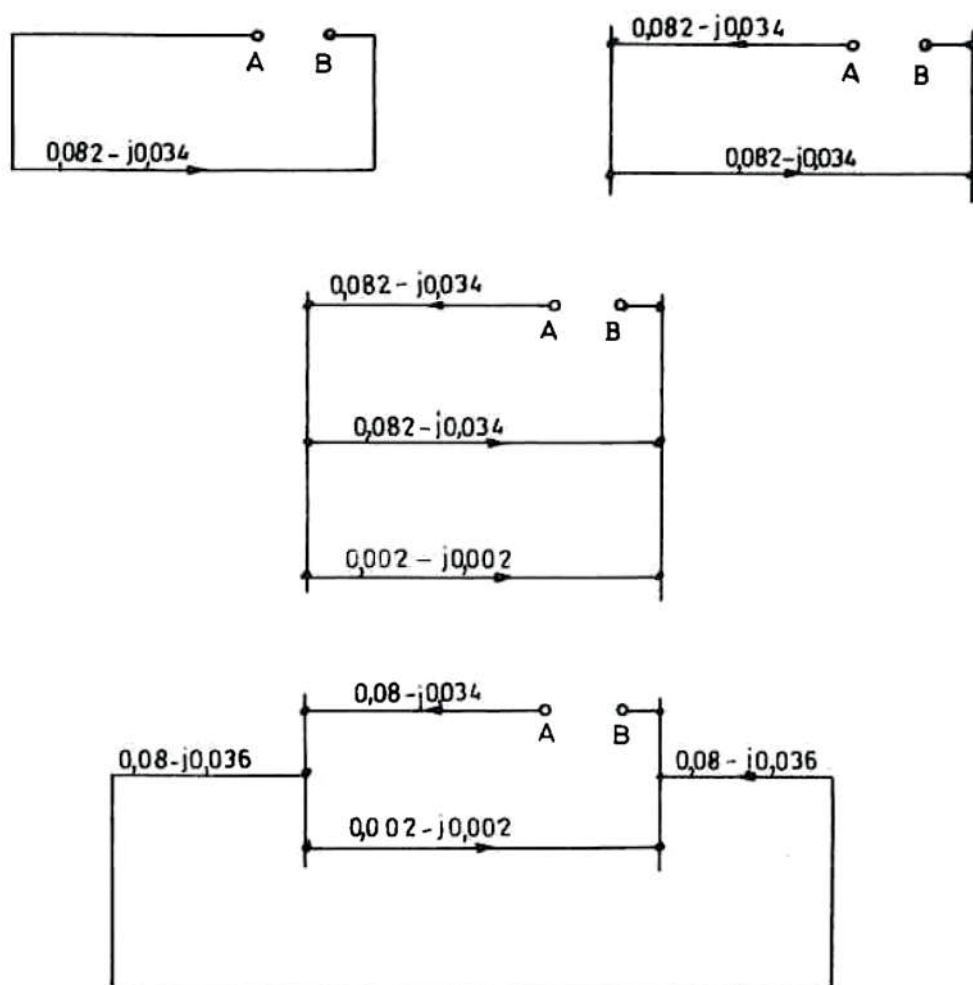
$$\bar{i}^0 = 0,046 - j 0,019$$



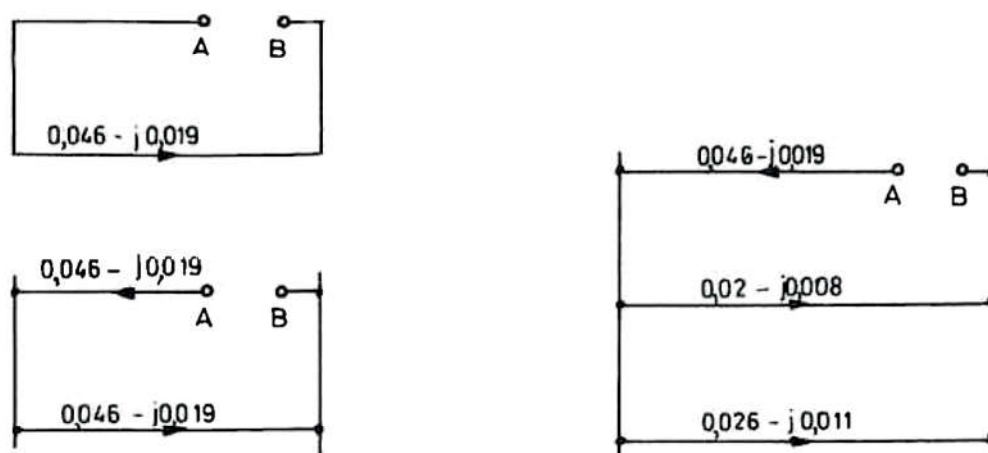
Slika 234 - Sistem komponenata kod jednopolnog iskap-
čanja voda I u mreži sa sl.219



Slika 235 - Raspodjela struja u sistemu komponenata kod jednopolnog iskapčanja voda I u mreži sa slike 219



Slika 236 - Odredjivanje raspodjele struje inverznog sistema na slici 235b



Slika 237 - Odredjivanje raspodjele struje nultog sistema na slici 235b

Rasporedjujemo inverznu struju:

$$\bar{i}_p^2 = (0,082 - j 0,034) \frac{j0,087}{1,724 + j1,977} = 0,002 + j 0,002$$

$$\bar{i}_{II}^2 = 0,08 - j 0,036$$

Rasporedjujemo struju nultog sistema na struju voda II i ostalu:

$$\bar{i}_{II}^0 = (0,046 - j0,019) \frac{0,2}{0,461} = 0,02 - j 0,008$$

$$\bar{i}_T^0 = 0,026 - j 0,011$$

Sada možemo izračunati napone i struje faza na bilo kojem mjestu u mreži. Računamo napon potrošača:

$$\bar{v}_p^1 = (0,498 - j0,206) (1,724 + j0,69) = 1,00 - j0,011$$

$$\bar{v}_p^2 = (0,002 + j 0,002) (1,724 + j0,69) = 0,002 + j 0,005$$

$$\bar{v}_p^a = 1,002 - j 0,006$$

$$\begin{aligned} \bar{v}_p^b &= (-0,5 - j0,866) (1,00 - j0,011) - (-0,5 + j0,866) (0,002 + \\ &+ j0,005) = -0,514 - j 0,861 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{v}_p^c &= (-0,05 + j0,866) (1,00 - j0,011) + (-0,5 - j0,866) (0,002 + \\ &+ j0,005) = -0,488 - j 0,865 \end{aligned}$$

3.3.4. Posljedice nesimetričnog prekida

Primjeri 3.9, 3.10 i 3.11 zorno pokazuju, da prekidi faza u razmatranim varijantama uzrokuju znatno manje nesimetrije, nego što bi se to na prvi pogled moglo očekivati. Pri tome je odlučujuće,

da potrošač ima dva ili više puteva napajanja, što je u navedenim primjerima i pretpostavljeno. U zamkastim mrežama su posljedice prekida faza još manje izražene. Zbog slabo izraženih nesimetrija često će se dogoditi, da pogonsko osoblje neće ni primjetiti prekid faze, pogotovo ako nije ugrađen ampermetar za mjerenje struje upravo te faze.

Cirkuliranje nulte komponente struje u mreži za vrijeme prekida faze izaziva smetnje (brujanje) u telefonskim linijama, pa najčešće s te strane dolazi obavijest da nešto nije u redu. Pošto nulta komponenta struje teče cijelom mrežom, a ne samo u pogodjenomvodu, smetnje na tt linijama se ispoljavaju na vrlo širokom geografskom području i obično ne mogu poslužiti kao indikacija za utvrđivanje prekida faze, pa ni voda kojemu je faza u prekidu.

Kada se konačno utvrdi da je negdje u mreži jedna faza u prekidu ili ako za to postoji opravdana sumnja, potrebno je pristupiti pronalaženju voda, a zatim i točnog mjesta na kojem je došlo do prekida. Prvenstveno se izvrši kontrola svih postojećih ampermetara u postrojenjima, te položaja svih polova prikidača, jer je zatajivanje jednog pola prekidača čest uzrok prekida faze. Ako ova akcija ne dovede do rezultata, pristupa se redom isključivanju pojedinih vodova, dok ne nestane smetnja. Vod, na kojem se tako utvrdi prekid faze, pregleda se i pronađeno mjesto prekida popravi. Prilikom isključivanja vodova treba voditi računa, da potrošači ne ostanu bez napajanja.

L I T E R A T U R A

Poglavlje 1

Despotović: Savremene metode u rešavanju problema elektroenergetskih sistema, ZJE, Beograd, 1968.

Despotović: Optimizacija raspodele snaga u elektroenergetskim sistemima, ZJE, Beograd, 1972.

Schultheiss, Wessnigk: Berechnung elektrischer Energieversorgungsnetze, Band II, VEB Deutscher Verlag für Grundstoff-industrie, Leipzig, 1971.

Bertolino: Metode primjenjene analize (numerička analiza), Zavod za izdavanje udžbenika SR Srbije, Beograd, 1970.

Šodan: Utvrđjivanje stanja elektroenergetskog sistema u pogonu na temelju mjerenja pojedinih veličina, Zagreb, Energija 1975, br. 5-6.

Dopazo, Klitin, Stagg, Van Sluck: State calculation of power systems from line flow measurements, American Electric Power Service Corporation, New York, N. Y.

Larson, Tinney, Peschon: State estimation in power systems, Part I: Theory and Feasibility, IEEE transactions on power apparatus and systems, No. 3, 1970.

Larson, Tinney, Hajdu, Piercy: State estimation in power systems, Part II: Implementation and applications, IEEE transactions on power apparatus and systems, No. 3, 1970.

Schweppe, Wildes: Power system static-state estimation, Part I: Exact model, IEEE transaction on power apparatus and systems, No. 1, 1970.

Schweppe, Rom: Power system static-state estimation, Part II: Approximate model, IEEE transaction on power apparatus and systems, No. 1, 1970.

Scehweppe: Power system static-state estimation, Part III: Implementation, IEEE transaction on power apparatus and systems, No. 1, 1970.

Dikić: Sekundarna i tercijalna regulacija napona u perspektivnoj mreži Jugoslavije, ZJE, IV savjetovanje o kvalitetu električne energije, Split, 1975.

Prenos i distribucija električne energije, Gradjevinska knjiga, Beograd 1964. (t.zv. "Priručnik Westinghouse")

Poglavlje 2

Perturbations réciproques des équipements électroniques de puissance et des réseaux, serija radova raznih autora, Revue générale de l'électricité, Tome 85, 3 i 4 1976.

Friedlander, Telahun, Young: Arc - furnace flicker compensation in Ethiopia, G.E.C. Journal of science and technology, Vol.32, No. 1, 1965, 2-10

Herbst, Käuferle, Peneder, Reichert: Statische regelbare Blindleistungskompensation für Hochspannungsnetze, Brown Boveri Mitteilungen, Band 61, 9/10 1974.

Flaathe: The use of series capacitors in conjunction with electric smelting furnaces, ASEA, Publ. 7791 E

Hochstetter: Eigenschaften der regelbaren statischen Blindeistungskompensatoren in der Elektrizitätsversorgung, Siemens Zeitschrift, 51, Jhrg., 3/1977.

.... : The control of system voltage using AC saturated reactors, Publ. English electric power transmission Ltd

Wanner, Herbst: Statische Blindleistungskompensation für Lichtbogenöfen, Brown Boveri Mitteilungen, Band 64, 2 1977.

Frank, Petterson: Raising the production of arc furnaces by stabilising the voltage with thyristor-switched capacitors, ASEA Journal, Vol. 50, 1/1977.

Chit, Horn: Neuzeitliche Blindleistungskompensation für Industriernetze, Technische Mitteilungen AEG-TELEFUNKEN, 66.Jhrg., 7/1976.

Chit, Horn, Utecht: Grenze der dynamischen Wirkungsweise ruhender Blindleistungs-Kompensationseinrichtungen, Technische Mitteilungen AEG-TELEFUNKEN, 65. Jhrg., 6/1975.

Frank, Ivner: Blindleistungskompensation von Lichtbogenöfen mit Hilfe von thyristorgeschalteten Kondensatoren System TYCAP, ASEA-Zeitschrift, Jhrg. 19, 1/1974.

Sundberg: Der elektrische Lichtbogenofen als Verbraucher am Versorgungsnetz, ASEA-Zeitschrift, Jhrg. 21, 5/1976.

Dixon, Kendall: Supply to arc furnaces: measurement and prediction of supply-voltage fluctuation, Proc. IEE, Vol.119, 4/1972.

Meynaud: Flicker et conditions de raccordement au réseau d'appareils produisant des variations rapides de tension, Révue générale de l'électricité, Tome 85, 11/1971.

Lemmenmeier, Meynaud, Sheppard, Nevries: Revised report on UIE/UNIPED enquiry about the effects of electric arc furnaces on power systems, Fours a arc, 11/1973.

Milun: Brza kolebanja napona uzrokovana radom elektrolučne peći, Elektroprivreda, 11-12/1975.

Poglavlje 3

Požar: Visokonaponska rasklopna postrojenja, Tehnička knjiga, Zagreb, 1967.

Maier: Kopplungsfreie Darstellung der Drehstrom-Doppelleitung, ETZ-A Bd. 94, H. 8, 1973.

Roeper: Kurzschlussströme in Drehstromnetzen, Siemens-Schuckertwerke, Erlangen, 1957.

Willheim, Waters: Neutral grounding in high-voltage transmission, Elsevier publishing company, New York, 1956.

Schultheiss, Wessnigk: Berechnung elektrischer Energieversorgungsnetze, Band II: Übertragungsberechnung, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1971.

Schaller: Berechnung elektrischer Energieversorgungsnetze,
Band III: Maschinelle Berechnung

Despotović: Osnovi analize elektroenergetskih sistema, ZJE,
Beograd, 1962.

Ožegović, Babović: Univerzalni program za proračun struja i
napona kratkog spoja "UKSX", Split, 1974.