

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

Dr MARIJA OŽGOVIĆ

KARLO OŽGOVIĆ

ELEKTRIČNE MREŽE

III



SPLIT, 1982.

Stručna recenzija

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

i

ŽELJKO ZLATAR, dipl.ing.,
v.pred. Sveučilišta u Zagrebu

Lektor

Prof. ANTE MATKOVIĆ

Odobreno rješenjem Odbora za izdavačku
djelatnost Sveučilišta u Splitu

Broj: 013-384/1-82. od 6. 07. 1982.

Fakultet elektrotehnike, strojarstva
i brodogradnje u Splitu
R.Boškovića b.b.

Tisak: Sveučilišna naklada Liber, Zagreb, Trg maršala Tita 14

PREDGOVOR

"Električne mreže III" su logičan nastavak već objavljenog I i II dijela. Ni gradivo ovog dijela nije sistematizirano strogo po nastavnom programu jednog predmeta i može poslužiti studentima smjera elektroenergetike u VII i VIII semestru u okviru stalnog i izbornih predmeta, studentima postdiplomskog studija te kod izrade završnih radova I, II i III stupnja. Ovakav pristup je potpuno opravdan ako se uzme u obzir dinamičnost suvremene nastave koja se trajno prilagođuje novim zahtjevima i potrebama.

Istovremeno s ovim izdanjem priprema se i drugo izdanje "Električne mreže I", makar su potrebe studenata matičnog fakulteta mogle biti zadovoljene samo jednom četvrtinom naklade. To je dokaz da su "Električne mreže" naišle na vrlo širok interes, a vjerujemo i na dobar prijem kod studenata drugih fakulteta i u stručnim krugovima uopće.

Prvo poglavlje obrađuje problem statičke i dinamičke stabilnosti. Pristup je klasičan, a okvir ne prelazi potrebe modernizirane nastave. Ukazano je na potrebu da se problem stabilnosti promatra kao problem višestrojnog sistema, ali je uvođenje studenata u problematiku provedeno postupno, preko najjednostavnijih slučajeva. Tako se je dobila mogućnost da student shvati dijagram toka programa s kojim izvodi vježbe. U okviru ovog poglavlja također su i matematičke podloge programa ekvivalentiranja aktivne mreže za potrebe računa dinamičke stabilnosti.

U drugom poglavlju obrađene su razne metode numeričkog rješavanja diferencijalnih jednačini.

U trećem poglavlju obrađene su još dvije metode redukcije pasivne mreže i usporedjene s metodom prikazanom u djelu "Električne mreže I".

Formiranje matrice vlastitih i međusobnih impedancija mreže $[\bar{Z}]$ za sistem s velikim brojem čvorova predmet je analize u četvrtom poglavlju. Pokazana su rješenja kod međusobnog utjecaja vodova, uključenja idealnih transformatora, formiranje nultog sistema

prenumeriranjem čvorova, itd. Na kraju su usporedjene metode inverzije matrice $[\bar{Y}]$ za dobijanje matrice $[\bar{Z}]$ i metoda "korak po korak."

Peto poglavlje predstavlja dopunu izlaganja materije iz "El. mreže I" u vezi s Carsonovnim formulama, a u cilju proučavanja povratnog puta trostruke nulte komponente struje kroz zemlju, dozemnu užad i uzemljenja.

U šestom poglavlju analiziraju se iskapčanja i prekidi na jednostrukom dalekovodu. Račun se provodi trofazno da bi se dobila što veća točnost.

Takodjer je trofazni proračun primijenjen i u sedmom poglavlju kod ispitivanja iskapčanja jedne trojke dvostrukog dalekovoda. Ovo poglavlje nas uvodi ne samo u područje rada u blizini napona, nego takodjer i u поближе osvjetljavanje problema preplitanja vodova.

Osmo poglavlje definira zahtjeve koje mreža postavlja u pogledu zaštite od kvarova i daje osnovne principe i karakteristike zaštitnih uređaja. Obradjena je nadstrujna, distantna i uspo-redbena zaštita. Uzeto je u obzir da se zaštita strojeva (generatora, transformatora, ...) obradjuje u okviru električnih postrojenja i da se zaštita mreže detaljnije obradjuje u specijalističkom predmetu.

Pregled materije "Električne mreže III" pokazuje, a čitalac će se u to brzo uvjeriti, da smo se u ovom dijelu držali istih načela kao i u "Električne mreže I i II", a to je: klasičan pristup fizikalnog shvaćanja problema što više približiti modernim mogućnostima obrade. Nadamo se da smo u tome i uspjeli.

Našu prvu namjeru da u "Električne mreže III" uključimo i poglavlje o prijenosu električne energije visokim istosmjernim naponom i još neka specijalna poglavlja nismo zbog velikog opsega rada uspjeli ostvariti, pa ćemo to nadoknaditi nastojanjem da što prije pripremimo "Električne mreže IV".

I na kraju, dužnost nam je zahvaliti svima koji su doprinijeli izlasku ovog sveska i njegovom konačnom izgledu. Posebno srdačno zahvaljujemo drugarici Milki Radonić na vrlo urednom strojnom prijepisu, te drugu Draganu Bijediću i njegovim suradnicima na pedantnoj izradi slika.

Split, veljača 1982.

Marija i Karlo Ožegović

S A D R Ź A J

1. STATIČKA I DINAMIČKA STABILNOST	1
1.1. Osnovni pojmovi	1
1.1.1. Općenito o stabilnosti	1
1.1.2. Granična snaga prijenosa	4
1.1.3. Generator i kruta mreža	7
1.2. Statička stabilnost	12
1.2.1. Metoda E.Clark	13
1.2.2. Utjecaj kapaciteta voda	18
1.2.3. Trajni kratki spoj na odvojk prijenosnog sistema	21
1.2.5. Utjecaj gubitaka	23
1.2.6. Vanjska karakteristika	26
1.2.7. Dodatno induktivno opterećenje izvora	31
1.2.8. Podupiranje napona sinhronim kompenzatorima ..	34
1.2.9. Umjetna statička stabilnost	60
1.2.10. Višestrojni sistem	64
1.2.11. Ostali kriteriji za određivanje statičke stabilnosti	69
1.2.12. Zaključna razmatranja	72
1.3. Dinamička stabilnost	73
1.3.1. Dinamička granična snaga	73
1.3.2. Diferencijalna jednačba njihanja	77
1.3.3. Površinski stavak	80
1.3.4. Kratki spoj	82
1.3.5. Automatsko ponovno uključivanje	93
1.3.6. Metoda "korak po korak"	97
1.3.7. Regulacija uzbude generatora i snage turbine .	108
1.3.8. Višestrojni sistem	112
1.3.9. Mjere za poboljšanje dinamičke stabilnosti ...	126
1.3.10. Program "DINST"	128
1.4. Ekvivalentiranje za dinamičku stabilnost	137
1.4.1. Ekvivalentiranje aktivne mreže	137
1.4.2. Ekvivalentna energija inercije	141

II

2. NUMERIČKO RJEŠAVANJE DIFERENCIJALNIH JEDNADŽBI	145
2.1. Eulerova metoda	145
2.2. Modificirana Eulerova metoda	148
2.3. Picardova metoda sukcesivnih aproksimacija	149
2.4. Metoda Runge-Kutta	151
2.5. Rješavanje diferencijalnih jednažbi višeg reda	154
2.6. Zaključak.....	162
3. REDUKCIJA PASIVNE MREŽE	165
3.1. Metoda grane	165
3.2. Metoda mrežnog analizatora	175
3.3. Usporedba metoda	192
4. USPOREDBA FORMIRANJA MATRICE $[\bar{Z}]$ MREŽE KOD VELIKOG BROJA ČVOROVA	195
4.1. Uvod	195
4.2. Metoda korak po korak	196
4.2.1. Uključivanje grane s idealnim transformatorom	198
4.2.2. Uključivanje grane s međusobnim utjecajem ..	200
4.2.3. Prenumeriranje mreže za metodu korak po korak	215
4.3. Inverzija matrice $[\bar{Y}]$	222
4.3.1. Formiranje matrice $[\bar{Y}]$	222
4.3.2. Inverzija po Banachiewiczzevoj shemi	225
4.3.3. Inverzija Gauss-Jordanovom eliminacijom	231
4.3.4. Inverzija preko hibridne matrice	238
4.4. Zaključak	245
5. RASPODJELA TROSTRUKE NULTE KOMPONENTE STRUJE KROZ ZEMLJU, DOZEMNU UŽAD I UZEMLJENJA	247
5.1. Uvod	247
5.2. Zemlja kao povratni vodič	248
5.2.1. Vod bez dozemnog užeta	253
5.2.2. Vod sa dozemnom užadi	260
5.3. Raspodjela 3 I_K^0	262
5.4. Mjesto kratkog spoja	280
5.5. Specijalni slučajevi	283

III

5.5.1. Zanemaren otpor uzemljenja stupova osim pogodjenog stupa	283
5.5.2. Otpor uzemljenja stupova beskonačan. Izolacija probijena na pogodjenom stupu	284
5.5.3. Dva dozemna užeta: jedno uzemljeno, a drugo izolirano	286
5.6. Zaključak	288
6. ISKAPČANJA I PREKIDI NA JEDNOSTRUKOM DALEKOVODU	291
6.1. Uvod	291
6.2. Iskopčana jedna faza	292
6.2.1. Matematički model	292
6.2.2. Model idealne mreže	299
6.2.3. Zanemarena poprečna grana dalekovoda	302
6.2.4. Zaključak	323
6.3. Prekid jedne ili dviju faza	324
6.3.1. Osnova matematičkog modela	324
6.3.2. Prekid faza a negdje na vođu	329
6.3.3. Prekid faza b i c negdje na vođu	333
6.3.4. Ispitivanja na idealnoj mreži	337
6.3.5. Zaključak	366
7. PARAMETRI DVOSTRUKOG DALEKOVODA	367
7.1. Uvod	367
7.2. Trofazne II-sheme	368
7.2.1. Nепrepleteni dvostruki vod	368
7.2.2. Djelomično prepleteni dvostruki vod	373
7.2.3. Potpuno prepleteni dvostruki vod	377
7.3. Iskopčana jedna trojka dvostrukog dalekovoda	379
7.3.1. Iskopčana trojka, neuzemljena	379
7.3.2. Iskopčana trojka, uzemljena oba kraja	383
7.3.3. Iskopčana trojka, uzemljena u B ili u A	385
7.3.4. Iskopčana trojka, uzemljena na krajevima, a prekinuta negdje između A i B u čvoru C....	391
7.4. Zaključak	417

IV

8. ZAŠTITA	419
8.1. Zadaća zaštite	419
8.2. Nadstrujna zaštita	424
8.2.1. Obična nadstrujna zaštita	424
8.2.2. Usmjerena nadstrujna zaštita	428
8.3. Distantna zaštita	433
8.3.1. Princip djelovanja	433
8.3.2. Mjerni usmjereni član distantnog releja	437
8.3.3. Poticajni član distantnog releja	460
8.3.4. Vremenska karakteristika dinstantnog releja..	461
8.3.5. Protunjihajni zapor	469
8.3.6. Preklopni član	472
8.3.7. Automatsko ponovno uključivanje	476
8.3.8. Štićenje cijele mreže distantnom zaštitom u I stupnju	479
8.3.9. Kritične točke distantne zaštite	483
8.4. Usporedbena zaštita	486
8.4.1. Uzdužna usporedbena zaštita	487
8.4.2. Poprečna diferencijalna zaštita	495
8.5. Lokacija i eliminacija zemljospoja	496

1. STATIČKA I DINAMIČKA STABILNOST

1.1 OSNOVNI POJMOVI

1.1.1 Općenito o stabilnosti

Analiza stabilnosti elektroenergetskog sistema sadrži problematiku, koja proizlazi isključivo iz činjenice da se proizvodnja, prijenos i potrošnja električne energije vrši izmjeničnom strujom. Kod mreža istosmjerne struje problem stabilnosti ne postoji.

Problem stabilnosti postoji u mreži s najmanje dva sinhrona stroja i usko je vezan uz pojam sinhronizma kod izmjenične struje, napose trofazne izmjenične struje. Sinhronizam je dopunski uvjet paralelnog rada aktivnih elemenata mreže.

Činjenica da uvjeti stabilnosti ne moraju uvijek biti ispunjeni prisiljava nas da u nejasnim i spornim slučajevima moramo izvršiti analizu stabilnosti mreže.

Poremećaj sinhronizma uslijed poremećaja stabilnosti je u tijesnoj međusobnoj vezi. Definicija sinhronizma dana je relativnom jednakošću položaja rotora svih sinhronih strojeva u mreži, pri čemu se misli na jednakost položaja rotora u električnom smislu ($n_1 = n_2 = \dots = n_n$, klizanje = 0). Međutim, dok sinhronizam označuje određeno stanje, koje je ispunjeno ili ne, stabilnost je širi pojam, koji strogo vodi računa o granicama do kojih će sinhronizam strojeva biti sačuvan ili ne.

Poznato je iz teorije, a i iz prakse, da je električna veza između sinhronih strojeva u paralelnom radu elastična. Zbog toga će snage, koje je moguće prenositi, biti ograničene. Iz istog razloga, tj. zbog elastičnosti, dolazit će u stanovitim okolnostima do njihovanja koja takodjer mogu ugroziti stabilnost.

Gubitak stabilnosti, bilo jednog bilo svih strojeva u povezanoj mreži predstavlja jedan od najtežih poremećaja. Selektivna zaštita zbog izvanrednih okolnosti neće u takvim slučajevima djelovati bezprijeckorno. Naponi u pojedinim djelovima mreže će se srušiti,

struje će dostići veličinu struja kratkog spoja, a zaštita ih neće jednoznačno definirati zbog oscilacija. Sistem će se raspasti. Ponovna uspostava normalnog pogona može potrajati dugo vremena. Dio potrošača je kroz to vrijeme bez energije.

Prvi problem stabilnosti, koji je uočen u počecima paralelnog pogona, jesu njihanja u stacionarnom pogonu. Ova njihanja bila su uzrokovana nejednolikim momentom klipnih pogonskih strojeva, pa u današnjim mrežama tih pojava više nema.

U ograničeno rasprostranjenim, malo opterećenim mrežama problem stabilnosti se redovito neće postavljati. Naprotiv, u rasprostranjenim i napregnutim mrežama doći će pojedini sinhroni strojevi do granice stabilnosti. Pošto se problem zaoštrava kod velikih snaga i velikih mreža te prijenosa na velike udaljenosti, on je srazmjerno kasno ušao u red ključnih problema prijenosnih sistema.

Poduzimanje mjera za povećanje stabilnosti izaziva znatna ulaganja. Ta ulaganja umanjuju pozitivni ekonomski efekt povezivanja manjih mreža u velike energetske sisteme. Stoga analiza stabilnosti, osim tehničkog, ima i svoj izrazito ekonomski značaj.

U mirnom, uravnoteženom pogonu promjene stanja, izazvane promjenama opterećenja po predviđenom programu, su spore. U promatranom vremenskom periodu možemo uzeti da promjene nema, da je pogon potpuno stacionaran.

U praksi će se postaviti pitanje: Koliko se mogu sporim prirastima povećati opterećenja, a da stabilnost (u ovom slučaju statička) ne bude ugrožena. Drugim riječima, treba odrediti ono određeno djelatno opterećenje, kod kojeg će statički stabilno stanje prijeći u statički nestabilno.

Kao posebna poglavlja promatranja statičke stabilnosti pojavljuju se:

- statička stabilnost kod konstantne uzbude sinhronih strojeva;
- statička stabilnost kod spore regulacije napona (i brzi regulatori napona uzimaju se u ovom slučaju kao spori);
- umjetna statička stabilnost primjenom vrlo brzih regulatora (Ovaj slučaj spada djelomično već u problematiku dinamičke stabilnosti).

Pod imenom dinamičke stabilnosti pojavljuje se problematika izjednačujućih procesa kroz pojave prigušenih oscilacija kutne brzine rotora sinhronih strojeva. Spomenute oscilacije nastaju uslijed nagle pojave smetnje u mreži. Kao smetnje dolaze u obzir:

- nagla opterećenja ili rasterećenja,
- promjena uklopnog stanja mreže,
- kratki spoj u mreži.

Uvjeti očuvanja dinamičke stabilnosti su ispunjeni, ako se po prigušivanju oscilacija pogon vrati u normalno stanje. Pojavljuje se pojam granične dinamičke snage, koja u stacionarnom pogonu ne smije biti prekoračena, ako ne želimo da pojava smetnje izazove gubitak dinamičke stabilnosti. Granična dinamička snaga ovisi o vrsti i trajanju smetnje.

Na proučavanje statičke i dinamičke stabilnosti elektroenergetskog sistema može bitno utjecati veličina sistema, posebno broj generatora. Kao karakteristične slučajeve možemo izdvojiti slijedeće:

- Postoji prijenos na veliku daljinu sa jasno definiranim smjerom djelatne snage;
- Postoji povezani elektroenergetski sistem. Obzirom na potrošačka područja u sistemu postoje udaljene elektrane i postoje bliske elektrane i sinhroni kompenzatori. Elektrane rade pod približno istim uvjetima. Visokonaponska, većinom zamkasta mreža, ima više karakter sabirnica, nego prijenosne mreže. Veliki gradovi i industrijski centri uglavnom su snabdjeveni iz bliskih elektrana.

Premda u praksi uglavnom imamo posla sa sistemom koji nije strogo ni jedan od ova dva ekstremna slučaja, ova dijametralna podjela nam je vrlo korisna za temeljna razmatranja.

1.1.2 Granična snaga prijenosa

Kod statičke i dinamičke stabilnosti postavlja se pitanje izvjesne granične snage. Do najjednostavnijeg izraza za snagu možemo doći, ako u prijenosnom sistemu zanemarimo sve djelatne otpore. Pitamo se: Koja se djelatna snaga može prenijeti između 1 i 2 (sl. 1a)?

Iz geometrijskih odnosa (slika 1b) zaključujemo slijedeće:

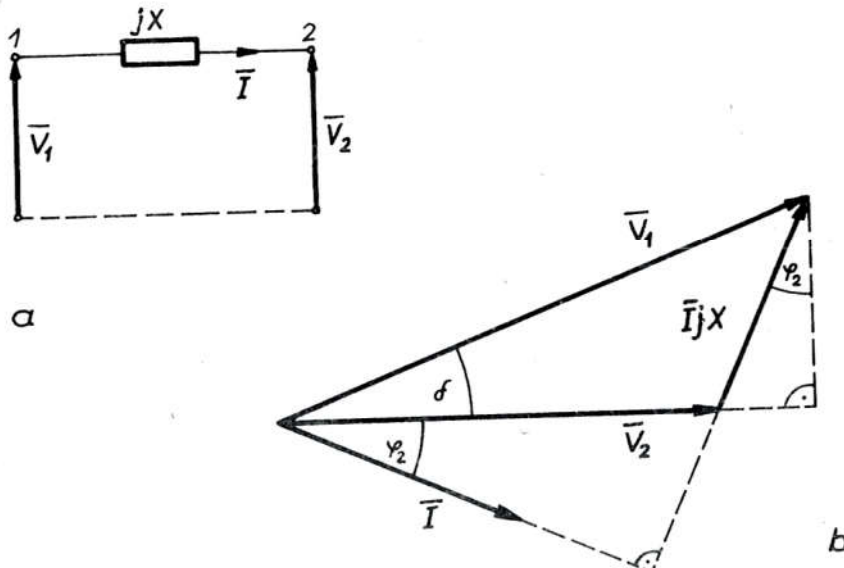
$$\sin \delta = \frac{I X \cos \phi_2}{V_1} \quad + \quad I \cos \phi_2 = \frac{V_1}{X} \sin \delta \quad / \cdot V_2$$

$$P_2 = V_2 I \cos \phi_2 = V_2 \frac{V_1}{X} \sin \delta$$

Kako nema gubitaka: $P_1 = P_2 = P$

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta$$

1-1



Slika 1, - Određjivanje izraza za prenesenu djelatnu snagu

Ako umjesto V_1 i V_2 uvrstimo linijske napone U_1 i U_2 , dobit ćemo izraz za trofaznu snagu.

Vrijednost prenesene snage raste s povećanjem kuta između napona na početku i na kraju prijenosnog sistema. Očigledno je da će maksimalna snaga prijenosa biti dostignuta kod $\delta = 90^\circ$:

$$P_{\max} = \frac{U_1 U_2}{X} \quad 1-2$$

Ako δ povećamo preko 90° , $\sin \delta$ opada i snaga P se smanjuje.

$P_{\max}$ raste s povećanjem napona (uz $U_1 = U_2 = U_n$ raste s kvadratom nazivnog napona prijenosnog sistema).

$P_{\max}$ opada ako X raste.

Zanemarenje djelatnog otpora neće dovesti do greške u načelnim razmatranjima, jer su veličine djelatnih otpora prema induktivnim zanemarive. Za odnos R/X može se uzeti:

vodovi 110 kV	1 : 2 - 1 : 10
transformatori	1 : 10 - 1 : 40
generatori	1 : 20 - 1 : 200

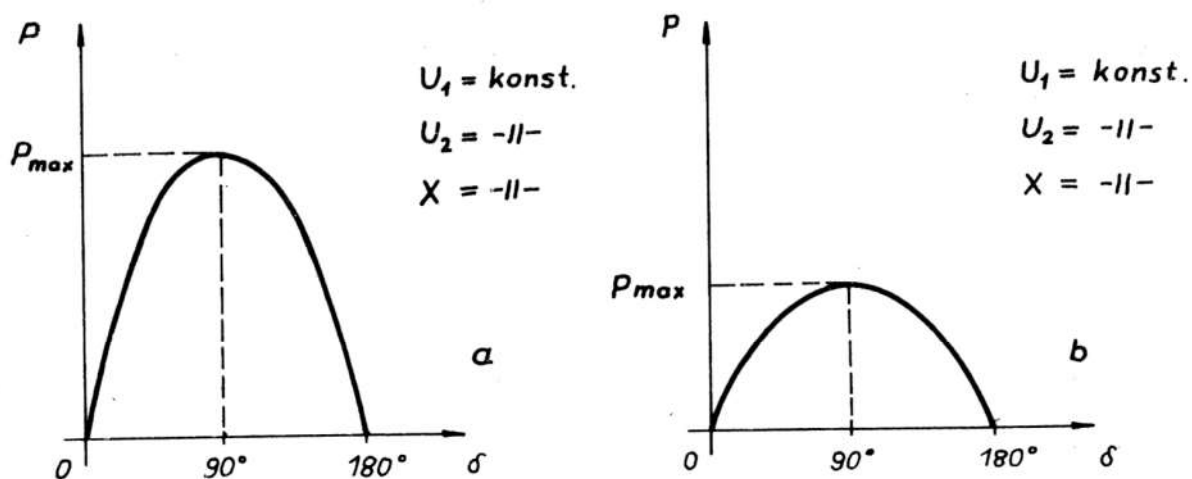
Kod analize stabilnosti redovito se zanemaruje djelatni otpor generatora i transformatora, a djelatni otpor vodova se uzima u obzir samo kod točnih proračuna. Ako prijenosni sistem sadrži transformatore i generatore, utjecaj djelatnih otpora vodova bit će pogotovo beznačajan. Zato će i osnovna razmatranja stabilnosti uz zanemareni djelatni otpor imati punu vrijednost.

Izraz $P = f(\delta)$ prema 1-1 pokazuje da se uz konstantno V_1 , V_2 i X snaga P mijenja po zakonu sinusa. Na slici 2 nacrtana je karakteristika $P = f(\delta)$ za manji i za veći X . Slika 2 a odgovara prijenosu preko jakog prenosnog sistema, a 2b preko slabog. Očito je da će problem stabilnosti nastupiti u slučaju b mnogo ranije, tj. kod manjih snaga P , nego u slučaju a.

Posebnu pažnju treba posvetiti veličini X i to ne samo u smislu

povećanja stabilnosti njezinim smanjivanjem, već posebno u pogledu izbora veličine za X , koju u pojedinim specijalnim slučajevima moramo uvrstiti u formulu. Načelno se može reći da za X moramo uvrstiti ukupnu reaktanciju prijenosnog sistema, uključujući reaktancije sinhronih strojeva.

Relacija 1-1 zadovoljit će samo u iznimnim slučajevima (naponi V_1 i V_2 održavani sinhronim kompenzatorima). U većini slučajeva računat ćemo s elektromotornim silama strojeva E_1 i E_2 .



Slika 2.- Krivulje snaga - kut za slučaj a) jakog prijenosnog sistema i b) slabog prijenosnog sistema

Ovisno o tome da li promatramo stacionarno ili prijelazno stanje, odnosno da li istražujemo statičku ili dinamičku stabilnost prijenosa ili mreže, u račun treba uzeti sinhronu ili prijelaznu reaktanciju i elektromotorne sile iza sinhronu odnosno prijelaznu reaktanciju.

Složeni elektroenergetski sistem nastojimo pojednostavniti. Istraživanje stabilnosti prijenosnog sistema je najjednostavnije, ako se sistem može svesti na model sinhroni generator - vod - sinhroni motor. Na slici 3. prikazani su slučajevi kada je to moguće uraditi. Ako to nije moguće, otežana je ocjena stabilnosti, naročito stati-

čke. Čim je sistem veći od jedne petlje i 3 generatora, proračuni nisu mogući bez elektroničkih računala.

1.1.3 Generator i kruta mreža

Prije nastavka izlaganja potrebno je upoznati jedan pojam, koji predstavlja granični slučaj u karakteristikama mreže. To je kruta mreža. Pod krutom mrežom (idealno gledano) podrazumijeva se toliko snažna mreža, snažna i po jakosti izvora i po jakosti prijenosnih sistema, da oduzimanje i dodavanje bilo koje snage u bilo kojem čvoru te mreže ne izaziva promjenu napona ni u tom ni u bilo kojem drugom čvoru. Misli se na promjenu napona kako po iznosu, tako i po fazi.

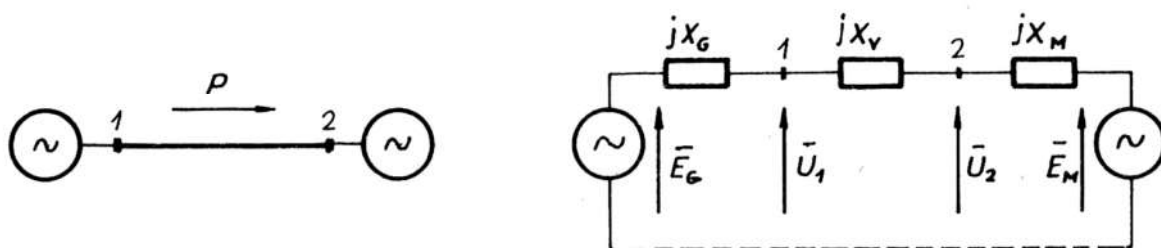
Ova definicija krute mreže izražena drugim načinom glasi:

Ekvivalentna impedancija krute mreže u bilo kojem čvoru jednaka je nuli. Po tome vidimo da unutar krute mreže (idealno gledano) ne postoje problemi stabilnosti, ukoliko mreža ne oslabi ispadanjem jednog njenog dijela iz pogona.

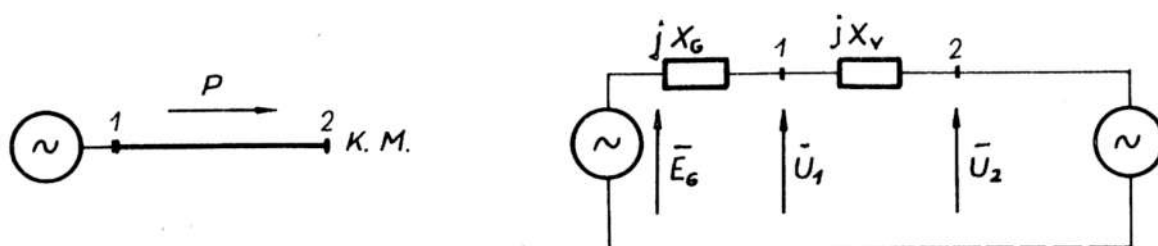
U praksi kruta mreža po navedenim definicijama, naravno, ne postoji. Ipak nam taj pojam olakšava neka razmatranja, osobito ako se taj pojam prilagodi praktičnim uvjetima tako da se kaže:

Neka se mreža može smatrati krutom ako uz ispunjavanje nekih općih uvjeta (npr. dovoljna gustoća vodova i velik broj zamki) snaga koja se mreži dodaje ili oduzima predstavlja samo mali dio ukupne snage svih izvora paralelno spojenih u mreži.

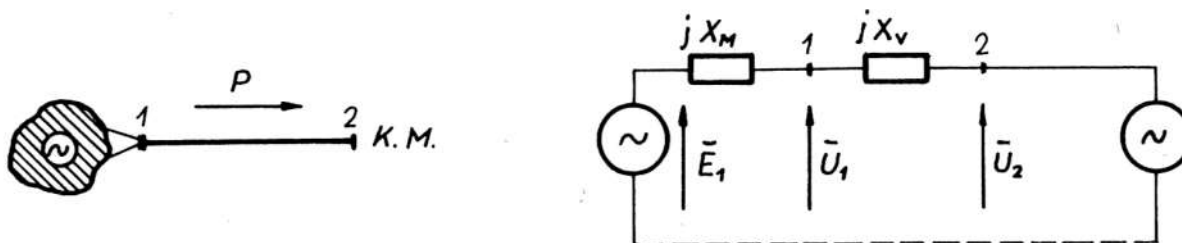
Iz navedenog slijedi da ćemo npr. kod prijenosa energije od udaljenog izvora do nekog čvora krute mreže, kao X uzeti zbroj reaktancija generatora izvora, transformatora, voda i eventualno krajnjeg transformatora, dok će reaktancija same krute mreže po definiciji biti jednaka nuli. Takav prijenos prikazan shematski izgledati će kao na slici 4a. Uz zanemarene djelatne otpore i stanoviti $\cos \phi$ za isti prijenos prikazan je dijagram napona na slici 4b.



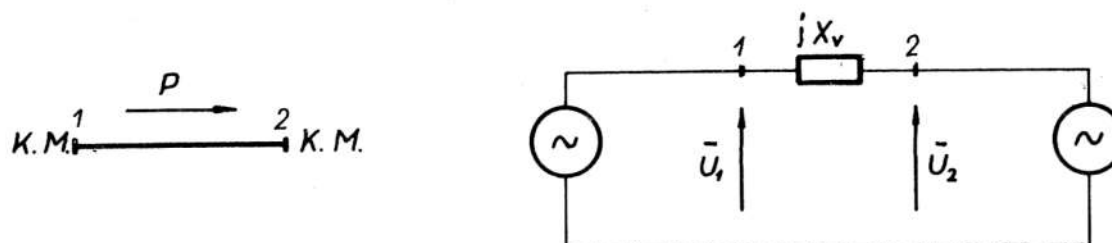
a Generator - vod - motor



b Generator - vod - kruta mreža

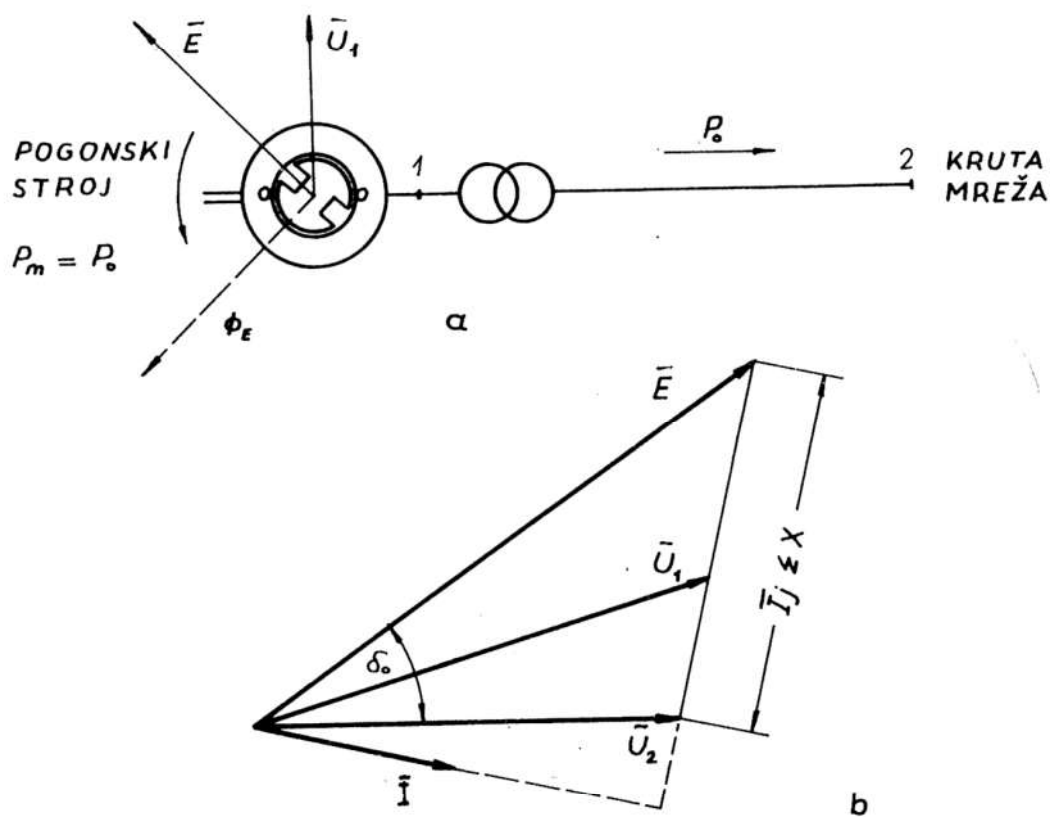


c Mreža - vod - kruta mreža



d Kruta mreža - vod - kruta mreža

Slika 3.- Primjeri prijenosa svedenog na model: generator - vod - motor



Slika 4.- Prijenos snage od udaljene elektrane do krute mreže

Za prikazani prijenos vrijedi izraz:

$$P = f(\delta) = \frac{E_1 U_2}{X} \sin \delta \quad 1-3$$

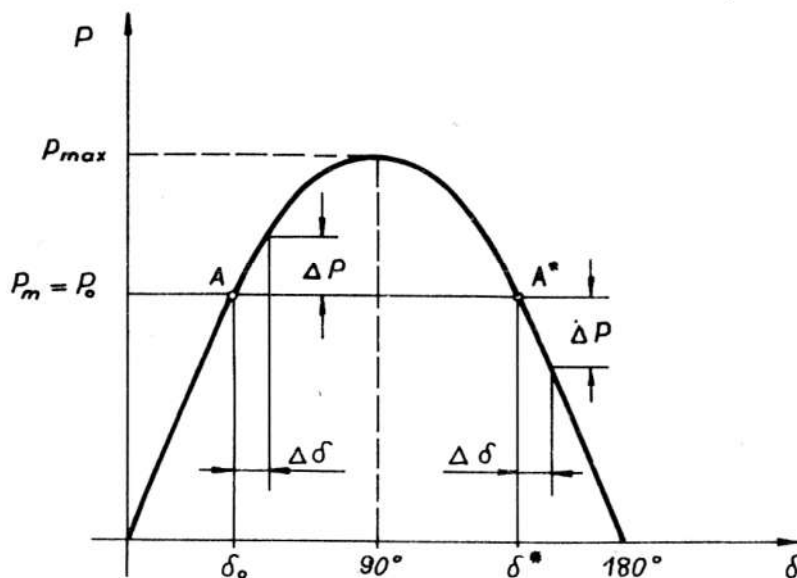
U relaciji 1-3 E_1 je linijski iznos EMS-e, a snaga je trofazna. Promatrat ćemo slučaj konstantne uzbude generatora, odnosno konstantne EMS-e E_1 koja odgovara uzbudi. Uz konstantan U_2 (jer je to napon čvora krute mreže) i konstantan X dobijemo karakteristiku prikazanu na slici 5.

U stacionarnom pogonu prenosi se snaga P_o , zbog čega će između vektora napona U_2 krute mreže i elektromotorne sile E_1 generatora nastati fazni kut δ_o . Stanje P_o , δ_o uneseno je u karakteristiku kao točka A. Pošto smo pretpostavili da nema gubitaka, sna-

ga predana krutoj mreži jednaka je mehaničkoj snazi P_m , koju pogonski stroj predaje generatoru. Cijeli sklop je u stanju ravnoteže.

Uzmimo da P_m ostaje konstantna bez obzira na druge promjene. Položaj rotora generatora određen je položajem vektora elektromotorne sile E_1 . Ako iz bilo kojeg razloga dodje do povećanja kuta δ za $\Delta\delta$, snaga prijenosa, pa prema tome i snaga koju daje generator mora po karakteristici porasti od P_0 na $P_0 + \Delta P$. Pošto snaga pogonskog stroja ostaje nepromijenjena, ravnoteža je očito poremećena. U tom momentu rotor prethodi vektoru napona U_2 za kut $\Delta\delta$ više nego ranije. Povećanje kuta δ znači da je rotor ubrzan u odnosu na krutu mrežu. Međutim, manjak mehaničke snage u iznosu ΔP djelovat će u smislu kočenja rotora sve do uspostave prijašnje ravnoteže ($P_m = P_0$, δ_0).

Slično tome, ako se kut δ_0 smanji na $\delta_0 - \Delta\delta$, tj. ako rotor generatora relativno zaostane prema svom prijašnjem položaju ravnoteže, smanjit će se (prema dijagramu) snaga predana krutoj mreži i doći će do viška snage pogonskog stroja. Ovaj višak izazvat će



Slika 5.- Krivulje snaga - kut za prijenos sa slike 4

ubrzanje rotora i uspostavu ravnoteže kao i ranije. Opet će se uspostaviti stanje ravnoteže $P_m = P_o, \delta_o$.

Dalje, ako pogonski stroj nešto poveća pogonsku snagu, nastali višak mehaničke snage ubrzat će rotor. Posljedica toga biti će povećanje kuta δ . Povećanje kuta izazvat će povećanje snage koja se predaje krutoj mreži, pa će se uspostaviti novo stanje ravnoteže u točki $P_m + \Delta P_m = P_o + \Delta P, \delta_o + \Delta \delta$.

Prema izloženom, sva pogonska stanja u okolišu točke A su statički stabilna.

Horizontalna $P_m = P_o$ siječe, međjutim, karakteristiku $P = f(\delta)$ osim u točki A još i u točki A* uz $\delta = \delta^*$. To znači da imamo još jedno stanje ravnoteže.

Pretpostavimo da se pogon vrši u točki A*. Neka sada dodje do slučajnog povećanja kuta δ^* na $\delta^* + \Delta \delta$ uz $P_m = \text{konst.}$ Iz dijagrama je vidljivo da će doći do smanjenja predane električne snage krutoj mreži od P_o na $P_o - \Delta P$. To će izazvati višak mehaničke snage, koja će se utrošiti na daljnje ubrzanje rotora, tj. doći će do daljnjeg povećanja kuta δ , do daljnjeg smanjenja predane snage mreži, do još većeg viška mehaničke snage, itd. Poremećaj neće dakle izazvati reakciju u smislu povratka u staro stanje ravnoteže. Rotor će se dalje ubrzavati, kut δ će preći 180° . Generator počinje uzimati snagu iz mreže. Ubrzanje rotora postat će toliko, da će doći do gubitka sinhronizma.

Ako bi se kod rada u točki A* uz δ^* kut δ^* malo smanjio, dakle rotor malo usporio, povećala bi se mreži predana snaga. Uz $P_m = \text{konst.}$ nastali manjak snage bi izazvao daljnje usporavanje rotora, itd. U ovom slučaju, doduše ne bi došlo do gubitka stabilnosti, ali bi poremećaj doveo do prijelaza preko prekritne točke $P_{\max}$ i do uspostave ravnoteže u stabilnom području, tj. u točki A. Prema izloženom pogon u opadajućem dijelu karakteristike $P = f(\delta)$ nije moguć. Pogonska stanja u okolini točke A* su statički labilna.

Granična snaga između stabilnih i labilnih pogonskih stanja je $P_{\max}$. Njoj odgovara kut $\delta = 90^\circ$.

Možemo zaključiti da je pogonsko stanje statički stabilno, ako s porastom snage P raste kut δ , tj. ako je:

$$\frac{dP}{d\delta} > 0 \quad 1-4$$

Ovaj izraz se još naziva sinhronizirajućom snagom, jer je ona u stabilnom području dP onaj faktor, koji teži ka uspostavi uravnoteženog stanja. Derivacija izraza $P = f(\delta)$ glasi

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{E_1 U_2}{X} \cos \delta, \quad 1-5$$

uz uvjet da su E_1 , U_2 i X konstantni.

Medjutim, uvjet konstantnosti napona vrlo je teško zadovoljiti. Dok se još donekle može računati s konstantnim naponima na sabirnicama, elektromotorne sile E generatora mijenjaju se u praksi u širokim granicama. Također će i uvjet nepromjenjive reaktancije X biti zadovoljen samo u stanovitim slučajevima. Kod poremećaja, naime, brzo dolazi do zasićenja željeza u generatorima, X postaje nelinearno, pa treba za svaki slučaj promatranja odrediti odgovarajući X . Određjivanje napona i reaktancije često je teže od samog promatranja stabilnosti u užem smislu.

1.2 STATIČKA STABILNOST

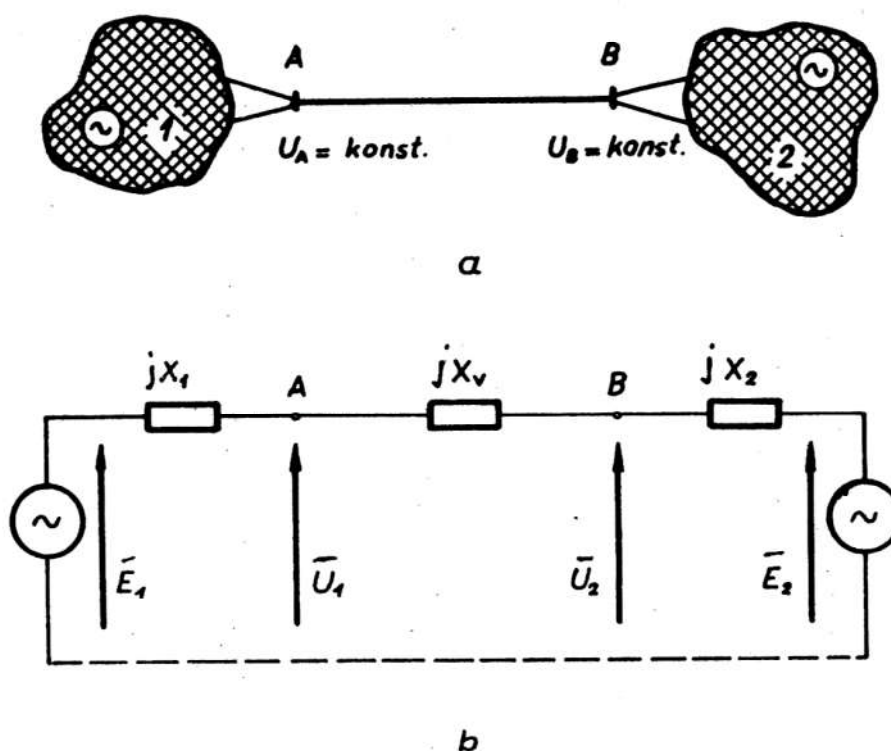
Određjivanje granične snage za statičku stabilnost nije problem, kada se radi o prijenosu snage iz udaljene elektrane u mrežu koja je dovoljno jaka da je možemo smatrati krutom mrežom. Isto tako je jednostavan slučaj kada su dvije jake mreže, koje možemo smatrati krutim, povezane prijenosnim sistemom. U većini slučajeva je ovakav model daleko od stvarnosti. Zato mrežu ili mreže moramo nadomjestiti ekvivalentnim elektromotornim silama i ekvivalentnim reaktancijama. Pošto se ovdje radi o statičkoj stabilnosti, za generatore bit će mjerodavna sinhrona reaktancija X_d .

1.2.1 Metoda Edith Clark

Ako se prijenos vrši između dvije složene mreže koje se ne mogu smatrati krutim, moramo se poslužiti metodama za određivanje elektromotornih sila, jer nam elektromotorne sile nisu poznate, a s njima moramo ući u proračun.

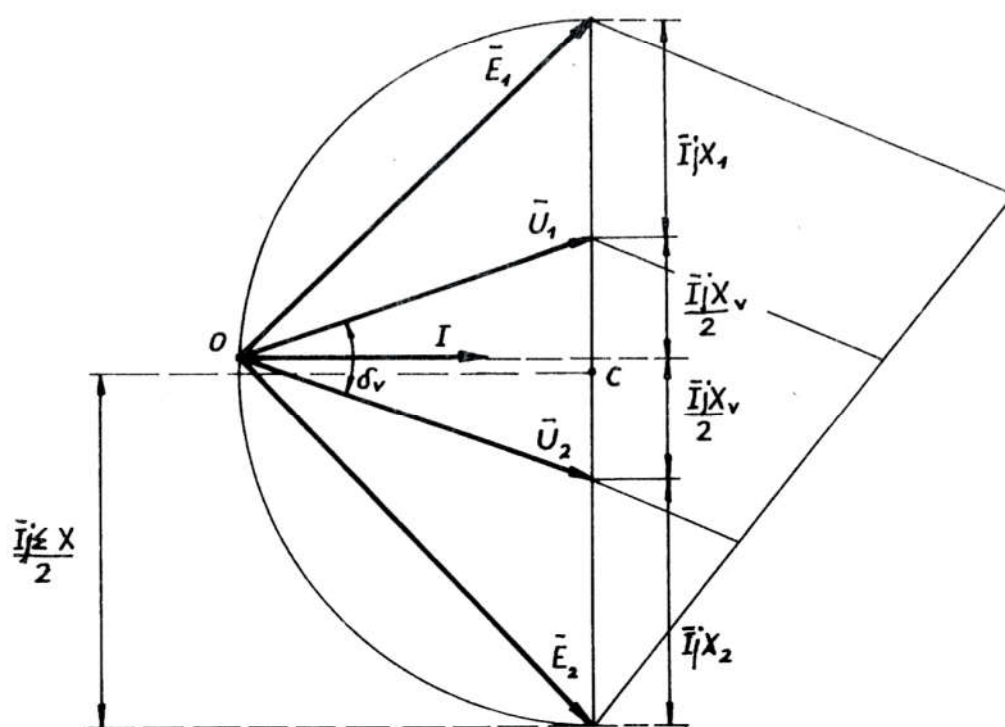
Na slici 6b nacrtana je ekvivalentna shema povezanih mreža sa slike 6a. Mreže osiguravaju konstantan modul napona na početku i kraju voda, odnosno prijenosnog sistema, tj. u čvorovima A i B. Treba odrediti maksimalnu djelatnu snagu koja se može preneti vodom A-B.

Najprije moramo mrežu svesti na jednu naponsku razinu, a zatim metodom transformacije odrediti ekvivalentne reaktancije mreža 1 i 2 u odnosu na čvorove A i B, s tim da za generatore budu uvrštene sinhronne reaktancije X_d . Uz tako određene ekvivalentne reak-



Slika 6.- Određjivanje statičke granične snage prijenosa voda između dvije mreže

tancije X_1 i X_2 mora nam biti još poznata reaktancija voda X_v . Ovaj postupak ima samo djelomično vezu s određivanjem Theveninovog ekvivalenta. Ovdje, naime, nije poznat napon praznog hoda u čvoru iz kojeg promatramo mrežu, pa se ne može odrediti E_T . Elektromotorne sile treba tek odrediti po veličini i fazi. Sada pristupimo crtanju dijagrama Edith Clark (slika 7):



Slika 7. - Dijagram Edith Clark za $U_1 = U_2$

- Odaberemo baznu dužinu za vektor ukupnog pada napona, npr. $100 \text{ mm} = \overline{I_2}$. U sredini C ove dužine nacrtamo simetralu.
- Nad nacrtanom baznom dužinom nacrtamo polukružnicu sa središtem u C.
- Bazna dužina podijeli se u 3 dijela u omjeru triju reaktancija, s tim da X_v bude u sredini.

- U raspolovištu dijela koji odgovara X_v povuče se okomica na baznu dužinu, i tako odredi sjecište te okomice s polukružnicom, odnosno odredi se ishodište vektorskog dijagrama tj. točka O.
- Potegnu se spojnice iz O sa ranije dobivenim točkama na baznoj dužini prema slici. To su vektori napona i elektromotorne sile u naponskom dijagramu, koji je time određen. Zbog geometrijskih odnosa kut između E_1 i E_2 iznosi 90° , pa prema tome dijagram odgovara stanju prijenosa maksimalne snage $P_{\max}$.
- Pošto nam je veličina $U_1 = U_2 = U_n$ poznata, mjerenjem dobivene dužine vektora U_n možemo odrediti mjerilo za napone. Time možemo odrediti i iznose padova napona IX_1 , IX_2 i IX_v . Odatle se uz poznate X može odrediti struja I , pa prema tome i snaga prijenosa.
- Snagu graničnog prijenosa zgodnije je odrediti mjerenjem kuta $\delta_v = \angle U_1 U_2$. Kut δ_v uvrstimo u izraz

$$P_{\max} = \frac{U_n^2}{X_v} \sin \delta_v \quad 1-6$$

Veličine S , P , I , δ_v , E_1 i E_2 mogu se računskim putem odrediti na temelju geometrijskih odnosa u dijagramu uz primjenu dosta složenih izraza, a iz poznatih veličina U_n , X_1 , X_2 i X_v .

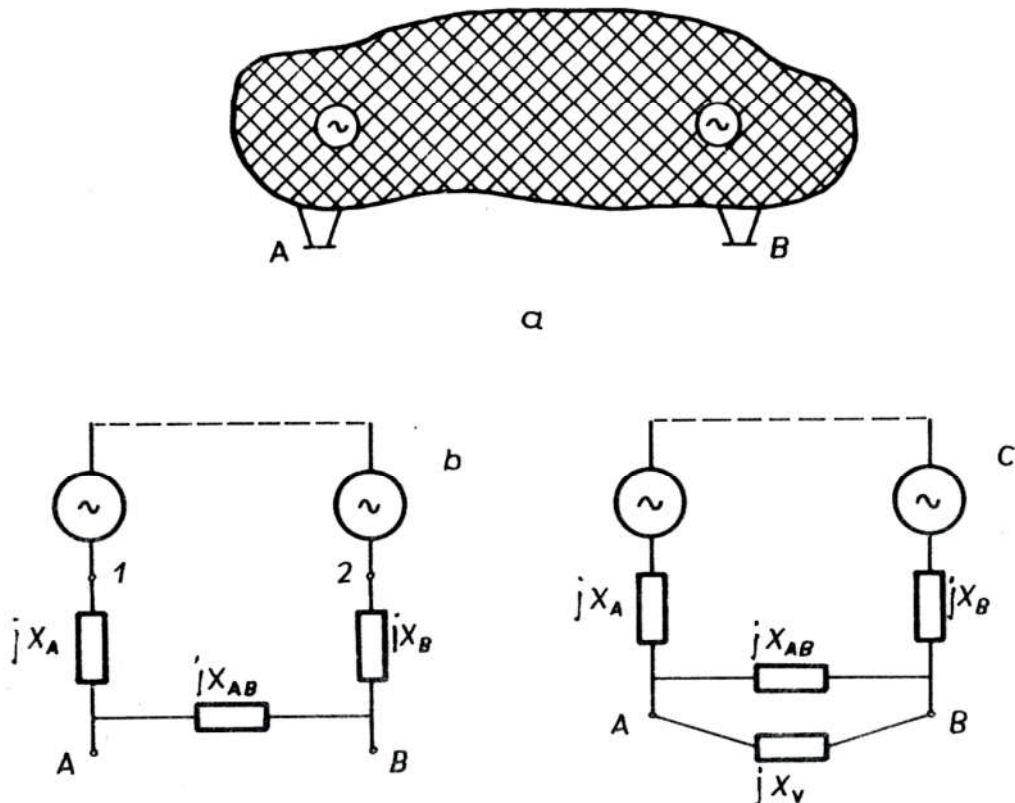
Nas u ovom slučaju interesira samo $P_{\max}$, za koju ćemo koristiti izraz 1-6. U ovaj izraz uvrstimo:

$$\sin \delta_v = \frac{2K}{K^2 + 1} \quad 1-7$$

$$K^2 = \left(2 \frac{X_1}{X_v} + 1\right) \left(2 \frac{X_2}{X_v} + 1\right) \quad 1-8$$

Dijagram E. Clark možemo također koristiti u slučaju povezivanja dvaju čvorova iste mreže.

Između čvorova A i B mreže sa slike 8 a treba izgraditi vod, čija je reaktancija X_v . Interesira nas maksimalna djelatna snaga, koja se statički stabilno može prenijeti novim vodom.



Slika 8. - Odredjivanje statičke granične snage prijenosa voda između dva čvora iste mreže

Cijelu mrežu svedemo na čvor*išta* A i B (opet sa sinhronim reaktancijama generatora). Ekvivalentna shema mreže prije izgradnje voda bit će prema sl. 8b, a nakon izgradnje voda prema sl. 8c. Ukupna reaktancija između A i B nakon izgradnje voda iznosit će:

$$X'_{AB} = \frac{X_{AB} X_V}{X_{AB} + X_V}$$

Veličine X_A , X_B i X'_{AB} unesu se u dijagram E. Clark ili u formulu za $P_{\max}$. Dobit ćemo snagu $P'_{\max}$, koja se može prenijeti između A i B. Na novopriključeni vod otpada snaga:

$$P_{\max v} = P'_{\max} \frac{X_{AB}}{X_{AB} + X_V}$$

Primjer pokazuje da daljnjim ojačavanjem prijenosnog sistema ne možemo po volji povećati maksimalnu snagu stabilnog prijenosa, jer ona ovisi i o stupnju krutosti povezanih mreža. Čak, ako bismo izgradili vod sa $X_V = 0$, tj. potpuno kompenzirani vod, $P_{\max}$ bi bilo ograničeno sa X_1 i X_2 .

Povezivanje sistema vodom višeg napona takodjer ne mora obvezno povećati $P_{\max}$. Naprotiv, $P_{\max}$ se u tom slučaju može čak i smanjiti. Reducirana reaktancija X_V voda višeg napona je manja od reducirane reaktancije nižeg voda, ali zato na oba kraja voda moramo dodati transformatore, te nakon toga i njihove reaktancije ulaze u račun (povoljniji su autotransformatori, radi manjeg e_k).

Primjer 1.1 Dvije mreže treba povezati 220 kV dalekovodom. Reducirane reaktancije na naponsku razinu 220 kV iznose: $X_1 = 103 \Omega$, $X_2 = 100 \Omega$ i $X_V = 96 \Omega$. Traži se snaga $P_{\max}$, ako je:

- a) napon na početku i na kraju voda jednak nazivnom naponu,
- b) napon na kraju voda jednak nazivnom naponu, a napon na početku voda 10% viši od nazivnog,
- c) izgradjen još jedan dalekovod istih parametara, uz naponske prilike kao pod a).

U slučaju a) nacrtat ćemo dijagram E. Clark kao na slici 7, ili ćemo koristiti relacije 1-7 i 1-8. Dobijemo da je $P_{\max} = 292$ MW.

U slučaju b) koristit ćemo dijagram E. Clark, s tim da nam položaj ishodišta O mora zadovoljiti omjer napona U_1 i U_2 . Konstrukcija dijagrama je pokazana na slici 9. Dobijemo da je $P_{\max} = 320$ MW.

U slučaju c) postupit ćemo kao u a), s tim što ćemo računati sa $\frac{X_V}{2}$, a sve druge veličine ostat će iste. Dobijemo da je $P_{\max} = 372$ MW. Povećanje granične snage prijenosa iznosi svega

$$\frac{372 - 292}{292} 100 = 27,4 \%$$

To je zbog toga što smanjenjem X_V nismo djelovali na X_1 i X_2 .

$$E_1' = \frac{E_1 \left(-\frac{2}{B_v}\right)}{X_1 - \frac{2}{B_v}} = E_1 c_1 \quad 1-10b$$

$$X_2' = \frac{X_2 \left(-\frac{2}{B_v}\right)}{X_2 - \frac{2}{B_v}} = X_2 \frac{\frac{2}{B_v}}{\frac{2}{B_v} - X_2} = X_2 c_2 \quad c$$

$$E_2' = \frac{E_2 \left(-\frac{2}{B_v}\right)}{X_2 - \frac{2}{B_v}} = E_2 c_2 \quad d$$

B_v je mali broj, pa je $\frac{2}{B_v}$ veliki broj, mnogo veći od X_1 , odnosno X_2 . Stoga je:

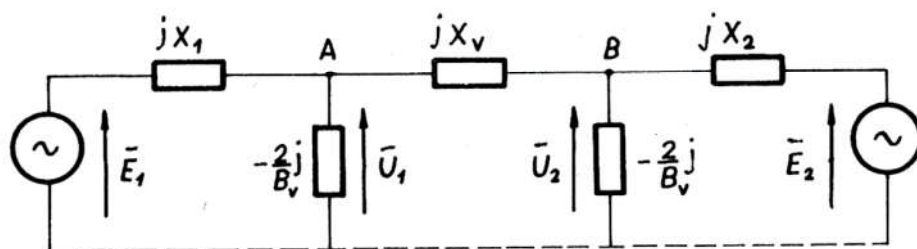
$$c_1 > 1 \quad i \quad c_2 > 1$$

$$P_{\max}' = \frac{c_1 E_1 c_2 E_2}{c_1 X_1 + X_v + c_2 X_2} = \frac{E_1 E_2}{\frac{X_1}{c_2} + \frac{X_v}{c_1 c_2} + \frac{X_2}{c_1}} \quad 1-11$$

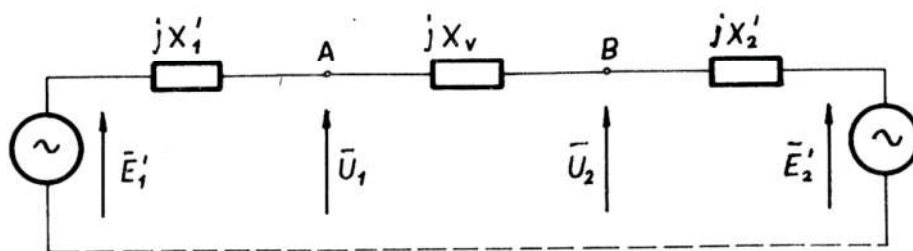
$$P_{\max}' > P_{\max}$$

Uvjeti statičke stabilnosti pokazuju se boljim ako se u račun uzmu kapaciteti dalekovoda uz konstantne EMS-e. Situacija je drukčija kod konstantnih napona U_1 i U_2 , što će se vidjeti iz primjera.

Primjer 1.2 U primjeru 1.1a) uzmi u obzir kapacitet dalekovoda. Vod je dug 228 km, a $C_1 = 9,2 \cdot 10^{-9}$ F/km.



a



b

Slika 10.- Ekvivalentne sheme prijenosa, ako se uzmu u obzir kapaciteti voda

$$\frac{2}{B_v} = \frac{2 \cdot 10^9}{314 \cdot 9,2 \cdot 222} = 3036,5 \, \Omega$$

$$c_1 = \frac{3036,5}{3036,5 - 103} = 1,35$$

$$c_2 = \frac{3036,5}{3036,5 - 100} = 1,034$$

Bez kapaciteta : $K^2 = 9,7$ $K = 3,1145$

$$\sin \delta_v = 0,5822$$

$$P_{\max} = 293,42 \text{ MW}$$

S kapacitetima: $K^2 = 10,159$ $K = 3,1873$

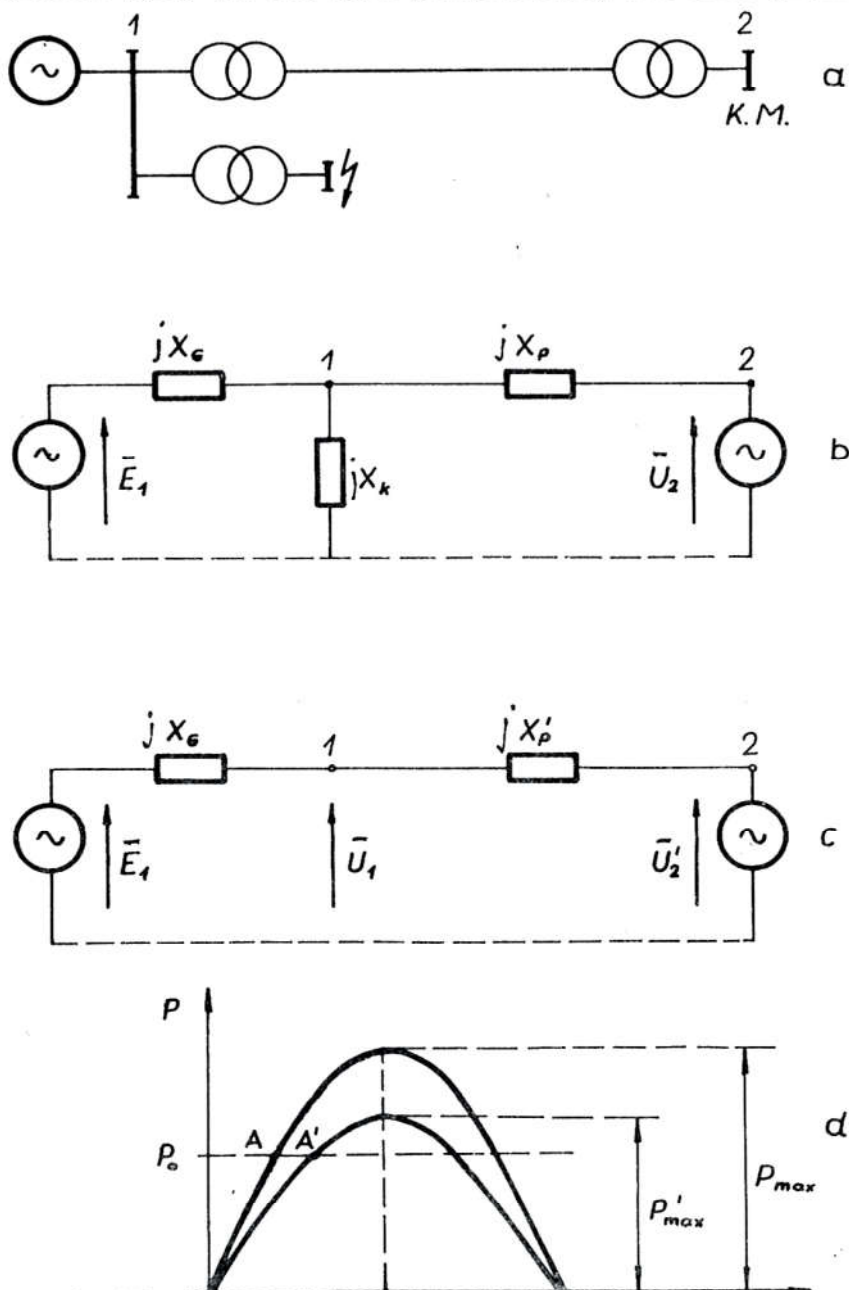
$$\sin \delta'_v = 0,5713$$

$$P'_{\max} = 287,98 \text{ MW}$$

Utjecaj kapaciteta voda je nepovoljan na statičku stabilnost, jer je $P'_{\max}$ manje od $P_{\max}$. Utjecaj ovih kapaciteta nije odlučujući i može se zanemariti.

1.2.3 Kratki spoj (trajni) na odvojk prijenosnog sistema

Trajni kratki spoj na odvojk prijenosnog sistema prema sl. 11a



Slika 11.- Kratki spoj na odvojk prijenosnog sistema

može se prikazati na ekvivalentnoj shemi prema sl. 11b, ako je poznata reaktancija do mjesta kratkog spoja.

Promatramo stacionarno stanje, pa uzimamo X_d generatora. Dalje ćemo smatrati, da se nije promijenila ni uzbuda, ni pogonska snaga. Mrežu opet svedemo na model bez poprečne grane (sl. 11.c):

$$X'_p = \frac{X_p X_k}{X_p + X_k} \quad U'_2 = U_2 \frac{X_k}{X_p + X_k} \quad 1-12a \text{ i } b$$

$$\frac{X_k}{X_p + X_k} < 1 \quad -- \quad U'_2 < U_2 \quad X'_p < X_p$$

Snaga prije i poslije kratkog spoja:

$$P = \frac{E_1 U_2}{X_G + X_p} \sin \delta \quad P' = \frac{E_1 U'_2}{X_G + X'_p} \sin \delta' \quad 1-13a \text{ i } b$$

Nazivnik se ne umanjuje koliko i brojnik, pa je stoga:

$$P_{\max} > P'_{\max}$$

Ako je $P_0 < P'_{\max}$, stabilitet je siguran i za vrijeme kratkog spoja, ali se nalazimo bliže graničnoj snazi (sl. 11.d).

1.2.4 Prijenos prirodnom snagom

Maksimalna snaga koja se može prenijeti između dvije krute mreže kod $U_1 = U_2 = U_n$ iznosi:

$$P_{\max} = \frac{U_n^2}{X} = \frac{U_n^2}{X_1 \ell} \quad 1-14$$

gdje je X_1 jedinična reaktancija spojnog voda.

Prirodna snaga voda s valnim otporom Z_v je:

$$P_{\text{nat}} = \frac{U_n^2}{Z_v} \quad 1-15$$

Možemo postaviti omjer:

$$m = \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{nat}}} = \frac{Z_v}{X_1 \ell} \quad 1-16$$

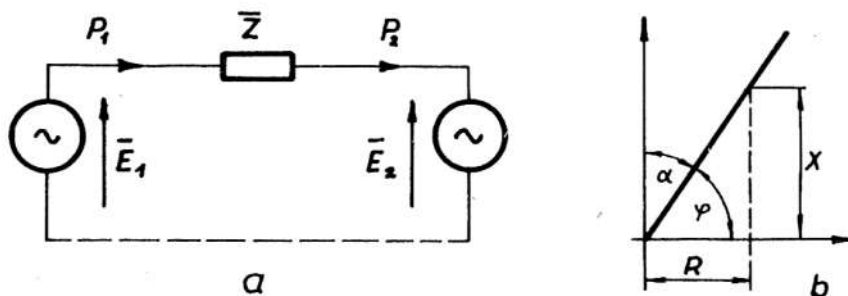
Za $X_1 = 0,4 \, \Omega/\text{km}$ i za $X_v = 380 \, \Omega$ izlazi da je:

$$m = \frac{950}{\ell}$$

Slijedi zaključak da se prirodna snaga ($P_{\text{max}} = P_{\text{nat}}$, $m=1$) može statički stabilno prenijeti na 950 km. Zbog reaktancija mreža i zbog rezerve ta će udaljenost biti manja.

1.2.5 Utjecaj gubitaka

Djelatni otpori u mreži izazivaju gubitke, pa se snage P_1 i P_2 razlikuju. Rezultat su dvije karakteristike $P=f(\delta)$ sinusoidalnog oblika, koje ne počinju u ishodištu koordinatnog sistema. Prijenosni sistem sveden na model bez poprečnih grana pokazuje slika 12.



Slika 12.- Prijenos preko impedancije $\bar{Z}$

$$\bar{I}_1 = \bar{Y}_{11} \bar{E}_1 - \bar{Y}_{12} \bar{E}_2 / \bar{E}_1^* \quad 1-17a$$

$$\bar{I}_2 = \bar{Y}_{21} \bar{E}_1 - \bar{Y}_{22} \bar{E}_2 / \bar{E}_2^* \quad b$$

$$\bar{S}_1 = \bar{Y}_{11} / \bar{E}_1 / ^2 - \bar{Y}_{12} \bar{E}_2 \bar{E}_1^* \quad 1-18a$$

$$\bar{S}_2 = \bar{Y}_{21} \bar{E}_1 \bar{E}_2^* - \bar{Y}_{22} / \bar{E}_2 / ^2 \quad b$$

U jednadžbama 4-17 i 4-18 admitancije su:

$$\bar{Y}_{11} = \bar{Y}_{12} = \bar{Y}_{22} = \bar{Y} = \frac{1}{Z} = Y / \theta = \frac{1}{Z} / -\phi$$

Uvedimo kut α prema slici 12b:

$$\phi = 90 - \alpha \quad \theta = -\phi = -90 + \alpha = -(90 - \alpha)$$

$$\delta_1 - \delta_2 = \delta$$

i uvrstimo u relaciju 1-18:

$$\bar{S}_1 = \frac{E_1^2}{Z} / -(90 - \alpha) - \frac{E_1 E_2}{Z} / -(90 - \alpha) - \delta \quad 1-19a$$

$$\bar{S}_2 = \frac{E_1 E_2}{Z} / -(90 - \alpha) + \delta - \frac{E_2^2}{Z} / -(90 - \alpha) \quad b$$

$$P_1 = \frac{E_1^2}{Z} \cos(90 - \alpha) - \frac{E_1 E_2}{Z} \cos(90 - \alpha + \delta)$$

$$P_2 = \frac{E_1 E_2}{Z} \cos(90 - \alpha - \delta) - \frac{E_2^2}{Z} \cos(90 - \alpha)$$

$$P_1 = \frac{E_1^2}{Z} \sin \alpha - \frac{E_1 E_2}{Z} \sin (\alpha - \delta)$$

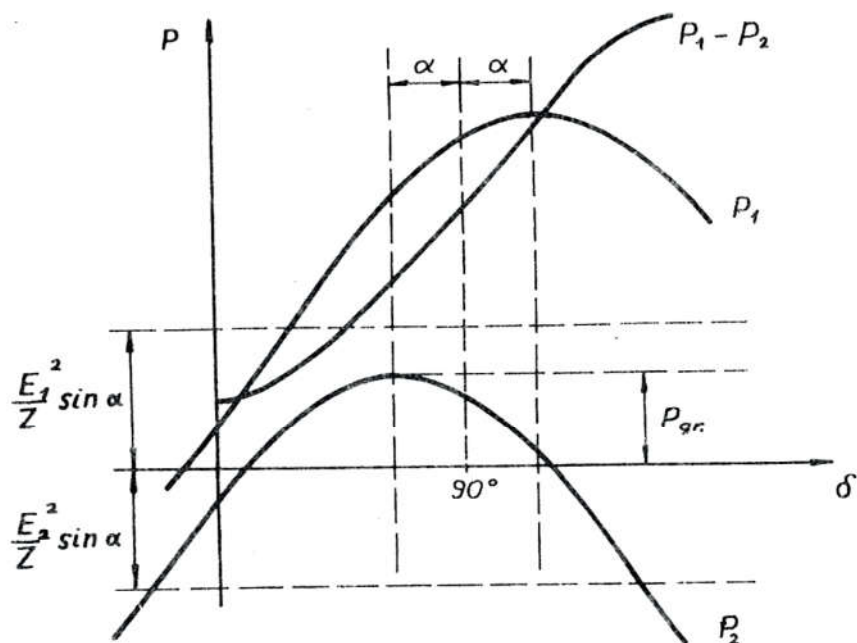
$$P_2 = -\frac{E_2^2}{Z} \sin \alpha + \frac{E_1 E_2}{Z} \sin (\alpha + \delta)$$

$$P_1 = \frac{E_1^2}{Z} \sin \alpha + \frac{E_1 E_2}{Z} \sin (\delta - \alpha)$$

1-20a

$$P_2 = -\frac{E_2^2}{Z} \sin \alpha + \frac{E_1 E_2}{Z} \sin (\delta + \alpha)$$

b



Slika 13.- Krivulje snaga - kut za prijenos preko impedancije $\bar{Z}$

Nulte točke i maksimume funkcija $P_1 = f(\delta)$ i $P_2 = f(\delta)$ dobijemo iz:

$$\delta - \alpha = 0 \quad \rightarrow \quad \delta = \alpha$$

$$\delta - \alpha = 90^\circ \quad \rightarrow \quad \delta = 90 + \alpha$$

$$\delta + \alpha = 0 \quad \rightarrow \quad \delta = -\alpha$$

$$\delta + \alpha = 90 \quad \rightarrow \quad \delta = 90 - \alpha$$

Krivulje P_1 i P_2 nacrtane su na sl. 13. Razlika $P_1 - P_2$ daje gubitke. Za stabilnost je mjerodavna niža krivulja. Načelno se može zaključiti, da gubici u prijenosnom sistemu umanjuju granice statičke stabilnosti prijenosa.

1.2.6 Vanjska karakteristika

U prijenosnom sistemu prema slici 14a postaviti ćemo zahtjev $U_1 = \text{konst.}$, a E_1 će se mijenjati uzbuđom generatora po potrebi. U tu svrhu promatrat ćemo izraz za snagu

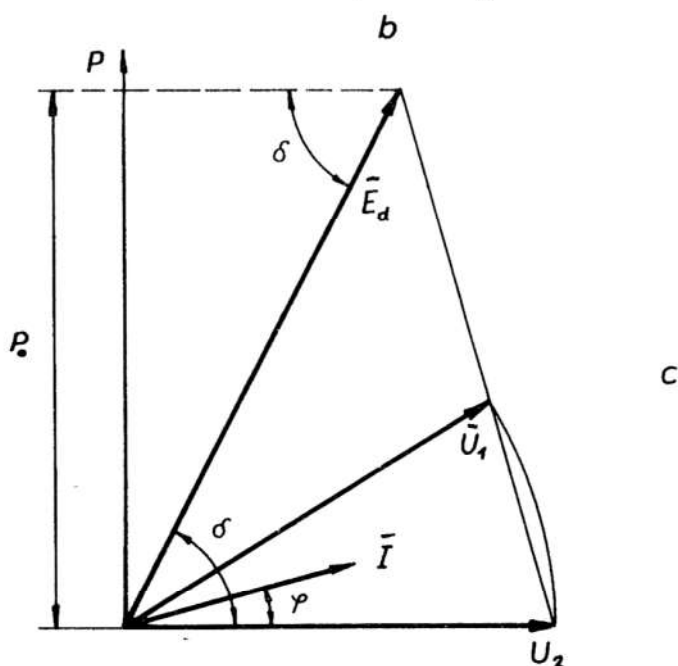
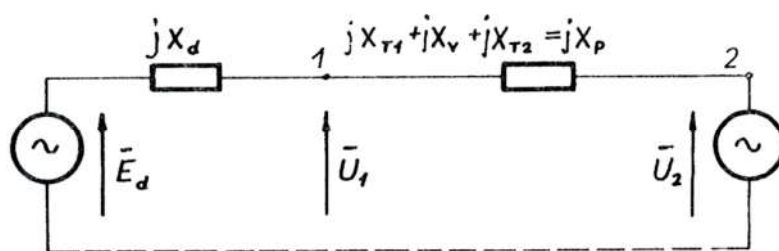
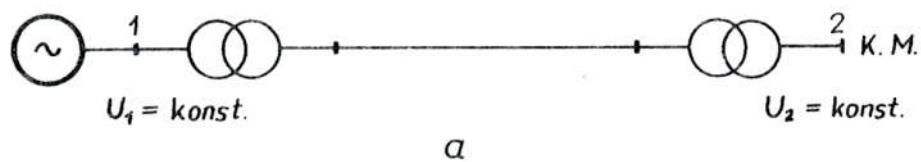
$$P = \frac{E_1 U_2}{X} \sin \delta = \frac{U_2}{X} E_1 \sin \delta = K E_1 \sin \delta \quad 1-21$$

Kao najjednostavniji slučaj uzet ćemo da, bez obzira na prenesenu snagu bude $U_1 = U_2$, pa vektorski dijagram ekvivalentne sheme sa slike 14b izgleda kao na slici 14c.

U imaginarnoj osi na sl. 14c možemo postaviti mjerilo za snagu.

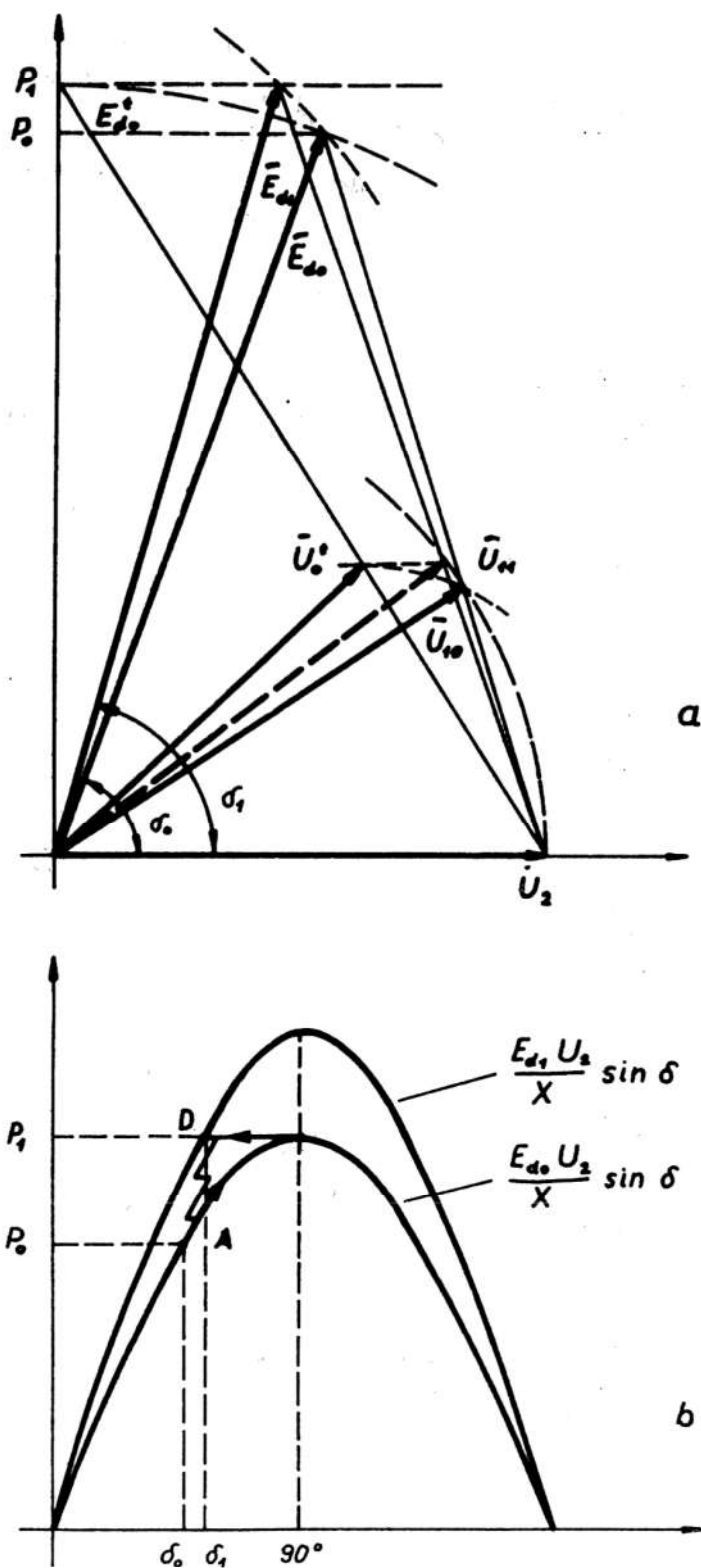
Ponovo ćemo nacrtati vektorski naponski dijagram. Početno stanje označit ćemo indeksom nula. Koristeći mjerilo za snagu možemo paralelno konstruirati karakteristiku snage $P_0 = f(\delta)$. Dakle, polazeći od početnog stanja, crtati ćemo paralelno dva dijagrama, (slika 15.a i 15.b).

Uzevši stanje P_0 , E_{10} i δ_0 kao početno, povećati ćemo snagu P uz $E_{10} = \text{konst.}$ do granice statičkog stabiliteta. To postićemo



Slika 14.- Prijenos izmedju generatora i krute mreže uz $U_1 = U_2$

povećanjem mehaničke snage pogonskog stroja, a da pri tome ne di-
ramo uzbuđu. U dijagramu $P = f(\delta)$ dolazimo do tjemena karakteristi-
ke, tj. do $\delta = 90^\circ$. Postižemo snagu $P_{\text{omax}} = P_1$. U naponskom dijagra-



Slika 15. - Povećanje djelatne snage prijenosa za sistem sa slike 14, uz uvjet $U_1 = U_2$

mu imamo pravokutni trokut. Napon U_{10} na stezaljkama generatora osjetno je pao na iznos U_0^+ .

Napon U_0^+ moramo sada podići na napon U_{11} , koji se nalazi na kružnici $U_2 = U_{10} = U_{11} = \text{konst.}$ Podizanje napona U_1 vrši se podizanjem uzbude generatora, a da pri tom ne utječemo na snagu pogonskog stroja. Na naponskom dijagramu vidimo da će U_{11} biti po apsolutnom iznosu jednak U_2 , ako uzbuda generatora dosegne vrijednost E_{d1} . U sustavu $P = f(\delta)$ to odgovara horizontalnom pomaku od $\delta = 90^\circ$ do $\delta_1 > \delta_0$ tj. na novu karakteristiku

$$P = \frac{E_{d1} U_2}{X} \sin \delta$$

Nova karakteristika je povoljnija, tj. $P_{\max 1} > P_{\max 0}$.

Od stanja nula na stanje jedan došli smo preko prekritne točke $P_{\max 0}$. U praksi su promjene opterećenja spore, pa nećemo dozvoliti da se dosegne kritična točka. Novo stanje će se postići postepenim povećavanjem snage pogonskog stroja uz istovremeno povećavanje uzbude, dakle pomicanjem duž jednog niza raznih karakteristika $P = f(\delta)$ uz stalno zadovoljavanje kriterija $U_1 = U_2$. Na slici 15.b taj proces je pokazan kao kretanje po nazubljenoj liniji.

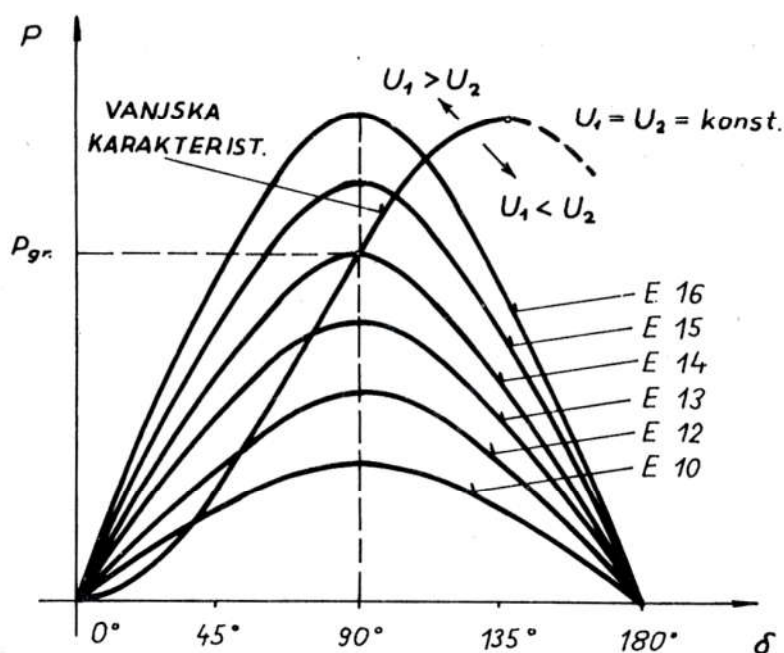
Zahvaljujući povećavanju uzbude generatora možemo postići osjetno veću snagu prijenosa, nego što se to moglo zaključiti iz izraza

$$P_{\max 0} = \frac{E_{d0} U_2}{X}$$

Uz uvjet $U_1 = U_2 = \text{konst.}$, pri promjeni opterećenja i uzbudi kretat će se elektromotorna sila E_1 generatora po kružnici. U dijagramu snaga dobit ćemo niz točaka za razna stanja ravnoteže, od kojih će svaka ležati na drugoj karakteristici $P = f(\delta)$. Ako opisani postupak proširimo na šire područje, dobit ćemo sliku 16.

Spojnicu svih točaka za uravnotežena stanja predstavlja vanjsku karakteristiku. Na mjestu gdje vanjska karakteristika siječe ver-

tikalu za $\delta = 90^\circ$ dostignuta je granica prijenosne snage uz promjenjivu uzbudu. Međutim, ako to opseg uzbude generatora dopušta, možemo pogon vršiti s nekim naponom $U_1 = \text{konst.} > U_2$, pa će se $P_{gr.}$ još više podignuti, jer nova vanjska karakteristika za taj slučaj leži lijevo od one za $U_1 = U_2$.



Slika 16. - Vanjska karakteristika

Prije prikazani način odredjivanja prijenosne moći prijenosnog sistema izmedju dvije mreže po metodi E. Clark u skladu je s ovim razmatranjima. Tamo smo, naime, postavili da mora biti $U_1 = k U_2$, a elektromotorne sile ekvivalentnih elektrana dobivene su kao rezultat upravo tog zahtjeva i nisu bile unaprijed odredjene.

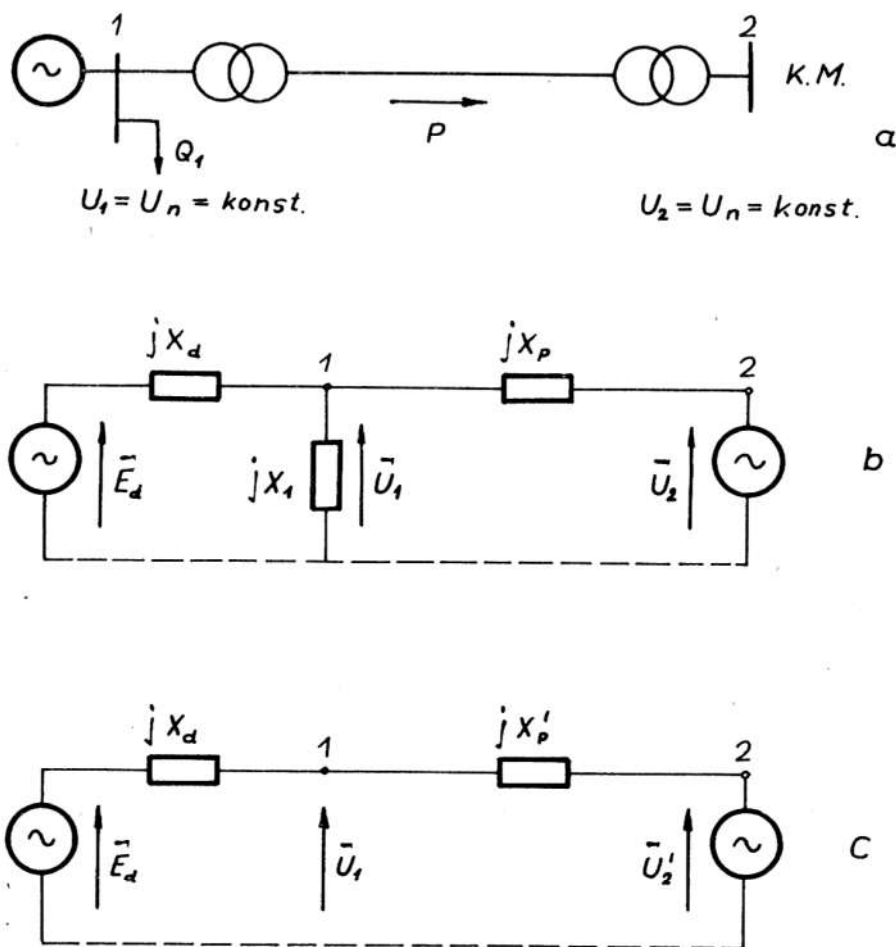
Ovim se je dakle pokazalo, iako uz mnoga zanemarenja, da je regulacija uzbude vrlo važan faktor u održavanju stabilnosti sinhronih strojeva priključenih na mrežu. Pošto smo promatrali statičke slučajeve, promjene su bile spore, pa je prema tome i

regulacija mogla biti spora. Osim toga regulacija uzbuđe je važan faktor u povećavanju granične prijenosne moći vodova s obzirom na statičku stabilnost.

Kao što je već rečeno, zbog sigurnosti neće se nikada do kraja iskoristiti mogućnosti koje daje statička stabilnost. Kut δ moramo u normalnom pogonu držati manji od 90° , kako bi kod poremećaja imali rezervu, koja će nam omogućiti stabilan rad kako za vrijeme, tako i neposredno nakon poremećaja.

1.2.7 Dodatno induktivno opterećenje izvora

Razmotrit ćemo ponovo slučaj uz uvjet konstantnog napona U_1 , s tim što ćemo na generatorske sabirnice priključiti neko induktivno opterećenje (slika 17a)



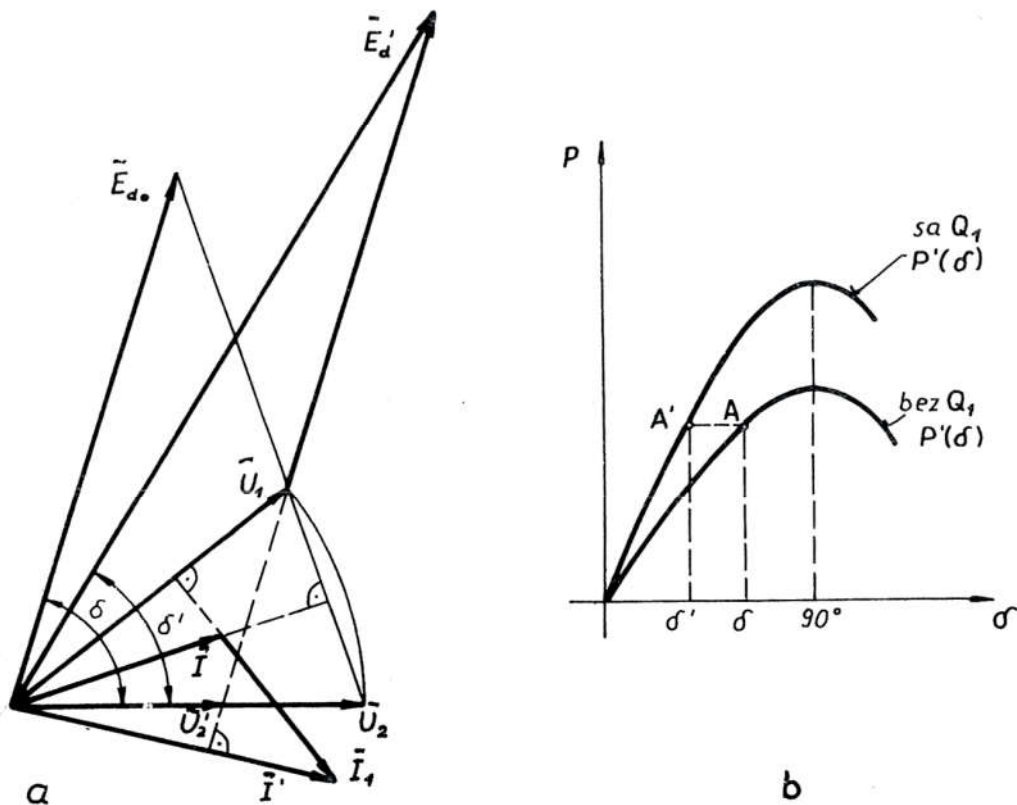
Slika 17. - Dodatno induktivno opterećenje izvora

Ekvivalentnu shemu sa slike 17b svedimo na model bez poprečnih grana (slika 17c), u kojemu su:

$$X_p' = \frac{X_1 X_p}{X_1 + X_p} \quad 1-22a$$

$$U_2' = U_2 \frac{X_1}{X_1 + X_p} \quad b$$

Iz relacije 1-22b se vidi da je fazni kut od U_2' jednak faznom kutu od U_2 . Ovo koristimo u crtanju vektorskog dijagrama na sl. 18a. Regulaciju podesimo tako da i u novom stanju bude ispunjen uvjet $U_1 = U_2$. Promjena elektromotorne sile bit će od E_{d0} na novu vrijednost E_d' .



Slika 18.- Dodatno induktivno opterećenje izvora, a) vektorski dijagram, b) krivulje snaga - kut

Izraz za snagu prije priključenog induktivnog opterećenja je:

$$P = \frac{E_d U_2}{X_d + X_p} \sin \delta \quad 1-23$$

Izraz za snagu nakon priključenog induktivnog opterećenja je:

$$P' = \frac{E'_d U'_2}{X_d + X'_p} \sin \delta', \quad 1-24$$

u kojem je:

$$E'_d > E_d \quad U'_2 < U_2 \quad X'_p < X_p \quad \delta' < \delta$$

Utjecaj povećane uzbude i smanjenog X_p je veći od smanjenja U_2 , pa je zato

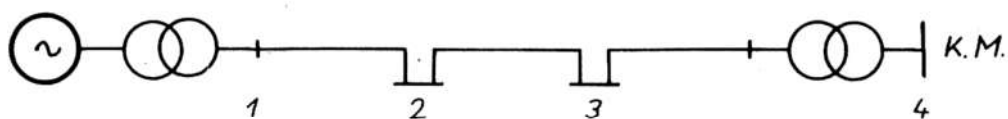
$$P'_{\max} > P_{\max}$$

Induktivno opterećenje dozvolilo nam je povećanje uzbude, a da se naponi na sabirnicama U_1 i U_2 nisu promijenili. Povećanje uzbude utrošeno je na svladavanje pada napona u sinhronoj reaktanciji generatora uslijed dodatne induktivne struje $\bar{I}_1$. Rezultat je pogon u točki A' na karakteristici $P'(\delta)$ (slika 18b), koji pruža veću sigurnost u pogledu statičke stabilnosti.

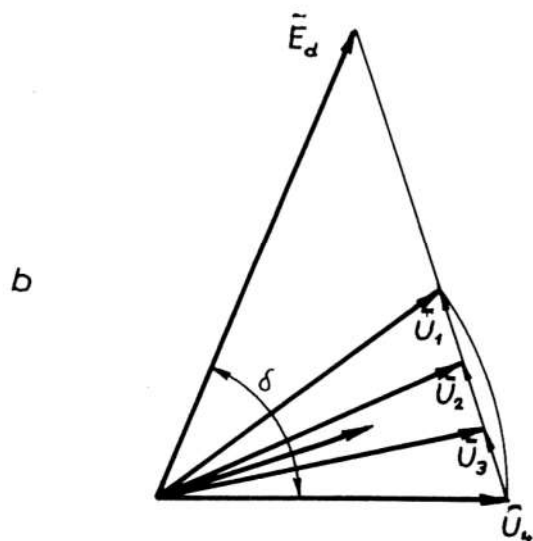
Dodatno kapacitivno opterećenje u točki 1 imalo bi obrnuti efekt. Isto tako će se nepovoljno odraziti na stabilnost uključivanje kondenzatorskih baterija u čvorove mreže. To je isti problem s kojim smo se sreli u 1.2.2 u razmatranju uzimanja u obzir kapaciteta vodova.

1.2.8 Podupiranje napona sinhronim kompenzatorima

Pretpostavimo prijenos na veću udaljenost od elektrane do mreže prema slici 19a uz zahtjev konstantnog napona na sabirnicama elektrane i to $U_1 = U_4$. Napon u čvorovima 2 i 3 će osjetno pasti, što se vidi iz naponskog dijagrama na sl. 19b.



a

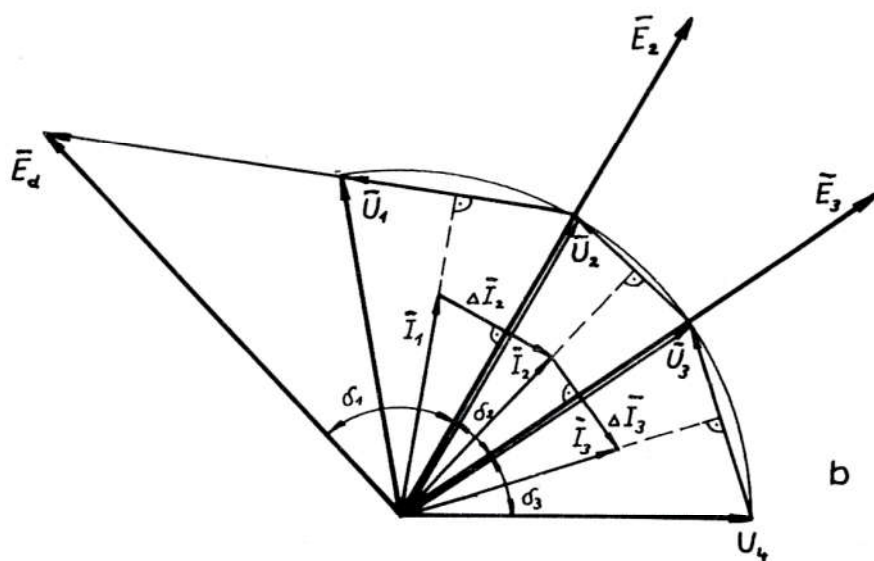
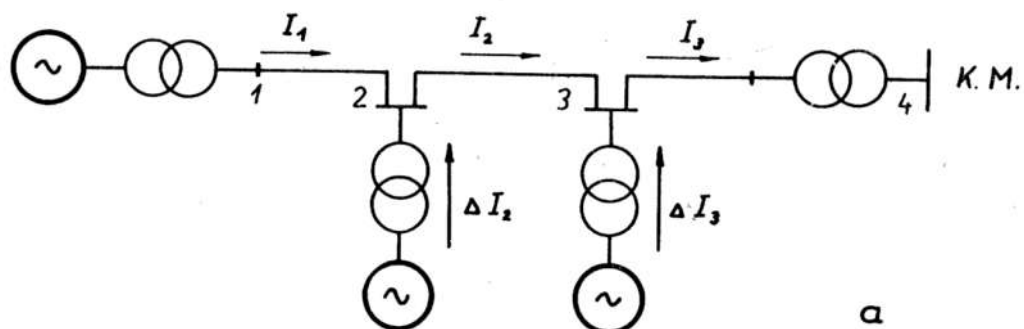


b

Slika 19.- Prijenos bez sinhronih kompenzatora

Pretpostavimo sada da je i u čvorovima 2. i 3. potrebno držati nazivni napon, tj. da je postavljen zahtjev $U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = U_n$. U tu svrhu u čvorovima 2. i 3. uključit ćemo sinhronne kompenzatore. Statička stabilnost će se mnogo povećati, osobito uz brzu i osjetljivu regulaciju napona svih strojeva. Sinhroni kompenzatori održavat će napone U_2 i U_3 konstantnima, jer mogu kontinuirano mijenjati proizvodnju reaktivne snage, i tako parirati

promjenama napona. Vektorski položaj elektromotorne sile kompenzatora poklapa se s položajem napona sabirnica, jer nema proizvodnje djelatne snage (slika 20).



Slika 20.- Prijenos sa slike 19a poduprt sinhronim kompenzatorima

Kompenzator mora moći proizvesti snagu $Q_{ind} = \sqrt{3} U I$. Za ocjenu statičke stabilnosti mjerodavni su, svaki posebno, kutovi δ_1 , δ_2 i δ_3 , pa ukupni kut između U_4 i E_d , dakle $\Sigma\delta$, može biti veći od 90° .

Primjer 1.3 Zadan je 220 kV prijenos prema slici 19a. Napon krute mreže $U_4 = 110$ kV. Podaci ostalih dijelova prijenosa jesu:

Generator: $U_n = 16,5$ kV
 $X_d = 100\%$
 $S_n = 3 \times 100$ MVA
 $\cos \phi_n = 0,8$

Transformator 1: $U_{n1}/U_{n2} = 225/16$
 $e_k = 10\%$
 $S_n = 3 \times 100$ MVA

Transformator 4: $U_{n1}/U_{n2} = 220/110$
 $e_k = 12\%$
 $S_n = 1 \times 300$ MVA

Dionica voda 1-2: $\ell = 90$ km

Dionica voda 2-3: $\ell = 140$ km

Dionica voda 3-4: $\ell = 130$ km

Zadatak glasi:

- Izračunaj napone U_2 i U_3 ako se prenosi maksimalna djelatna snaga, uz uvjet da se na sabirnicama elektrane održava napon 245 kV!
- Koliki su naponi U_2 i U_3 ako se uopće ne prenosi djelatna snaga, a na sabirnicama elektrane održava se napon 245 kV?
- Kolika se maksimalna djelatna snaga može prenijeti uz uvjet da je na sabirnicama elektrane napon 220 kV? Koliki su tada naponi U_2 i U_3 ?

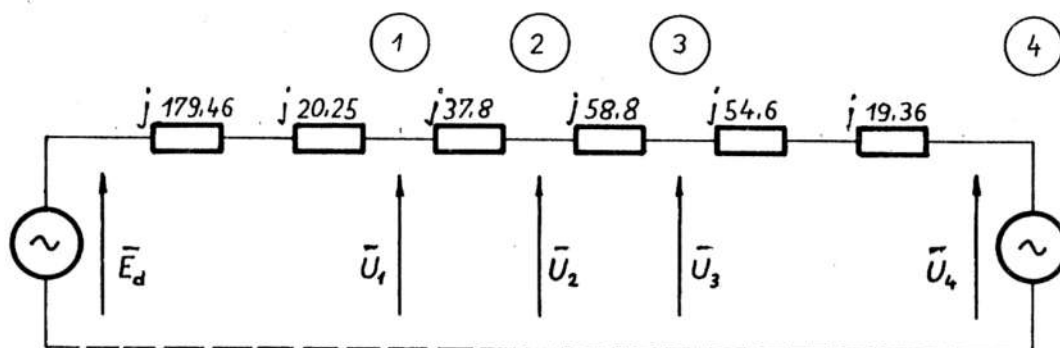
Zadatak ćemo riješiti u metodi otpora, s tim što ćemo cijelu mrežu svesti na naponsku razinu 220 kV.

Generator:
$$X_d = \frac{100}{100} \frac{16,5^2}{300} \left(\frac{225}{16}\right)^2 = 179,46 \ \Omega$$

Transformator 1: $X_{T1} = \frac{12}{100} \frac{225^2}{300} = 20,25 \, \Omega$

Transformator 4: $X_{T4} = \frac{12}{100} \frac{220^2}{300} = 19,36 \, \Omega$

Na slici 21. nacrtana je ekvivalentna shema zadanog prijenosa.



Slika 21.- Ekvivalentna shema zadanog prijenosa

a) Iz dijagrama E. Clark (slika 22a), očitamo

$$E_d = 468,5 \, \text{kV}$$

$$U_1 = 245 \, \text{kV}$$

$$U_2 = 218 \, \text{kV}$$

$$U_3 = 201,9 \, \text{kV}$$

$$U_4 = 220 \, \text{kV}$$

Sada možemo izračunati:

$$P_{\max} = \frac{220 \cdot 468 \cdot 5}{370,27} = 278,4 \, \text{MW}$$

Gornja snaga je teoretski maksimalna snaga, koja se uz zadane uvjete može prenijeti od elektrane do krute mreže. Ako između E_d i U_4 ne dozvolimo kut veći od 30° , maksimalna snaga prijenosa iznositi će polovinu teoretski dozvoljene maksimalne snage

$$P_{\max} = 139,2 \text{ MW}$$

b) Vektorski dijagram na slici 22b pokazuje električne prilike za ovaj slučaj. Možemo ga lako riješiti računski.

Struja je čisto induktivna, jer nema prijenosa djelatne snage.

$$I = \frac{(245 - 220) 10^3}{\sqrt{3} \cdot 170,56} = 84,7 \text{ A}$$

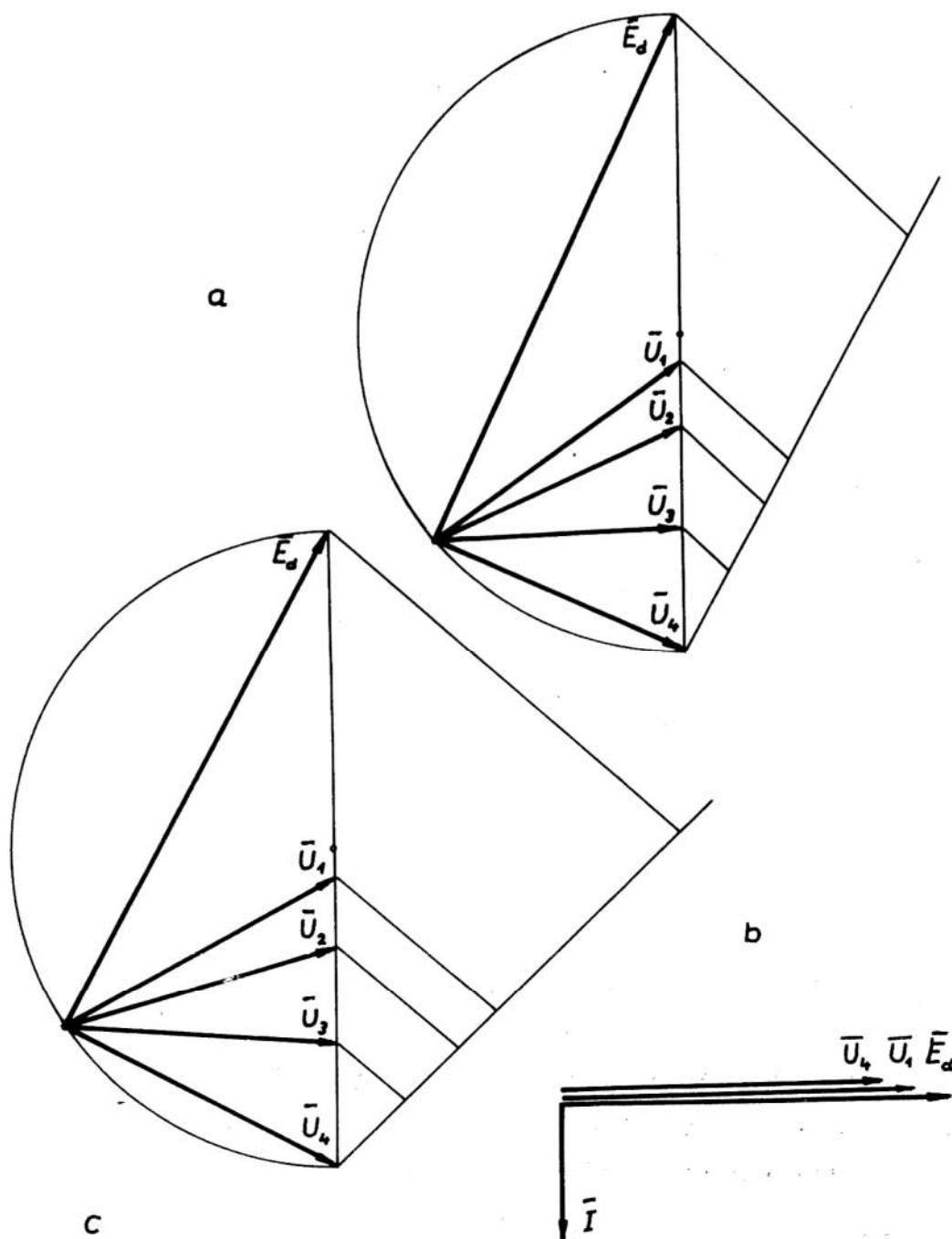
Računanjem padova napona dobijemo

$$\begin{aligned} E_d &= 274,3 \text{ kV} \\ U_1 &= 245 \text{ kV} \\ U_2 &= 239,5 \text{ kV} \\ U_3 &= 230,9 \text{ kV} \\ U_4 &= 220 \text{ kV} \end{aligned}$$

Usporedba s rezultatima u a) pokazuje koliko prijenos djelatne snage obara naponske prilike duž prijenosa između 1 i 4, a isto tako utjecaj prijenosa djelatne snage na kut među naponima.

c) Ovaj slučaj je nepovoljniji od slučaja a). Iz dijagrama E. Clark (slika 22c) može se očitati:

$$\begin{aligned} E_d &= 403,3 \text{ KV} \\ U_1 &= 220 \text{ kV} \\ U_2 &= 201,7 \text{ kV} \end{aligned}$$



Slika 22,- Naponski dijagrami pogonskih slučajeva a, b i c iz primjera 1.3

$$U_3 = 194,8 \text{ KV}$$

$$U_4 = 220 \text{ kV}$$

Teoretski maksimalna snaga prijenosa iznosi

$$P_{\max} = \frac{403,3}{370,27} \frac{220}{220} = 239,6 \text{ MW}$$

dok će uz dozvoljeni kut između E_d i U_4 od 30° iznositi samo

$$P_{\max} = 119,8 \text{ MW}$$

Primjer 1.4 Prijenos iz primjera 1.3 poduprijet ćemo sinhronim kompenzatorima u 2 i u 3.

Zadatak glasi:

a) Koja se teotetski maksimalna snaga može prenijeti od elektrane do krute mreže, uz uvjet da je

$$U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = 220 \text{ kV}$$

b) Da li se uz uvjet:

$$U_2 = U_3 = U_4 = 220 \text{ kV}$$

može prenijeti snaga za koju je elektrana gradjena?

c) Da li kompenzatori slijedećih performansi mogu udovoljiti zahtjevima zadanog prijenosa?

Kompenzator:

$$U_n = 10 \text{ kV}$$

$$X_d = 180\%$$

$$S_n = 50 \text{ MVA}$$

Transformator: $U_{n1}/U_{n2} = 220/10$
 $X_d = 10\%$
 $S_n = 50 \text{ MVA}$

Nacrtaj ekvivalentnu shemu prijenosa s kompenzatorima u 2 i 3!

Rješenje:

a) Promatrajmo mogućnost prijenosa pojedinih dionica. Pod dionicom podrazumijevamo prijenos između dva sinhrona stroja. Veličinu prijenosa djelatne snage određuje kut između elektromotornih sila, iznosi elektromotornih sila i odgovarajuće reaktancije.

Uloga je sinhronog kompenzatora da na sabirnicama postrojenja održava zadani napon. S obzirom da u mrežu daje isključivo reaktivnu snagu, napon na sabirnicama postrojenja je u fazi s elektromotornom silom stroja. Upravo zato možemo U_2 i U_3 tretirati kao elektromotorne sile, što mnogo olakšava proračun.

Iz dijagrama E. Clark na slici 23a određujemo E_d kod prijenosa maksimalne snage na dionici generator-kompenzator u 2.

$$E_d = 754,3 \text{ kV}$$

Sada možemo izračunati snagu

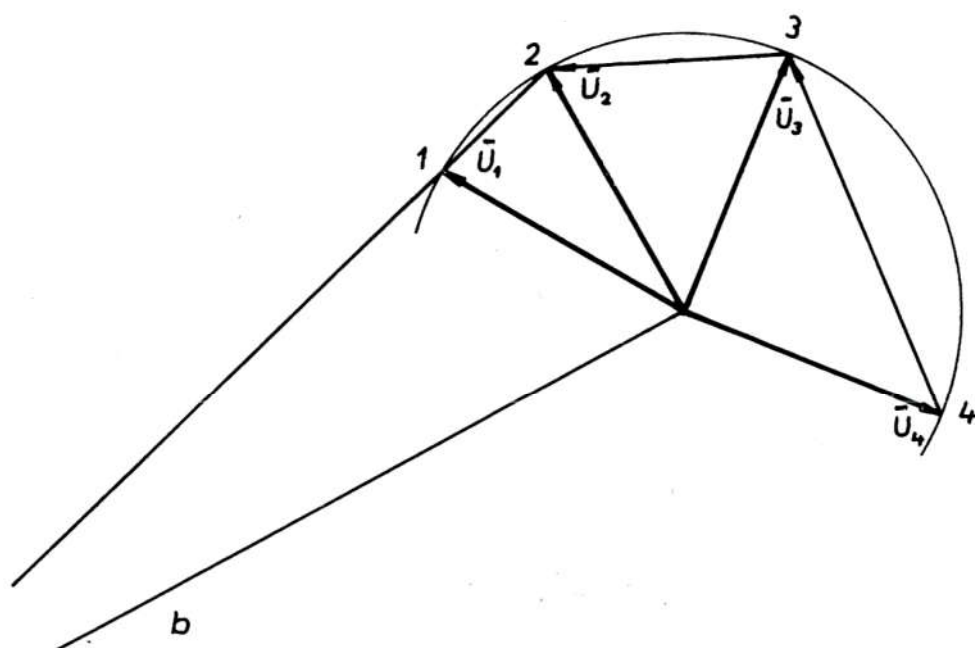
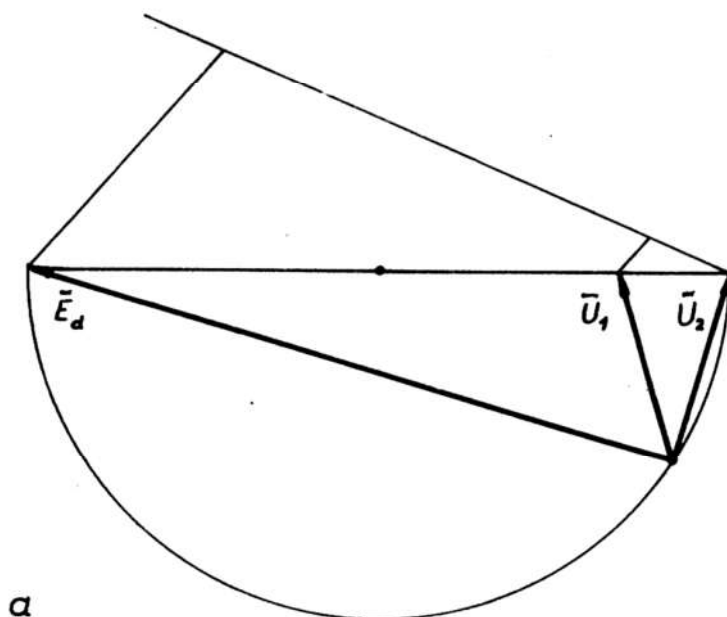
$$P_{\max} = \frac{754,3}{237,51} \cdot 220 = 698,7 \text{ MW}$$

Na dionici između kompenzatora priključenih u 2 i 3 možemo prenijeti:

$$P_{\max} = \frac{220^2}{58,6} = 823,1 \text{ MW}$$

Na dionici između kompenzatora u 3 i krute mreže možemo prenijeti:

$$P_{\max} = \frac{220^2}{73,96} = 654,4 \text{ MW}$$



Slika 23.- Naponski vektorski dijagrami iz zadatka 1.4,
ako se prenosi $P_{\max}$

Mjerodavna je najmanja snaga koju jednom od dionica možemo prenijeti, a to je 654,4 MW. Pri prijenosu ove snage iznosi kut između U_2 i U_3 :

$$\sin \delta_{2-3} = \frac{654,4 \cdot 58,8}{220^2} = 0,795$$

$$\delta_{2-3} = 52,5^\circ,$$

dok je kut između U_1 i U_2 :

$$\sin \delta_{1-2} = \frac{654,4 \cdot 37,8}{220^2} = 0,511$$

$$\delta_{1-2} = 30,7^\circ$$

Na slici 23b nacrtan je vektorski dijagram za prijenos $P_{\max}$.

b) Elektrana je građena za snagu:

$$P_n = S_n \cos \phi_n = 300 \cdot 0,8 = 240 \text{ MW}$$

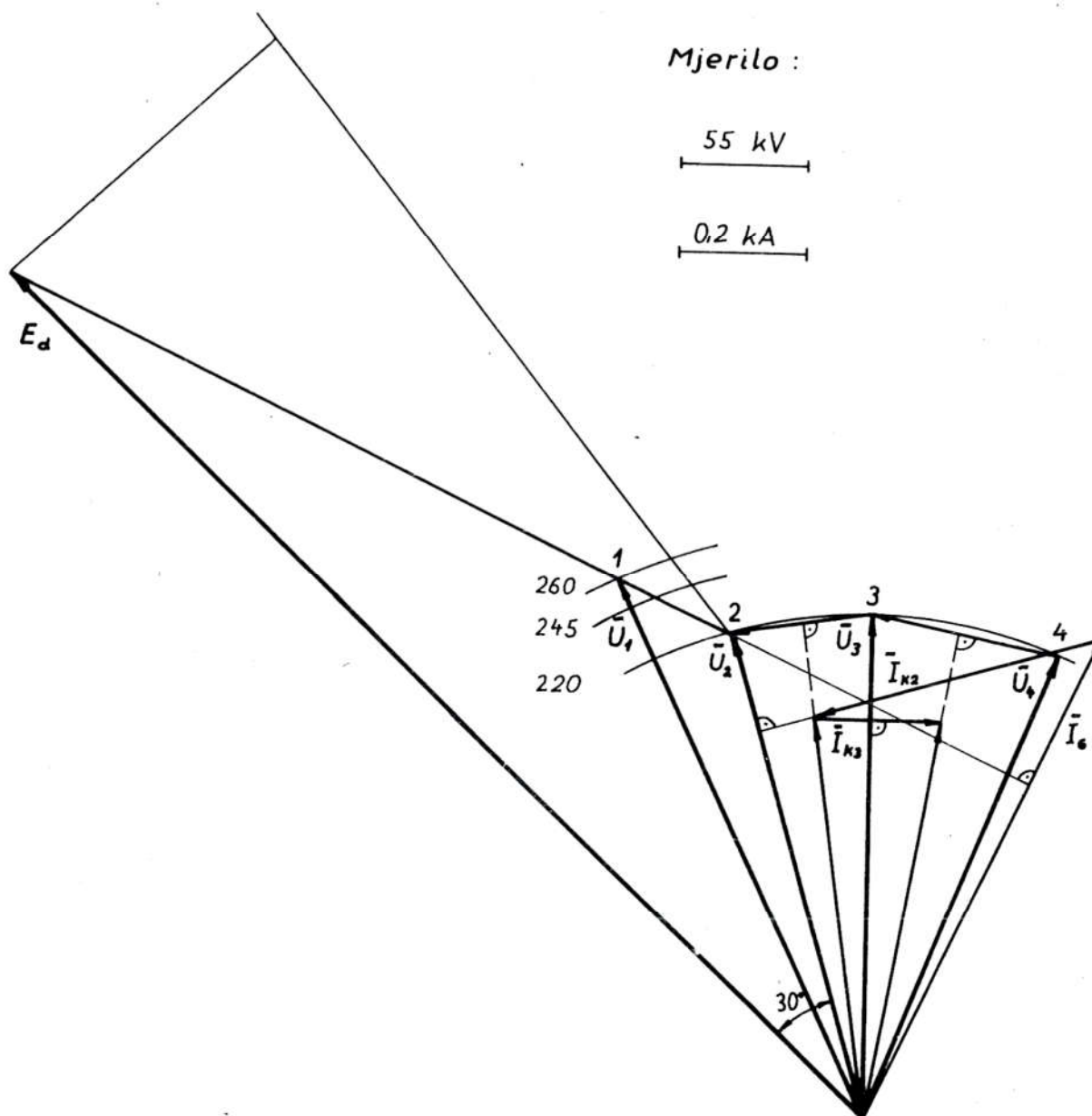
Istražit ćemo prijenos ove djelatne snage uz uvjet da kut između elektromotornih sila strojeva ne prelazi 30° . U relaciji

$$P = \frac{E_d U_2}{X} \sin \delta$$

nepoznata je E_d . Možemo je izračunati

$$E_d = \frac{240 \cdot 237,51}{220 \cdot 0,5} = 518,2 \text{ kV}$$

Nacrtat ćemo naponski dijagram, kako je to učinjeno na slici 24. i očitati napon U_1 :



Slika 24.- Naponski i strujni vektorski dijagram iz zadatka 1.4, ako se prenosi snaga 240 MW

$$U_1 = 259,6 \text{ kV}$$

Kut između U_2 i U_3

$$\sin \delta_{2-3} = \frac{240 \cdot 58,8}{220^2} = 0,2916$$

$$\delta_{2-3} = 16,95^\circ$$

Kut između U_3 i U_4

$$\sin \delta_{3-4} = \frac{240 \cdot 73,96}{220^2} = 0,3669$$

$$\delta_{3-4} = 21,53^\circ$$

Radi previsokog napona U_1 (viši od 245 kV), ovakav pogon nije moguć.

c) Izračunajmo reaktancije:

$$\text{Kompenzator: } X_d = \frac{180}{100} \frac{10^2}{50} \left(\frac{220}{10}\right)^2 = 1742$$

$$\text{Transformator: } X_T = \frac{10}{100} \frac{220^2}{50} = 96,8$$

U dijagramu na slici 24 očitajmo struje kompenzatora

$$I_{k2} = 475 \text{ A kap.}$$

$$I_{k3} = 200 \text{ A ind.}$$

a napone na stezakljakama kompenzatora izračunajmo:

$$U_{k2} = 220 - \sqrt{3} \cdot 96,8 \cdot 475 = 140,5 \text{ kV}$$

$$U_{k3} = 220 + \sqrt{3} \cdot 96,8 \cdot 200 = 253,5 \text{ kV}$$

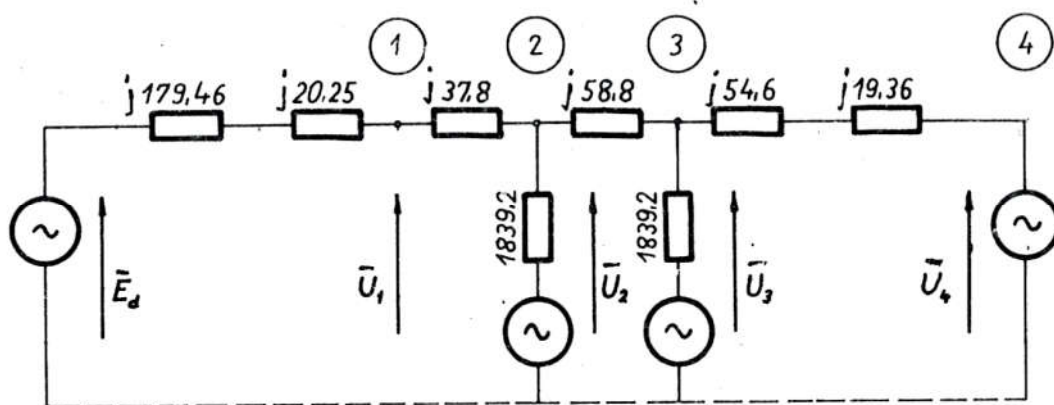
Kompensatori daju u mrežu snagu

$$S_{k2} = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 475 = 180,8 \text{ MVar kap.}$$

$$S_{k3} = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 200 = 76,1 \text{ MVar ind.}$$

Kompensatori su preopterećeni.

Na slici 25 nacrtana je ekvivalentna shema prijenosa.



Slika 25.- Ekvivalentna shema prijenosa s kompenzatorima u 2 i 3

Primjer 1.5 U primjeru 1.4 možemo smanjiti napon U_1 ako na sabirnice elektrane, tj. u 1 priključimo induktivno opterećenje. Ovo induktivno opterećenje ujedno će rasteretiti kompenzator u 2 davanja kapacitivne snage u mrežu.

Na slici 26 nacrtana je ekvivalentna shema prijenosa s induktivnim opterećenjem u 1 i kompenzatorima u 2 i 3.

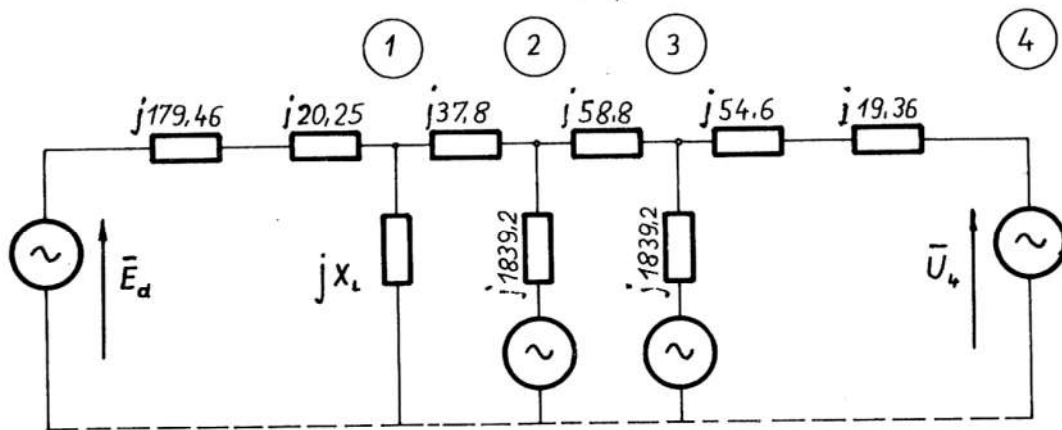
a) Da li je moguće uz prijenos snage 240 MW od elektrane do krute mreže zadovoljiti uvjete

$$U_1 = 245 \text{ kV}$$

$$U_2 = U_3 = U_4 = 220 \text{ kV}$$

b) Treba izračunati snagu prigušnice i kontrolirati snage kompenzatora.

Rješenje:



Slika 26.- Ekvivalentna shema prijenosa s prigušnicom u 1 i kompenzatorima u 2 i 3

a) Poznata je djelatna snaga koja se prenosi izmedju U_1 i U_2 , a iznosi 240 MW. Poznati su naponi $U_1 = 245 \text{ kV}$ i $U_2 = 220 \text{ kV}$. Izračunajmo kut:

$$\sin \delta_{1-2} = \frac{240 \cdot 37,8}{245 \cdot 220} = 0,1683$$

$$\delta_{1-2} = 9,69^\circ$$

Nacrtajmo vektorski dijagram, sl. 27, očitamo pad napona između 1 i 2 i izračunajmo struju koja stvara ovaj pad napona

$$\Delta U_{1-2} = 42,7 \text{ kV}$$

$$I = \frac{42,7}{\sqrt{3} \cdot 37,8} = 0,653 \text{ kA}$$

Ova struja je ujedno struja generatora i okomita je na pravac pA. Izračunajmo pad napona bloka

$$\Delta U_{1-A} = 0,653 \cdot \sqrt{3} \cdot 199,71 = 225,6 \text{ kV}$$

Dobili smo točku A, pa možemo nacrtati i očitati E_{dA} i kut između E_{dA} i U_2 . Ovaj kut je veći od 30° i ne odgovara našim zahtjevima.

Nacrtajmo pravac pE kroz O pod kutem od 30° prema U_2 . Ovo je kut δ_{0-2} .

Nacrtajmo pravac pAB kroz točku A paralelan s vektorom U_1 .

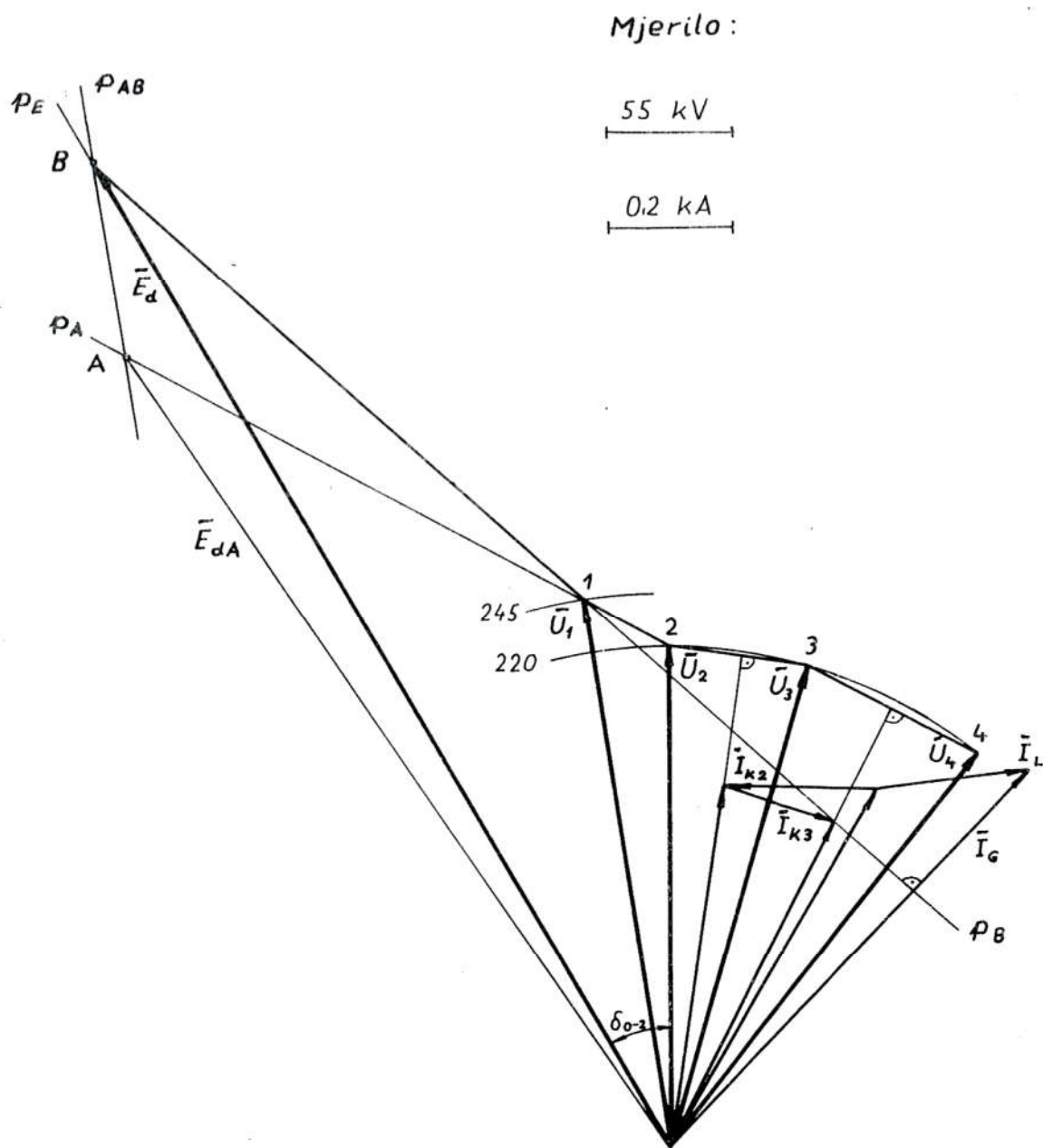
Struju prigušnice pokriva struja generatora. Ova komponenta struje generatora okomita je na U_1 , pa je komponenta pada napona od ove struje paralelna s vektorom napona U_1 i nalazi se na pravcu pAB.

Sjecište pravca pAB i pravca pE daje traženu točku B. U točki B nalazi se vrh vektora E_d .

Nacrtajmo pravac pB koji prolazi kroz 1 i B. Okomito na ovaj pravac nacrtajmo struju generatora I_G , tako da kroz vrh vektora struje I povučemo okomicu na U_1 . Dobili smo struje I_L i I_G . Obje struje smo mogli i izračunati iz padova napona. Ostale struje također možemo dobiti grafički i analitički. Tako je struja kompenzatora u 2 okomita na U_2 , a struja kompenzatora u 3 okomita na U_3 .

Dakle:

$$\bar{I}_G = \bar{I} + \bar{I}_L$$



Slika 27 - Vektorski dijagram napona i struja pri prijenosu s prigušnicom u 1 i kompenzatorima u 2 i 3.

$$\bar{I}_{2-3} = \bar{I} + \bar{I}_{k2}$$

$$\bar{I}_{3-4} = \bar{I}_{2-3} + \bar{I}_{k3}$$

Struje iznose

$$I_G = 0,82 \text{ kA}$$

$$I = 0,65 \text{ kA}$$

$$I_L = 0,25 \text{ kA}$$

$$I_{k2} = 0,24 \text{ kA kap.}$$

$$I_{2-3} = 0,58 \text{ kA}$$

$$I_{k3} = 0,185 \text{ kA ind.}$$

$$I_{3-4} = 0,58 \text{ kA}$$

Naponski uvjeti su zadovoljeni.

b) Snaga koju uzima prigušnica je:

$$S_L = \sqrt{3} \cdot 245 \cdot 0,25 = 106 \text{ MVar}_{\text{ind.}}$$

Snaga koju daje kompenzator u 2 je:

$$S_{k2} = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,24 = 91,3 \text{ MVar}_{\text{kap.}}$$

Snaga koju daje kompenzator u 3 je:

$$S_{k3} = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,185 = 70,4 \text{ MVar}_{\text{ind.}}$$

Snaga predviđenih kompenzatora je premala i treba priključiti kompenzatore odgovarajuće veće nazivne snage.

Primjer 1.6 Prijenosni sistem iz primjera 1.4 ojačat ćemo tako, da izgradimo dvostruke vodove.

- a) Da li je moguć prijenos snage od 240 MW uz uvjet da napon U_1 nije viši od 245 kV, a ostali naponi su 220 kV. Koliki je tada napon U_1 ?
- b) Kolike snage daju kompenzatorska postrojenja?

Rješenje:

a) Na slici 28. nacrtana je ekvivalentna shema prijenosa, a na slici 29. strujni i naponski dijagram.

Nacrtajmo vektorski dijagram za slučaj da napon U_1 iznosi 220 kV. Dobili smo točku 1'. Na pravcu pA', koji prolazi kroz točke 2 i 1', nadjimo iz omjera reaktancija točku A'. Kut ove elektromotorne sile i napona U_2 veći je od 30° i ne zadovoljava naš uvjet da kut medju EMS strojeva ne bude veći od 30° .

Nacrtajmo vektorski dijagram za slučaj da napon U_1 iznosi 245 kV. Dobili smo točku 1". Na pravcu pA", koji prolazi kroz 2 i 1", nadjimo točku A". Povucimo pravac A'-A".

Nacrtajmo pravac pE pod kutem od 30° prema U_2 . Sjecište pravca pE i pravca A'-A" daje točku B. U ovoj točki je vrh elektromotorne sile koju tražimo. Točku 1. ćemo naći kao sjecište pravaca 2-B i 1'-1".

U točki 1 nalazi se vrh vektora napona U_1 .

Okomito na pravac pB nalazi se smjer struje generatora. Ovu struju izračunajmo iz poznatih padova napona i reaktancija. Analitički ili grafički ćemo lako dobiti ostale struje:

$$I_G = 0,71 \text{ kA}$$

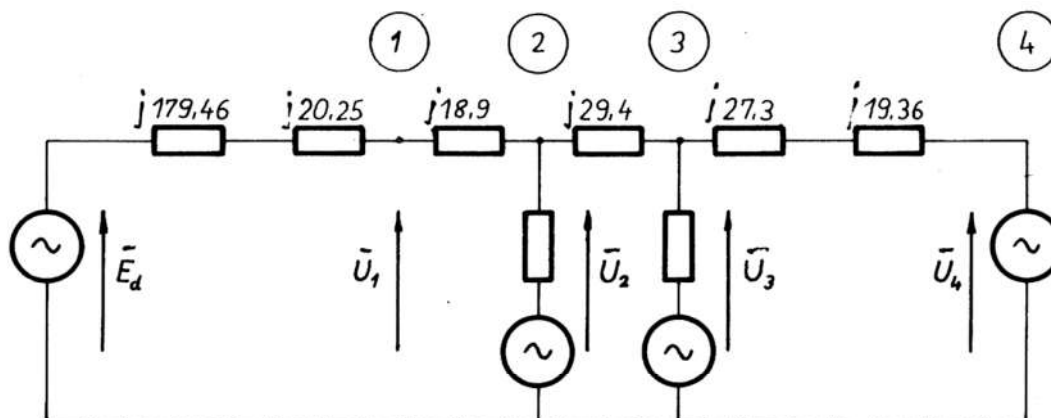
$$I_{k2} = 0,37 \text{ kA}$$

$$I_{2-3} = 0,58 \text{ kA}$$

$$I_{k3} = 0,1 \text{ kA}$$

$$I_{3-4} = 0,57 \text{ kA}$$

$$U_1 = 231 \text{ kV}$$



Slika 28. - Ekvivalentna shema prijenosa iz zadatka 1.6

b) Snage kompenzatorskih postrojenja

$$S_{k2} = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,37 = 140,8 \text{ MVA kap.}$$

$$S_{k3} = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,1 = 38,1 \text{ MVA ind.}$$

Kompenzatorsko postrojenje u 2 ne zadovoljava.

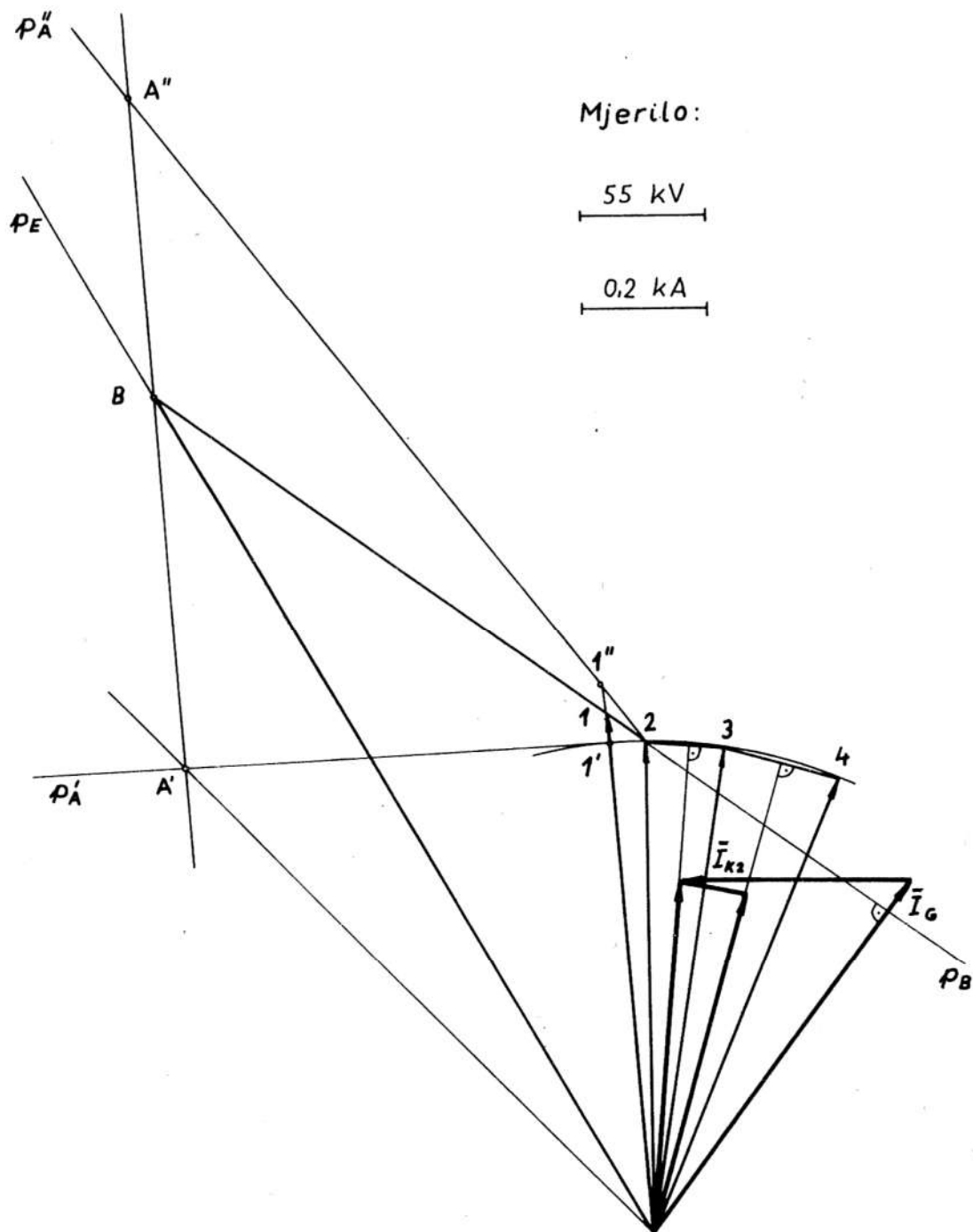
Primjer 1.7 Ispitajmo prijenos iz primjera 1.6.

a) Koju snagu možemo prenijeti bez intervencije u čvorovima 2 ili 3, uz uvjet da je:

$$U_1 = 245 \text{ kV}$$

$$U_4 = 220 \text{ kV}$$

Koliki su naponi U_2 i U_3 ?



Slika 29. - Vektorski dijagram napona i struja prijenosa
iz primjera 1.6

b) na sabirnice 3 priključimo kondenzatorsku bateriju. Koja je potrebna snaga ove baterije, ako želimo prenositi snagu 120 MW uz uvjet da je :

$$U_1 = U_3 = 245 \text{ KV}$$

$$U_4 = 220 \text{ kV}$$

Koliki je napon U_2 u ovom slučaju?

Da li kut između elektromotornih sila strojeva zadovoljava?

Rješenje:

a) Na slici 30. nacrtan je dijagram ovog prijenosa.

Nacrtajmo U_4 i pod željenim kutem pravac pE . U ovom slučaju to je kut od 30° .

Nacrtajmo pravac koji dijeli ukupni pad napona u omjeru reaktancija između U_4 i U_1 i U_1 i E_d . Ovaj pravac dobijemo tako da na pravcu pE odaberemo dvije proizvoljne točke, spojimo ih s vrhom vektora U_4 i ove spojnice podijelimo na odgovarajuće omjere. Dobi-
li smo točke A i B. Pravac pAB siječe kružnicu U_1 u točki 1. Iz 4 kroz 1 povučemo pravac koji siječe pravac pE u točki koja je vrh vektora E_d .

Očitajmo iz dijagrama

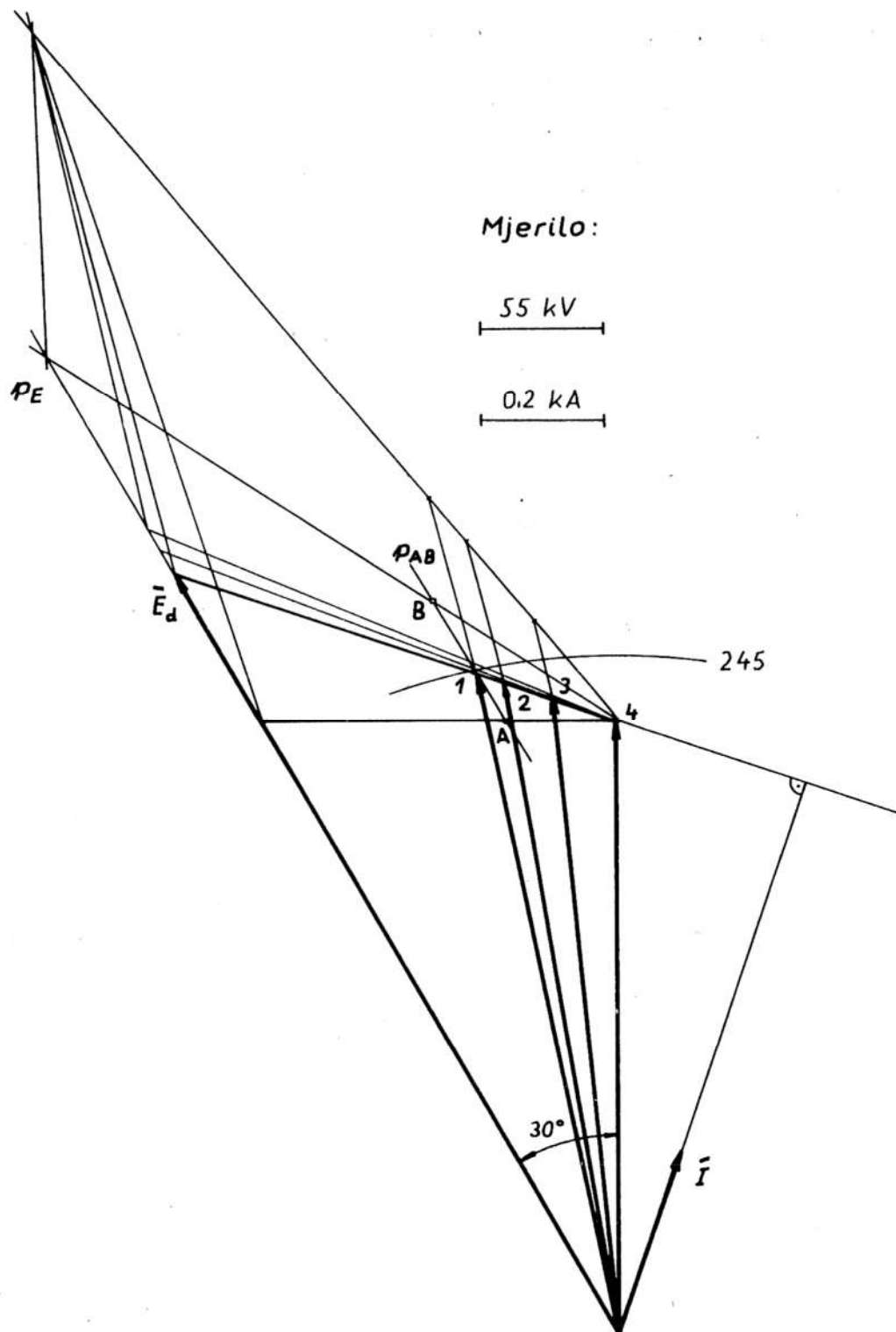
$$E_d = 316 \text{ kV}$$

$$U_2 = 237,6 \text{ kV}$$

$$U_3 = 228,2 \text{ kV}$$

Izračunajmo snagu:

$$P = \frac{316 \cdot 220}{294,67} 0,5 = 118 \text{ MW}$$



Očitajmo pad napona na reaktancijama

$$\Delta U = 165 \text{ kV}$$

Izračunajmo struju. Ova struja je okomita na ΔU

$$I = \frac{165}{\sqrt{3} \cdot 294,67} = 0,324 \text{ kA}$$

b) Na slici 31a nacrtana je ekvivalentna shema zadanog prijenosa. Iznos X_C je nepoznat i treba ga odrediti. Na slici 31b nalazi se transfigurirana ekvivalentna shema sa slike 31a u sistem s dva sinhrona stroja.

Izračunajmo kuteve:

$$\sin \delta_{3-4} = \frac{120 \cdot 46,66}{220 \cdot 245} = 0,1039$$

$$\delta_{3-4} = 5,96^\circ$$

$$\sin \delta_{1-3} = \frac{120 \cdot 48,3}{245^2} = 0,0967$$

$$\delta_{1-3} = 5,54^\circ$$

Nacrtajmo vektorski dijagram (slika 32). Očitajmo padove napona

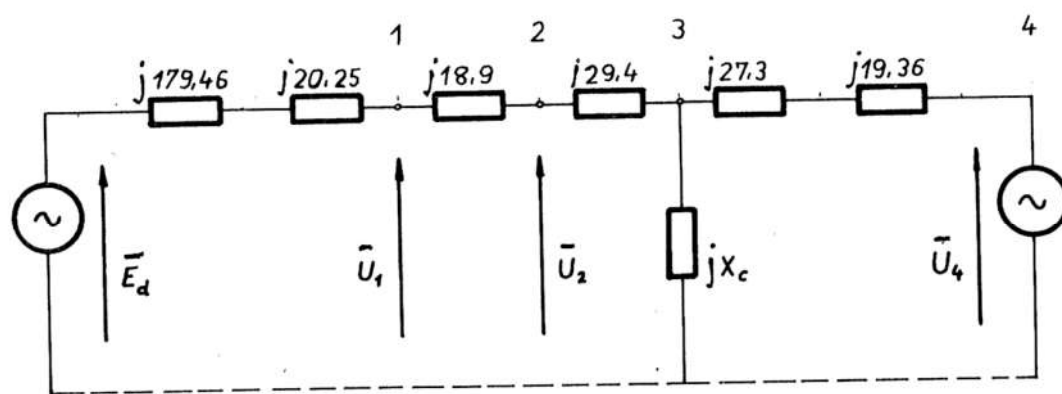
$$\Delta U_{3-4} = 33,7 \text{ kV}$$

$$\Delta U_{1-3} = 22 \text{ kV}$$

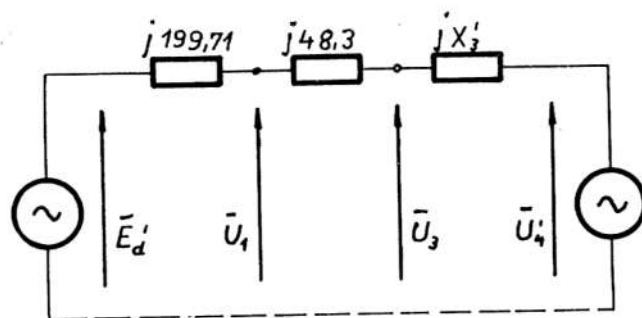
Izračunajmo struje:

$$I_{3-4} = \frac{33,7}{\sqrt{3} \cdot 46,66} = 0,395 \text{ kA}$$

$$I_{1-3} = \frac{22}{\sqrt{3} \cdot 48,3} = 0,263 \text{ kA}$$



a



b

Slika 31. - Ekvivalentne sheme prijenosa iz zadatka 1.7b

Izračunajmo pad napona u bloku generator-transformator

$$U_{0-1} = \sqrt{3} \cdot 0,263 \cdot 199,71 = 95,5 \text{ kV}$$

Unesimo gornji pad napona u vektorski dijagram i očitajmo:

$$E_d = 246 \text{ kV}$$

$$\delta_{0-4} = 33^\circ$$

Očitajmo struju koju daje kondenzatorska baterija

$$I_{kb} = 0,29 \text{ kA ind.}$$

odnosno uzima 0,29 kA kap.

Izračunajmo snagu kondenzatorske baterije

$$S_{kb} = \sqrt{3} \cdot 245 \cdot 0,29 = 122,9 \text{ MVar},$$

i konačno:

$$X_C = - \frac{245}{\sqrt{3} \cdot 0,29} = - 488,3 \text{ } \Omega$$

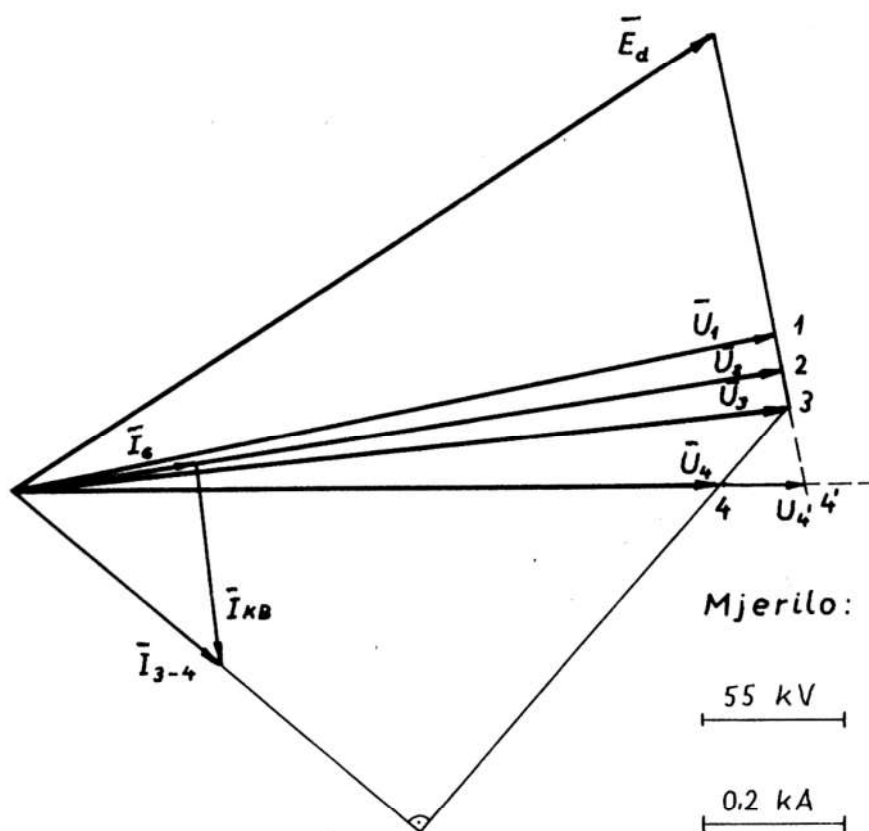
$$X_3' = \frac{(- 488,3) \cdot 46,66}{- 441,7} = 51,6 \text{ } \Omega$$

Kontrola !

Izračunajmo U_4' ili očitajmo U_4' u dijagramu i to tako da produžimo pravac 1-3 do pravca na kojem leži U_4 :

$$U_4' = 248,6 \text{ kV}$$

$$\sin \delta_{0-4} = 0,549$$



Slika 32.- Vektorski dijagram napona i struja za prijenos prema zadatku 1.7b

Izračunajmo snagu:

$$P = \frac{248,6 \cdot 264}{299,6} 0,549 = 120 \text{ MW}$$

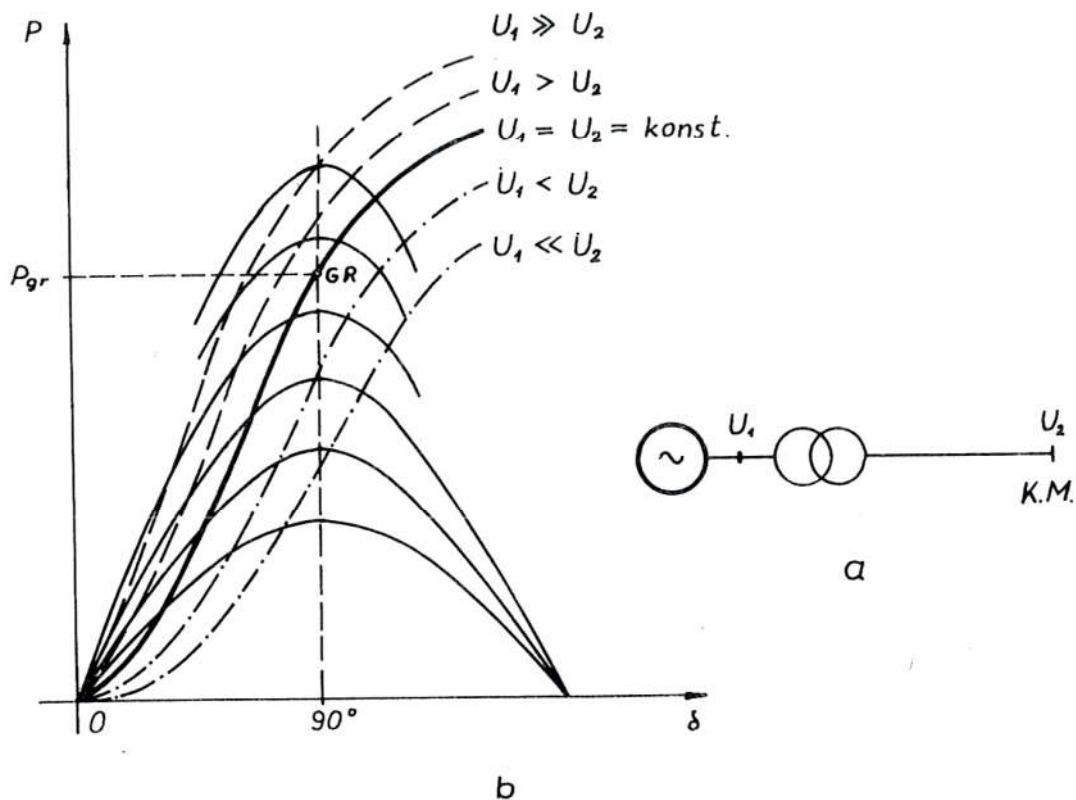
Usporedba vektorskih dijagrama sa slika 30 i 32 pokazuje da priključenje kondenzatorske baterije:

- poboljšava naponske prilike,
- povećava predaju induktivne snage krutoj mreži,
- smanjuje E_d (uzbuda generatora),
- vrlo malo utječe u smislu pogoršanja na stabilnost.

1.2.9 Umjetna statička stabilnost

Pri razmatranju koje nas je dovelo do pojma "vanjske karakteristike", konstruirane na bazi $U_1 = U_2 = \text{konst.}$, pretpostavili smo da je:

- najprije došlo do povećanja opterećenja,
- zbog toga povećan kut δ ,
- zbog toga smanjen napon U_1 ,
- uspostavljeno novo stanje na krivulji $P = f(\delta)$ uz uvjet da je $P_1 < P_{\text{max}}$, odnosno $\delta < 90^\circ$
- ručno povećana uzbuda, dok se napon U_1 nije vratio na prvobitnu vrijednost (rezultat je nova krivulja $P = f(\delta)$),
itd.



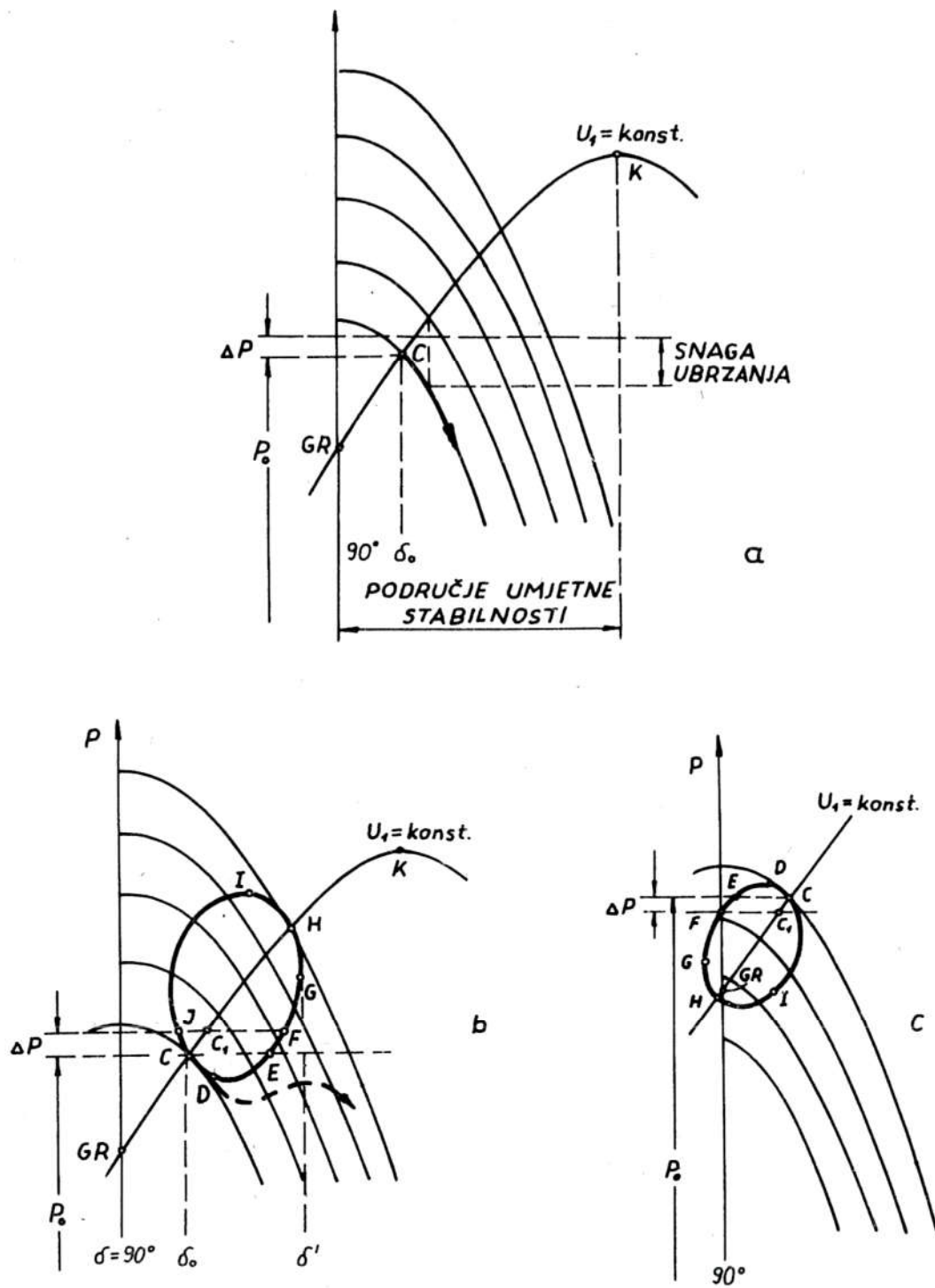
Slika 33.- Vanjska karakteristika

Proces se mogao, korak po korak, bez gubitka statičke stabilnosti ponavljati tako dugo, dok se ne postigne granična snaga P_{gr} uz $\delta = 90^\circ$ (slika 33b).

Ako razmatranje ponovimo još nekoliko puta, ali uz uvjet $U_1 = kU_2 = \text{const.}$, $k \leq 1$ (npr. k je redom jednak 0,95; 0,975; 1,025; 1,05), dobit ćemo za svaki k novu vanjsku karakteristiku, odnosno za sve k familiju vanjskih karakteristika, kako je prikazano na sl. 33b, a za prijenos prema sl. 33a. Ovu okolnost koristimo za postizanje tzv. umjetne statičke stabilnosti, kod koje je moguć prijenos snage veće od P_{gr} .

Na slici 34a pokazana je familija krivulja $P = f(\delta)$ i vanjska karakteristika za neki $U_1 = \text{konst.}$ Pretpostavimo da je uspostavljeno stanje ravnoteže u točki C uz $P_0 > P_{gr}$ uz $\delta = \delta_0 > 90^\circ$, dakle u statički labilnom području. Ako pogonski stroj generatora kratkotrajno poveća snagu za ΔP , doći će do ubrzanja rotora. Ubrzanje rotora će dovesti do povećanja kuta δ , što na ovom dijelu karakteristike $P = f(\delta)$ znači smanjenje električki odane snage. Drugim riječima doći će do sve većeg raskoraka između mehaničke snage pogonskog stroja i električki odane snage. Ta razlika predstavlja snagu ubrzanja rotora, dolazi do daljnjeg povećanja kuta δ , do daljnjeg smanjenja električki odane snage i konačno do nepovratnog gubitka statičke stabilnosti. Tokom ovog zbivanja smanjivat će se i napon U_1 , što se na slici očituje kao udaljšavanje radne točke od vanjske karakteristike.

Upravo spomenuto smanjivanje napona U_1 može biti kriterij za reagiranje regulatora napona u smislu povećanja uzbude generatora. Poznato je iz izraza 1-3 da povećanje uzbude $E_1 = E_d$ dovodi do povećanja električki odane snage. Ako je regulator dovoljno brz, a povećanje uzbude generatora dovoljno snažno, može se električki odana snaga povećati iznad vrijednosti mehaničke snage P_0 prije definitivnog ispada rotora iz sinhronizma. Tako nastala razlika između sada veće električke odane snage i manje primljene mehaničke snage djeluje u smislu kočenja rotora, kut se smanjuje i moguć je povratak na početni kut δ_0 , iako je ovaj kut veći od 90° .



Slika 34. - Zbivanja u području umjetne statičke stabilnosti

Opisani proces je ilustriran slikom 34b u sustavu $P - \delta$. Mali kratkotrajni prirast mehaničke snage za ΔP dovodi do ubrzavanja rotora. Radi stanovite neosjetljivosti regulatora napona, radna točka će se premjestiti iz C u D po pripadnoj krivulji $P = f(\delta)$. U točki D počinje djelovanje regulatora. U točki E će električki odana snaga biti izjednačena sa snagom P_0 pogonskog stroja.

Iza točke E počinje djelovati snaga kočenja, ali će se kut δ radi tromosti rotora još nešto povećati do maksimalne vrijednosti δ' , što odgovara točki G. Sada počinje usporavanje rotora i uz programirano djelovanje na uzбудu može se preko točaka H, I ... ponovo uspostaviti "umjetno" stabilno stanje u točki C.

Ako rad regulatora nije dovoljno brz ili ako djelovanje na uzбудu nije dovoljno snažno, doći će do gubitka sinhronizma, pri čemu će se radna točka kretati po crtkanoj krivulji (slika 34b).

Ako do poremećaja labilne ravnoteže u točki C dodje uslijed kratkotrajnog smanjenja mehaničke snage pogonskog stroja, ponovna uspostava ravnoteže se postiže analognim brzim djelovanjem regulatora napona na uzбудu (sl.34c). Umjetna stabilnost se, prema izloženom, može shvatiti kao stalno osciliranje oko radne točke C. Oscilacije treba da su što manje.

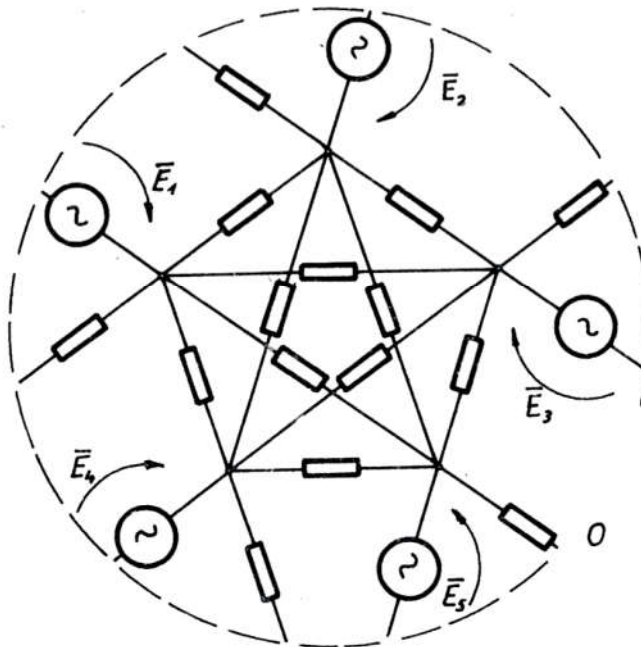
Ako porast snage pogonskog stroja za ΔP nije bio kratkotrajan, već namjeran regulacijski zahvat radi povećanja snage generatora proces ponovne uspostave ravnoteže će završiti u točki C_1 umjesto u C (sl.34b).

Opisani sistem primijenjuje se samo kod prijenosa velikih snaga na velike udaljenosti.

1.2.10 Višestrojni sistem

Razmatranje povezivanja dviju mreža kao i utjecaj izgradnje voda u nekoj mreži bilo je u stvari određivanje statičke stabilnosti višestrojnog sistema.

Ako pasivni dio mreže, uključujući i potrošače predstavljene impedancijama, reduciramo na čvorove iza sinhronne reaktancije generatora, dobit ćemo mrežu prema slici 35. U ovoj mreži je svaki čvor generatora iza sinhronne reaktancije vezan sa svim takvim čvorovima ostalih generatora.



Slika 35.- Višestrojni sistem nakon transformacije

Snaga P_i , koja se odaje u nekom čvoru i , funkcija je svih međusobnih kuteva svih elektromotornih sila i svih admitancija neposredno vezanih uz čvor i . Za konstantnu uzбудu možemo pisati izraze za snage u kojima su samo kutevi varijable:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= f_1 (\delta_{12}, \delta_{13}, \dots, \delta_{1n}) \\
 P_2 &= f_2 (\delta_{21}, \delta_{23}, \dots, \delta_{2n}) \\
 &\dots \dots \dots \\
 P_i &= f_i (\delta_{i1}, \delta_{i2}, \dots, \delta_{in}) \quad 1-25 \\
 &\dots \dots \dots \\
 P_n &= f_n (\delta_{n1}, \delta_{n2}, \dots, \delta_{n,n-1})
 \end{aligned}$$

ili

$$\begin{aligned}
 P_i &= f_i (\delta_{ij}) & i &= 1, 2, \dots, n \\
 & & j &= 1, 2, \dots, n \\
 & & j &\neq i
 \end{aligned}$$

Ovdje je:

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j = -\delta_{ji}$$

Kutevi δ_i , odnosno δ_j su kutevi prema nekom referentnom naponu. Najlakše je zamisliti da je referentan napon krute mreže.

Neka npr. dodje do kratkotrajne promjene snage za $+\Delta P$ u čvoru i . Promjena snage povećat će kut δ_i , a radi elastične veze s ostalim generatorima povećat će se i ostali kutevi δ_j .

Sada zanemarimo promjenu kuteva δ_j i računajmo samo s promjenom kuta δ_i . Relacija 1-4 za ocjenu statičke stabilnosti prelazi u:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} > 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad 1-26$$

ponovljeno za sve čvorove i u mreži.

Kriterij 1-26 za ocjenu statičke stabilnosti nije sasvim korektan, ali je praktički moguć, dok je ispitivanje promjene snage ovisno o promjeni svih kuteva nemoguće čim se radi o većem broju generatora u mreži.

Ispišimo izraze za djelatnu i jalovu snagu koja se stvara u čvoru i reducirane mreže sa slike 35,

$$P_i = E_i \sum_{j=1}^n Y_{ij} E_j \cos (\delta_i - \theta_{ij} - \delta_j) \quad 1-27a$$

$$Q_i = E_i \sum_{j=1}^n Y_{ij} E_j \sin (\delta_i - \theta_{ij} - \delta_j) \quad b$$

$$i = 1, 2, \dots n$$

pa nakon diferenciranja prema 1-25 dobit ćemo:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = - E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} E_j \sin (\delta_i - \theta_{ij} - \delta_j), \quad 1-28$$

jer dijagonalni članovi nemaju δ_i . I dalje:

$$\begin{aligned} Q_i &= E_i \sum_{j=1}^n Y_{ij} E_j \sin (\delta_i - \theta_{ij} - \delta_j) + \\ &+ E_i Y_{ii} E_i \sin (\delta_i - \theta_{ii} - \delta_i) - \\ &- E_i Y_{ii} E_i \sin (\delta_i - \theta_{ii} - \delta_i) = \\ &= E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} E_j \sin (\delta_i - \theta_{ij} - \delta_j) - E_i^2 Y_{ii} \sin \theta_{ii} \end{aligned}$$

a odavde:

$$E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} E_j \sin (\delta_i - \theta_{ij} - \delta_j) = Q_i + E_i^2 Y_{ii} \sin \theta_{ii} \quad 1-29$$

Usporedimo 1-28 i 1-29:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -Q_i - E_i^2 Y_{ii} \sin \theta_{ii} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad 1-30$$

Za dvostrojni sistem relacija 1-30 prelazi u:

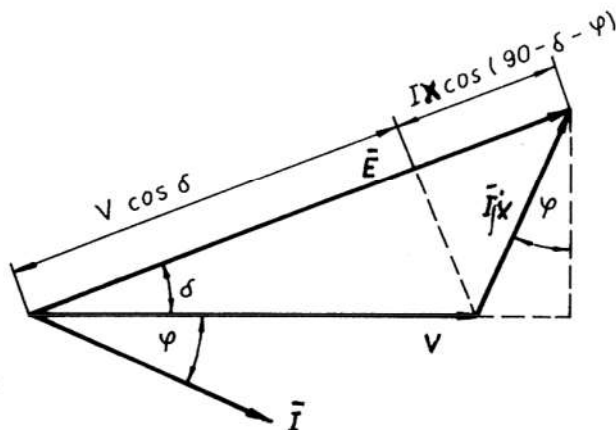
$$\frac{dP}{d\delta} = -Q - E^2 \frac{1}{Z} \sin(-\theta) = -Q + E^2 \frac{1}{Z} \sin \theta$$

Za $\theta = 90^\circ$ $\sin \theta = 1$, što daje:

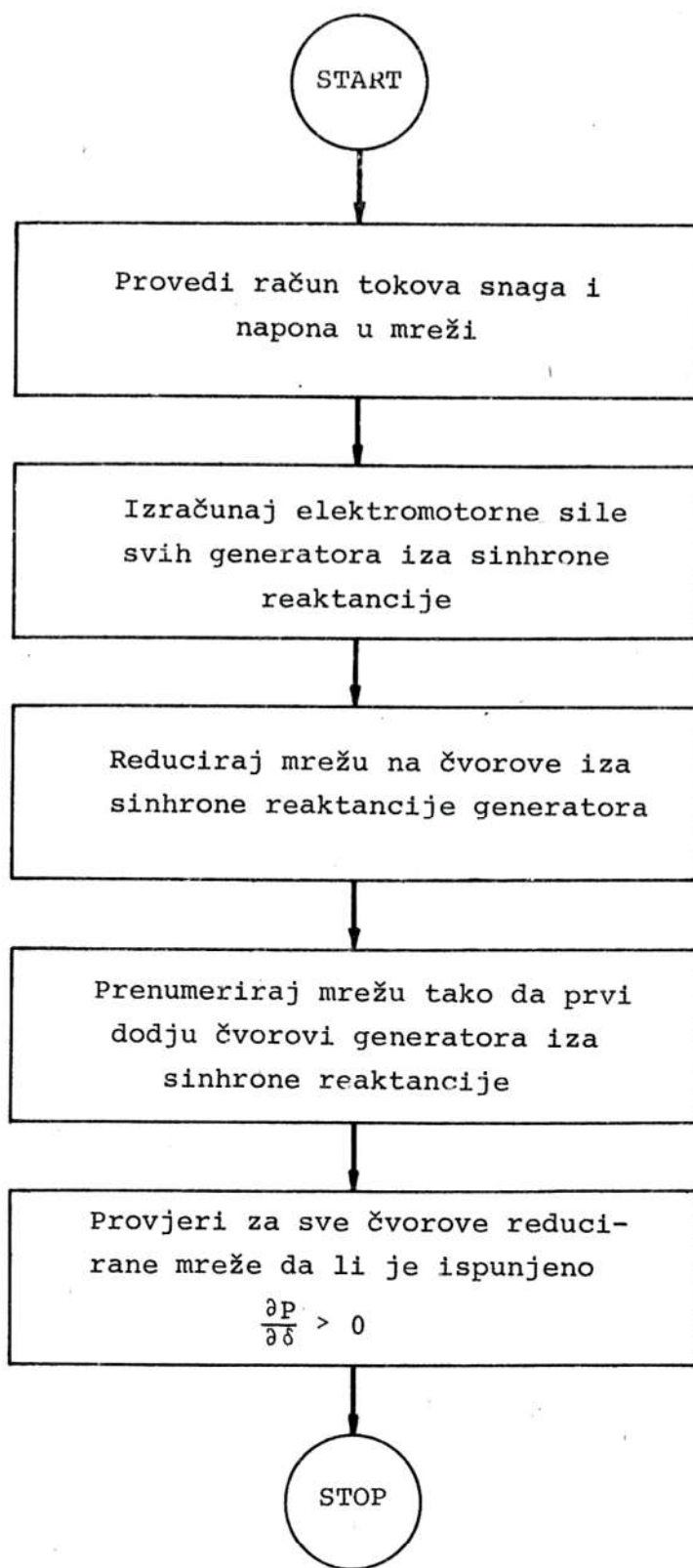
$$\frac{dP}{d\delta} = -Q + \frac{E^2}{X} \quad 1-31$$

Iz geometrijskih odnosa na slici 36 vidimo da je:

$$V \cos \delta = E - I X \cos (90 - \delta - \phi)$$



Slika 36.- Vektorski dijagram dvostrojnog sistema



Slika 37,- Blok dijagram toka za provjeru kriterija $\frac{\partial P}{\partial \delta} > 0$

što uvršteno u relaciju 1-5 (u linijskim vrijednostima) daje:

$$\begin{aligned}\frac{dP}{d\delta} &= \frac{E}{X} E - I X \cos (90 - \delta - \phi) = \\ &= \frac{E^2}{X} - E I \cos (90 - (\delta + \phi)) = \\ &= \frac{E^2}{X} - E I \sin (\delta + \phi) = \frac{E^2}{X} - Q ,\end{aligned}$$

a to je upravo izraz 1-31.

Na slici 37 nacrtan je blok dijagram toka za određivanje statičke stabilnosti sistema prema kriteriju 1-30.

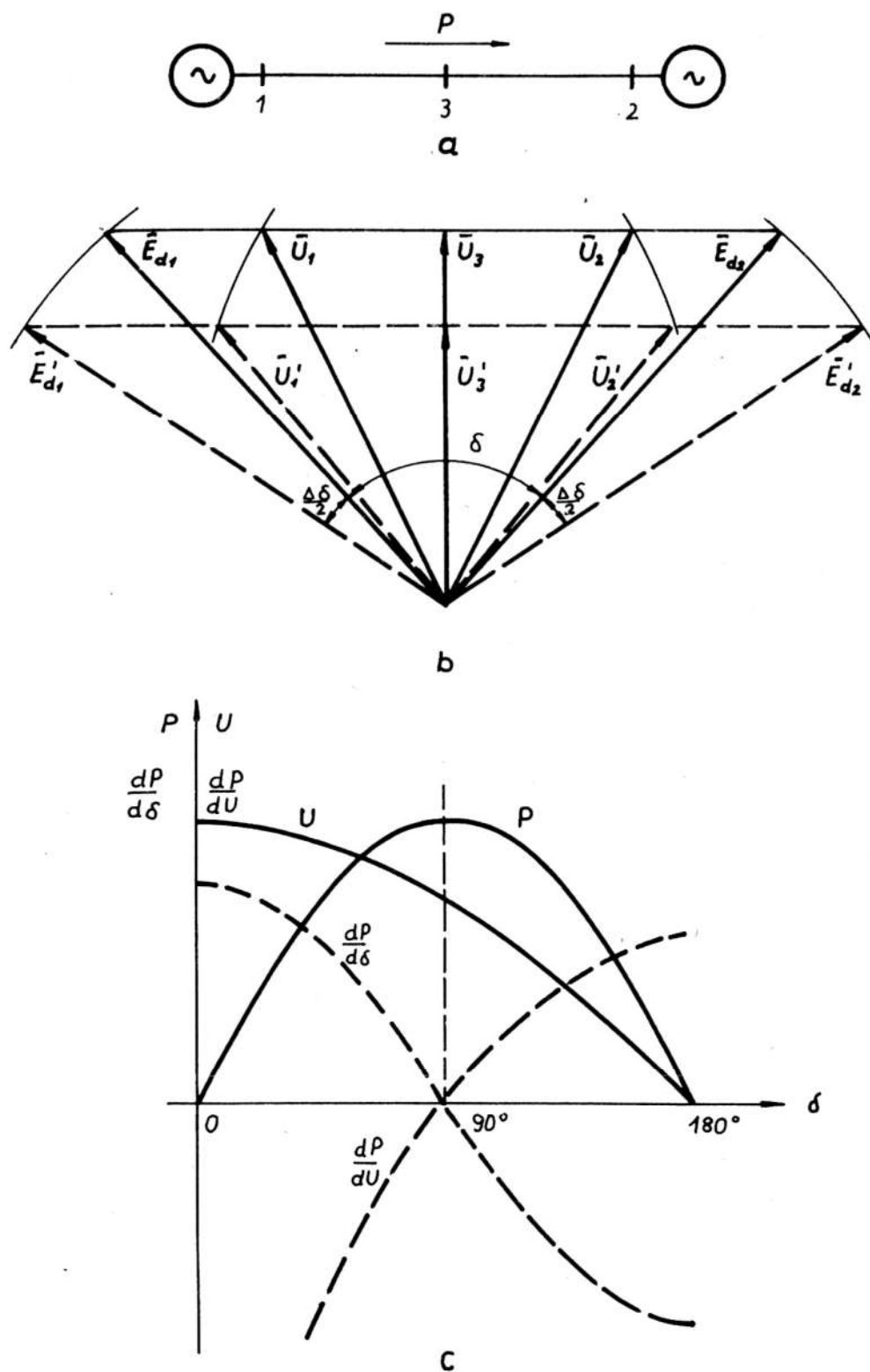
1.2.11 Ostali kriteriji za određivanje statičke stabilnosti

Kriterij 1-4 odnosno 1-26 je pregledan, praktičan i obično se primjenjuje. Vidjeli smo da ovaj kriterij uz mnoge prednosti ima i mana, specijalno kriterij 1-26. Može se još dodati da se potrošači uzimaju u račun kao konstantne admitancije odnosno impedancije, dok njihovo stvarno ponašanje slijedi neku karakteristiku, što nije bez utjecaja na stabilnost.

Za određivanje statičke stabilnosti bilo bi vrlo probitačno služiti se kriterijem koji povezuje veličine permanentno mjerene u praksi. Može se dogoditi da se lako dodje do relacije $P=f(U)$ i $Q=f(U)$, čije razmatranje može takodjer dati kriterij za određivanje statičke stabilnosti.

Na slici 38. nacrtan je vektorski dijagram (sl.38b) i krivulje dP/dU (sl.38c) prijenosa sa sl.38a. Iz slike 38c vidimo, da se u statički stabilnom području nalazimo kada je:

$$\frac{dP}{dU} < 0$$



Slika 38.- Odredjivanje krivulje $\frac{dP}{dU}$

a u statički labilnom području kada je

$$\frac{dP}{dU} > 0$$

1-33

Ako do izraza dP/dU dolazimo preko izraza $P = f(\delta)$, onda nema smisla ići na ovaj kriterij, jer zahtijeva više posla.

U visokonaponskoj zamkastoj mreži imamo uvijek posla sa višestrojnim sistemom, u kojem su razlike kuteva vrlo male. Uvjeti statičke stabilnosti su daleko povoljniji nego pri prijenosu snage na daljinu. Statička stabilnost može doći u pitanje kod većeg odstupanja od normalnog pogona.

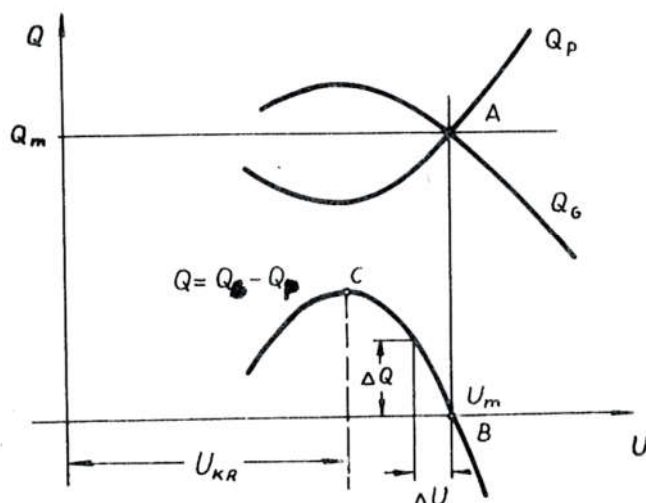
Pretpostavimo da u nekom čvoru visokonaponske zamkaste mreže dođe do osjetnog povećanja potroška jalove snage. Stabilnost mreže će ovisiti o tome da li su blizu izvori iz kojih se može pokriti povećana potrošnja jalove snage. Ako su izvori blizu, znači da će regulacija napona bliskih izvora značajno reagirati i da će napon u elektranama praktički ostati nepromijenjen. Pojava je ograničena na trenutni lokalni pad napona i statička stabilnost mreže nije ugrožena.

Ako neka od elektrana nije u stanju da dovoljno podigne uzbuđu, jer nema toliko rezerve u jalovoj snazi, past će napon na sabirnicama elektrane. Uz nepromijenjenu snagu pogonskog stroja mora doći do odgovarajućeg povećanja kuta δ i stabilnost ove elektrane je ugrožena.

Postojanje elektrana u sistemu, kod kojih povećano davanje jalove snage izaziva veliko smanjenje napona na sabirnicama, jer uzbuda ostaje konstantna (ne može se više povećati) opasno je za stabilnost. Veći udarac jalove snage može ovakovu elektranu izbaciti iz pogona i time lančanom reakcijom izazvati slom sistema.

Na slici 39. prikazane su karakteristike proizvodnje i potrošnje za neki čvor mreže. Mjerodavna je razlika ovih dviju karakteristika. Predavanje jalove snage mreži jednako je nuli gdje se ove karakteristike sijeku. Karakteristika razlike proizvodnje i potrošnje $Q = f(U)$ siječe pravac U_n u normalnom pogonu u točki B. Izvod dQ/dU

u ovoj točki mora biti negativan i velikog iznosa, jer tada dodatno jalovo opterećenje ΔQ izaziva mali pad napona ΔU . Prekretnu točku predstavlja tjeme krivulje $Q = f(U)$. S druge strane točke C pogon je labilan.



Slika 39. - Karakteristike proizvodnje i potrošnje

Kriterij $dP/d\delta > 0$ i kriterij $dQ/dU < 0$ općenito nemaju isto značenje i vode do različitih graničnih snaga. Prvi kriterij upotrijebit ćemo u slučaju prijenosa na veće udaljenosti s određenim smjerom djelatne snage. Ovdje nam je od prvenstvenog interesa granična snaga prijenosa. Kod zamkaste mreže u kojoj se tokovi snaga neprekidno mijenjaju ne samo po iznosu nego i po smjeru, granične snage prijenosa nemaju veliko značenje. Ovdje nas interesira gubitak statičke stabilnosti kao posljedica nedozvoljenog smanjenja napona.

1.2.12 Zaključna razmatranja

Statička stabilnost predstavlja kriterij za granicu prijenosne moći prijenosnog sistema. Kod mreža nižih napona ograničenje prijenosne snage zbog gubitaka neće dozvoliti da prijenosni sistem dodje na granicu statičke stabilnosti.

Tamo gdje je to potrebno, statička stabilnost će se moći povećati:

- smanjenjem reaktancija: serijski kondenzatori, autotransformatori, vodiči u snopu, generatori sa manjim X_d , više vodova paralelno,
- održavanjem visokog pogonskog napona,
- brzom regulacijom uzbude,
- većim induktivnim opterećenjem generatora,
- smanjenjem djelatnih otpora u sistemu, i
- podupiranjem prijenosnog sistema sinhronim kompenzatorima.

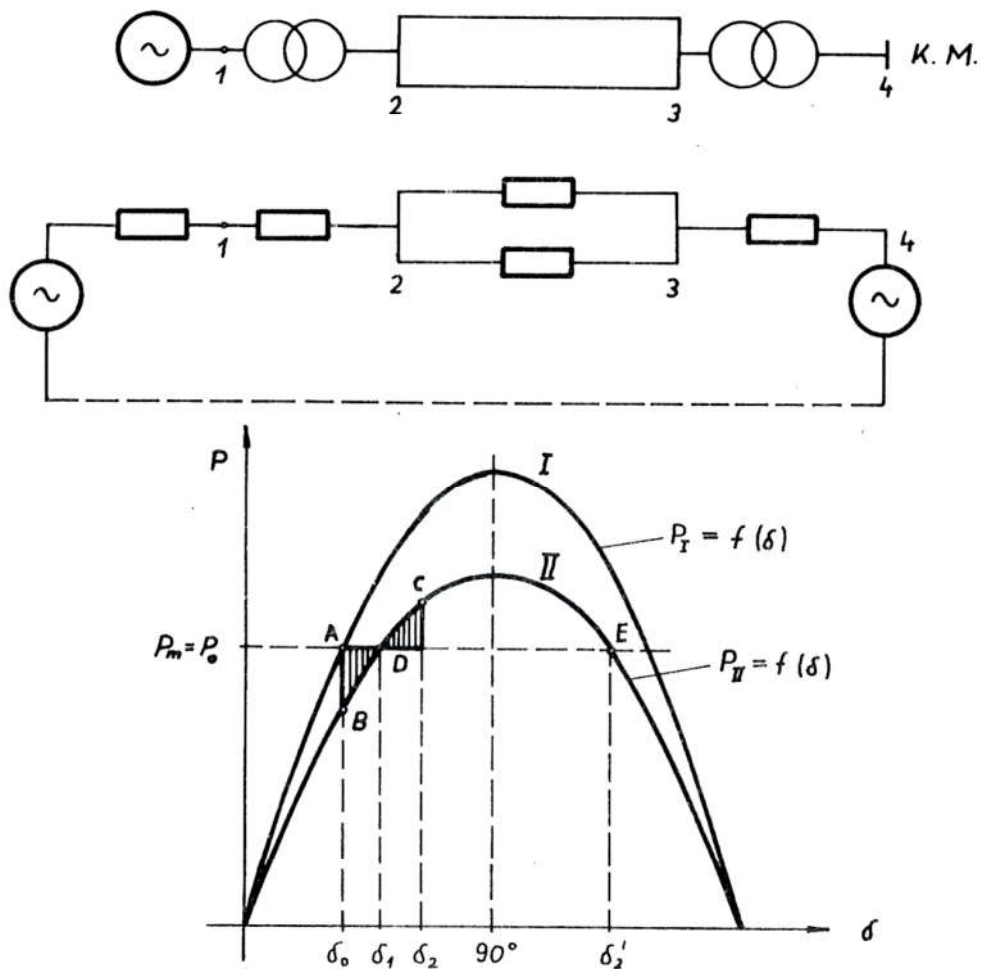
1.3 DINAMIČKA STABILNOST

U područje dinamičke stabilnosti spadaju razmatranja kada je sistem dodatno ugrožen naglim promjenama, npr.: nepredvidjena iskapčanja, udarci opterećenja, kratki spojevi i tome slično. Ovdje dolazi do njihanja rotirajućih masa rotora generatora. Sistem ostaje stabilan, ako u ovim oscilacijama, odnosno u oscilacijama elektromotornih sila generatora, dolazi do vraćanja kuteva u položaj koji odgovara točki ravnoteže novoga stanja u stabilnom području.

Vrijeme kroz koje je potrebno istražiti da li je sistem dinamički stabilan, vrlo je kratko. Kroz to vrijeme ne dolazi do djelovanja regulatora pogonskog stroja, pa se uzima da je snaga pogonskog stroja konstantna. Zbog istog razloga ne može se znatno promijeniti magnetski tok generatora, pa treba računati s prijelaznom reaktancijom generatora X'_d i elektromotornom silom iza prijelazne reaktancije E'_d .

1.3.1 Dinamička granična snaga

Promatrat ćemo najprije najjednostavniji primjer, a to je prijenos od udaljene elektrane do krute mreže. Promjena uklopnog stanja nastaje iskapčanjem jednog od dva paralelna voda (slika 40).



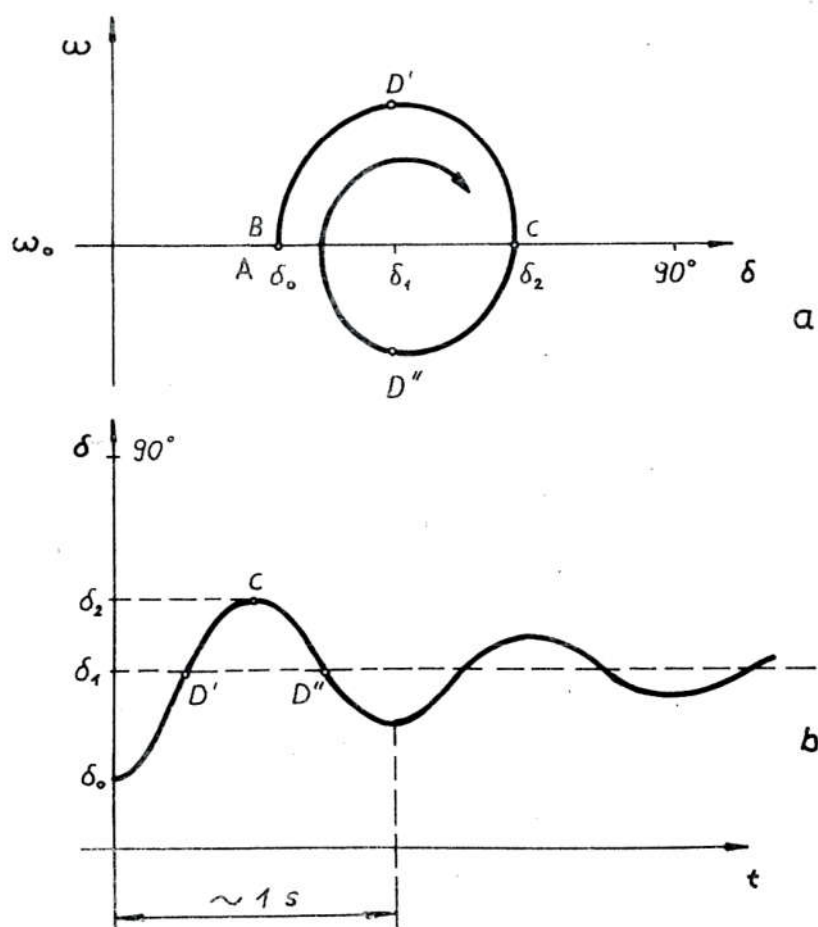
Slika 40.- Iskapćanje jednog od dva paralelna voda

Ako oba voda sudjeluju u prijenosu, mjerodavna je krivulja $P_I = f(\delta)$. Ako se jedan vod iskopća, mjerodavna je krivulja $P_{II} = f(\delta)$. Prijenosnim sistemom (uz oba voda ukopćana) prenosi se snaga P_0 . Uspostavljena je ravnoteža u točki A (δ_0 , P_0) na krivulji I (sl.40c). Iznenadno iskapćanje jednog voda učinit će važećom krivulju II. U prvom času će kut δ_0 zbog tromosti rotirajućih masa ostati nepromijenjen. To stanje odgovara točki B. Pošto je mehanička snaga P_m ostala nepromijenjena, a točka B odgovara smanjenoj odanoj električnoj snazi koja se prenosi, dolazi do viška mehaničke snage.

Višak mehaničke snage $\overline{AB} = \Delta P$ ubrzavat će rotor. Zbog ubrzanja pomiče se točka B prema D i kut δ_0 prema δ_1 . Ponovna ravnoteža uspostaviti će se u točki D. Pri tom razlika snaga opada i u točki D izjednačene su primljena mehanička i odana električka snaga. Međutim, rotor je ubrzan i zbog tromosti masa kut δ se dalje povećava prema δ_2 . Kako je sada P_e veće od P_m , dolazi do kočenja rotora. U točki C rotor će biti usporen na sinhronubrzinu.

Manjak mehaničke snage u točki C kočiti će dalje rotor. Kut δ će se smanjivati i ponovo će biti postignuta točka D. Zbog inercije kut δ će se i dalje smanjivati, a rotor će se ubrzavati, itd. Nastat će prigušene oscilacije oko točke nove ravnoteže D.

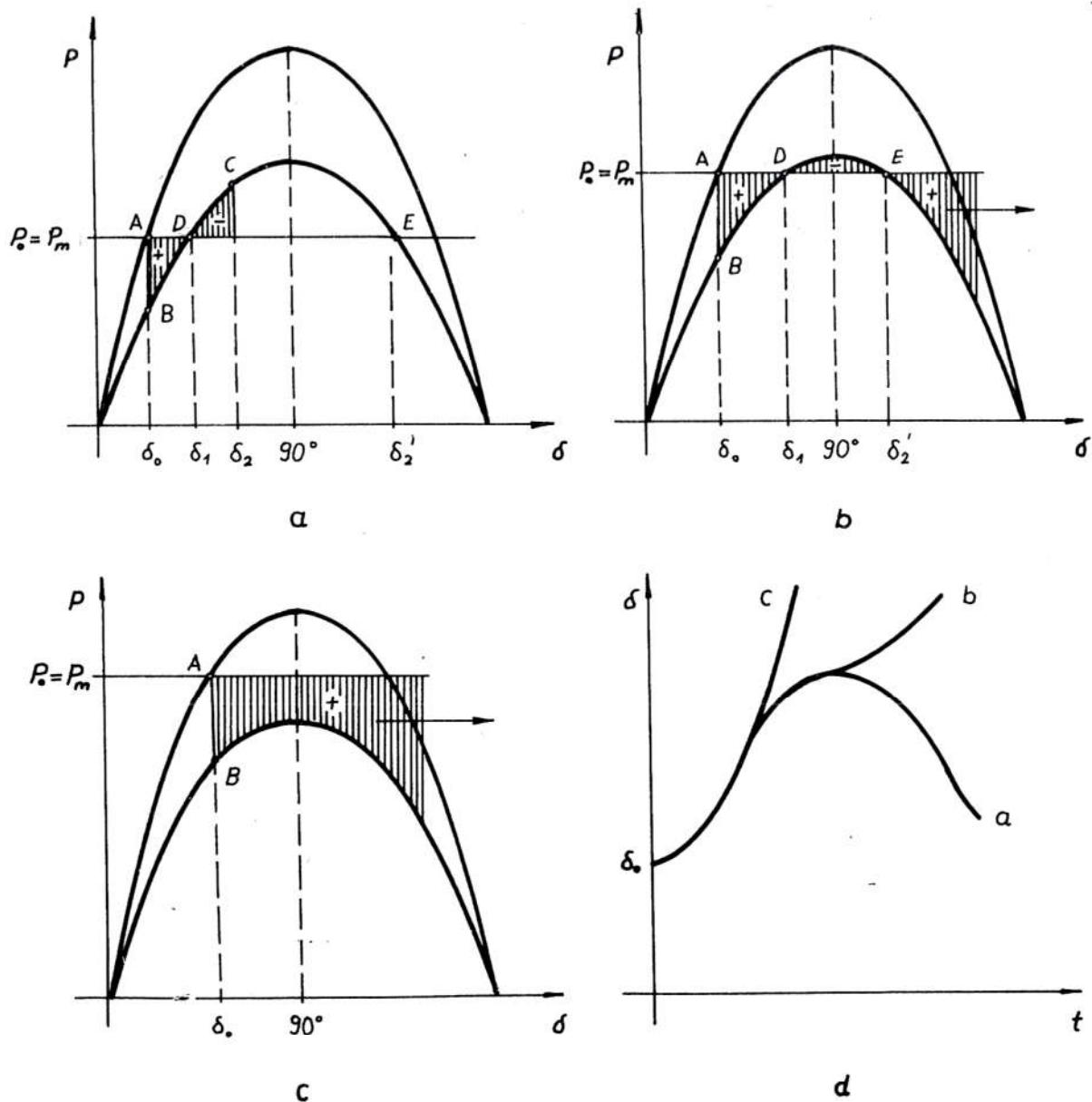
Opisana zbivanja prikazana su i na slici 41, na dijagramima $\omega = f(\delta)$ i $\delta = f(t)$. U ovom slučaju stabilitet je očito bio sačuvan.



Slika 41. - Krivulje $\omega = f(\delta)$ i $\delta = f(t)$

Stabilnost će biti sačuvana uvijek, ako kut δ ne prekorači kut δ_2' (sl.40c), makar je on veći od 90° . Ako se naime točka C makne i preko tjemena karakteristike $P_{II} = f(\delta)$, ali ne preko δ_2' , tj. preko točke E, postojat će uvijek kočenje, koje konačno dovodi rotor natrag u položaj nove ravnoteže, tj. u točku D (δ_1, P_0). Zato je u promatranom slučaju stabilnost bila sačuvana.

Na slici 42, razmatran je opet isti slučaj prijenosa i iznenadnog iskapčanja voda. Prije iskapčanja voda najmanja snaga prenosila se u slučaju 42a, a najveća u slučaju 42c.



Slika 42.- Odredjivanje dinamičke granične snage

U slučaju sa slike 42a točka C prešla je točku $\delta = 90^\circ$, ali nije dosegla točku E. Rotor se počeo vraćati i stabilnost je sačuvana.

U slučaju sa slike 42b točka C je prešla točku E, pa je ponovo došlo do ubrzanja rotora. Stabilnost je nepovratno izgubljena. U točki E rotor ima još uvijek brzinu veću od sinhronu, pa će zato prijeći točku E. Razlika momenata djeluje opet u smislu ubrzanja i postaje sve veća.

U slučaju sa slike 42c ne postoji točka nove ravnoteže nakon iskapčanja jednog voda. Stabilnost je izgubljena.

Na slici 42d nacrtane su krivulje $\delta = f(t)$ za sva tri promatrana slučaja.

Do gubitka sinhronizma, dakle, dolazi ako je prenesena snaga P_0 veća od neke dinamičke granične snage. Ova snaga ovisi o karakteru smetnje.

Iskapčanje jednog voda spada u najblaže slučajeve ugrožavanja dinamička stabilnost. Kratki spojevi predstavljaju daleko veću opasnost.

1.3.2 Diferencijalna jednadžba njihanja

Oscilacije ne moraju uvijek dovesti do novog stanja ravnoteže. Faktor koji se pojavljuje kod dinamičke stabilnosti jest tromost rotirajućih masa sinhronih strojeva uključujući tu i mase rotora turbine.

Računska obrada opisanih pojava temelji se na izrazu za kutno ubrzanje:

$$\alpha = \frac{\Delta M}{I} = \frac{\Delta P}{\omega I} , \quad 1-34$$

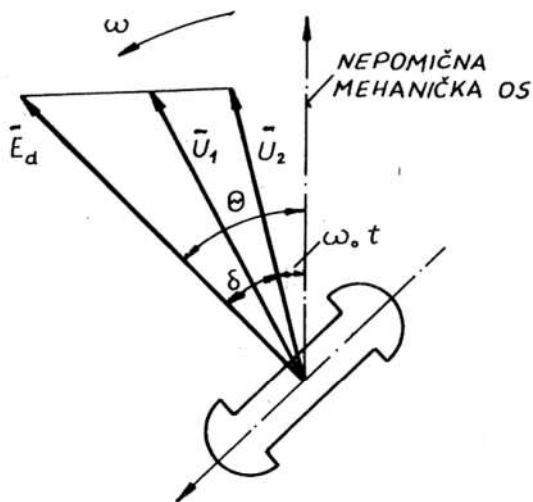
gdje je:

M = moment sile
I = moment tromosti
 ω = kutna brzina
 α = kutno ubrzanje

Kutno ubrzanje možemo još izraziti i u ovom obliku:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad 1-35$$

Sa δ je ovdje označen kut između rotirajuće osi sinhronog napona krute mreže ($\omega = \omega_0$) i elektromotorne sile iza prijelazne reaktancije generatora. Kut θ označuje kut vektora elektromotorne sile prema nepomičnoj mehaničkoj osi (slika 43).



Slika 43. - Veza između mehaničkog kuta θ i električnog kuta δ

Iz slike 43. slijedi:

$$\delta = \theta - \omega_0 t$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\theta}{dt} - \omega_0$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

A to je upravo relacija 1-35. Izjednačimo izraze 1-34 i 1-35 za α . Dobit ćemo diferencijalnu jednačinu oscilacije:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\Delta P}{\omega I} \quad 1-36$$

Za vrijeme cijelog nestacionarnog zbivanja ω se mijenja vrlo malo ($\Delta\omega = 1\%$), pa za izraz 1-36 možemo pisati:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\Delta P}{\omega_o I} = \frac{1}{\omega_o I} \Delta P = k \Delta P \quad 1-37$$

Da bi se odredilo k potrebno je poznavati konstantu inercije H ili mehaničku vremensku konstantu T_m . U evropskoj literaturi upotrebljava se T_m , a u američkoj H .

Konstanta inercije H je kinetička energija rotirajućih masa kod sinhronne brzine po jedinici nazivne snage.

$$H = \frac{I \omega_o^2}{2S_n} \left| \frac{MWS}{MVA} \right| \quad 1-38$$

Mehanička vremenska konstanta je vrijeme kočenja sa sinhronog broja okretaja do mirovanja nominalnom prividnom snagom S_n .

$$T_m = \frac{I \omega_o^2}{S_n} |s| \quad 1-39$$

Prema tome je:

$$\begin{aligned} k &= \frac{1}{\omega_o I} = \frac{\omega_o / 2S_n}{\omega_o I \omega_o / 2S_n} = \frac{\omega_o}{2H S_n} = \\ &= \frac{2\pi f}{2H S_n} = \frac{9000}{H S_n}, \end{aligned} \quad 1-40$$

ili

$$k = \frac{1}{\omega_o I} = \frac{\omega_o / S_n}{\omega_o I \omega_o / S_n} = \frac{\omega_o}{T_m S_n} = \frac{2\pi f}{T_m S_n} = \frac{18000}{T_m S_n} \quad 1-41$$

Uobičajene su vrijednosti:	T_m s	$H \left \frac{MWS}{MVA} \right $
turbogeneratori	10 - 16	5 - 8
hidrogeneratori	5 - 8	2,5 - 4
sinhr. kompenzatori	2,5 - 4	1,25-2

H odnosno T_m možemo izračunati ako nam je poznata prividna nazivna snaga S_n , nominalni broj okretaja n , i GD^2 generatora. Pošto je:

$$I = \frac{GD^2}{4} |tm^2|$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

$$H = \frac{4\pi^2 n^2 GD^2}{60^2 2 S_n 4} = 1,37 \frac{GD^2 n^2}{S_n} 10^{-6} \left| \frac{MWS}{MVA} \right| \quad 1-42$$

$$T_m = 2,74 \frac{GD^2 n^2}{S_n} 10^{-6} |s| \quad 1-43$$

Ako radimo proračun s jediničnim vrijednostima, u 1-40 odnosno 1-41 treba unijeti jediničnu vrijednost za snagu, jer je:

$$\alpha = \frac{9\,000}{H S_n / S_B} \Delta P / S_B = \frac{9\,000}{H S_n} \Delta P$$

1.3.3 Površinski stavak

Pomnožimo sada diferencijalnu jednadžbu njihanja s $2 \frac{d\delta}{dt}$, pa ćemo dobiti:

$$2 \frac{d\delta}{dt} \frac{d^2\delta}{dt^2} = 2 k \Delta P \frac{d\delta}{dt}$$

Lijeva strana je jednaka derivaciji izraza $\left(\frac{d\delta}{dt}\right)^2$:

$$\frac{d\delta}{dt} \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = 2 k \Delta P \frac{d\delta}{dt}$$

$$d \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = 2 k \Delta P d\delta$$

$$\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 = 2 k \int_{\delta_0}^{\delta} \Delta P d\delta$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{2 k \int_{\delta_0}^{\delta} \Delta P d\delta} \quad 1-44$$

Iz ranijih kvalitativnih razmatranja smo vidjeli, da neko njihove počinje iz stanja $d\delta/dt$ jednako nuli, točka A(P_0, δ_0). Povećanje kuta prestaje takodjer u nekoj točki $d\delta/dt$ jednako nuli, točka C(P_0, δ_2). Ako nismo dospjeli do točke $d\delta/dt$ jednako nuli, stabilnost je izgubljena. Prema tome, za očuvanje stabilnosti u nestacionarnim slučajevima možemo postaviti uvjet da mora postojati početno i završno stanje $d\delta/dt$ jednako je nuli. Prema relaciji 1-44 ovaj je uvjet ispunjen kada je

$$\int_{\delta_0}^{\delta} \Delta P d\delta = 0 \quad 1-45$$

Integral 1-45 upravo odgovara površinama, koje su označene sa + i - u karakteristikama snaga - kut na slici 42. Šrafirane površine su proporcionalne tom integralu. Nazovemo li površinu označenu sa + ubrzavajućom, a sa - usporavajućom, dobivamo daljnji uvjet koji kaže da će dinamička stabilnost biti sačuvana, ako su obje površine međusobno jednake. Ovaj uvjet se zove površinski stavak.

1.3.4 Kratki spoj

Kratki spoj je najveća opasnost za stabilnost pogona. Kod trolejnog kratkog spoja na sabirnicama elektrane generatori se mehanički potpuno rasterećuju unatoč jakim strujama kratkog spoja, jer su ove struje induktivne. To rasterećenje ne može slijediti pogonski stroj, pa dolazi do ubrzanja rotora i do gubitka stabilnosti. Ekvivalentna shema ovakvog slučaja na prijenosu sa slike 44a nalazi se na sl. 44b, a dijagram snaga - kut na slici 45a.

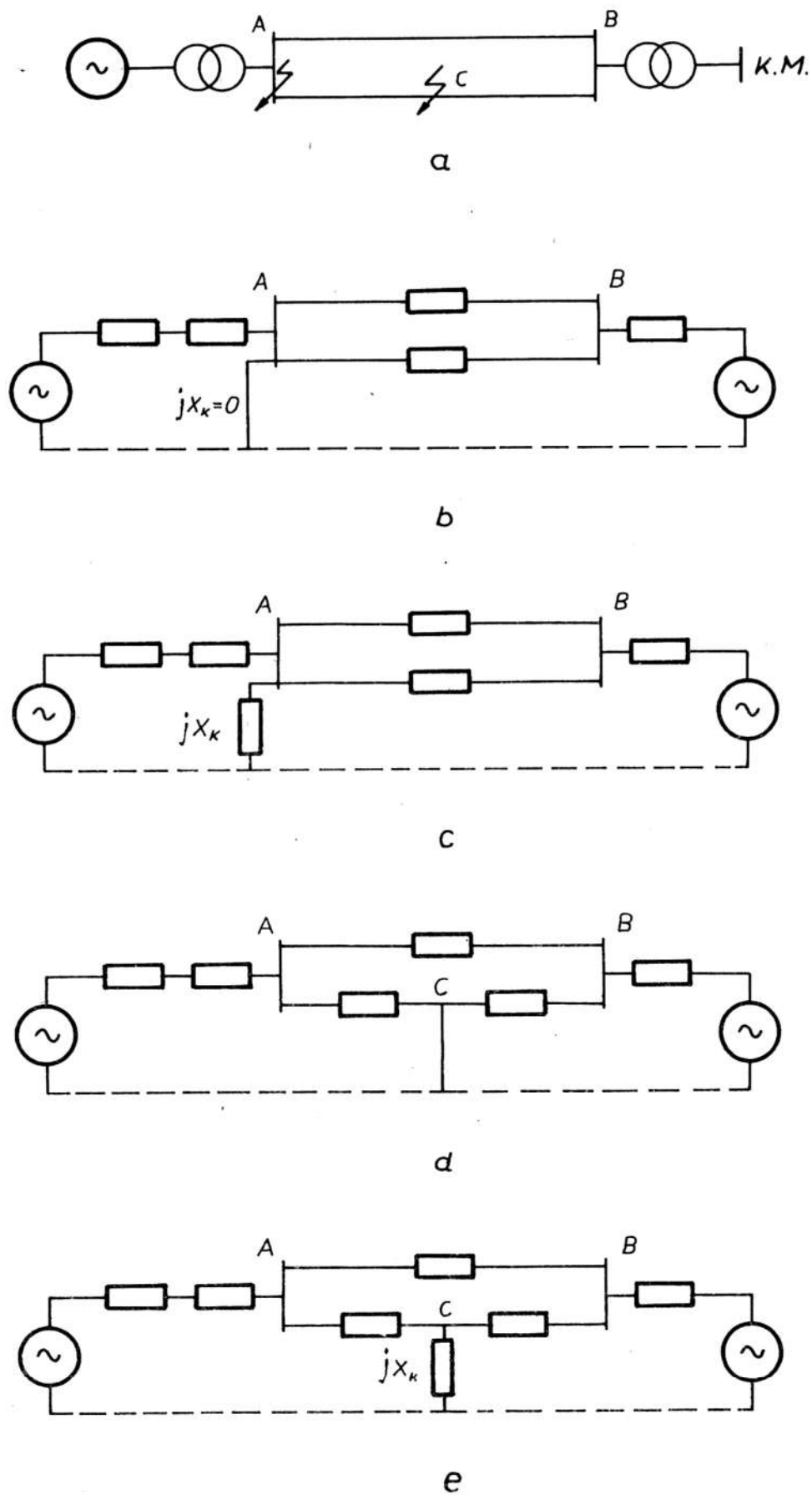
Kada nastane trolejni kratki spoj na jednom od vodova (sl. 44a, točka C) dio snage pogonskog stroja može se prenositi zdravim vodom, što se vidi na ekvivalentnoj shemi (sl. 44d). Ova snaga je mala radi velikih padova napona u mreži izazvanih velikim strujama kratkog spoja. U dijagramu snaga - kut na slici 45c imamo tri krivulje. Za normalni pogon s oba voda važeća je krivulja 0, za kratki spoj krivulja I, a za jedan iskopčan vod krivulja II. Ako je trolejni kratki spoj dovoljno daleko od sabirnica elektrane i zaštita dovoljno brza, može se selektivnim iskapčanjem voda pogodjenog kratkim spojem sačuvati stabilnost.

Nesimetrični kratki spoj na sabirnicama elektrane dozvoljava izvjestan prijenos djelatne snage zdravom fazom ili fazama. Ekvivalentna shema na slici 44c. Nikakvim se iskapčanjem ne može sačuvati stabilnost (slika 45b).

Nesimetrični kratki spoj na vodu je također slučaj kada se može spasiti stabilnost, ako zaštita dovoljno brzo iskopča vod. Ekvivalentna shema je na slici 44e, a dijagram snaga - kut na slici 45d.

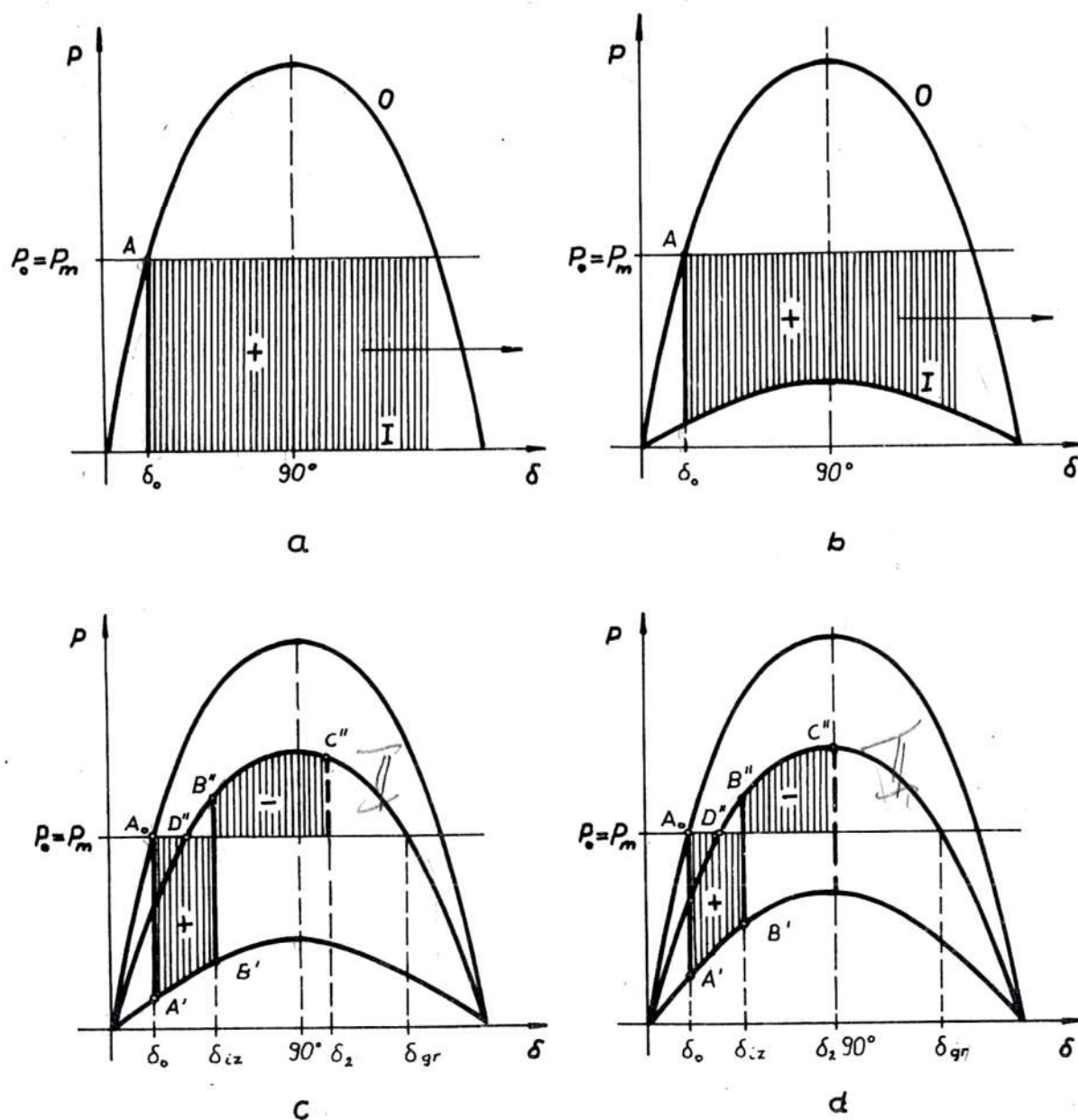
Zbivanja kod kratkog spoja na jednom vodu, kojega zaštita iskopča kroz kratko vrijeme, možemo pratiti na dijagramima sa slike 45c, odnosno 45d. Dinamička karakteristika prijenosa jednim vodom daleko je povoljnija od dinamičke karakteristike kratkog spoja, i postoji mogućnost da stabilnost bude očuvana.

Trenutak prije kratkog spoja imamo pogon u točki A_0 . Pri pojavi kratkog spoja i dalje za vrijeme njegovog trajanja vrijedi karakteristika I. Kut δ_0 se može odmah promijeniti, pa odana elektri-



Slika 44, - Kratki spoj na prijenosu dvostrukim vodom

čka snaga odgovara točki A' . $\overline{A_0 A'} = P$ je ubrzavajuća snaga. Zato raste brzina rotora i kut δ . U momentu t_{iz} , kada je $\delta = \delta_{iz}$, a nalazimo se u točki B' , djeluje zaštita i izbací vod u kvaru. Odavanje električne djelatne snage sada je određeno točkom B'' na krivulji II. P je sada negativno, ali zbog tromosti kut δ i



O - neposredno pred nastanak kratkog spoja
I - kratki spoj
II - iskopčan jedan vod

Slika 45.- Zbivanja kod kratkog spoja na dvostrukom vođu

dalje raste. Kada je dostignuta točka C" i kut δ_2 , rotor je za-
kočen na sinhronu brzinu. Daljnjim usporavanjem kut δ se smanju-
je. Nastupa proces prigušenog osciliranja oko točke D", koja pred-
stavlja novo stanje ravnoteže. Kako vidimo, brza eliminacija krat-
kog spoja sačuvala je sinhronizam. Da je kratki spoj trajao nešto
duže, mogla je točka C" prekoračiti kut δ_{gr} , što bi dovelo do gu-
bitka dinamičke stabilnosti.

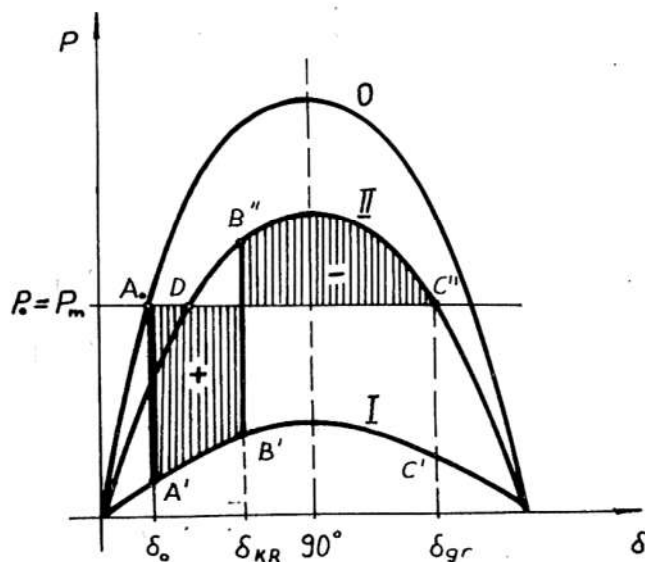
Razmatranja dinamičke stabilnosti dovode nas do novih pojmova.

To su:

granični kut δ_{gr}

kritični kut δ_{kr}

Granični kut smo već upoznali. To je kut koji rotor tokom osci-
lacija ne smije prijeći, ako želimo da stabilnost bude sačuvana.
Granični kut neće biti prekoračen, ako kratki spoj bude pravodo-
bno isključen, i to obostrano. Vrijeme za koje kratki spoj može
biti najkasnije isključen, dano je kritičnim kutem, δ_{kr} , koji mo-
žemo odrediti pomoću površinskog stavka. Vertikalnu B'B" pomičemo
tako dugo lijevo i desno, dok ne postignemo jednakost ubrzavaju-



0 - neposredno pred na-
stanak kratkog spoja

I - kratki spoj

II - iskopčan vod

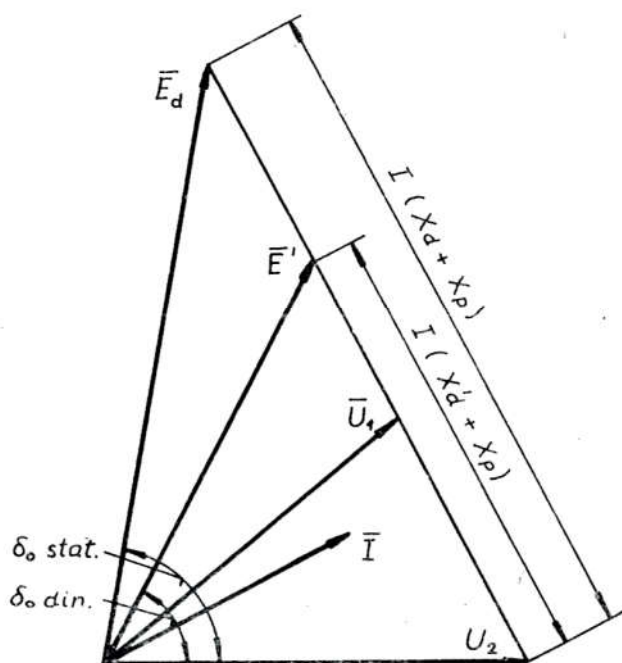
Slika 46 - Odredjivanje kritičnog kuta

će (+) i usporavajuće (-) površine. Taj položaj vertikale B'B" odgovara kutu δ_{kr} (sl.46).

Ako su nam poznate prilike na sabirnicama generatora neposredno prije kvara, poznata nam je i djelatna snaga koju generator daje u mrežu, tj. snaga pogonskog stroja. U trenucima koji su odlučni za očuvanje dinamičke stabilnosti, brzina rotora ne narašće dovoljno, da bi regulator broja okretaja mogao djelovati na pogonski stroj u smislu zatvaranja turbine odnosno smanjenja pogonske snage. Uz tromost regulatora uzbude ovo je još jedan razlog da računamo s $P_m = \text{konst.}$

Iz poznatog napona na sabirnicama i struje generatora možemo izračunati elektromotornu silu iza prijelazne (tranzientne) reaktancije E' . Radi tromosti magnetskog toka E' računamo konstantnim. Uzimanje u račun E' i X' dovodi do povoljnijih početnih uvjeta stabilnosti od uvjeta u stacionarnom stanju, jer je:

$$E' < E_d \quad X' \ll X_d ,$$



Slika 47. - Kut kod statičke i dinamičke stabilnosti

iz čega slijedi:

$$P_{\max \text{ din}} = \frac{E' U_2}{\bar{X}' + X_p} > P_{\max \text{ st}} = \frac{E_d U_2}{X_d + X_p} \quad 1-46$$

U vektorskom dijagramu na sl.47 prikazan je položaj E' prema napo-
nu krute mreže i odnos kuteva δ_{ost} i δ_{odin} .

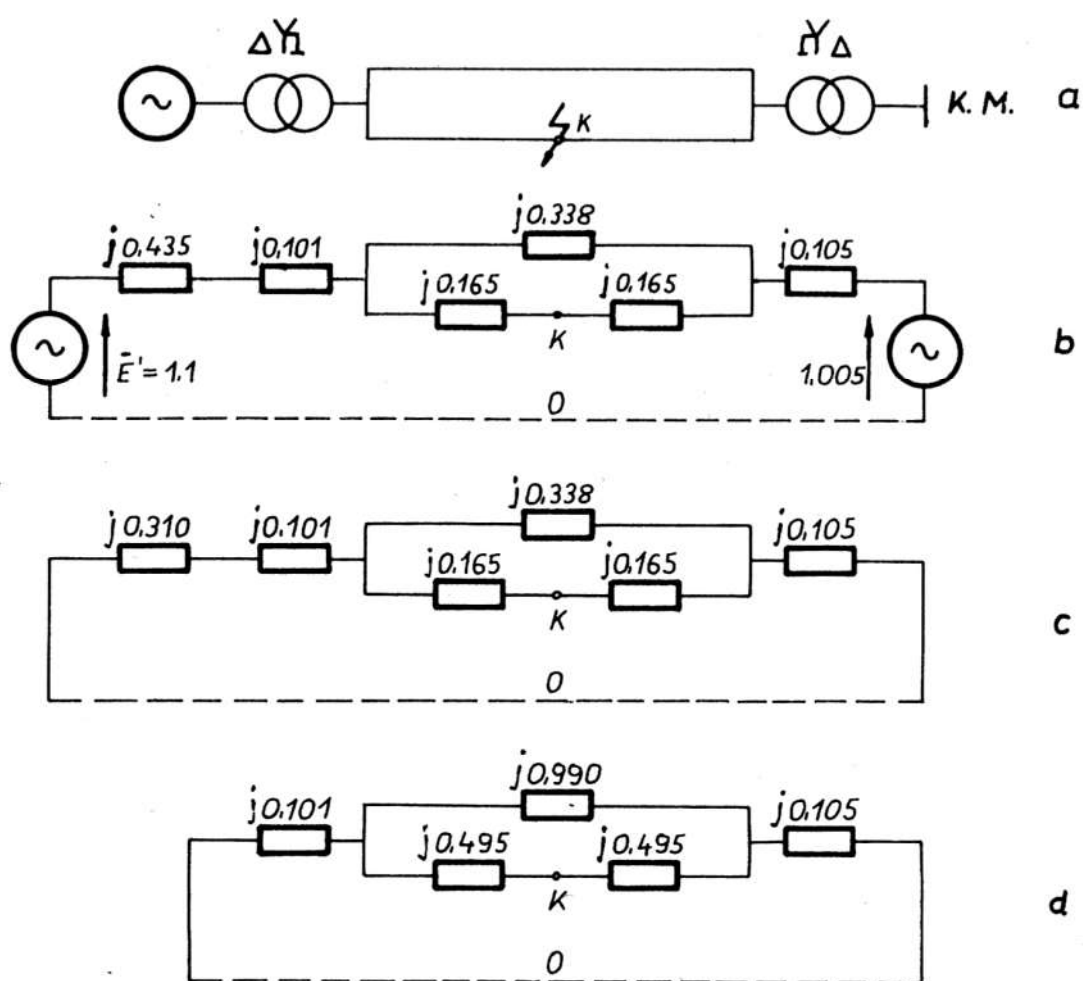
Obično se ispituje dinamička stabilnost za karakteristične nepo-
voljne slučajeve. Ako stabilnost u tim slučajevima ostaje sačuva-
na, ostat će sačuvana i u slučajevima, koji su manje teški, pa ih
ne treba računati. Ako pak stabilnost u karakterističnim nepovolj-
nim slučajevima nije sačuvana, moraju se odrediti uvjeti kod kojih
je pogon još dinamički stabilan. Iz rezultata se zaključuje na
mjere, koje treba poduzeti za poboljšanje dinamičke stabilnosti.
Vrlo je interesantno odrediti koju vrst kratkog spoja treba u-
zeti kao najnepovoljniju.

Primjer 1.8 Treba odrediti najnepovoljniju vrst kratkog spoja
za prijenos, prema slici 48a. Podaci u jediničnim vrijednostima
unešeni su u ekvivalentne sheme i to za direktni sistem na slici
48b, za inverzni sistem na slici 48c i za nulti sistem na slici
48d.

Nadomjesne sheme komponenata sa slika 48b, c i d prelaze transfi-
guracijom u nadomjesne sheme na slici 49a, b i c. Inverzni i nul-
ti sistem možemo dalje svesti na jednu reaktanciju gledano iz O-K,
jer su ovi sistemi pasivni.

Ekvivalentne sheme za vrijeme kvara dobit ćemo povezivanjem sis-
tema komponenata ovisno o vrsti kratkog spoja. Za svaku vrst
kratkog spoja može se izračunati reaktancija X_k koju treba uklju-
čiti između O-K. Tako je:

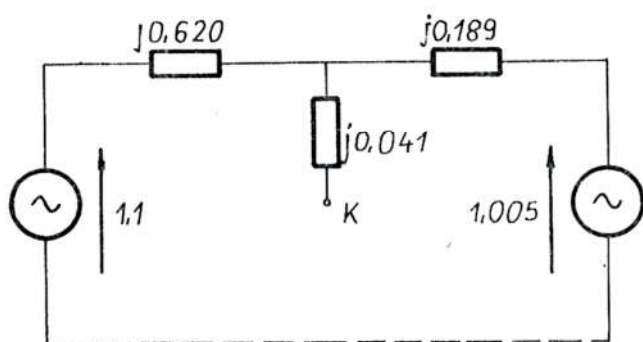
za tropolni kratki spoj	$X_k = 0$	1-47a
za jednopolni kratki spoj	$X_k = X_1 + X_0$	b
za dvopolni kratki spoj	$X_k = X_1$	c
za dvopolni kratki spoj sa spojem sa zemljom	$X_k = \frac{X_1 X_0}{X_1 + X_0}$	d



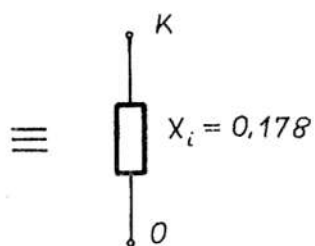
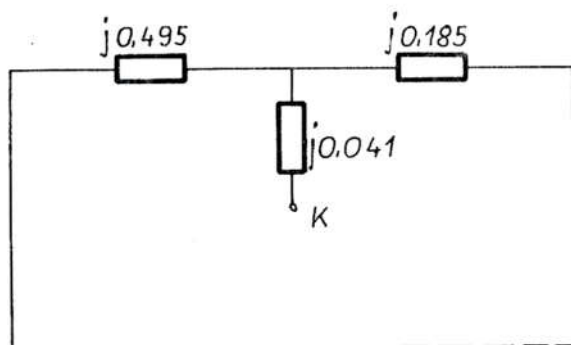
Slika 48.- Zadani prijenosni sistem iz primjera 1.8

Stoga je:

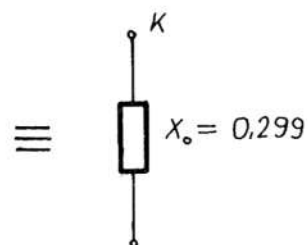
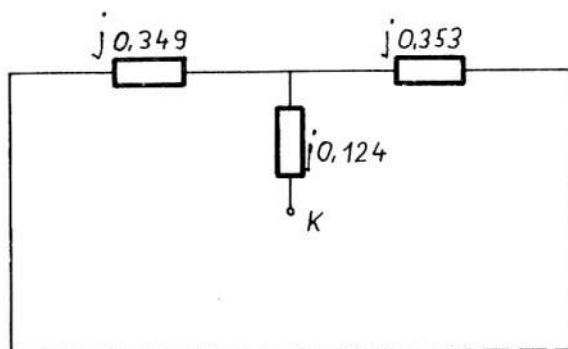
$$\begin{aligned} X_{kK3} &= 0 \\ X_{kK1} &= 0,477 \\ X_{kK2} &= 0,178 \\ X_{kK2Z} &= 0,112 \end{aligned}$$



a direktni sistem

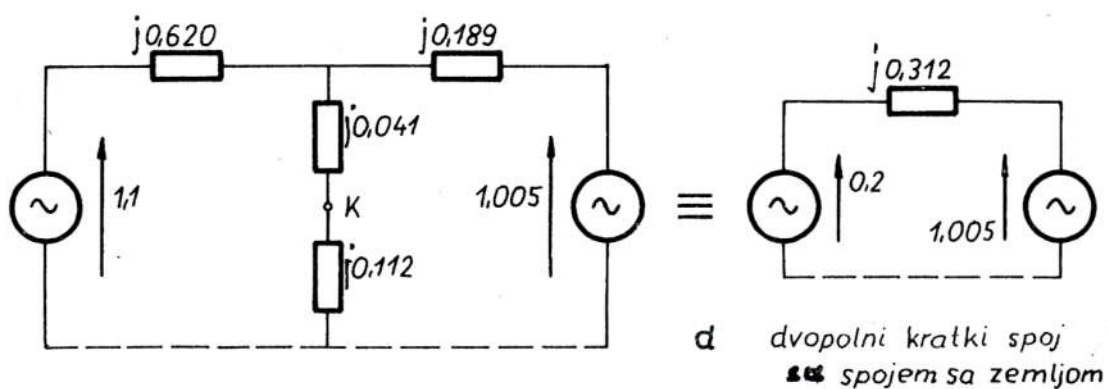
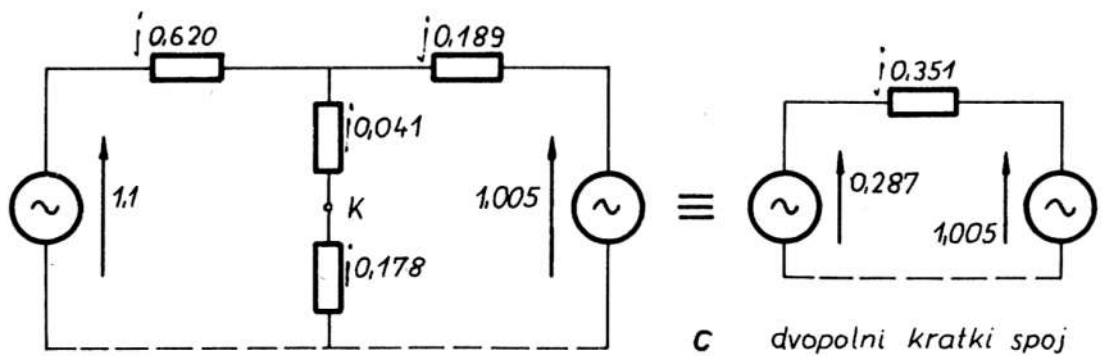
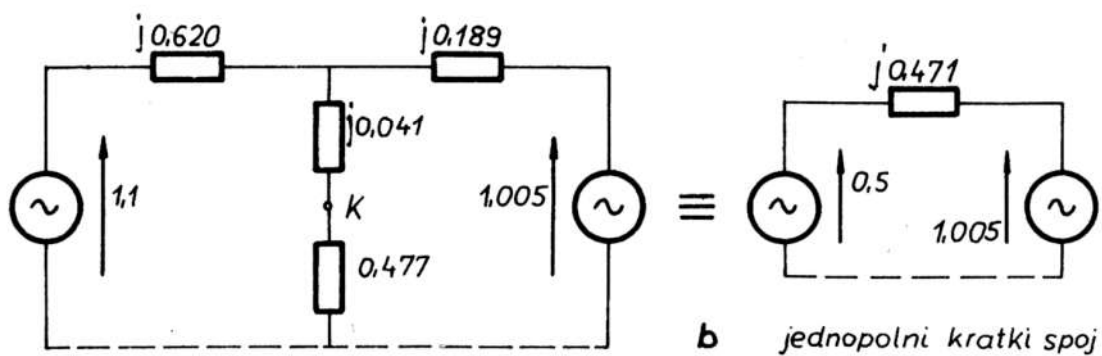
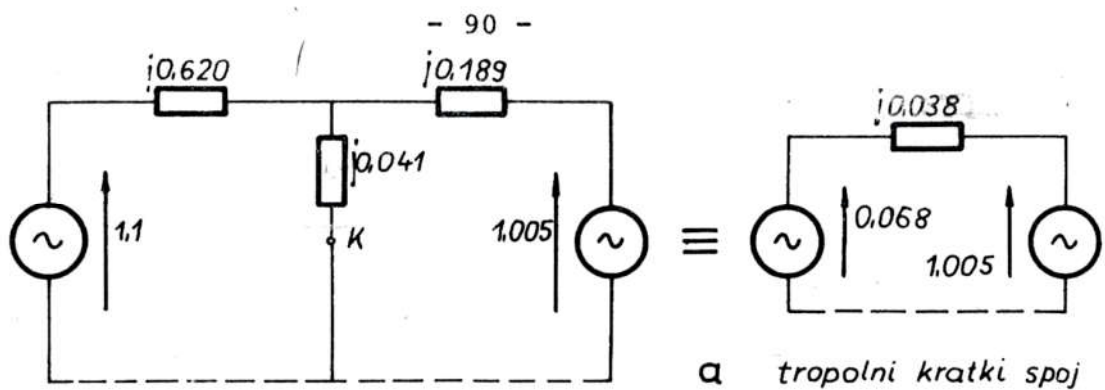


b inverzni sistem



c multi sistem

Slika 49.- Direktni, inverzni i multi sistem prijenosa sa slike 48 nakon transfiguracije



Slika 50.- Ekvivalentne sheme za vrijeme kvara

Za naš slučaj izračunane veličine X_k za razne vrste kratkog spoja prema 1-47 unešene su u nadomjesne sheme na slici 50. Prema poznatom postupku preračunali smo dalje mrežu na sistem bez poprečnih grana. Sada se može izračunati maksimalna snaga dinamičke karakteristike za vrijeme kratkog spoja za svaku vrst kratkog spoja.

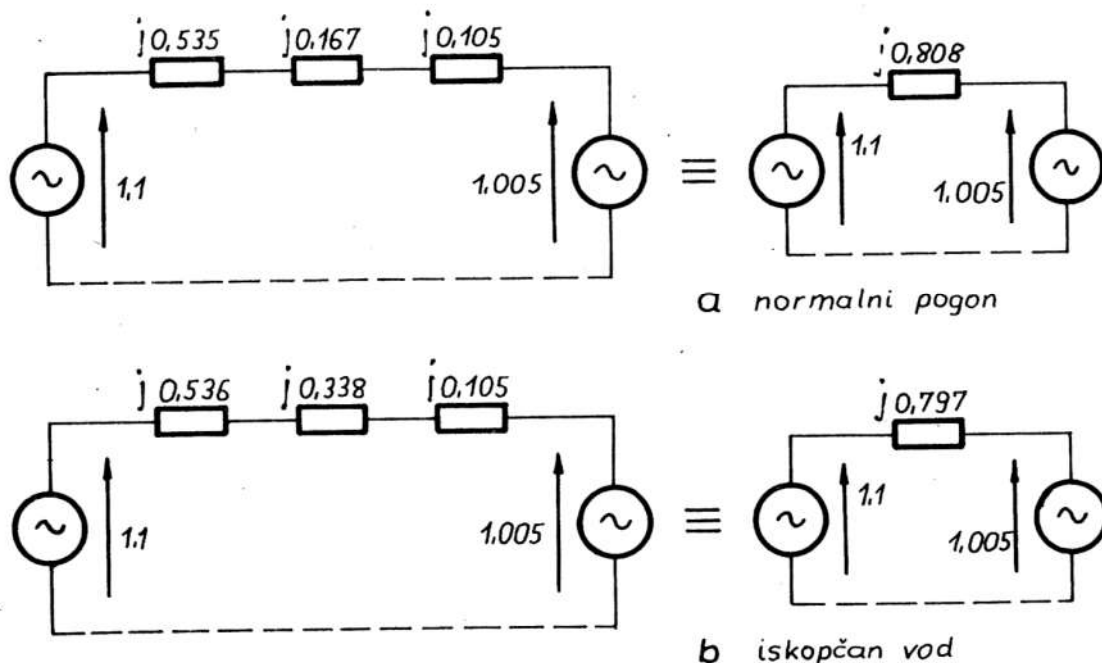
$$P_{\max K3} = \frac{0,068 \cdot 1,005}{0,227} = 0,302$$

$$P_{\max K1} = \frac{0,5 \cdot 1,005}{0,471} = 1,067$$

$$P_{\max K2} = \frac{0,287 \cdot 1,055}{0,351} = 0,822$$

$$P_{\max K2Z} = \frac{0,2 \cdot 1,005}{0,312} = 0,644$$

Za prijenos zadan ovim zadatkom i za određeno mjesto K račun pokazuje da je za dinamičku stabilnost najopasnija pojava trolejnog kratkog spoja.

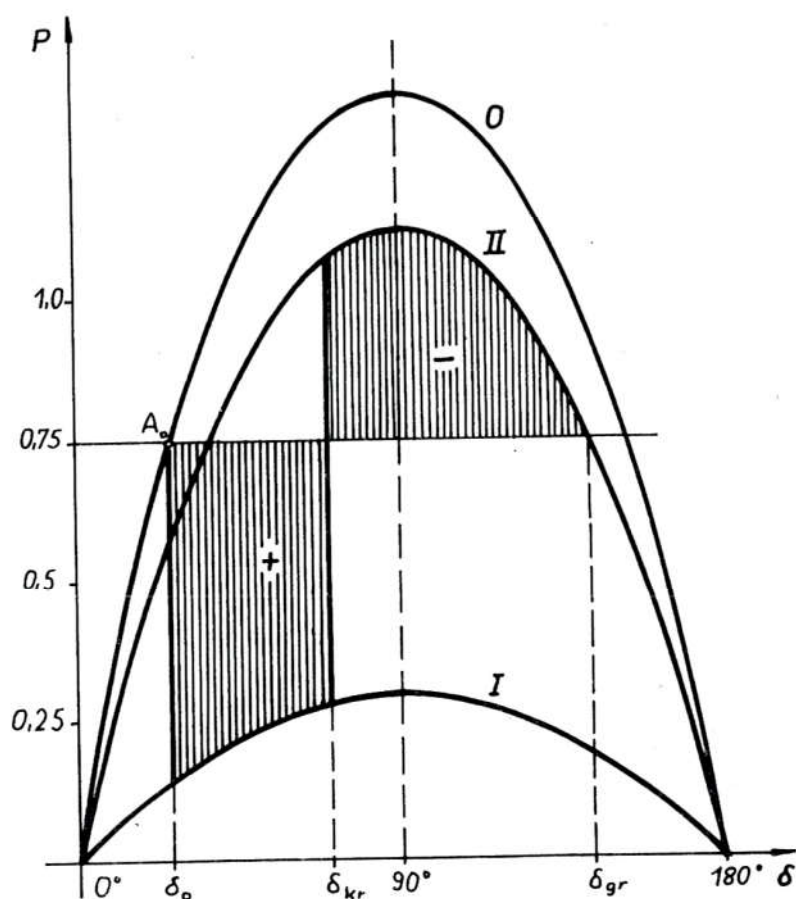


Slika 51. - Ekvivalentne sheme prijenosa za primjer 1.9

Primjer 1.9 Uz pretpostavku da je na prijenosu iz prethodnog primjera u točki K došlo do pojave tropolnog kratkog spoja odredi δ_{kr} pokušavanjem. Kratki spoj je eliminiran obostranim iskopčanjem voda. Neposredno prije kvara prenosila se snaga $P_0 = 0,75$. Za rješenje zadatka potrebne su nam još krivulje snaga - kut za normalni pogon i iskopčan vod. Nadomjesne sheme nacrtane su na slici 51.

$$P_{\max \text{ NP}} = \frac{1,1 \cdot 1,005}{0,808} = 1,368$$

$$P_{\max \text{ IV}} = \frac{1,1 \cdot 1,005}{0,979} = 1,129$$



0 - normalni pogon
I - tropolni kratki spoj
II - iskopčan vod

Slika 52.- Grafičko određivanje δ_{kr}

Iz dijagrama snaga - kut na sl.52,možemo očitati da je:

$$\delta_o = 33^\circ$$

$$\delta_{kr} = 71^\circ$$

$$\delta_{gr} = 139^\circ$$

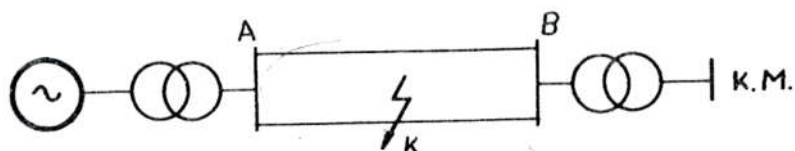
Vrijeme iskapčanja zaštite i granična dinamička snaga u uskoj su medjusobnoj vezi.

1.3.5 Automatsko ponovno ukapčanje

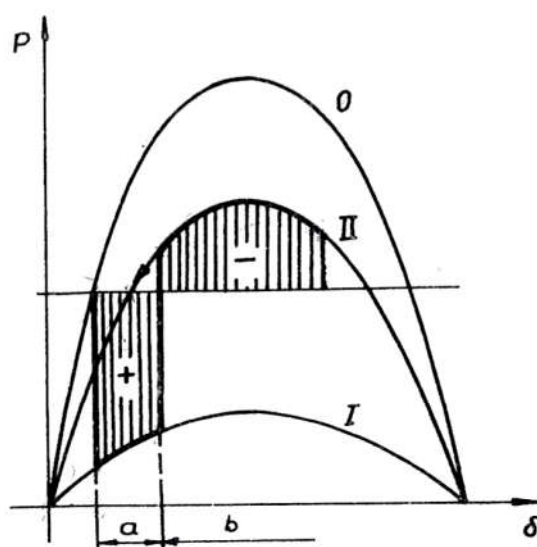
Automatsko ponovno ukapčanje (APU) doprinosi održavanju dinamičke stabilnosti, ako je uspješno. Uspješno APU je onda, kada se luk prolaznog kratkog spoja na vodu ugasi za vrijeme beznaponske pauze. Neuspješno ponovno ukapčanje pogoršava dinamičku stabilnost i može je ugroziti i u slučajevima, kada bi dinamička stabilnost bila sačuvana samim brzim iskapčanjem voda u kvaru. Zato treba biti oprezan kod izbora i primjene automatike.

Razmotrit ćemo prethodni slučaj u svjetlu automatskog ponovnog ukapčanja. Zadan je prijenos prikazan na slici 53a. Na slikama 53b, c i d nacrtani su dijagrami snaga kut za tri moguća slučaja:

- dalekovod nema automatsko ponovno ukapčanje. Za sve snage manje od dinamičke granične snage stabilnost je očuvana samim brzim iskapčanjem oštećenog voda.
- dalekovod ima automatsko ponovno ukapčanje, koje nakon beznaponske pauze uključuje vod. Ako je kvar prolaznog karaktera, na kraju opet vrijedi karakteristika normalnog pogona (o). Nakon oscilacija oko točke A_o pogon se vraća u normalno stanje. Stabilnost je očuvana, i to uz bolje uvjete nego u prethodnom slučaju.
- dalekovod ima automatsko ponovno ukapčanje, koje nakon beznaponske pauze uključuje vod. Ako kvar nije prolaznog karaktera, vrijedi opet karakteristika kratkog spoja. Definitivno iskapčanje voda vrši se sada u daleko težim okolnostima, jer je kut



Slika 53a - Zadani prijenos.
Na dvostrukom vodu kratki spoj



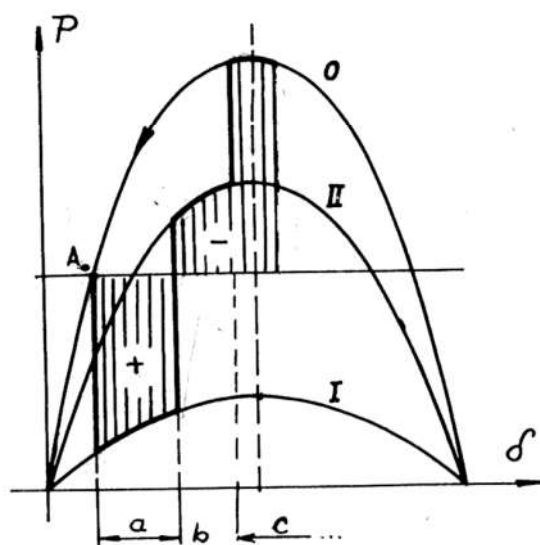
0 - normalni pogon
I - kratki spoj
II - iskopčan vod u kvaru
a - traje kratki spoj
b - iskopčan vod u kvaru

Slika 53b - Dalekovod nema automatsko ponovno ukapčanje. Stabilnost sačuvana

δ veći od δ_{kr} . Stabilnost nije očuvana. Da nije bilo APU, stabilnost bi bila sačuvana.

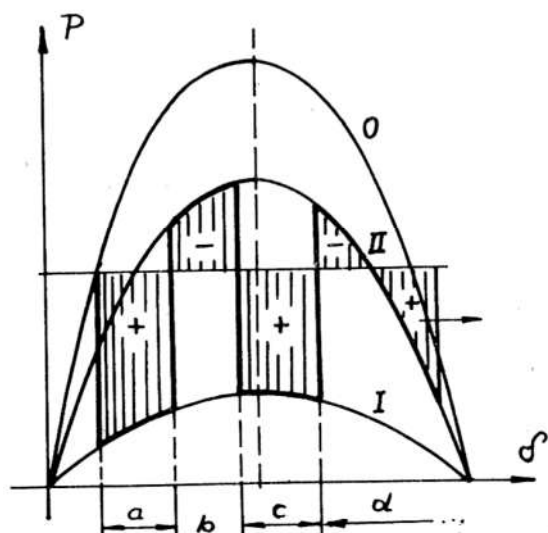
Gore opisani, namjerno odabrani slučaj, govori protiv primjene automatskog ponovnog uključivanja. Ne smijemo, međutim, zaboraviti da je velika većina grešaka prolaznog karaktera. Može se zaključiti:

- ako greška mora dovesti do gubitka stabilnosti, APU može samo spasiti situaciju. Zbog toga treba APU obavezno uvesti s vrlo kratkim vremenom iskapčanja i vrlo kratkim beznaponskim pauzama. Ovo vrijedi u slučajevima prijenosa jednim jedinim vodom.
- ako zahvaljujući paralelnim ili zamkastim vodovima dinamička stabilnost nije ugrožena iskapčanjem voda u kvaru, primjenit ćemo također brzu zaštitu, ali duge beznaponske pauze. U tom slučaju se eventualno ponovno ukapčanje voda na trajni kratki



- a - traje kratki spoj
- b - iskopčan vod u kvaru
(beznaponska pauza)
- c - vod ponovo uključen
- 0 - I - II - 0

Slika 53c - Dalekovođ ima auto-
matsko ponovno ukapčanje. APU je us-
pješno. Stabilnost je sačuvna.



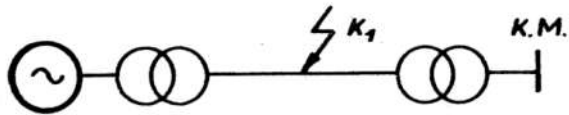
- a - traje kratki spoj
- b - beznaponska pauza
- c - vod uključen. Ponovo
kratki spoj
- d - vod definitivno isključen
- 0 - I - II - 0

Slika 53d - Dalekovođ ima auto-
matsko ponovno ukapčanje. APU je ne-
uspješno. Stabilnost nije očuvana

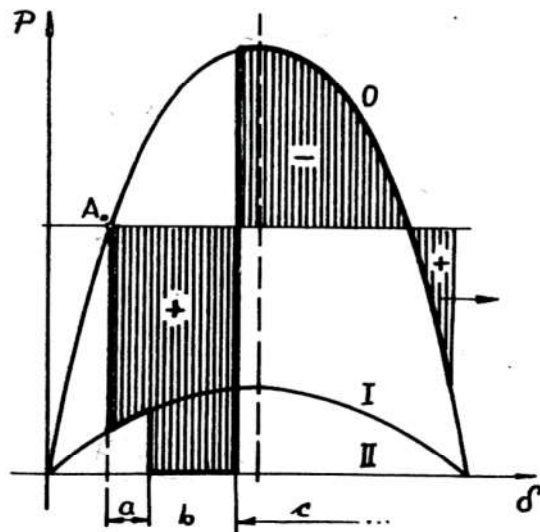
Slika 53. - Dijagrami $P = f(\delta)$ kod primjene APU

spoj javlja kao nova pojava, pošto se za vrijeme duge beznaponske pauze već uigralo novo stacionarno stanje.

Varijanta automatskog ponovnog ukapčanja je jednopolno automatsko ponovno ukapčanje, koje se temelji na činjenici da je oko 80% prolaznih smetnji na vodovima jednopolnog karaktera.

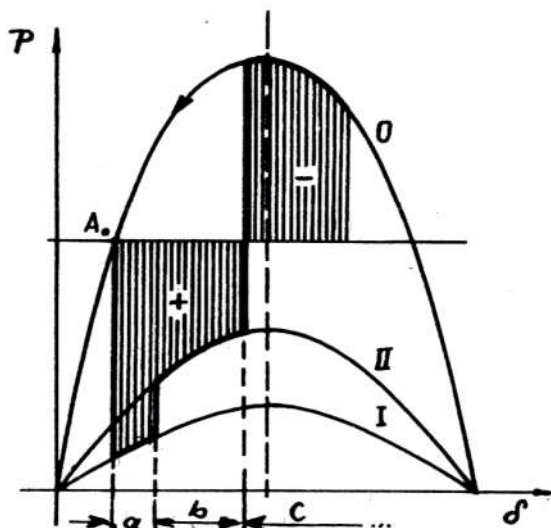


Slika 54a - Zadani prijenos od elektrane na krutu mrežu



- a - traje kratki spoj K1
 - b - beznaponska pauza, sve tri faze isključene
 - c - ukopčan vod
- 0 - I - II - 0

Slika 54b - Dalekovod ima trofazno APU. Stabilnost nije sačuvana



- a - traje kratki spoj K1
 - b - isključena pogodjena faza
 - c - uključen vod
- 0 - I - II - 0

Slika 54c - Dalekovod ima jedno-
polno APU. Stabilnost je sačuvana.

Slika 54. - Varijante uspješnog APU za slučaj jednofaznog kratkog spoja

Jednopolno APU primjenit ćemo na jednostrukim prijenosnim sistemima, npr. vod - elektrana - mreža. U ovom slučaju tropolno iskapčanje dovodi do potpunog nestanka sinhronizacijskog momenta i cijela mehanička snaga pogonskog stroja trošit će se na ubrzanje rotora. Ako isključimo samo pogodjenu fazu, stanovita djelatna snaga i dalje će se prenositi preko preostale dvije faze, što će povoljno utjecati na očuvanje dinamičke stabilnosti. Na slici 54. prikazan je slučaj uspješnog APU kada je kod tropolnog iskapčanja voda stabilnost bila izgubljena, dok je kod jednopolnog iskapčanja voda stabilnost bila sačuvana.

Kod jednopolnog APU trebat će duža beznaponska pauza, jer se luk teže gasi radi inducirano napona zdravih faza.

1.3.6 Metoda korak po korak

Rješenje diferencijalne jednačbe

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = k \Delta P$$

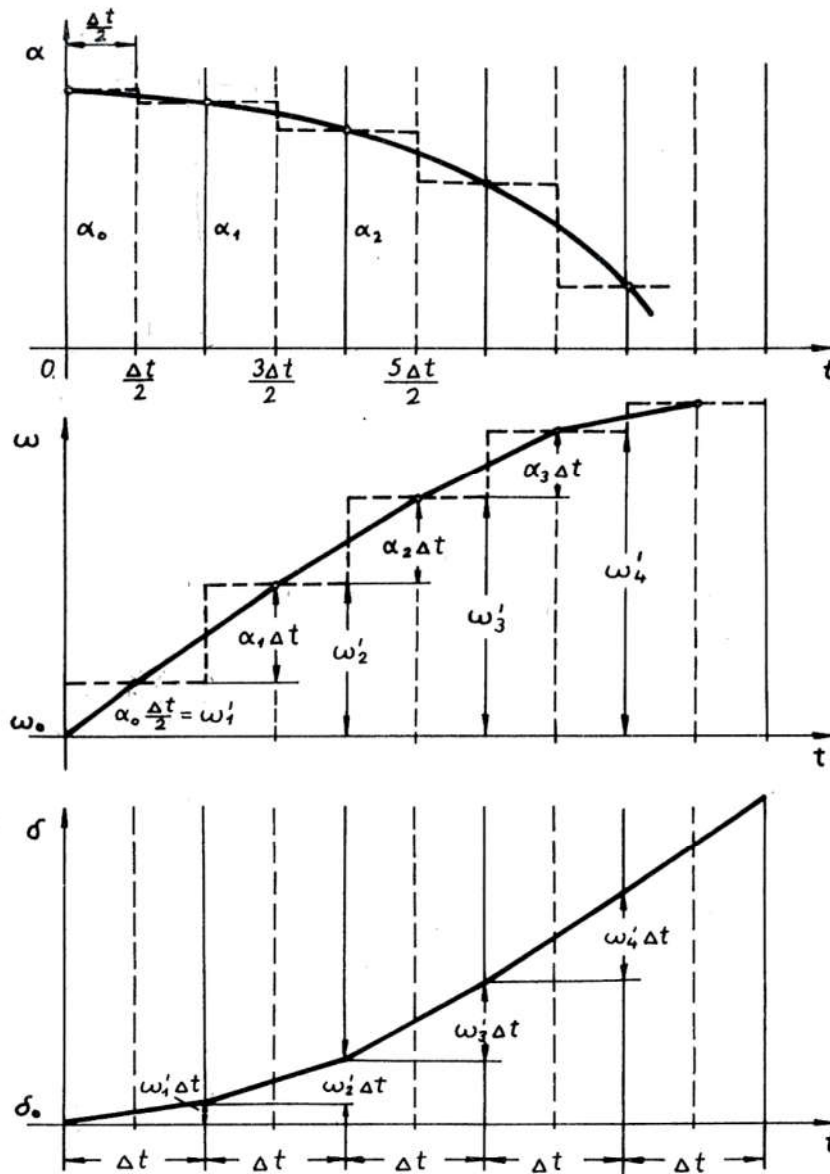
nije jednostavno, jer je $\Delta P = f(t)$ i rješenje se ne može odrediti u analitičkoj formi. Ovdje ćemo pokazati jednu varijantu Eulerove numeričke metode, koja se često koristi i to pod imenom "metoda korak po korak".

Slika 55. ilustrira ovu metodu.

Ubrzanje α proporcionalno je razlici primjenjene mehaničke snage i odane električne snage generatora

$$\alpha = k (P_m - P_e), \quad 1-48$$

gdje je $P_e = f(\delta)$, a $\delta = f(t)$. Podijelimo promatrano vrijeme na jednake intervale Δt . Aproximiramo krivulju $\delta = f(t)$ tako da je za vrijeme t od:



Slika 55.- Odredjivanje krivulja njihanja metodom korak po korak

$$0 - \frac{\Delta t}{2} \quad \alpha_0 = \text{konst.} \quad 1-49a$$

$$\frac{\Delta t}{2} - \frac{3\Delta t}{2} \quad \alpha_1 = \text{konst.} \quad b$$

$$\frac{3\Delta t}{2} - \frac{5\Delta t}{2} \quad \alpha_2 = \text{konst.} \quad c$$

itd.

Ova ubrzanja dovode do povećanja kutne brzine. Označit ćemo razliku između stvarne i sinhronne kutne brzine sa ω' . Na kraju svakog intervala iznosi:

$$\omega'_1 = \alpha_0 \frac{\Delta t}{2} \quad 1-50a$$

$$\omega'_2 = \omega'_1 + \alpha_1 \Delta t \quad b$$

$$\omega'_3 = \omega'_2 + \alpha_2 \Delta t \quad c$$

itd.

Aproksimiramo krivulju $\omega' = f(t)$ tako da je za vrijeme t od

$$0 - \Delta t \quad \omega'_1 = \text{konst.} \quad 1-51a$$

$$\Delta t - 2\Delta t \quad \omega'_2 = \text{konst.} \quad b$$

$$2\Delta t - 3\Delta t \quad \omega'_3 = \text{konst.} \quad c$$

itd.

Ove brzine dovode do povećanja kuta δ . Označit ćemo razliku između stvarnog kuta i početnog kuta δ_0 sa δ' . Na kraju svakog intervala δ' iznosi:

$$\delta'_1 = \omega'_1 \Delta t \quad 1-52a$$

$$\delta' = \delta'_1 + \omega'_2 \Delta t \quad b$$

$$\delta'_3 = \delta'_2 + \omega'_3 \Delta t \quad c$$

Za n -ti interval:

$$\omega'_n = \omega'_{n-1} + \alpha_{n-1} \Delta t \quad 1-53a$$

$$\delta'_n = \delta'_{n-1} + \omega'_n \Delta t \quad b$$

$$\begin{aligned} \Delta \delta_n &= \delta'_n - \delta'_{n-1} = \omega'_n \Delta t = \\ &= (\omega'_{n-1} + \alpha_{n-1} \Delta t) \Delta t = \\ &= \omega'_{n-1} \Delta t + \alpha_{n-1} \Delta t^2 \end{aligned}$$

$$\Delta \delta_n = \Delta \delta_{n-1} + k \Delta P_{n-1} \Delta t^2 \quad 1-54$$

Novi priraštaj kuta računamo iz priraštaja kuta prethodnog intervala i razlike mehaničke i električne snage također prethodnog intervala.

Krivulja ubrzanja α nije unaprijed poznata. Ona slijedi iz kuta δ , koji se računa iz α . Relacija 1-54 pokazuje ovaj proces, koji ide postepeno od intervala do intervala.

Obično se uzima $\Delta t = 0,05$ s ili $\Delta t = 0,04$ s. Što je manji interval Δt , račun je točniji.

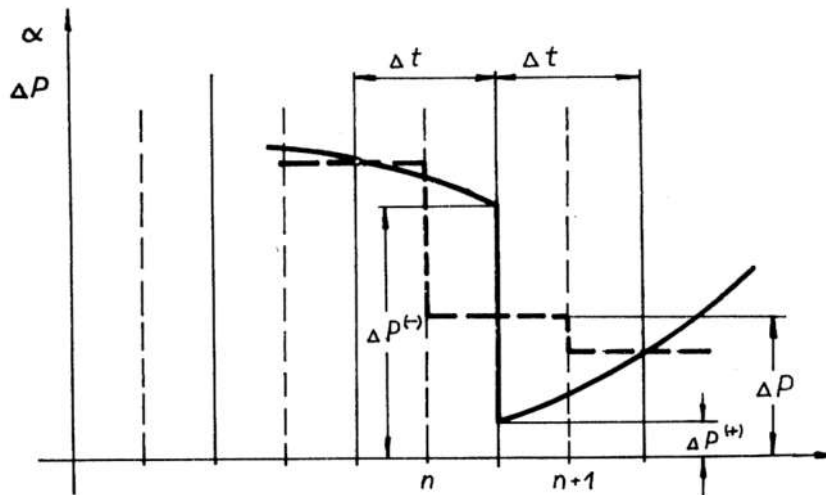
Vidjeli smo da u toku same prijelazne pojave može doći do promjene uklopnog stanja, npr. da zaštita iskopča kratki spoj. Razlika snaga ΔP je jednaka srednjoj aritmetičkoj vrijednosti obaju stanja na granici:

$$\Delta P = \frac{\Delta P^{(-)} + \Delta P^{(+)}}{2} \quad 1-55$$

$\Delta P^{(-)}$ = razlika snaga starog stanja

$\Delta P^{(+)}$ = razlika snaga novog stanja

Relacija 1-55 je ilustrirana na slici 56,



Slika 56.- Promjena uklopnog stanja

Primjer 1.10 Zadan je prijenos kao na slici 48. Trofazni kratki spoj u točki K iskopčan je nakon 0,15 s. Trajanje beznaponske pauze iznosilo je 0,4 s. Odredi krivulje njihanja, ako je:

- a) APU uspješan
- b) APU neuspješan

U momentu kratkog spoja prenosila se snaga $P_O = 0,8; 0,9$ i $1,0$. Konstanta inercije generatora $H = 3$, nazivna snaga $S_n = 1,0$.

Karakteristika normalnog pogona:

$$P_{NP} = 1,136 \sin \delta$$

Pošto je $P_m = P_O$, uvrštenjem u gornju jednadžbu izlazi:

$$\delta_O = 35,79^\circ; 41,14^\circ \text{ i } 46,97^\circ$$

Karakteristika kvara:

$$P_{K3} = 0,302 \sin \delta$$

Karakteristika iskopčanog voda:

Tablica 1.1

t	δ_{st}	Pe MW	ΔP MW	α st/s ²	$\Delta t'$ s	$\Delta \omega$ st/s	ω' st/s	ω st/s	Δt s	$\Delta \delta_{st}$	δ_{st}
0,00	35,79	0,177	0,623	1869	0,025	46,7	46,7	18047	0,05	2,34	38,13
0,05	38,13	0,186	0,614	1842	0,05	92,1	138,8	18139	0,05	6,94	45,07
0,10	45,07	0,214	0,586	1758	0,05	87,9	226,7	18227	0,05	11,34	56,41
0,15	56,41	0,252 0,94	0,204	612	0,05	30,6	257,3	18257	0,05	12,87	69,28
0,20	69,28	1,056	-0,256	-768	0,05	-38,4	218,9	18219	0,05	10,95	80,23
0,25	80,23	1,113	-0,313	-939	0,05	-46,9	171,9	18172	0,05	8,59	88,83
0,30	88,83	1,129	-0,329	-987	0,05	-49,4	122,5	18123	0,05	6,13	94,96
0,35	94,96	1,124	-0,325	-974	0,05	-48,7	73,8	18074	0,05	3,69	98,65
0,40	98,65	1,116	-0,316	-948	0,05	-47,4	26,4	18026	0,05	1,32	99,97
0,45	99,97	1,112	-0,312	-936	0,05	-46,8	-20,4	17980	0,05	-1,02	98,95
0,50	98,95	1,115	-0,315	-945	0,05	-47,3	-67,7	17932	0,05	-3,38	95,57
0,55	95,57	1,124 1,362	-0,442	-1326	0,05	-66,3	-134	17866	0,05	-6,7	88,87
0,60	88,87	1,368	-0,568	-1704	0,05	-85,2	-219,2	17781	0,05	-10,96	77,91
0,65	77,91	1,338	-0,538	-1614	0,05	-80,7	-299,9	17700	0,05	-15,00	62,91

Tablica 1.2

t	δ st	P _e MW	ΔP MW	α st/s ²	Δt s	$\Delta \omega$ st/s	ω' st/s	ω st/s	Δt s	$\Delta \delta$ st	δ st
0,00	41,14	0,199	0,701	2103	0,025	52,58	52,58	18053	0,05	2,63	43,77
0,05	43,77	0,209	0,691	2073	0,05	103,65	156,23	18156	0,05	7,81	51,58
0,10	51,58	0,237	0,663	1989	0,05	99,45	255,68	18256	0,05	12,78	64,36
0,15	64,36	0,272 1,018	0,252	756	0,05	37,8	293,48	18293	0,05	14,67	79,03
0,20	79,03	1,108	-0,208	-624	0,05	-31,2	262,28	18262	0,05	13,11	92,14
0,25	92,14	1,128	-0,228	-684	0,05	-34,2	228,08	18228	0,05	11,40	103,54
0,30	103,54	1,098	-0,198	-594	0,05	-29,7	198,38	18198	0,05	9,92	113,46
0,35	113,46	1,036	-0,136	-408	0,05	-20,4	177,98	18178	0,05	8,90	122,36
0,40	122,36	0,954	-0,054	-162	0,05	-8,1	169,88	18170	0,05	8,49	130,85
0,45	130,85	0,854	0,046	138	0,05	6,9	176,78	18178	0,05	8,84	139,69
0,50	139,69	0,730	0,170	510	0,05	25,5	202,23	18202	0,05	10,11	149,80
0,55	149,80	0,568 0,688	0,272	816	0,05	40,8	243,03	18243	0,05	12,15	161,95
0,60	161,95	0,423	0,477	1431	0,05	71,6	314,6	18314	0,05	15,73	177,68

Tablica 1.3

t	δ_{st}	P_e MW	ΔP MW	α st/s ²	$\Delta t'$ s	$\Delta \omega$ st/s	ω' st/s	ω st/s	Δt s	$\Delta \delta$ st	δ_{st}
0,00	46,97	0,221	0,779	2337	0,025	58,4	58,4	18058	0,05	2,92	49,89
0,05	49,89	0,231	0,769	2307	0,05	115,4	173,8	18174	0,05	8,69	58,58
0,10	58,58	0,257	0,743	2224	0,05	111,5	285,3	18285	0,05	14,26	72,84
0,15	72,84	0,289 1,079	0,316	948	0,05	47,4	332,7	18333	0,05	16,64	89,48
0,20	89,48	1,111	-0,111	-333	0,05	-16,7	316,0	18316	0,05	15,80	105,28
0,25	105,28	1,089	-0,089	-267	0,05	-13,35	302,7	18303	0,05	15,13	120,41
0,30	120,41	0,974	0,026	- 78	0,05	3,9	306,6	18307	0,05	15,33	135,74
0,35	135,74	0,788	0,212	636	0,05	31,8	338,4	18338	0,05	19,92	152,66
0,40	152,66	0,519	0,481	1443	0,05	72,2	410,6	18410	0,05	20,52	173,19
0,45	173,19	0,133	0,867	2601	0,05	130,1	540,7	18541	0,05	27,03	200,22

Tablica 1.4

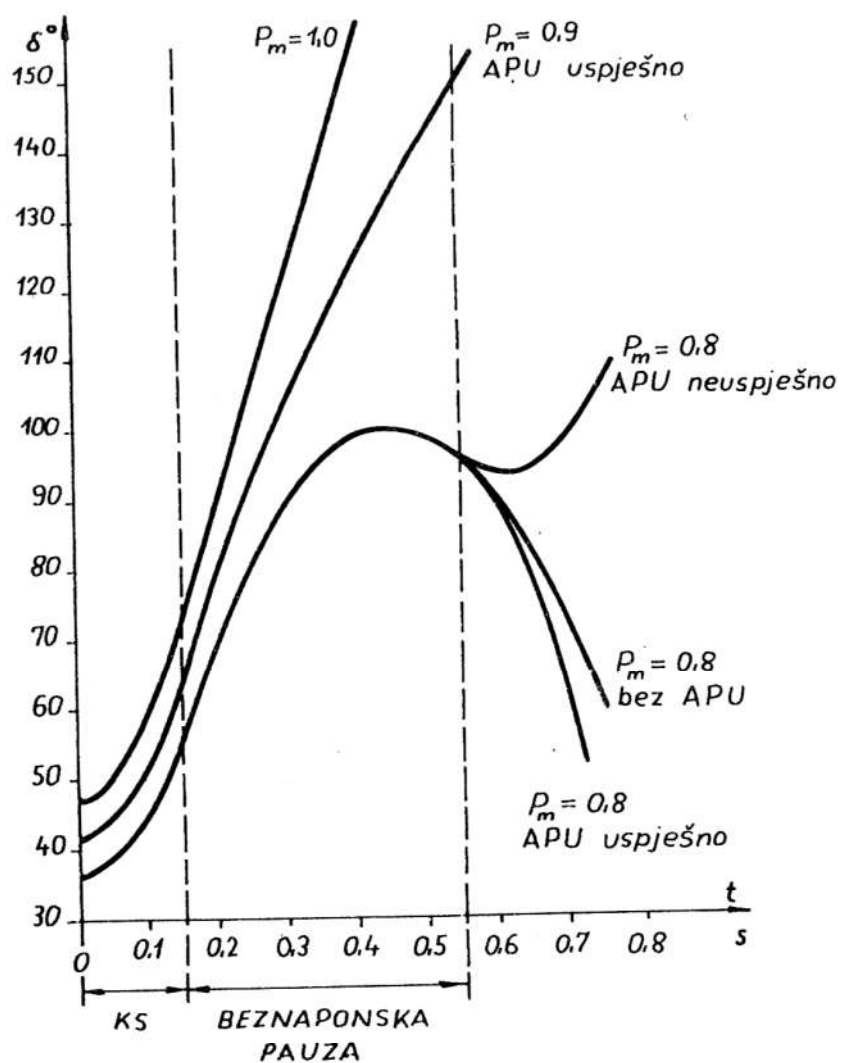
t	δ st	Pe MW	ΔP MW	α^2 st/s ²	Δt s	$\Delta \omega$ st/s	ω' st/s	ω st/s	Δt s	$\Delta \delta$ st	δ st
0,35	94,96	1,124	-0,325	-974	0,05	-48,7	73,8	18074	0,05	3,69	98,65
0,40	98,65	1,116	-0,316	-948	0,05	-47,4	26,4	18026	0,05	1,32	99,97
0,45	99,97	1,112	-0,312	-936	0,05	-46,8	-20,4	17980	0,05	-1,02	98,95
0,50	98,95	1,115	-0,315	-945	0,05	-47,3	-67,7	17932	0,05	-3,38	95,57
0,55	95,57	1,124 0,300	0,088	264	0,05	13,2	-54,5	17946	0,05	-2,73	92,85
0,60	92,85	0,302	0,498	1494	0,05	74,7	20,2	18020	0,05	1,01	93,86
0,65	93,86	0,301	0,499	1497	0,05	74,9	95,1	18095	0,05	4,75	98,61
0,70	98,61	0,299	0,501	1503	0,05	75,2	170,3	18170	0,05	8,51	107,12

$$P_{IV} = 1,129 \sin \delta$$

Za konstantu inercije $H = 3$:

$$k = \frac{9\,000}{3 \cdot 1} = 3\,000$$

U tablicama 1.1 - 1.5 nalazi se tok proračuna krivulja $\delta = f(t)$ metodom korak po korak. Krivulje su nacrtane na slici 57.



Slika 57. - Krivulje njihanja prema zadatku u primjeru 1.10

Za $P_m = 0,8$ stabilnost je sačuvana, bez obzira da li će vod ostati iskopčan ili će ga automatsko ponovno ukapčanje uspješno ukopčati. Neuspješno automatsko ponovno ukapčanje dovodi do gubitka sinhronizma.

Za $P_m = 0,9$ i $P_m = 1,0$ ni uspješno automatsko ponovno ukapčanje ne može sačuvati stabilnost.

1.3.7 Regulacija uzbude generatora i snage turbine

U do sada opisanom tehničkom rješenju problema dinamičke stabilnosti zanemareni su efekti regulacije uzbude generatora i regulacije snage turbine, pa je računano sa konstantnom mehaničkom snagom agregata i konstantnom elektromotornom silom iza tranzientne reaktancije. U slučajevima kada se zahtijeva točnije ponašanje sistema u tranzientnom periodu ili ako se vrijeme promatranja pomakne preko jedne sekunde, važno je uvesti u račun regulaciju uzbude i regulaciju turbine.

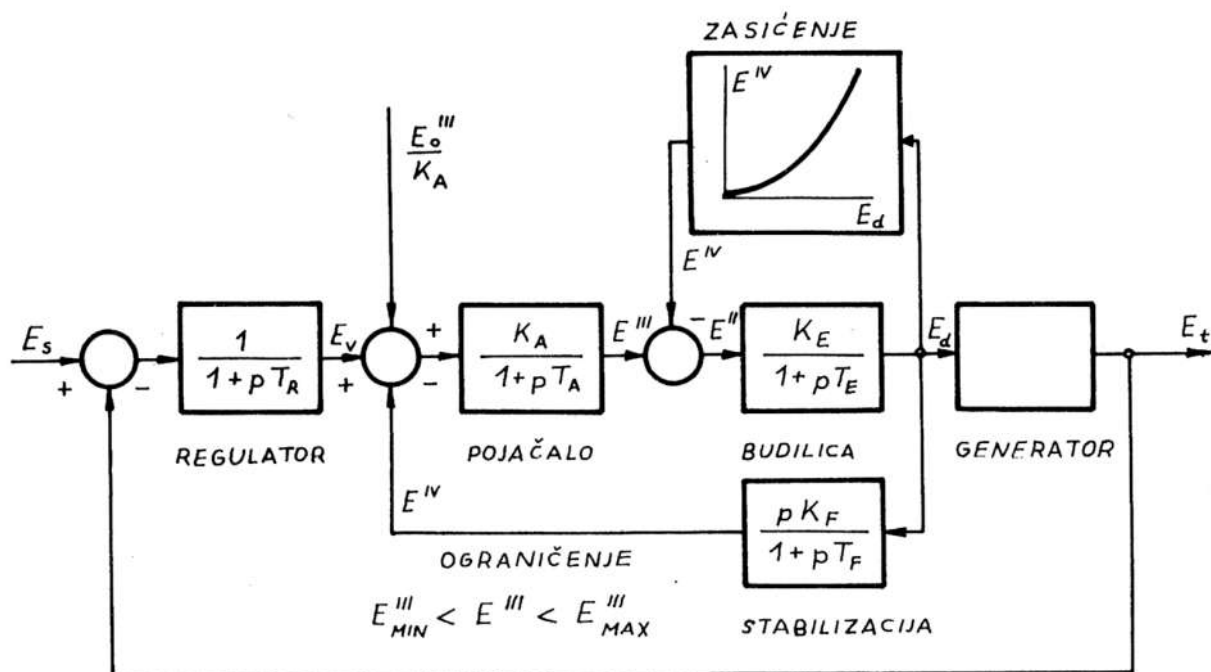
Uobičajeno je da se regulacija uzbude i regulacija turbine prikažu blok dijagramima, koji preko prijenosnih funkcija prikazuju ulaz i izlaz sistema.

Na slici 58. prikazan je pojednostavljeni blok dijagram regulacije uzbude. Ovaj prikaz uključuje prijenosne funkcije regulatora, pojačala, budilice i petlje za stabilizaciju. Petlja za stabilizaciju služi za prigušenje oscilacija i za sprečavanje udaraca napona. Blok dijagram (npr. onaj sa sl.58) osnova je za opisivanje regulacije napona diferencijalnim jednadžbama.

Prema blok dijagramu na sl. 58. možemo postaviti:

$$\frac{dE^V}{dt} = \frac{1}{T_R} (E_s - E_t - E^V) \quad 1-56a$$

$$\frac{dE^{III}}{dt} = \frac{1}{T_A} \left\{ K_A \left(E^V + \frac{E_o^{III}}{K_A} - E^{III} \right) \right\} \quad b$$



Slika 58.- Blok dijagram regulacije uzbuđene

$$\frac{dE_d}{dt} = \frac{1}{T_E} (E^{II} - K_E E_d) \quad 1-56c$$

$$\frac{dE^{IV}}{dt} = \frac{1}{T_F} \left\{ K_F \frac{dE_d}{dt} - E^{IV} \right\}, \quad d$$

gdje je:

- E_s = propisani napon
- E_o^{III} = izlazni napon pojačala prije poremećaja
- T_R = vremenska konstanta regulatora
- K_A = pojačanje pojačala
- T_A = vremenska konstanta pojačala
- K_E = pojačanje budilice

T_E = vremenska konstanta budilice

K_E = pojačanje petlje za stabilizaciju

T_F = vremenska konstanta petlje za stabilizaciju

Medjuvarijable su: E^{II} , E^{III} , E^{IV} , E^V i E^{VI} . Dalje je:

$$E^{II} = E^{III} - E^{VI} \quad 1-56e$$

Utjecaj zasićenja u uzbudnom krugu uzet je u obzir preko

$$E^{VI} = A e^{BE_d} \quad 1-56f$$

A i B su konstante koje ovise o krivulji magnetiziranja budilice. Jednadžbe 1-56a-f treba riješiti simultano s diferencijalnim jednadžbama njihanja.

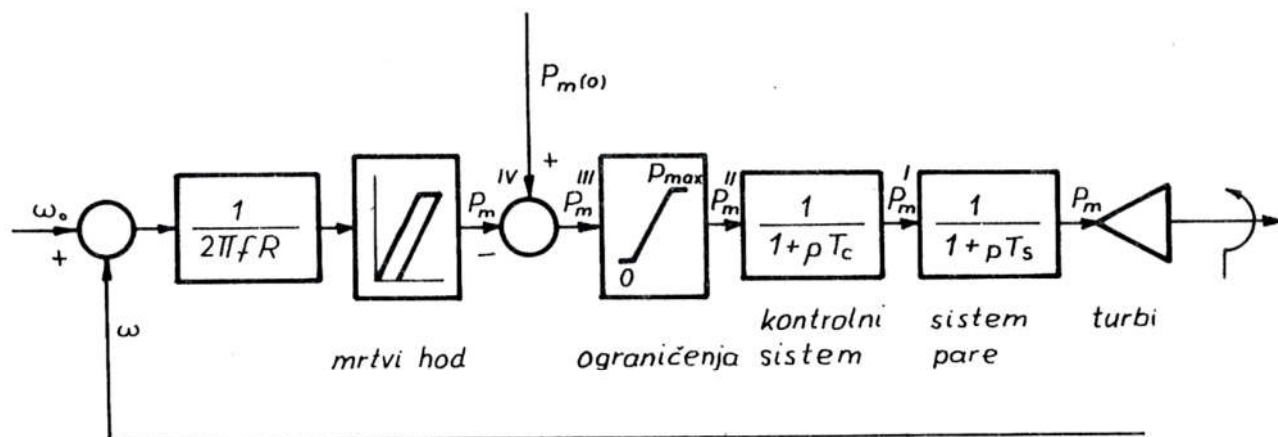
Na slici 59 prikazan je pojednostavljeni blok dijagram regulacije turbine, preko kojeg se može uzeti u račun utjecaj regulatora brzine okretaja. Prikaz uključuje prijenosnu funkciju sistema proizvodnje pare s vremenskom konstantom T_s i kontrolnog sistema s vremenskom konstantom T_C . Diferencijalne jednadžbe povezuju ulaz i izlaz varijabli ovih funkcija na slijedeći način:

$$\frac{dP_m}{dt} = \frac{1}{T_s} (P_m^I - P_m) \quad 1-57a$$

$$\frac{dP_m^I}{dt} = \frac{1}{T_C} (P_m^{II} - P_m^I) \quad b$$

P_m je mehanička snaga, a medjuvarijable su P_m^I , P_m^{II} , P_m^{III} i P_m^{IV} .

Varijable su povezane na slijedeći način:



Slika 59.- Blok dijagram regulacije turbine

$$\begin{aligned}
 P_m^{II} &= 0 & P_m^{III} &\leq 0 \\
 P_m^{II} &= P_m^{III} & 0 < P_m^{III} &< P_{\max} \\
 P_m^{II} &= P_{\max} & P_m^{III} &\geq P_{\max}
 \end{aligned}$$

gdje je $P_{\max}$ maksimalni kapacitet turbine. Mejuvarijabl

$$P_m^{III} = P_{m(0)} - P_m^{IV},$$

gdje je $P_{m(0)}$ početna mehanička snaga. Medjuvarijabla P_m je.

$$P_m^{IV} = \frac{1}{R} \left(\frac{\omega_0 - \omega}{2\pi f} \pm DB_T \right), \quad 1-57d$$

gdje je R relativna regulacija brzine i DB_T je mrtvi hod, tj. promjena u brzini da bi se svladao mrtvi hod sistema.

Jednadžbe 1-57a-d treba riješiti simultano s jednadžbama njihanim.

1.3.8 Višestrojni sistem

Do sada smo promatrali samo generator priključen preko prijenosnog sistema na krutu mrežu, što je poseban slučaj dvostrojnog sistema. U slučaju kratkog spoja kod stvarnog dvostrojnog sistema doći će do njihanja rotora i jednog i drugog stroja. Mjerodavan je kut između elektromotornih sila iza tranzientne reaktancije, odnosno kut $\delta' = \delta'_1 - \delta'_2$.

U elektroenergetskom sistemu redovito ima velik broj generatora. Svi ti generatori njišu se više ili manje ovisno o svojim karakteristikama, svom položaju u mreži i mjestu poremećaja. Sistem će biti dinamički stabilan, ako krivulje $\delta = f(t)$ za sve generatore međusobno teže nekoj konačnoj vrijednosti.

Nije potrebno promatrati sve međusobne kuteve. Dovoljno je odabrati jedan generator za referentni i promatrati ponašanje kuta između elektromotorne sile ovog generatora i svih ostalih. Ako vijedi:

$$\begin{aligned}\delta'_{mr} &\rightarrow c_1 \\ \delta'_{nr} &\rightarrow c_2\end{aligned}$$

onda je:

$$\delta'_{mr} - \delta'_{nr} = \delta'_{mn} \rightarrow c_1 - c_2 = c \quad 1-58$$

Analizu dinamičke stabilnosti sistema sa velikim brojem generatora provest ćemo u principu na isti način kao i kod najjednostavnijeg slučaja, samo će primijenjene matematičke metode biti one, koje su prikladne za računanje elektroničkim računalom. Bez

kompjutera može se ispitati dinamička stabilnost za sistem s najviše 3 stroja.

Prvi problem je, dakle, da se odredi ekvivalentna shema mreže neposredno prije kvara i da se toj mreži odrede tokovi snaga i naponi. Na taj način postaju nam poznate naponske prilike na sabirnicama svih generatora i djelatno opterećenje generatora. Također sada su nam poznati i naponi na sabirnicama potrošača.

Slijedi računanje admitancije potrošača iz relacije:

$$\bar{Y}_p = \frac{\bar{S}_p^*}{|U_p|^2} \quad 1-59$$

Iz podataka na sabirnicama generatora računamo elektromotorne sile $\bar{E}'$ iza tranzientne reaktancije svih generatora prema:

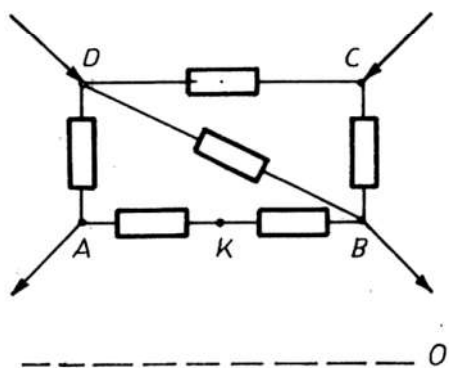
$$\bar{E}'_G = \bar{U}_G + \sqrt{3} I_G jX'_G \quad 1-60$$

Sada dolazi na red odredjivanje ekvivalentnih shema mreže onih sklopnih stanja, koja nam dolaze u proračunu. Svaku od tih mreža reduciramo na čvorove iza tranzientne reaktancije generatora. Ovo je prikazano na slici 60. za uklopno stanje određeno trolnim kratkim spojem na vodu A-B zadane mreže.

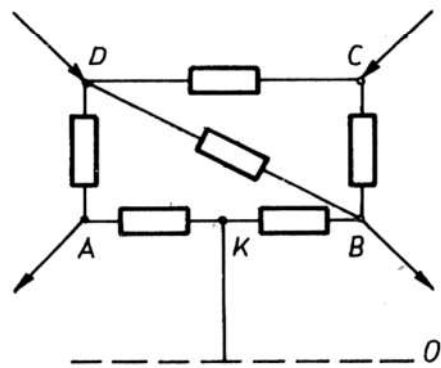
Mreža tranzientnog perioda definira se matričnom jednađžbom:

$$[\bar{I}] = [\bar{Y}] [\bar{E}'], \quad 1-61$$

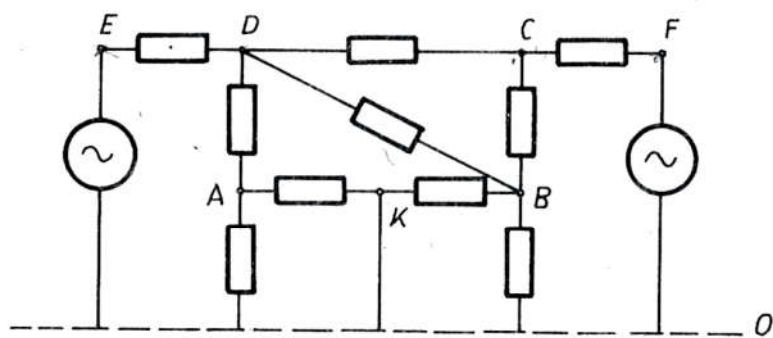
gdje je $[\bar{Y}]$ matrica vlastitih i međjusobnih admitancija čvora iza tranzientne reaktancije generatora. Relaciju 1-61 napisat ćemo u razvijenom obliku:



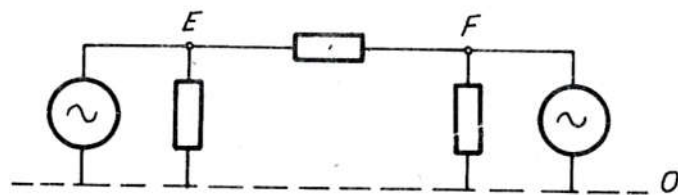
a) normalni pogon



b) tropolni kratki spoj



c) nadomjesna dhema tranzientnog perioda



d) reducirana mreža c)

Slika 60.- Priprema mreže za računanje dinamičke stabilnosti, kada je tropolni kratki spoj u čvoru K

ko ima generatora. Zato je potrebno mrežu tranzientnog perioda reducirati na broj čvorova koji je jednak broju generatora. Matrica $[\bar{Y}]$ iz relacije 1-61 je matrica vlastitih i međusobnih admitancija čvora upravo ovakve reducirane mreže.

Ako se uvrste vrijednosti za $\bar{I}_1$ iz relacije 1-61 u relacije 1-63 dobit ćemo:

$$\begin{aligned}
 P_i &= \operatorname{Re} (\bar{E}_i' \bar{Y}_{i1}^* \bar{E}_1'^* + \bar{E}_i' \bar{Y}_{i2}^* \bar{E}_2'^* + \dots + \bar{E}_i' \bar{Y}_{ii}^* \bar{E}_i'^* + \dots + \bar{E}_i' \bar{Y}_{iM}^* \bar{E}_M'^*) = \\
 &= \operatorname{Re} (E_i' Y_{i1} E_1' \underline{\delta_i - \theta_{i1} - \delta_1} + E_i' Y_{i2} E_2' \underline{\delta_i - \theta_{i2} - \delta_2} + \\
 &+ \dots + E_i'^2 Y_{ii} \underline{-\theta_{ii}} + \dots + E_i' Y_{iM} E_M' \underline{\delta_i - \theta_{iM} - \delta_M}) = \\
 &= E_i' Y_{i1} E_1' \cos (-\theta_{i1} + \delta_i - \delta_1) + E_i' Y_{i2} E_2' \cos (-\theta_{i2} + \\
 &+ \delta_i - \delta_2) + \dots + E_i'^2 Y_{ii} \cos (-\theta_{ii}) + \dots + \\
 &+ E_i' Y_{iM} E_M' \cos (-\theta_{iM} + \delta_i - \delta_M) = \\
 &= E_i' Y_{i1} E_1' \sin [90 + \theta_{i1} - (\delta_i - \delta_1)] + \\
 &+ E_{i2}' Y_{i2} E_2' \sin [90 + \theta_{i2} - (\delta_i - \delta_2)] + \dots + \\
 &+ E_i'^2 Y_{ii} \sin (90 + \theta_{ii}) + \dots + \\
 &+ E_i' Y_{iM} E_M' \sin [90 + \theta_{iM} - (\delta_i - \delta_M)] \quad i = 1, 2, \dots, M \quad 1-64
 \end{aligned}$$

Označi li se sa:

$$\delta_i - \delta_j = \delta_{ij} \quad 1-65$$

$$90 + \theta_{ij} = \alpha_{ij} \quad 1-66$$

može se pisati za snagu i-tog generatora:

$$P_i = E_i' Y_{i1} E_1' \sin (\alpha_{i1} - \delta_{i1}) + E_i' Y_{i2} E_2' \sin (\alpha_{i2} - \delta_{i2}) + \\ + \dots + E_i' Y_{ii} \sin \alpha_{ii} + \dots + E_i' Y_{iM} E_M' \sin (\alpha_{iM} - \delta_{iM})$$

$$i = 1, 2, \dots, M$$

1-67

Relacija 1-67 upravo je relacija 1-20 napisana za višestrojni sistem, u kojem za svaki čvor vrijedi da je pozitivna snaga koja ulazi u čvor, a negativna koja iz čvora izlazi.

U navedenim izrazima za snagu varijabla je samo kut δ_{ij} :

$$P_i = f (\delta_{i1}, \delta_{i2}, \dots, \delta_{iM})$$

1-68

$$i = 1, 2, \dots, M$$

Sada se može prijeći na računanje razlike između dovedene snage P_{mi} i odane električne snage P_i svakog generatora. Krivulju nihanja i-tog generatora prema referentnom generatoru možemo računati metodom korak po korak. U svakom koraku računa se prirast kuta svih generatora i tek onda se može ići na slijedeći korak.

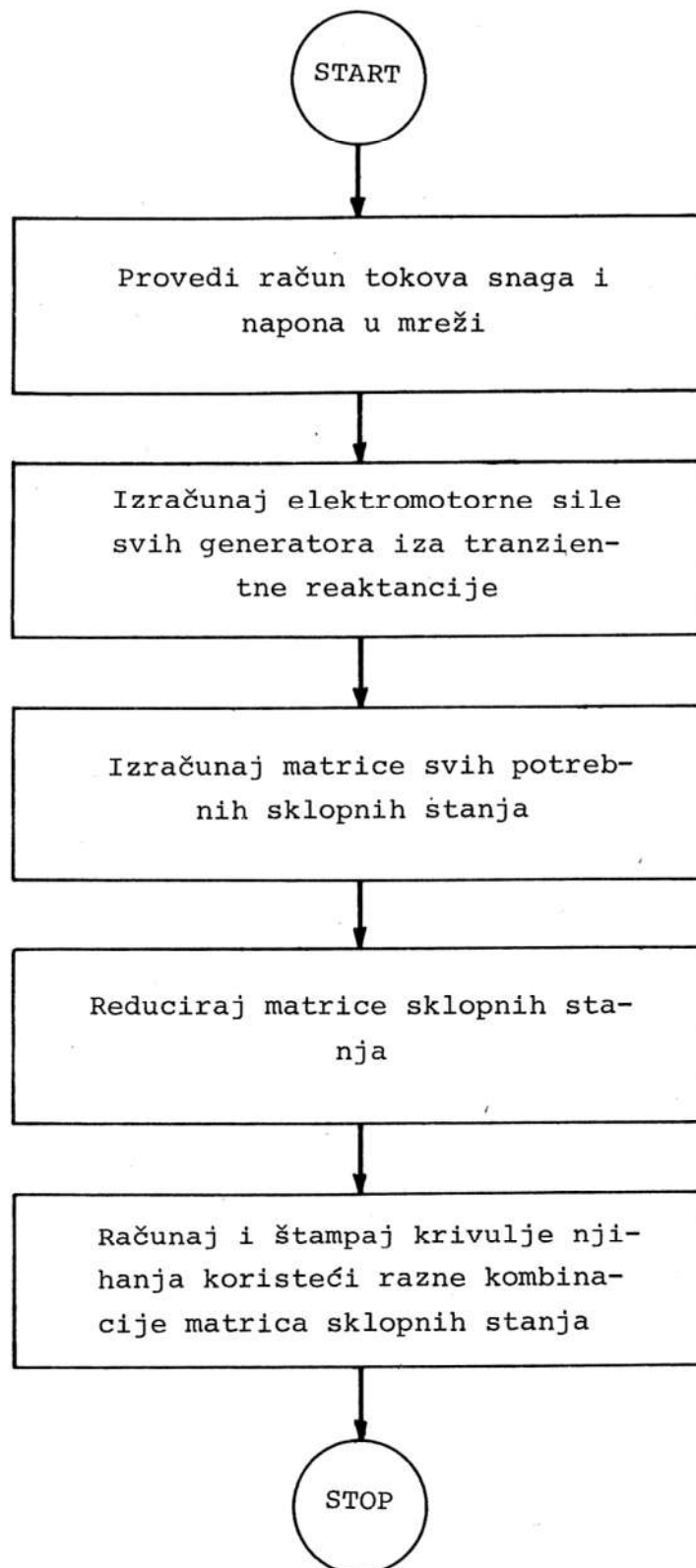
Za svako sklopno stanje računamo matricu, u kojoj su uključeni svi čvorovi plus čvorovi iza tranzientne reaktancije generatora. Svaku matricu posebno reduciramo na čvorove iza tranzientne reaktancije generatora. Za prijelaz na novo sklopno stanje vrijedi relacija:

$$P_i = \frac{\Delta P_i^{(-)} + \Delta P_i^{(+)}}{2}$$

1-69

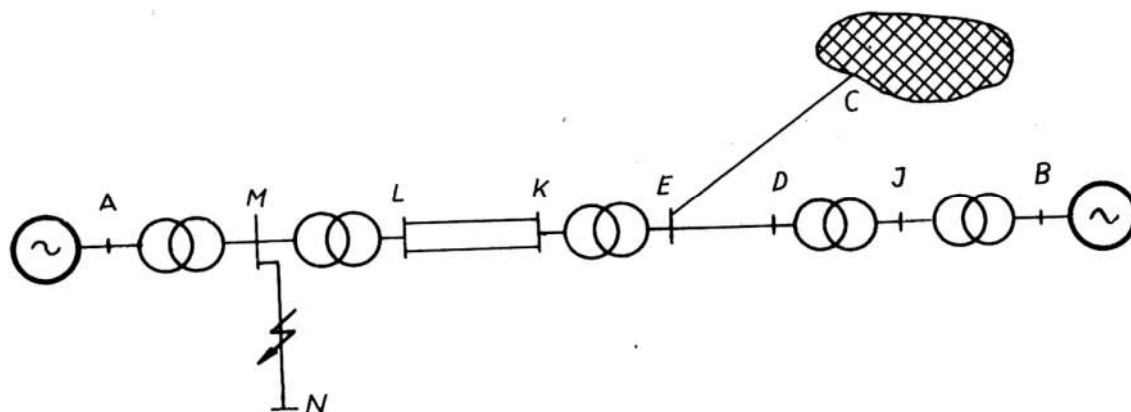
$$i = 1, 2, \dots, M$$

Na sl.61. prikazan je blok dijagram toka za proračun dinamičke stabilnosti mreže s većim brojem generatora.



Slika 61. - Blok dijagram toka za računanje dinamičke stabilnosti mreže s većim brojem generatora

Primjer 1.11 U mreži sa slike 62. nastao je trolpolni kratki spoj na vodu M-N u blizini sabirnica M. Iskapčanjem ovog voda nakon 0,10 s eliminira se kratki spoj. Izračunaj krivulje njihanja. Zадani su podaci u jediničnim vrijednostima preko lista podataka. Vidi tablicu 1.6 i 1.7 i slike 62. i 63.

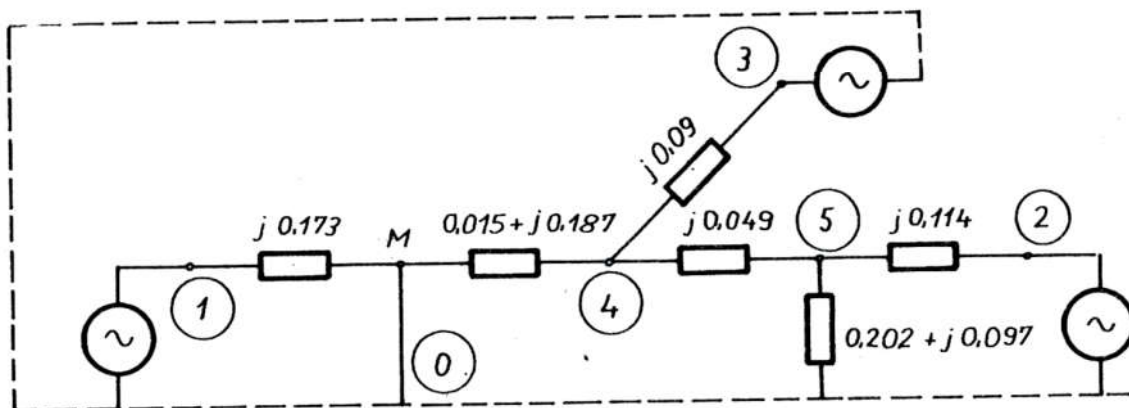


Slika 62.- Trolpolni kratki spoj u blizini sabirnica M

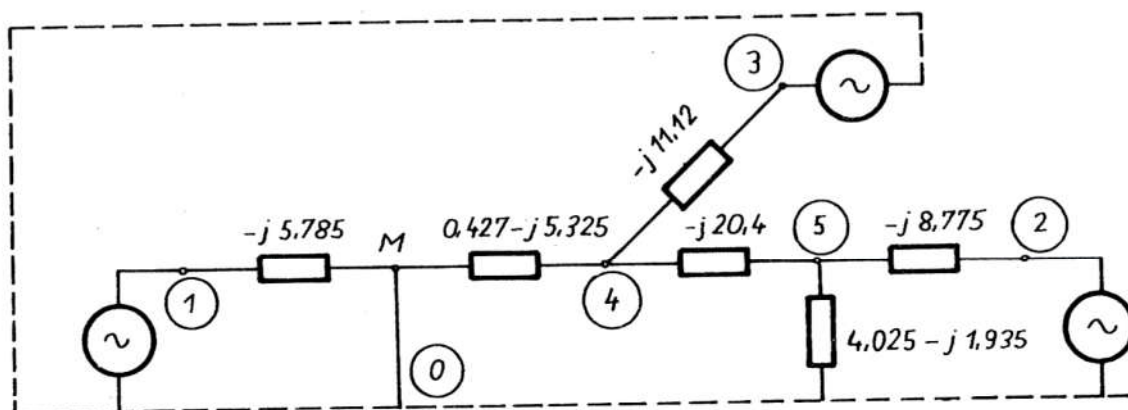
Tablica 1.6

LISTA GRANA

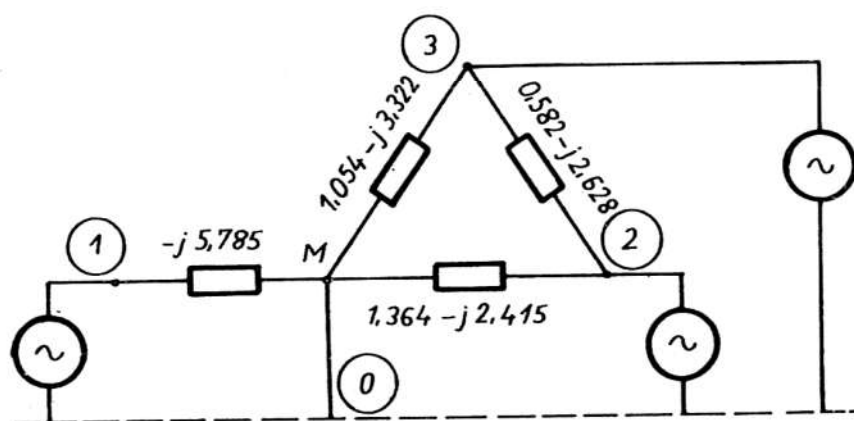
p	g	s	t	$\bar{Y}_{s-t}$	t^P	G	N
1	1	0	1	0,00 - j 5,785	0,10	6	5
	2	0	4	0,427 - j 5,325			
	3	3	4	0,00 - j11,12			
	4	4	5	0,00 - j20,4			
	5	0	5	4,025 - j 1,935			
	6	2	5	0,00 - j 8,775			
2	1	0	5	4,025 - j 1,932	0,4	5	5
	2	2	5	0,00 - j 8,775			
	3	4	5	0,00 - j20,4			
	4	3	4	0,00 - j11,2			
	5	1	4	0,1156 - j 2,77			



a - impedancije

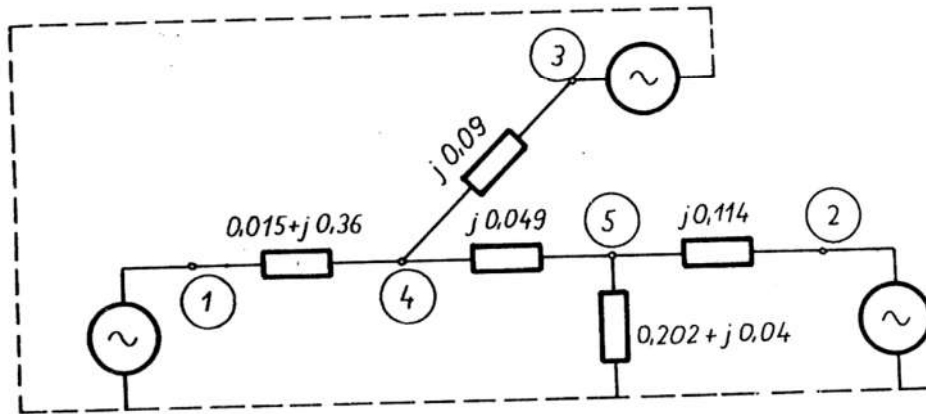


b - admitancije

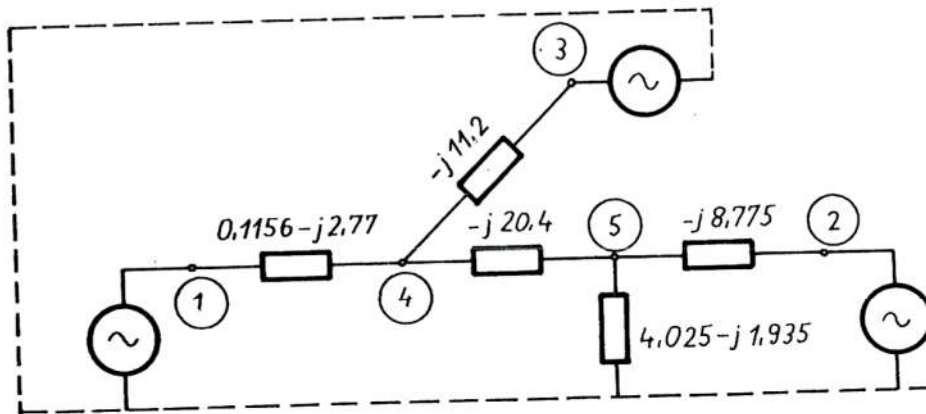


c - reducirana mreža

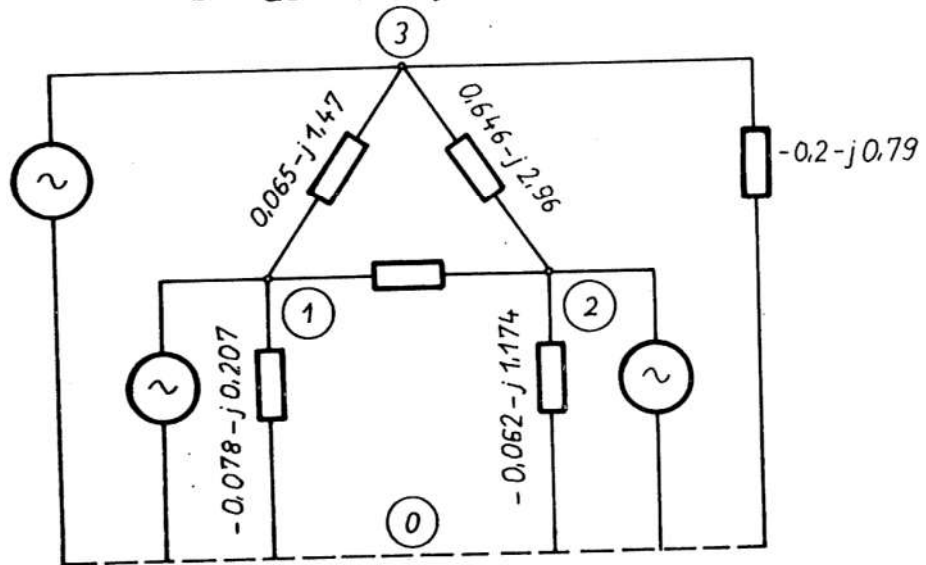
Slika 63.- Tropolni kratki spoj na vodu M-N u M



a - impedancije



b - admitancije



c - reducirana mreža

Slika 64.- Iskopčan vod M-N, a time i kratki spoj

Tablica 1.7

LISTA ČVOROVA

i	$\bar{e}_i$	P_{mi}	k_i
1	1,405 / $39^{\circ}30'$	2,5	500
2	1,116 / $-0^{\circ}35'$	1,1	750
3	0,955 / 0°	0	28,1

$$M = 3 \quad t = 0,05 \quad r = 1 \quad t_{MAX} = 0,20$$

Matrica trolnog kratkog spoja:

	1	2	3	4	5
1	-j5,785	0	0	0	0
2	0	-j8,755	0	0	j8,775
3	0	0	-j11,2	j11,2	0
4	0	0	j11,2	0,427-j36,845	j20,4
5	0	j8,755	0	j20,4	4,025-j31,107

Reducirana matrica trolnog kratkog spoja:

	1	2	3
1	0,0-j5,785	0	0
2	0	0,782-j5,043	0,582+j2,628
3	0	0,582+j2,628	0,472-j5,95

Matrica iskopčanog voda:

	1	2	3	4	5
1	$0,1156-j2,77$	0	0	$-0,1156-j2,77$	0
2	0	$-j8,775$	0	0	$j8,775$
$[\bar{Y}] = 3$	0	0	$-j11,12$	$j11,12$	0
4	$-0,1156+j2,77$	0	$j11,12$	$0,1156-j34,29$	$j20,4$
5	0	$j8,775$	0	$j20,4$	$4,025-j31,107$

Reducirana matrica iskopčanog voda:

	1	2	3
1	$0,116-j2,418$	$0,129+j0,741$	$0,065+j1,47$
$[\bar{Y}] = 2$	$0,129+j0,741$	$0,837-j4,875$	$0,646+j2,96$
3	$0,065+j1,47$	$0,646+j2,96$	$0,511-j5,22$

Prvi korak:

$$t = 0,0 \text{ s}$$

$$\bar{e}'_1 = 1,405 / 39,5^\circ$$

$$p_1 = 0,00$$

$$\Delta p_1 = 2,5$$

$$\bar{e}'_2 = 1,116 / -0,584^\circ$$

$$p_2 = 1,566$$

$$\Delta p_2 = -0,466$$

$$\bar{e}'_3 = 0,955 / 0^\circ$$

$$p_3 = 1,079$$

$$\Delta p_3 = -1,079$$

$$\alpha_1 = 1250 \text{ } ^\circ/\text{s}^2$$

$$\omega_1 = 31,2 \text{ } ^\circ/\text{s}$$

$$\delta'_1 = 41,06^\circ$$

$$\alpha_2 = -349,7 \text{ } "$$

$$\omega_2 = -8,74 \text{ } "$$

$$\delta'_2 = -1,02^\circ$$

$$\alpha_3 = -30,3 \text{ } "$$

$$\omega_3 = -0,757 \text{ } "$$

$$\delta'_3 = -0,038^\circ$$

Drugi korak:

$$t = 0,05 \text{ s}$$

$$\bar{e}_1' = 1,405 \quad / \quad 41,06^\circ$$

$$p_1 = 0,000$$

$$\Delta p_1 = 2,5$$

$$\bar{e}_2' = 1,116 \quad / - 1,02^\circ$$

$$p_2 = 1,549$$

$$\Delta p_2 = -0,444$$

$$\bar{e}_3' = 0,955 \quad / - 0,038^\circ$$

$$p_3 = 1,095$$

$$\Delta p_3 = -1,095$$

$$\alpha_1 = 1250 \quad ^\circ/s^2$$

$$\omega_1 = 93,6 \quad ^\circ/s$$

$$\delta_1' = 45,74^\circ$$

$$\alpha_2 = -333 \quad "$$

$$\omega_2 = -25,39 \quad "$$

$$\delta_2' = -2,289^\circ$$

$$\alpha_3 = -30,8 \quad "$$

$$\omega_3 = -2,297 \quad "$$

$$\delta_3' = -0,153^\circ$$

Treći korak:

$$t = 0,10 \text{ s}$$

$$\bar{e}_1' = 1,405 \quad / \quad 45,74^\circ$$

$$p_1 = 0,0$$

$$\Delta p_1^{(-)} = 2,5$$

$$\bar{e}_2' = 1,116 \quad / - 2,289^\circ$$

$$p_2 = 1,45$$

$$\Delta p_2^{(-)} = -0,35$$

$$\bar{e}_3' = 0,955 \quad / - 0,153^\circ$$

$$p_3 = 1,156$$

$$\Delta p_3^{(-)} = -1,156$$

$$p_1 = 2,705$$

$$\Delta p_1^{(+)} = -0,205$$

$$\Delta p_1 = 1,148$$

$$p_2 = 0,216$$

$$\Delta p_2^{(+)} = 0,804$$

$$\Delta p_2 = 0,227$$

$$p_3 = 1,006$$

$$\Delta p_3^{(+)} = 1,006$$

$$\Delta p_3 = -1,081$$

$$\alpha_1 = 574 \quad ^\circ/s^2$$

$$\omega_1 = 122,3 \quad ^\circ/s$$

$$\delta_1' = 51,855^\circ$$

$$\alpha_2 = 170,5 \quad "$$

$$\omega_2 = -16,86 \quad "$$

$$\delta_2' = -3,132^\circ$$

$$\alpha_3 = -30,25 \quad "$$

$$\omega_3 = -3,807 \quad "$$

$$\delta_3' = -0,343^\circ$$

Četvrti korak:

$$t = 0,15 \text{ s}$$

$$\bar{e}'_1 = 1,405 / 51,855^\circ$$

$$p_1 = 2,826$$

$$\Delta p_1 = -0,326$$

$$\bar{e}'_2 = 1,116 / -3,132^\circ$$

$$p_2 = 0,743$$

$$\Delta p_2 = 0,357$$

$$\bar{e}'_3 = 0,955 / -0,343^\circ$$

$$p_3 = -0,18$$

$$\Delta p_3 = 0,18$$

$$\alpha_1 = -163 \quad ^\circ/s^2$$

$$\omega_1 = 114,12 \quad ^\circ/s$$

$$\delta'_1 = 57,561^\circ$$

$$\alpha_2 = 268 \quad "$$

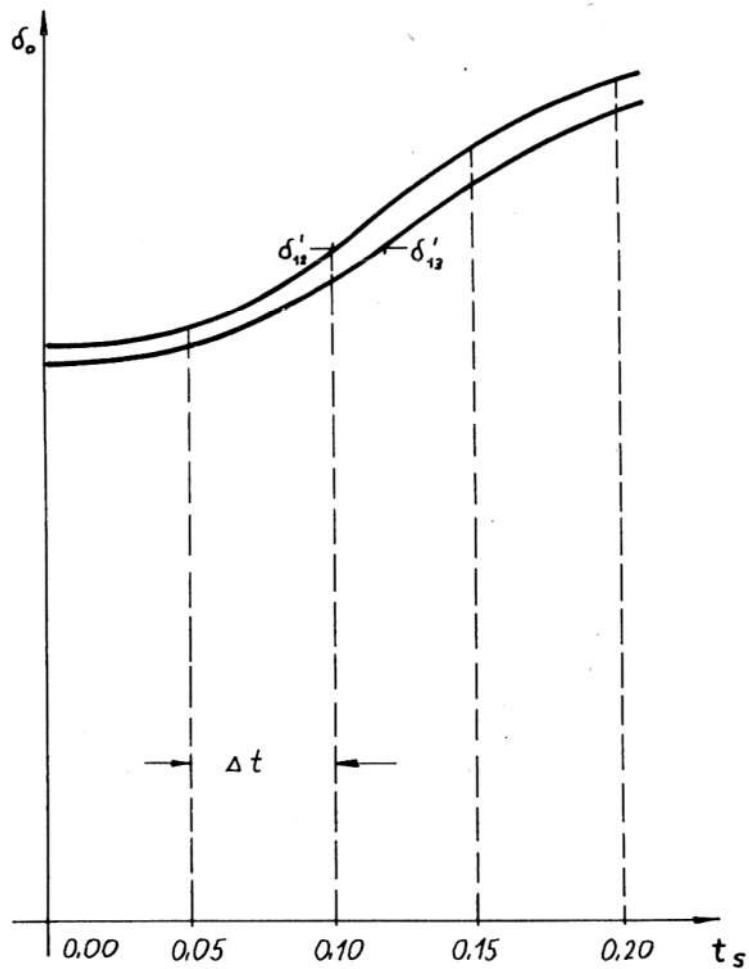
$$\omega_2 = -3,46 \quad "$$

$$\delta'_2 = -3,305^\circ$$

$$\alpha_3 = 5,06 \quad "$$

$$\omega_3 = -3,554 \quad "$$

$$\delta'_3 = -0,521^\circ$$



Slika 65,- Krivulje njihanja u primjeru 1.11

Tablica 1.8

t	δ°_1	δ°_2	δ°_3	δ°_{12}	δ°_{13}
0,00	39,5	-0,584	0,00	40,084	39,5
0,05	41,06	-1,02	-0,038	42,08	41,098
0,10	45,74	-2,289	-0,153	48,029	45,893
0,15	51,855	-3,132	-0,343	54,987	52,198
0,20	57,561	-3,305	-0,521	60,866	58,082

Rezultati su prikazani u tablici 1.8 i na slici 65. Vrijeme promatranja t_{MAX} je prekratko za ocjenu dinamičke stabilnosti.

1.3.9 Mjere za poboljšanje dinamičke stabilnosti

Općenito uzevši dinamička stabilnost neće doći u pitanje, ako eliminiramo uzroke koji izazivaju poremećaje dinamičke stabilnosti. Ako te uzroke nije moguće eliminirati, moramo ih svesti na najmanju mjeru po intenzitetu i trajanju. Zato je potrebno:

- spriječiti nagle promjene tereta,
- izbjegavati neuredno sinhroniziranje stojeva,
- spriječiti kvarove dobrom zaštitom od prenapona i dobrim dimenzioniranjem izolacije.

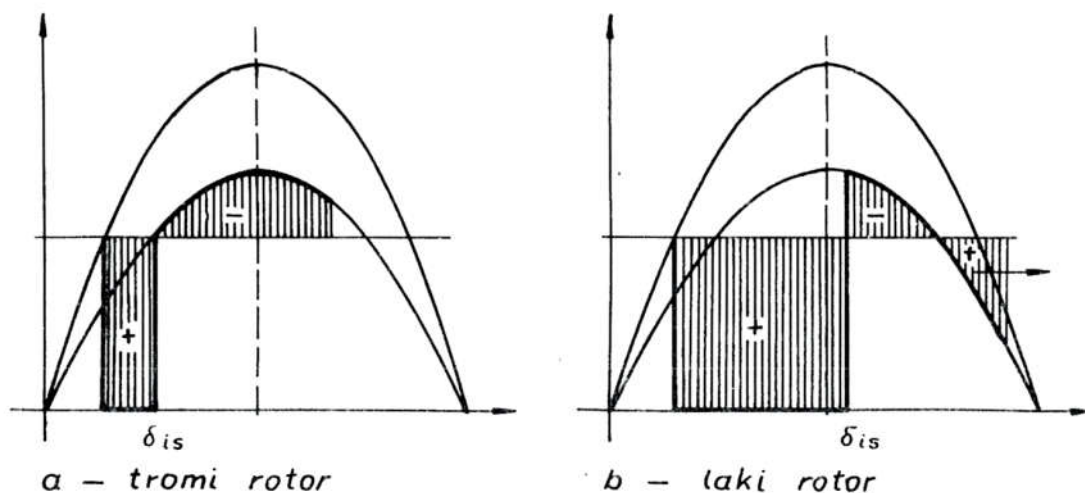
Trajanje kvara treba skratiti primjenom brze zaštite i brzih sklopaka. Pošto iskapčanje dijela mreže takodjer negativno djeluje na dinamičku stabilnost, treba:

- iskopčati samo dio mreže koji je u kvaru (zaštita mora biti selektivna),
- primijeniti automatsko ponovno ukapčanje (tropolno i jednopolno).

Kao i kod statičke stabilnosti, brza regulacija napona poboljšat će pogonske uvjete.

Oscilacije do kojih dolazi pri procesu uigravanja u novo stanje ravnoteže, izazivaju nedefinirane struje izjednačenja. Ove struje mogu dovesti do neselektivnog i nepotrebnog djelovanja zaštite. Stoga zaštita, napose distantna, mora biti neosjetljiva na takve oscilacije. Na smanjenje oscilacija djeluje povoljno:

- brza i osjetljiva regulacija snage turbine,
- prigušni namotaji generatora,
- velika tromost rotora generatora i turbine (sl.66).



Slika 66.- Utjecaj tromosti rotora generatora i turbine na dinamičku stabilnost

Rašireno je mišljenje da je problem stabilnosti, posebno dinamičko izražen samo u slabim, jako rasprostranjenim mrežama, s velikim dužinama vodova, razmjerno malim brojem pretežno slabijih generatora i odgovarajućom malom potrošnjom u centrima konzuma. Prema tome, u "jakim" mrežama, koje se po definiciji približavaju pojmu "krute" mreže, ne bi trebalo očekivati poteškoće u pogledu stabilnosti.

Praksa, međjutim, pokazuje da i u jakim mrežama, makar rijetko, može doći do teških poremećaja, kojima je nestabilnost češće sekundarni, a rijetko i primarni uzrok. Određeni pogonski režimi (forsiranje isključivo hidroenergije ili isključivo termoenergije,

uz istovremeno nepažljivo isključivanje nekih elemenata mreže, vodova i transformatora) mogu toliko mjeri oslabiti inače vrlo jaku mrežu da ona dolazi na granicu dinamičke pa i statičke stabilnosti. Uzme li se još u obzir da krupni poremećaji u zemljama s velikom gustoćom potrošnje izazivaju znatno veće posljedice, može se zaključiti da je problem stabilnosti, na neki specifički način, neophodna karika u nizu analiza mreže.

1.3.10 Program DINST

Program DINST je izradjen u okviru rada pod naslovom "Programi za odredjivanje dinamičke stabilnosti u mreži s većim brojem generatora" [lit. pog. 1].

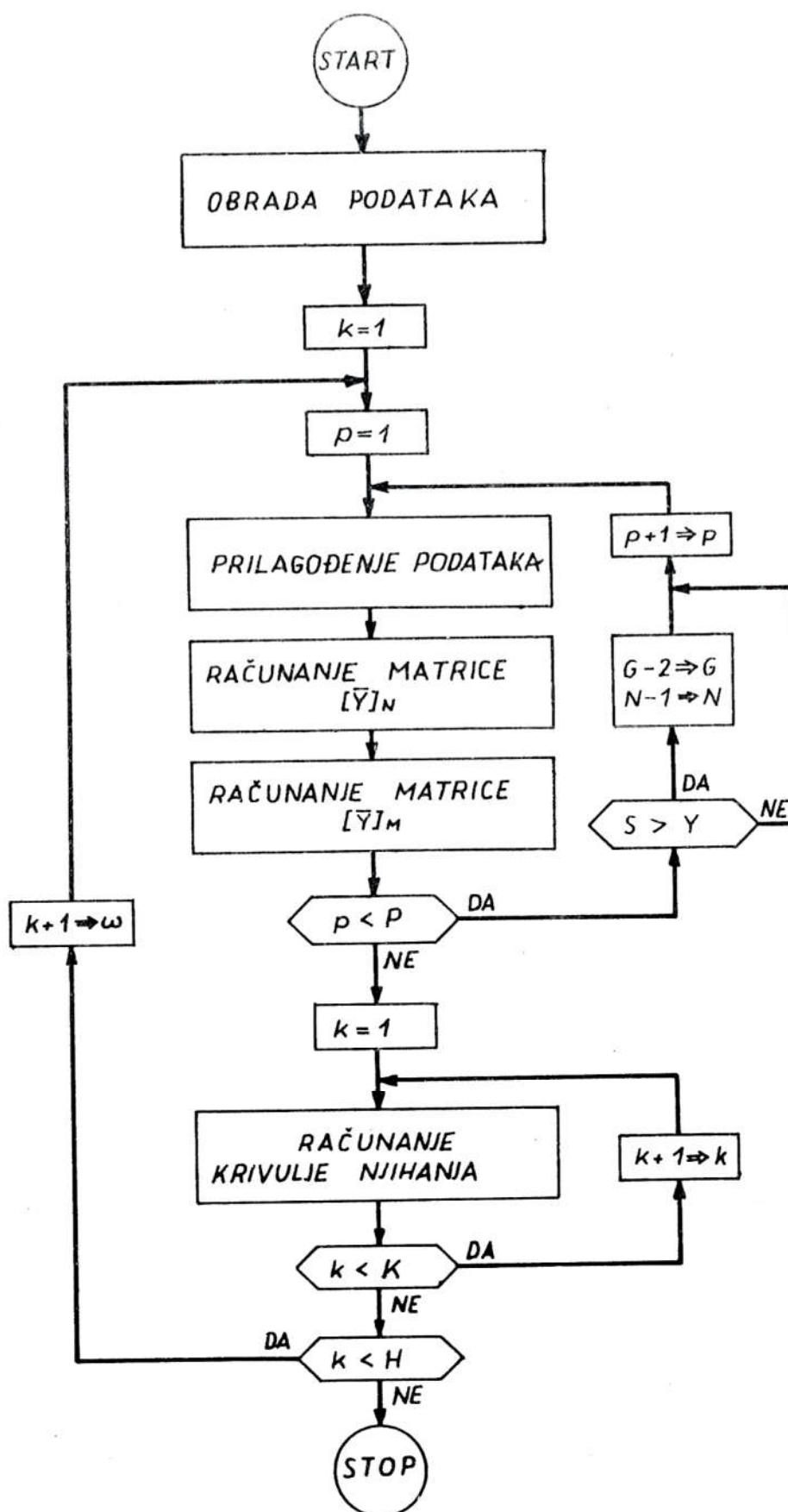
Glavni zahtjev, koji se postavio pri izradbi ovog programa, bila je analiza dinamičke stabilnosti velike mreže s velikim brojem sinhronih strojeva. O broju čvorova mreže i broju generatora ovisi veličina matrice $[\bar{Y}]_N$, a o broju generatora veličina matrice $[\bar{Y}]_M$. Računanje i smještaj ovih matrica zahtijeva mnogo prostora u memoriji, a i mnogo vremena za rad računskog stroja, pa su zato moguća jedino kompromisna rješenja. Po ovom programu može se obuhvatiti mreža od maksimalno 100 sabirnica s 50 sinhronih generatora, a odjedanput se može računati s najviše 7 matrica sklopnih stanja.

Blok dijagram toka na slici 67 prikazuje organizaciju programa DINST.

Zadaju se podaci mreže normalnog pogona prije kvara i tranzientne impedancije generatora. Ovi se podaci preračunaju u admitancije i tako pripreme za računanje matrica vlastitih i međusobnih admitancija čvora tranzientnog perioda.

Analiziraju se kvarovi na vođu udaljeni $\lambda \ell_v$ od sabirnica. Kvarovi mogu biti:

- trolejni kratki spoj - K3
- jednopolni kratki spoj - K1
- dvopolni kratki spoj - K2
- dvopolni kratki spoj i spoj sa zemljom - K2Z



Slika 67, - Blok dijagram toka programa DINST

Ako se ovome još doda;

- mreža bez kvara,
- iskopčan vod,
- iskopčana jedna faza,

kompletira se računanje navedenih kvarova na prilike sa utjecajem zaštite.

Prvi vod koji se uzima u razmatranje, $h=1$, može biti bilo koji iz mreže, a zadan je brojem grane g . Slijedi računanje zadanih matrica, a potom krivulja njihanja. Svaka krivulja njihanja rezultat je matrica. Npr.:

1. Matrica trolejnog kratkog spoja
2. Matrica iskopčanog voda,
3. Matrica mreže bez kvara ;

ili

1. Matrica jednopolnog kratkog spoja,
2. Matrica iskopčane faze,
3. Matrica jednopolnog kratkog spoja,
4. Matrica iskopčanog voda,

itd.

Prijelaz na novi h nije vezan nikakvim redoslijedom grana. Može to biti i ista grana, kojoj je npr. promijenjen λ . Račun je gotov kada je obradjeno svih H grana.

Podaci se prenose na kartice iz liste podataka, koja je sastavljena od H plus 3 tablice, a upisati treba još i četiri konstante N , M , G i H . Svi podaci zadaju se u jediničnim vrijednostima.

Numeriranje sabirnica vrši se po odredjenom ključu. Najprije se numeriraju čvorovi iza tranzientne reaktancije generatora. To su čvorovi $1 \dots M$. Zatim dolaze čvorovi generatorskih sabirnica. To su čvorovi $M+1 \dots 2M$. Generator 1 priključen je na sabirnice $M+1$, generator 2 na sabirnice $M+2$ itd. Ostali čvorovi, tj. čvorovi $N-2M$ numeriraju se proizvoljno brojevima od $2M+1 \dots N$.

Prva tablica je tablica podataka grana $g=1,2,\dots,G$. Druga tablica je tablica opterećenja, a treća mehaničke konstante k . U tab-

licama grana u kvaru $h=1,2,\dots,H$ zadaju se:

- g^h = broj grane na kojoj je kvar
- λ = relativna udaljenost kvara od sabirnica t
- $\bar{y}_f$ = admitancija kvara iskopčane faze
- $\bar{y}_{K1}$ = admitancija kvara trofaznog kratkog spoja
- $\bar{y}_{K2}$ = admitancija kvara dvofaznog kratkog spoja
- $\bar{y}_{K2Z}$ = admitancija kvara dvofaznog kratkog spoja i spoja sa zemljom
- Δt = vremenski interval u metodi korak po korak
- t_{MAX} = ukupno vrijeme promatranja
- r = referentni generator
- k = studirani slučaj (kombinacija matrica)
- t^p = trajanje sklopnog stanja
- $[\bar{Y}]^p$ = matrica sklopnog stanja, tj. S

Izdavanje podataka predviđeno je također u jediničnim vrijednostima.

Na slici 68 prikazane su tablice ulaznih podataka.

Po ovom programu predviđeno je, kao što je već rečeno 7 sklopnih stanja. S je broj identifikacije matrice prema sklopnom stanju za koji se računa. Iz obradjenih i sklopnom stanju prilagodjenih ulaznih podataka računa se matrica $[\bar{Y}]_N$. Nakon redukcije ove matrice spremi se matrica $[\bar{Y}]_M$ na određeno mjesto u memoriji.

$S=1$ matrica mreže normalnog pogona tranzientnog perioda (sl.69). Dobije se iz obradjenih ulaznih podataka.

$S=2$ matrica iskopčane grane g^h (sl.70). U obradjenim ulaznim podacima treba poništiti uzdužnu granu i u admitanciji čvora $\bar{y}_i$ poprečne grane π sheme. Zato je:

GRANE

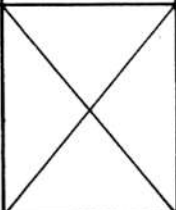
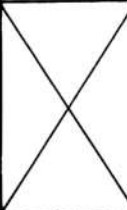
q	s	t	$\Sigma_{s-t}^{(u)}$		$Y_{s-t}^{(p)}$	
1	1	M+1	—	—	X	
.	.	.	.	.		
.	.	.	.	.		
.	.	.	.	.		
M	M	2M	—	—		
M+1	—	—	—	—	—	—
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
G	—	—	—	—	—	—

MEH. KONST.

i	k _i
1	—
.	.
.	.
M	—

G, N, M, H

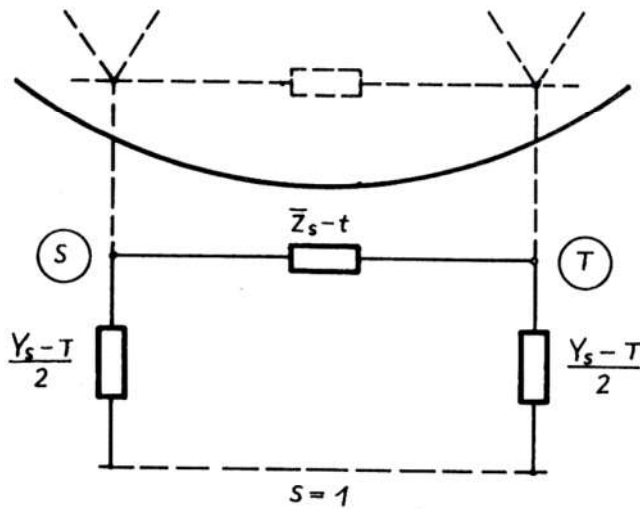
OPTEREĆENJA

i	$\bar{y}_i$	$\bar{s}_{oi}$	$\bar{s}_{pi}$	$ \bar{e}_i $	δ_i
$M+1$	—	—	—	—	—
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
$2M$	—	—	—	—	—
$2M+1$	—		—	—	
.	.		.	.	
.	.		.	.	
N	—		—	—	

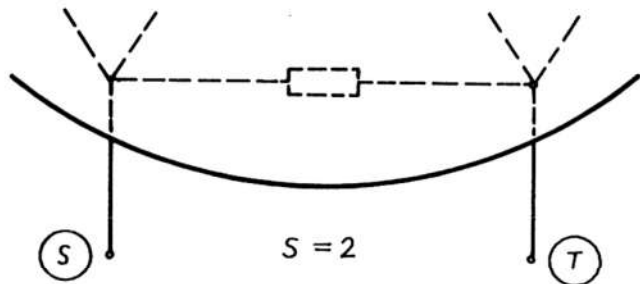
GRANA U KVARU

h = —						g = —		λ, K, P $\Delta t, t_{max}, \tau$ $\bar{y}_g$ $\bar{y}_{k_1}$ $\bar{y}_{k_2}$ $\bar{y}_{k_2z}$
	k = 1		k = 2		...	k = K		
P	t ^P	s	t ^P	s		t ^P	s	
1	—	—	—	—		—	—	
2	—	—	—	—		—	—	
3	—	—	—	—	...	—	—	
4	—	—	—	—		—	—	

Slika 68. - Ulazni podaci programa DINST



Slika 69,-
Vod s-t u normalnom
pogonu



Slika 70,-
Vod s-t iskopčan

$$\bar{y}_{s-t}^{(u)} = 0$$

1-70a

$$\bar{y}_s = \bar{y}_s - \frac{\bar{y}_{s-t}^{(p)}}{2}$$

b

$$\bar{y}_t = \bar{y}_t - \frac{\bar{y}_{s-t}^{(p)}}{2}$$

c

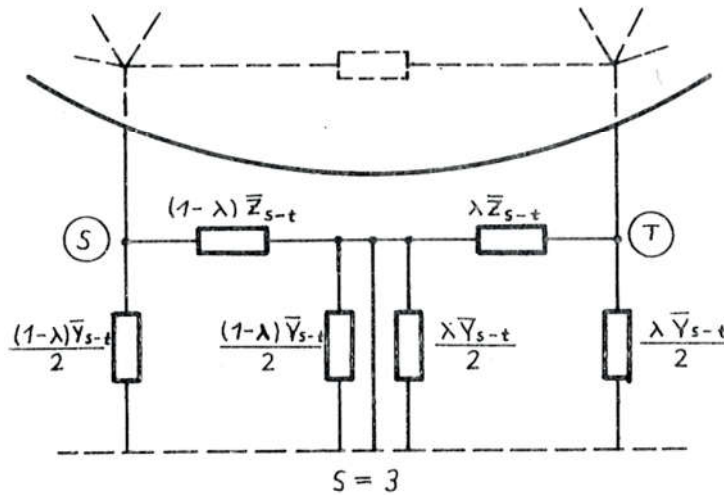
$S = 3$ matrica tropolnog kratkog spoja (sl.71). Grana izmedju s i t raspada se na dvije grane i to granu dužine $(1 - \lambda) \ell_v$, koja se veže izmedju nule i čvora s i na granu $\lambda \ell_v$, koja se veže izmedju nule i čvora t . Nestaje, dakle grana iz normalnog pogona, a pojavljuju se dvije nove. Zato je:

$$\bar{y}_{s-t}^{(u)} = 0$$

1-71a

$$\bar{y}_s = \bar{y}_s + \frac{1}{(1-\lambda) \bar{z}_{s-t}^{(u)}} - \lambda \frac{\bar{y}_{s-t}^{(p)}}{2} \quad 1-71b$$

$$\bar{y}_t = \bar{y}_t + \frac{1}{\lambda \bar{z}_{s-t}^{(u)}} - (1-\lambda) \frac{\bar{y}_{s-t}^{(p)}}{2} \quad c$$



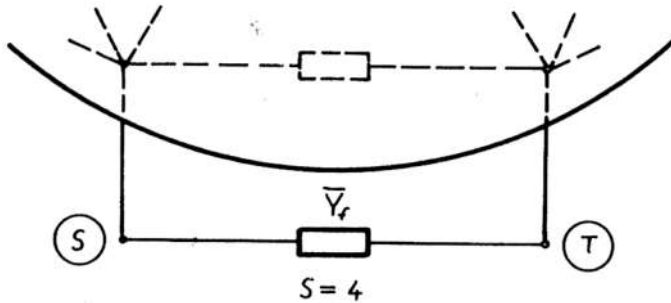
Slika 71.-
Tropolni kratki
spoj na vodu s-t

$S = 4$ matrica prekida faze. Umjesto grane u kvaru priključuje se između s i t admitancija kvara $\bar{y}_f$ (slika 72). Koristi se neki program za redukciju mreže. Admitancija $\bar{y}_f$ ulazi u ulazne podatke programa DINST. S ovim podatkom preinačuju se obradjeni podaci kako slijedi:

$$\bar{y}_{s-t}^{(u)} = \bar{y}_f \quad 1-72a$$

$$\bar{y}_s = \bar{y}_s - \frac{\bar{y}_{s-t}^{(p)}}{2} \quad b$$

$$\bar{y}_t = \bar{y}_t - \frac{\bar{y}_{s-t}^{(p)}}{2} \quad c$$



Slika 72.-
Prekid faze na
vodu s-t

$S = 5$ matrica jednopolnog kratkog spoja. Na mjestu kratkog spoja priključuje se admitancija kvara $\bar{y}_{kl}$ (vidi sliku 73). Grana između s i t nestaje, a pojavljuju se dvije uzdužne, jedna poprečna i jedan novi čvor. Matrica će imati $N+1$ redak i $N+1$ stupac. Nastale izmjene u konfiguraciji mreže odražavaju se na obradjene podatke na slijedeći način:

$$\bar{y}_{s-t}^{(u)} = 0 \quad 1-73a$$

$$\bar{y}_s = \bar{y}_s - \lambda \frac{\bar{y}_{s-t}^{(p)}}{2} \quad b$$

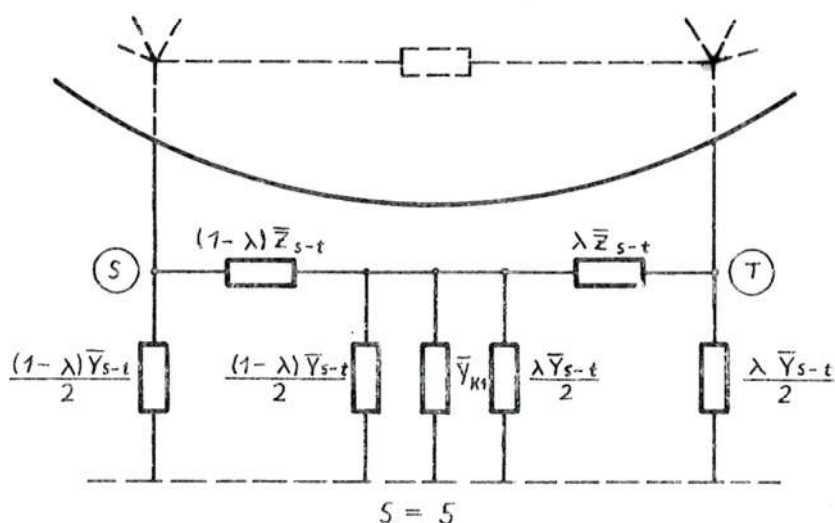
$$\bar{y}_t = \bar{y}_t - (1-\lambda) \frac{\bar{y}_{s-t}^{(p)}}{2} \quad c$$

$$\bar{y}_{s-(N+1)} = \frac{1}{(1-\lambda) \bar{z}_{s-t}^{(u)}} \quad d$$

$$\bar{y}_{t-(N+1)} = \frac{1}{\lambda \bar{z}_{s-t}^{(u)}} \quad e$$

$$\bar{y}_{(N+1)} = \bar{y}_K + \frac{\bar{y}_{s-t}^{(p)}}{2} \quad f$$

$S = 6$ matrica dvopolnog kratkog spoja. Postupak je isti kao kod jednopolnog kratkog spoja.



Slika 73.- Jednopolni kratki spoj na vodu s-t

$S = 7$ matrica dvopolnog kratkog spoja i spoja sa zemljom. Postupak je isti kao kod jednopolnog kratkog spoja.

Obradjene podatke treba imati dvostruke. Jedni su oni koji se ne diraju, a drugi su oni koji se mijenjaju i od kojih se gradi matrica $[\bar{Y}]_N$. Nakon izračunavanja matrice vraćaju se mijenjani podaci s pomoću nemijenjanih u prvobitno stanje.

Redukcija matrice $[\bar{Y}]_N$ vrši se u istom prostoru u kojem se ova matrica nalazi, pa nakon redukcije imamo samo matricu $[Y]_M$. Svaka izračunana matrica $[\bar{Y}]_M$ smješta se na svoje unaprijed određeno mjesto i odatle koristi.

Nakon što su izračunane matrice sklopnih stanja i spremljene na svoja mjesta u memoriji, potrebno je još izračunati za svaki generator EMS-u e' iza tranzientne impedancije, kut ove elektromotorne sile δ' i mehaničku snagu koju daje pogonski stroj.

Krivulje njihanja računaju se metodom korak po korak, koja je opisana u 1.3.6. Jedina je razlika u tome što se ovdje točno uzima u račun promjena sklopnog stanja unutar intervala Δt , a ne samo na granici, pa je time izbjegnuta pogreška koja nastaje kada se ne slaže vrijeme zaštite s odabranim Δt , odnosno njegovim višekratnikom.

1.4 EKVIVALENTIRANJE ZA DINAMIČKU STABILNOST

Analiza dinamičke stabilnosti izvodi se redovito s pomoću modela mreže s manjim brojem generatora. Često je potrebno odrediti optimalne parametre jednog stroja ili promatrati ponašanje strojeva na uskom području, pa je njihanje svih ostalih strojeva pogotovo onih udaljenih, dovoljno promatrati kroz njihanje nadomjesnih strojeva. Uzimanje u račun svih generatora posebno nije moguće ni kod manjih sistema i korištenja računala većeg kapaciteta. Ekvivalentiranje za dinamičku stabilnost je stoga neophodno u svakom računu dinamičke stabilnosti mreže.

Ekvivalentiranje za dinamičku stabilnost razlikuje se od ekvivalentiranja za proračun tokova snaga i napona. U ekvivalentiranju za dinamičku stabilnost polazimo od sistema u prijelaznom periodu, kojemu smo predhodno izračunali tokove snaga i napone. Iz poznatih snaga i napona izračunaju se admitancije potrošača i elektromotorne sile generatora iz prijelazne reaktancije. Zadatak je da se dio sistema, nazovimo ga podsistemom, zamijeni ekvivalentom čije ponašanje u prelaznom periodu mehanički i električki odgovara ponašanju nadomještenog dijela mreže. Pri tome je takodjer važna ravno-pravna mogućnost uklapanja ekvivalenta u tok proračuna.

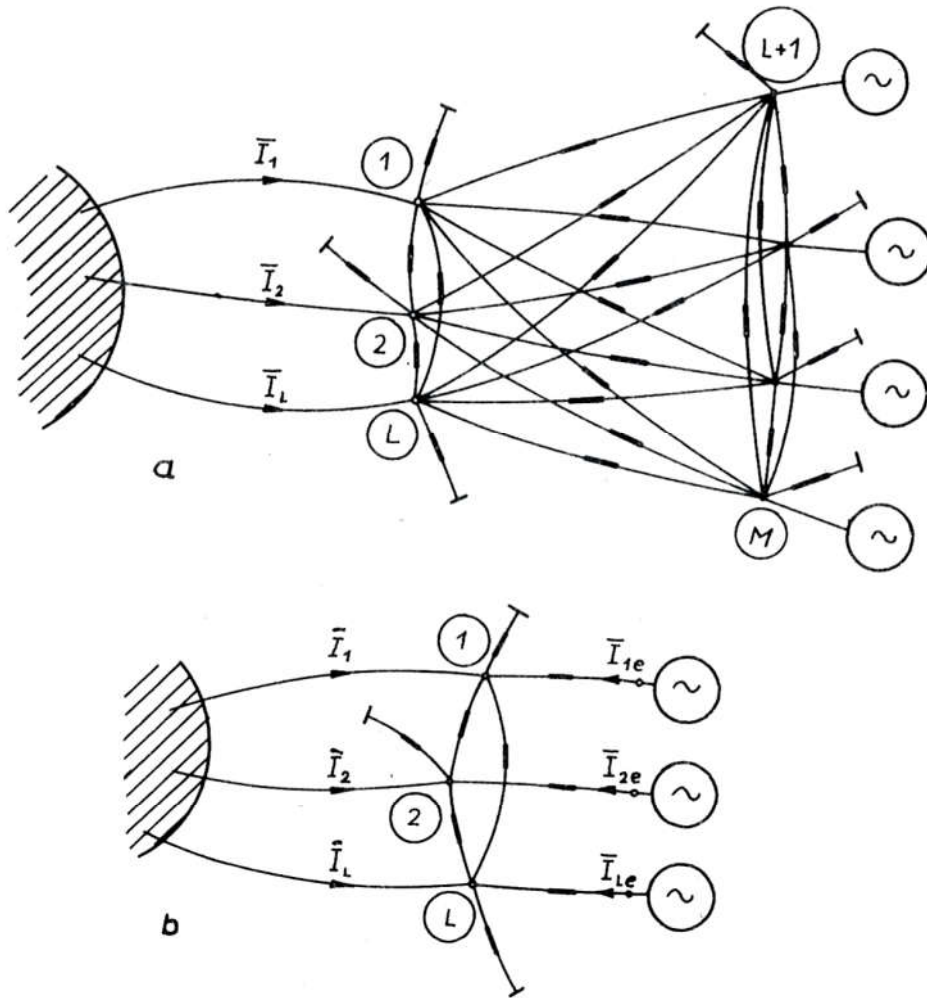
1.4.1 Ekvivalentiranje aktivne mreže

Podsistem reduciramo na čvorove iza tranzientne reaktancije generatora i čvorove s kojima je podsistem vezan s ostalim sistemom. Dobijemo ekvivalentnu shemu prema slici 74a.

Podsistem sa slike 74a nadomjestit ćemo ekvivalentom sa slike 74b. Pri tome ćemo iz reduciranog podsistema zadržati admitancije između čvorova 1 do L i ovih čvorova prema zemlji. Ostaje nam da odredimo admitancije i elektromotorne sile nadomjesnih generatora.

Podsistemu je prije redukcije pripadala matrica veličine $[\bar{Y}_M]$.

Jednadžbe reduciranog podsistema glase:



Slika 74.- Ekvivalentiranje aktivne mreže za dinamičku stabilnost

$$\bar{I}_1 = \bar{Y}_{11} \bar{E}_1 + \bar{Y}_{12} \bar{E}_2 + \dots + \bar{Y}_{1L} \bar{E}_L + \dots + \bar{Y}_{1M} \bar{E}_M$$

$$\bar{I}_2 = \bar{Y}_{21} \bar{E}_1 + \bar{Y}_{22} \bar{E}_2 + \dots + \bar{Y}_{2L} \bar{E}_L + \dots + \bar{Y}_{2M} \bar{E}_M$$

.....

$$\bar{I}_1 = \bar{Y}_{11} \bar{E}_1 + \bar{Y}_{12} \bar{E}_2 + \dots + \bar{Y}_{1L} \bar{E}_L + \dots + \bar{Y}_{1M} \bar{E}_M$$

.....

$$\bar{I}_M = \bar{Y}_{M1} \bar{E}_1 + \bar{Y}_{M2} \bar{E}_2 + \dots + \bar{Y}_{ML} \bar{E}_L + \dots + \bar{Y}_{MM} \bar{E}_M$$

U matrici reduciranog podsistema iznosi:

$$\bar{Y}_{ii} = - \sum_{j=1}^M \bar{Y}_{ij} + \bar{Y}_{i-o} \quad j \neq i \quad 1-79$$

$\bar{Y}_{i-o}$ = admitancija grane između čvora i
i nule sistema.

Relaciju 1-79 možemo također pisati u obliku:

$$\bar{Y}_{ii} = - \sum_{j=1}^L \bar{Y}_{ij} - \sum_{j=L+1}^M \bar{Y}_{ij} + \bar{Y}_{i-o} \quad j \neq i \quad 1-80$$

U matrici ekvivalentnog podsistema iznosi

$$\bar{Y}_{ii} = - \sum_{j=1}^L \bar{Y}_{ij} + \bar{Y}_{i-o} + \bar{Y}_{ie} \quad \begin{matrix} j \neq i \\ i = 1..L \end{matrix} \quad 1-81$$

Pošto su po pretpostavci oba $\bar{Y}_{ii}$ jednaka dobijemo nakon izjednačenja relaciju 1-80 i 1-81:

$$- \sum_{j=1}^L \bar{Y}_{ij} - \sum_{j=L+1}^M \bar{Y}_{ij} + \bar{Y}_{i-o} = - \sum_{j=1}^L \bar{Y}_{ij} + \bar{Y}_{i-o} + \bar{Y}_{ie}$$

$$\bar{Y}_{i-e} = - \sum_{j=L+1}^M \bar{Y}_{ij} \quad i = 1..L \quad 1-82$$

Iz jednačbe 1-79 vidimo da je i za reducirani podsistem:

$$\bar{Y}_{i-o} = \bar{Y}_{ii} + \sum_{j=1}^M \bar{Y}_{ij} \quad j \neq i$$

ili

$$\bar{Y}_{i-o} = \sum_{j=1}^M \bar{Y}_{ij} \quad i = 1..L \quad 1-83$$

Tražene relacije su 1-78, 1-82 i 1-83. Prema njima potrebno je poznavati samo reduciranu matricu podsistema, te snage i napone u čvorovima 1 do L. Međutim, redukcija matrice $[\tilde{Y}]_N$ zahtijeva eliminiranje potrošačkih čvorova, pa je potrebno još poznavati snagu i modul napona na potrošačkim sabirnicama.

1.4.2 Ekvivalentna energija inercije

Za svaki pojedini generator vrijedi:

$$\Delta P_1 = \frac{H_1 S_1}{180 f} \alpha_1$$

$$\Delta P_2 = \frac{H_2 S_2}{180 f} \alpha_2$$

.

$$\Delta P_M = \frac{H_M S_M}{180 f} \alpha_3$$

1-84

Pretpostavi li se za ekvivalentni generator:

$$\Delta P_e = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \dots + \Delta P_M \quad 1-85$$

$$\alpha_e = \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_M \quad 1-86$$

$$S_e = S_1 + S_2 + \dots + S_M \quad 1-87$$

dobije se:

$$\Delta P_e = \frac{\alpha_e}{180 f} (H_1 S_1 + H_2 S_2 + \dots + H_M S_M) \quad 1-88$$

$$\Delta P_e = \frac{\alpha_e}{180 f} H_e S_e \quad 1-89$$

$$H_e S_e = \sum H_i S_i \quad i = 1, 2, \dots, M \quad 1-90$$

$$H_e = \frac{\sum H_i S_i}{\sum S_i} \quad i = 1, 2, \dots, M \quad 1-91$$

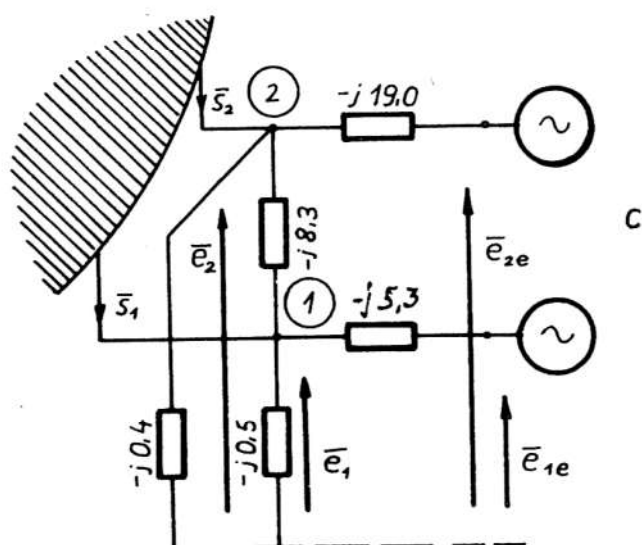
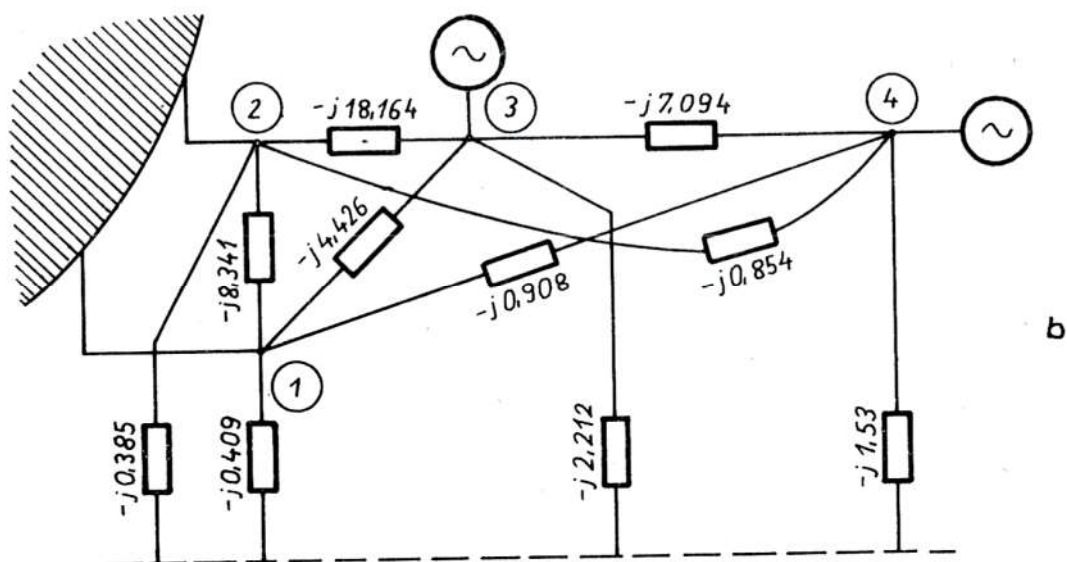
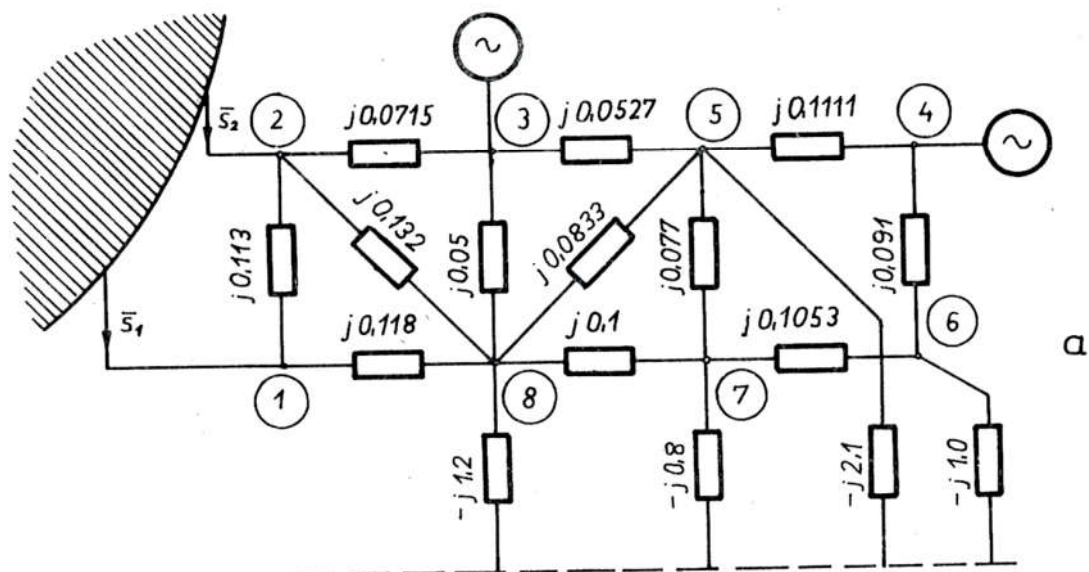
H_e je mehanička konstanta inercije ekvivalentnog generatora, kada je veza podsistema i sistema ostvarena u jednom čvoru. Ispitivanja pokazuju da nema bitne razlike kada se kod većeg broja ekvivalenata uzme za sve ista prosječna mehanička konstanta inercije ili kada se ona odredi prema ekvivalentnim snagama.

Primjer 1.12 Zadan je podsistem prema slici 75a. Podsistem treba ekvivalentirati na čvorove 1 i 2. Izračunajmo matricu $[\tilde{Y}]_N$ ovog podsistema:

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	15,7	-7	0	0	0	0	0	-8,5
2	-7	29	-14	0	0	0	0	-8,0
3	0	-14	53	0	-19	0	0	-20
4	0	0	0	20	-9	-11	0	0
5	0	0	-19	-9	55,1	0	-13	-12
6	0	0	0	-11	0	21,5	-9,5	0
7	0	0	0	0	-13	-9,5	33,5	-10
8	-8,5	-8	-20	0	-12	0	-10	59,7

$[\tilde{Y}]_N = (-j)$

Nakon redukcije raspolažemo matricom $[\tilde{Y}]_M$



Zadano :

$$\bar{S}_1 = 2.2 + j 0.0$$

$$\bar{S}_2 = 1.53 + j 0.0$$

$$\bar{e}_1 = 1.1 + j 0.0$$

$$\bar{e}_2 = 0.9 + j 0.0$$

$$N = 8$$

$$M = 4$$

$$L = 2$$

Slika 75.- Ekvivalentiranje u primjeru 1.12

$$[\bar{Y}]_M = (-j)$$

	1	2	3	4
1	14,1	-8,3	-4,4	-0,9
2	-8,3	27,7	-18,2	-0,8
3	-4,4	-18,2	44,5	-7,1
4	-0,9	-0,8	-7,1	10,5

Reducirani podsistem konstruiran iz matrice $[\bar{Y}]_M$ pokazan je na slici 75b.

Računamo potrebne veličine ekvivalenta:

$$\bar{Y}_{1-e} = -(-j)(-4,4 - 0,9) = -j 5,3$$

$$\bar{Y}_{2-e} = -(-j)(-18,2 - 0,8) = -j 19,0$$

$$\bar{e}_{1e} = \frac{1}{-j5,3} (-j)(14,1 \quad 1,1 - 8,3 \quad 0,9) - \frac{2,2}{1,1} = 1,51 - j 0,378$$

$$\bar{e}_{2e} = \frac{1}{-j19} (-j)(-8,3 \quad 1,1 + 27,7 \quad 0,9) - \frac{1,35}{0,9} = 0,832 - j0,079$$

$$\bar{Y}_{1-o} = 14,1 + (-8,3 - 4,4 - 0,9)(-j) = -j0,5$$

$$\bar{Y}_{2-o} = 27,7 + (-8,3 - 18,2 - 0,8)(-j) = -j0,4$$

$$\bar{i}_{1e} = (1,51 - j0,378 - 1,1)(-j5,3) = -2,0 - j2,17$$

$$\bar{i}_{2e} = (0,832 - j0,079 - 0,9)(-j19) = -1,5 + j1,29$$

$$\bar{s}_{1e} = (1,51 - j0,378)(-2,0 + j2,17) = -2,2 + j4,036$$

$$\bar{s}_{2e} = (0,832 - j0,079)(-1,5 - j1,29) = -1,352 - j0,941$$

$$\bar{s}_{1s} = 1,1(-2,0 + j2,17) = -2,2 + j2,388$$

$$\bar{s}_{2s} = 0,9(-1,5 - j1,29) = -1,352 - j1,16$$

Ekvivalentni podsistem nacrtan je na slici 75c.

2. NUMERIČKO RJEŠAVANJE DIFERENCIJALNIH JEDNADŽBI

Mnogi zamršeni fizikalni sistemi opisuju se diferencijalnim jednadžbama, čije se rješenje ne može odrediti u analitičkom obliku. Međutim, moguće je dobiti približno rješenje takovih diferencijalnih jednadžbi numeričkim metodama. Rješavanje diferencijalnih jednadžbi je vrlo važan dio numeričke analize.

Metode numeričke integracije koriste redovito proces korak-po-korak za određivanje niza vrijednosti zavisne varijable, koja pripada izabranom nizu vrijednosti nezavisne varijable. Uobičajeni je postupak u izabiranju vrijednosti nezavisne varijable u određenim intervalima. Točnost rješenja numeričke integracije ovisi o izabranoj metodi i širini intervala. Ovdje ćemo opisati samo neke često upotrebljavane metode.

2.1 EULER-OVA METODA

Neka je zadana diferencijalna jednadžba I reda:

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y), \quad 2-1$$

gdje je x nezavisna varijabla, a y je zavisna varijabla. Rješenje jednadžbe 2-1 bit će:

$$y = g(x, c), \quad 2-2$$

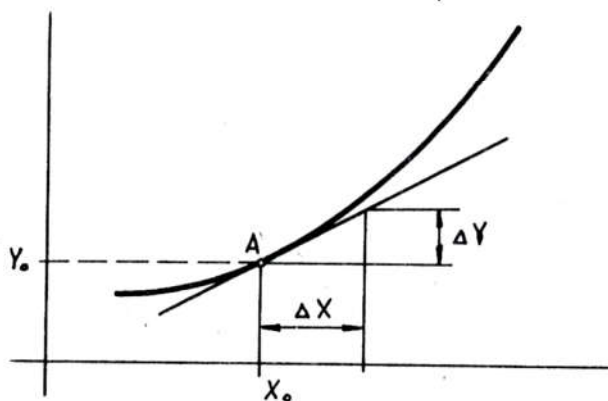
gdje je c konstanta određena posebnim početnim uvjetima. Krivulja, koja prikazuje jednadžbu 2-2 prikazana je na slici 76. Pošto je to neprekinuta krivulja, mogu se mali segmenti pretpostaviti ravnim linijama. U posebnoj točki $A(x_0, y_0)$ na ovoj krivulji vrijedi približno:

$$\Delta y \approx \left. \frac{dy}{dx} \right|_0 \Delta x \quad 2-3$$

gdje je $\left. \frac{dy}{dx} \right|_0$ nagib krivulje u točki (x_0, y_0) i dobije se uvršćanje x_0 i y_0 u jednadžbu 2-1. Stoga se za zadane početne uvjete x_0 i y_0 može odrediti nova vrijednost y_1 za određeni $x+\Delta x$.

Neka je $h = \Delta x$. Tada je:

$$y_1 = y_0 + \Delta y \quad \text{ili} \quad y_1 = y_0 + \left. \frac{dy}{dx} \right|_0 h, \quad 2-4a, b$$



Slika 76.-

Graf funkcije rješenja
diferencijalne jednadžbe

gdje je Δy porast y za odgovarajući porast od x . Računamo slijedeću vrijednost od y iz poznate vrijednosti y prethodnog intervala

$$y_2 = y_1 + \left. \frac{dy}{dx} \right|_1 h, \quad 2-5$$

gdje je:

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_1 = f(x_1, y_1) \quad 2-6$$

Proces se može nastaviti dalje na isti način. Metoda je ilustrirana na slici 77.

Za ovu metodu možemo napisati:

i isto tako za z:

$$z_1 = z_0 + \left. \frac{dz}{dx} \right|_0 h \quad 2-11$$

gdje je

$$\left. \frac{dz}{dx} \right|_0 = f_2(x_0, y_0, z_0) \quad 2-12$$

U slijedećim koracima uzimaju se vrijednosti prethodnog koraka da bi se odredio slijedeći.

2.2 MODIFICIRANA EULEROVA METODA

U Eulerovoj metodi je pretpostavljeno da se vrijednost $\frac{dy}{dx}$ proteže na cijeli interval. Ova vrijednost je računana na početku intervala, i na kraju intervala može odstupati od prave vrijednosti više nego je to prihvatljivo. Poboljšanje možemo postići na slijedeći način:

Izračunamo novu vrijednost od y za x_1 kao prije i nazovimo ovu vrijednost nultom aproksimacijom

$$x_1 = x_0 + h \quad 2-13a$$

$$y_1^{(0)} = y_0 + \left. \frac{dy}{dx} \right|_0 h \quad b$$

Koristimo nove vrijednosti x_1 i $y_1^{(0)}$ i računamo $\frac{dy}{dx}$ na kraju prvog odnosno na početku drugog intervala.

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_1^{(0)} = f(x_1, y_1^{(0)}) \quad 2-14$$

Poboljšanu vrijednost $y_1^{(1)}$ možemo naći upotrebom prosjeka $\left. \frac{dy}{dx} \right|_0$ i $\left. \frac{dy}{dx} \right|_1^{(0)}$ na način:

$$y_1^{(1)} = y_0 + \left(\frac{\left. \frac{dy}{dx} \right|_0 + \left. \frac{dy}{dx} \right|_1^{(0)}}{2} \right) h \quad 2-15$$

Treću aproksimaciju od y možemo naći na isti način koristeći x_1 i $y_1^{(1)}$:

$$y_1^{(2)} = y_0 + \left(\frac{\frac{dy}{dx}|_0 + \frac{dy}{dx}|_1^{(1)}}{2} \right) h \quad 2-16$$

i četvrtu:

$$y_1^{(3)} = y_0 + \left(\frac{\frac{dy}{dx}|_0 + \frac{dy}{dx}|_1^{(2)}}{2} \right) h \quad 2-17$$

Ovaj proces se može nastaviti sve dok dvije procjene u nizu za y_1 ne ostanu unutar željene tolerancije. Cijeli proces se zatim ponavlja da bi se dobio y_2 . Slijedi ponavljanje procesa za y_3 , itd. do y_n .

Modificirana Eulerova metoda također se može upotrebiti u rješavanju simultanih diferencijalnih jednačbi.

2.3 PIKARDOVA METODA SUKCESIVNIH APROKSIMACIJA

Temelj Pikardove metode je određivanje rješenja aproksimirajući y kao funkciju od x preko zadanog niza vrijednosti od x , tj.

$$y \approx g(x) \quad 2-18$$

Ovaj izraz je procijenjen direktnim uvrštavanjem vrijednosti od x da bi se dobile odgovarajuće vrijednosti od y .

Neka je zadana jednačba 2-1 u obliku:

$$dy = f(x, y) dx \quad 2-19$$

Integral između odgovarajućih granica x_0 i x_1 glasi:

$$\int_{y_0}^{y_1} dy = \int_{x_0}^{x_1} f(x, y) dx = y_1 - y_0 \quad 2-20$$

Što uz poznati y_0 omogućava izračunavanje y_1 :

$$y_1 = y_0 + \int_{x_0}^{x_1} f(x, y) dx \quad 2-21$$

Granica integracije predstavlja promjenu y koja proizlazi iz promjene x od x_0 do x_1 . Rješenje se može dobiti procjenom navedenog integrala metodom sukcesivnih aproksimacija. Prva aproksimacija za y kao funkcije od x može se dobiti izmjenom y pod integralom sa y_0 , tj. sa zadanom početnom vrijednošću:

$$y_1^{(1)} = y_0 + \int_{x_0}^{x_1} f(x, y_0) dx \quad 2-22$$

Nova vrijednost od y mora se sada zamijeniti u jednadžbi 2-21 da bi se dobila druga aproksimacija za y_1 , tj.

$$y_1^{(2)} = y_0 + \int_{x_0}^{x_1} f(x, y_1^{(1)}) dx \quad 2-23$$

Proces se može nastavljati toliko puta koliko je potrebno da se dobije željena točnost.

Međutim, procjena integrala može biti zamršena, čak ako je za jednu od varijabli pretpostavljeno da je čvrsta. Ova teškoća i potreba za izvođenjem velikog broja integracija ograničava primjenu ove metode.

Pikardova metoda može se primijeniti za rješavanje simultanih jednažbi, kao npr.:

$$\frac{dy}{dx} = f_1(x, y, z) \quad 2-24a$$

$$\frac{dz}{dx} = f_2(x, y, z) \quad b$$

upotrebljavajući formule:

$$y_1 = y_0 + \int_{x_0}^{x_1} f_1(x, y_0, z_0) dx$$

$$z_1 = z_0 + \int_{x_0}^{x_1} f_2(x, y_0, z_0) dx$$

2.4 METODA RUNGE - KUTTA

U Runge - Kutta metodi promjene vrijednosti zavisne varijable računaju se iz zadanog niza formula. Ove formule su dobijene upotrebom aproksimacija Taylorova reda. Kako je svaka vrijednost od y jednoznačno određena formulama, ova metoda ne zahtijeva ponavljanje aproksimacija kao u modificiranoj Eulerovoj metodi ili sukcesivne integracije kao u Pikardovoj metodi.

Vrijednost funkcije u okolišu (x_0, y_0) razvojem u Taylorov red, uz zanemarenje viših članova reda, iznosi:

$$y_1 = y_0 + \left. \frac{dy}{dx} \right|_0 h + \left. \frac{d^2y}{dx^2} \right|_0 \frac{h^2}{2} + \dots = y_0 + f(x_0, y_0) h +$$

$$+ \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_0 \frac{h^2}{2} + \left. \frac{\partial f}{\partial y} \right|_0 f(x_0, y_0) \frac{h^2}{2} + \dots \quad 2-25$$

Relaciju 2-25 napisat ćemo u slijedećem obliku:

$$y_1 = y_0 + a_1 k_1 + a_2 k_2 , \quad 2-26$$

gdje je:

$$k_1 = f(x_0, y_0) h \quad 2-27$$

$$k_2 = f(x_0 + b_1 h, y_0 + b_2 k_1) h \quad 2-28$$

Relaciju 2-27 takodjer razvijemo pomoću Taylorova reda:

$$k_2 = \{ f(x_0, y_0) + b_1 \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_0 h + b_2 k_1 \left. \frac{\partial f}{\partial y} \right|_0 + \dots \} h, \quad 2-29$$

što uvršteno u izraz 2-26 daje:

$$\begin{aligned} y_1 = y_0 + a_1 f(x_0, y_0) h + a_2 f(x_0, y_0) h + \\ + a_2 b_1 \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_0 h^2 + a_2 b_2 f(x_0, y_0) \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_0 h^2 \end{aligned}$$

i sredjeno:

$$\begin{aligned} y_1 = y_0 + (a_1 + a_2) f(x_0, y_0) h + a_2 b_1 \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_0 h^2 + \\ + a_2 b_2 f(x_0, y_0) \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_0 h^2 \end{aligned} \quad 2-30$$

Uspoređjujući koeficijente u jednadžbama 2-25 i 2-30 dobijemo:

$$a_1 + a_2 = 1 \quad 2-31a$$

$$a_2 b_1 = \frac{1}{2} \quad b$$

$$a_2 b_2 = \frac{1}{2} \quad c$$

Relacije 2-31 predstavljaju niz od 3 jednačbe sa 4 nepoznanice. Zato ulazimo u račun s još jednom pretpostavkom, da za a_2 odaberemo proizvoljnu vrijednost od $1/2$, što uvršteno u 2-31 omogućuje dobijanje slijedećih vrijednosti:

$$a_1 = 1/2 \quad 2-32a$$

$$a_2 = 1/2 \quad b$$

$$b_1 = 1 \quad c$$

$$b_2 = 1 \quad d$$

što uvršteno u 2-25 daje:

$$y_1 = y_0 + \frac{1}{2} k_1 + \frac{1}{2} k_2 \quad , \quad 2-33$$

iz čega slijedi da je:

$$d_y = y_1 - y_0 = \frac{1}{2} (k_1 + k_2) \quad 2-34$$

Problem se sveo na računanje k_1 i k_2 . Uvrštenjem 2-34 u 2-27 i 2-28 ove relacije prelaze u:

$$k_1 = f(x_0, y_0) h \quad 2-35$$

$$k_2 = f(x_0 + h, y_0 + k_1) h \quad 2-36$$

Računanje k_1 i k_2 je Runge-Kutta metoda za aproksimaciju 2-gog reda. Greška je reda h^3 .

Runge-Kutta metoda za aproksimaciju 4-reda daje grešku reda h^5 . U tom slučaju potrebno je računati k_1 , k_2 , k_3 i k_4 primjenjujući isti postupak.

Metoda Runge-Kutta može se također primijeniti na sistem simultanih diferencijalnih jednačbi, kao npr.

$$\frac{dy}{dx} = f_1(x, y, z) \quad 2-37a$$

$$\frac{dz}{dx} = f_2(x, y, z), \quad b$$

za koje vrijede aproksimativne formule:

$$y_1 = y_0 + \frac{1}{2} k_1 + \frac{1}{2} k_2 \quad 2-38a$$

$$z_1 = z_0 + \frac{1}{2} k_1 + \frac{1}{2} k_2 \quad b$$

2.5 NUMERIČKO RJEŠENJE DIFERENCIJALNIH JEDNADŽBI VIŠEG REDA

Opisani načini rješavanja diferencijalnih jednačbi I-og reda mogu se također primijeniti na rješavanje diferencijalnih jednačbi višeg reda uvođenjem pomoćnih varijabla.

Npr. neka je zadana diferencijalna jednačba II-gog reda:

$$a \frac{d^2 y}{dx^2} + b \frac{dy}{dx} + c y = 0 \quad 2-39$$

i početni uvjeti x_0 , y_0 i $\left. \frac{dy}{dx} \right|_0$. Relacija 2-39 može se napisati kao dvije simultane diferencijalne jednačbe I-og reda:

$$\frac{dy}{dx} = y' \quad 2-40a$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{dy'}{dx} = - \frac{by' + cy}{a} \quad b$$

Primjenom jedne od prije opisanih metoda može se riješiti ovaj sistem od dvije simultane diferencijalne jednačbe.

Na isti način može se riješiti svaka jednačba ili sistem jednačbi višega reda, odnosno može se reducirati na jednačbe prvoga reda.

Primjer 2.1 Zadana je diferencijalna jednačba prvog reda:

$$\frac{dy}{dx} = x^2 - y$$

Poznato je: $x_0 = 0$, $y_0 = 1$. Zadan je interval izračunavanja funkcije i to od 0 do 0,3 uz $\Delta x = 0,05$, tj. $x = 0(0,05)0,3$.

Usporedi rješenja u metodama:

- a) Euler
- b) Modificirana Euler
- c) Picard
- d) Runge-Kutta

a) Eulerova metoda:

$$y_n = y_{n-1} + \left. \frac{dy}{dx} \right|_{n-1} h$$

Rezultati su u tablici 2.1.

b) Modificirana Eulerova metoda

$$y_{n+1}^{(k)} = y_n^{(0)} + \left(\frac{\left. \frac{dy}{dx} \right|_n^{(0)} + \left. \frac{dy}{dx} \right|_n^{(k)}}{2} \right) h$$

Rezultati se nalaze u tablici 2.2.

c) Picardova metoda:

$$y_{n+1}^{(k)} = y_n^{(0)} + \int_{x_n}^{x_{n+1}} f(x_n, y_{n+1}^{(k-1)}) dx$$

Rezultati se nalaze u tablici 2.3.

d) Runge - Kutta metoda

1. Aproksimacija 2-gog reda:

$$\Delta y = \frac{1}{2} (k_1 + k_2)$$

Rezultati se nalaze u tablici 2.4.

2. Aproksimacija 4-tog reda:

$$\Delta y = \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

Rezultati se nalaze u tablici 2.5.

Tablica 2.1 EULEROVA metoda

n	x_n	y_n	$\frac{dy}{dx} _n$	$\frac{dy}{dx} _n h$
0	0	1	-1	-0,05
1	0,05	0,95	-0,9475	-0,047375
2	0,01	0,902625	-0,892625	-0,044631
3	0,15	0,857994	-0,835494	-0,041775
4	0,2	0,816219	-0,776219	-0,038811
5	0,25	0,777408	-0,714908	-0,035745
6	0,3	0,741663		

$$y_n = y_{n-1} + \frac{dy}{dx}|_{n-1} h$$

POBOLJŠANA EULEROVA METODA

Tablica 2.2

n	x_n	$y_n^{(0)}$	$\frac{dy}{dx} _n^{(n)}$	$y_{n+1}^{(0)}$	$\frac{dy}{dx} _n^{(1)}$	$y_{n+1}^{(1)}$	$\frac{dy}{dx} _n^{(2)}$
0	0	1	-1	0,95	-0,95	0,95125	-0,95125
1	0,05	0,951219	-0,948719	0,903783	-0,901283	0,904968	-0,902468
2	0,1	0,904939	-0,894939	0,860192	-0,850192	0,861311	-0,851311
3	0,15	0,861283	-0,838783	0,819344	-0,796844	0,820392	-0,797892
4	0,2	0,820366	-0,780366	0,781348	-0,741348	0,782323	-0,742323
5	0,25	0,782299	-0,719799	0,746309	-0,683809	0,747209	-0,684709
6	0,3	0,747186					

$$y_{n+1}^{(k)} = y_n^{(0)} + \left(\frac{\frac{dy}{dx}|_n^{(0)}}{2} + \frac{\frac{dy}{dx}|_n^{(k)}}{2} \right) h$$

PICARDOVA METODA

Tablica 2.3

n	x_n	$y_n^{(0)}$	a	$y_{n+1}^{(0)}$	b	$y_{n+1}^{(1)}$	c
0	0	1	-0,049958	0,950042	-0,047460	0,952540	-0,047585
1	0,05	0,952415	-0,047330	0,905085	-0,044964	0,907451	-0,045081
2	0,1	0,907334	-0,044557	0,862777	-0,042347	0,864988	-0,042457
3	0,15	0,864877	-0,041701	0,823176	-0,033362	0,831515	-0,039489
4	0,2	0,825389	-0,038728	0,786661	-0,036792	0,788597	-0,036888
5	0,25	0,788501	-0,035633	0,752868	-0,033851	0,754650	-0,033940
6	0,3	0,754561					

$$a = \int_{x_n}^{x_{n+1}} f(x_n, y_n^{(0)}) dx$$

$$b = \int_{x_n}^{x_{n+1}} f(x_n, y_{n+1}^{(0)}) dx$$

$$c = \int_{x_n}^{x_{n+1}} f(x, y_{n+1}^{(1)}) dx$$

METODA RUNGE-KUTTA II RED

Tablica 2.4

n	x_n	y_n	k_1	x_n+h	y_n+k_1	k_2	Δy
0	0	1	-0,05	0,05	0,95	-0,047475	-0,0487295
1	0,05	0,9513125	-0,0462074	0,1	0,9051051	-0,0447552	-0,045358
2	0,1	0,9058312	-0,0447915	0,15	0,8610397	-0,0419269	-0,043408
3	0,15	0,862472	-0,0419986	0,2	0,8204734	-0,0390236	-0,040557
4	0,2	0,8219609	-0,039098	0,25	0,7828629	-0,0360181	-0,037603
5	0,25	0,7844029	-0,0360951	0,3	0,7483078	-0,0329153	-0,034549
6	0,3	0,7498977					

$$k_1 = f(x_n, y_n)h \quad k_2 = f(x_n+h, y_n+k_1)$$

Tablica 2.5

METODA RUNGE-KUTTA IV RED

n	x_n	y_n	k_1	k_2	k_3	k_4	Δy
0	0	1	-0,05	-0,048719	-0,048751	-0,047437	-0,0487295
1	0,05	0,951271	-0,047439	-0,046096	-0,046130	-0,040257	-0,045358
2	0,1	0,905913	-0,044796	-0,043395	-0,04343	-0,041999	-0,043408
3	0,15	0,862506	-0,042000	-0,050544	-0,040580	-0,039096	-0,040557
4	0,2	0,821945	-0,039097	-0,037589	-0,037626	-0,036091	-0,037603
5	0,25	0,784346	-0,036092	-0,034534	-0,034573	-0,032989	-0,034549
6	0,3	0,749797					

$$k_3 = f(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}h)$$

$$k_4 = f(x_n + h, y_n + k_3h)$$

$$k_1 = f(x_n, y_n)$$

$$k_2 = f(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}h)$$

2.6 ZAKLJUČAK

U ovom poglavlju prikazano je 5 metoda za rješavanje diferencijalnih jednačbi. To su:

- a) Eulerova
- b) Modificirana Eulerova
- c) Picardova
- d) Runge-Kutta II reda
- e) Runge-Kutta IV reda

Namjera je bila da se pokaže kako postoje razne numeričke metode za rješavanje diferencijalnih jednačbi, te da se dađe uvid u opseg računanja po pojedinoj metodi.

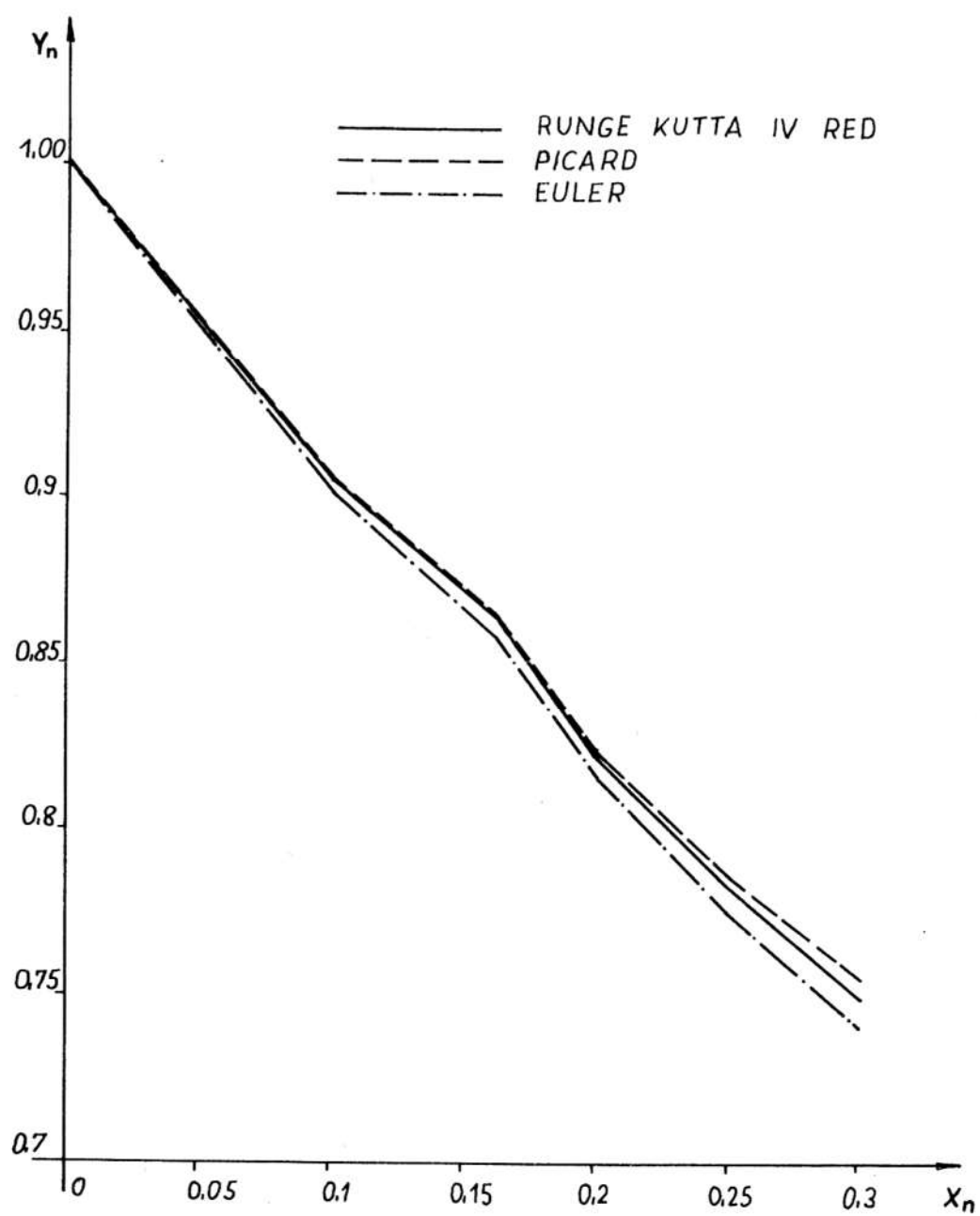
Najjednostavnija je Eulerova metoda, pa zato i zahtijeva najmanje računanja.

Metoda korak po korak, koja je primjenjena u rješavanju diferencijalne jednačbe II reda u prethodnom poglavlju (vidi 1.3.6) u stvari je Eulerova metoda. Prema relaciji 2-3, odnosno prema slici 76, prirast Δy je rezultat konstantnog dy/dx u intervalu Δx . U metodi korak po korak prirast kutne brzine ω u intervalu Δt rezultat je konstantnog kutnog ubrzanja α .

Na slici 78 usporedjena su rješenja zadane diferencijalne jednačbe I reda iz tablica 2.1, 2.3 i 2.5. Postupak nije vođen do rješenja nego je prekinut nakon 6 koraka.

Može se uočiti razilaženje krivulja. Razilaženje je kumulativno. Ako se kao najbolja metoda prihvati metoda Runge-Kutta IV reda, možemo reći da najviše odstupaju Eulerova i Picardova metoda. Eulerova metoda daje niže vrijednosti, a Picardova više vrijednosti od metode Runge-Kutta IV reda.

Poboljšanje Eulerove metode u metodi korak po korak (slika 55) izvršeno je kod prijelaza na diferencijalnu jednačbu nižeg reda. Kod ovog prijelaza pomaknut je interval za pola intervala i time se dobilo na točnosti aproksimacije. Ovaj zahvat moguće je načiniti u svakoj metodi.



Slika 78 - Grafički prikaz rezultata iz tablica 2.1, 2.3 i 2.5

3. REDUKCIJA PASIVNE MREŽE

U poglavlju 1.3.9 smo vidjeli da je matricu $[\bar{Y}]$ svakog sklopnog stanja potrebno reducirati na matricu čvorova iza prijelazne reaktancije generatora nakon što je mreža prije toga učinjena pasivnom u potrošačkom čvoru. Redukcija pasivne mreže je također sastavni dio proračuna dinamičke stabilnosti.

Račun redukcije pasivne mreže može se provesti na klasičan način ili metodom blok transformacije kako je to prikazano u "Mreže I", točka 7.4.1 i 9.5.1. Medjutim postoje i drugi postupci, koje ćemo ovdje opisati.

3.1 METODA GRANE

Klasičan način proračuna je pretvorba opće zvijezde u opći poligon preko relacije:

$$\bar{Y}_{ik} = \frac{\bar{Y}_i \bar{Y}_k}{\sum \bar{Y}}, \quad 3-1$$

gdje je:

$\bar{Y}_i, \bar{Y}_k$ = admitancija krakova zvijezde vezanih za čvor i, odnosno k

$\sum \bar{Y}$ = zbroj svih krakova zvijezde

$\bar{Y}_{ik}$ = admitancija grane poligona između čvora i i k

Metoda grane temelji se na relacijama klasičnog proračuna.

Prvi je korak da iz zadane liste grana načinimo novu listu grana. Nova lista grana ima minimalan, tj. najmanji broj grana, uz uvjet da su svi čvorovi povezani jednom granom. Ovaj broj grana iznosi:

$$G' = N'(N' - 1) / 2 \quad 3-2$$

za numeraciju $n' = 1, 2, \dots N'$

odnosno

$$G' = N (N + 1) / 2 \quad 3-3$$

za numeraciju $n = 0, 1, 2, \dots N$

jer je

$$N' = N + 1 \quad 3-4$$

Ako u mreži ima čvorova koji nisu međusobno povezani, pojavljuju se grane čija je admitancija jednaka nuli.

Cijeli postupak se odvija u novoj listi grana, pa je prostor koji zahtijeva ova metoda definiran veličinom ove liste, odnosno relacijom 3-3.

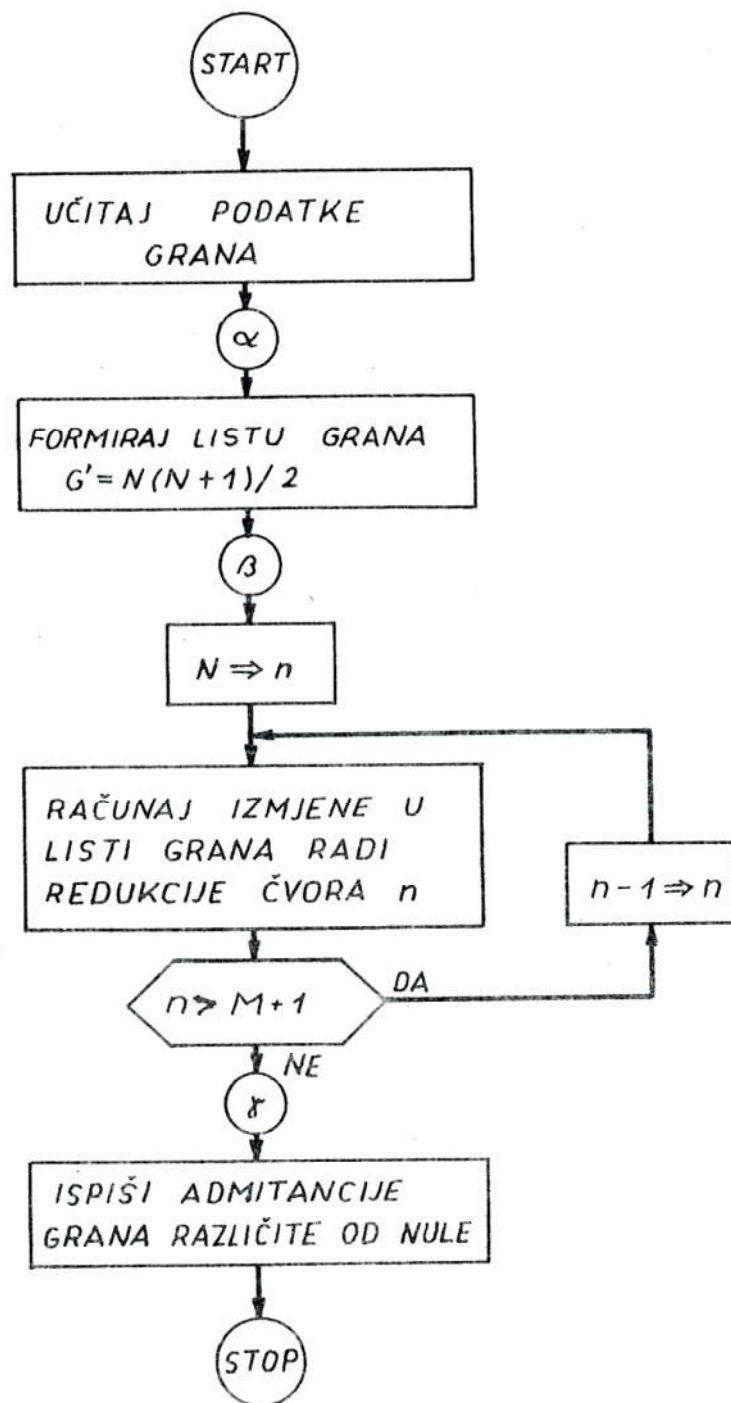
Cijeli postupak se odvija redukcijom čvor po čvor. Reduciranje mreže u metodi grane najbolje je pratiti na dijagramima toka, koji su prikazani na slikama 79. i 80.

Razlikuju se dvije velike petlje. U prvoj petlji formira se lista minimalnog broja grana: zbrajaju se admitancije paralelnih grana i uključuju grane čija je admitancija jednaka nuli.

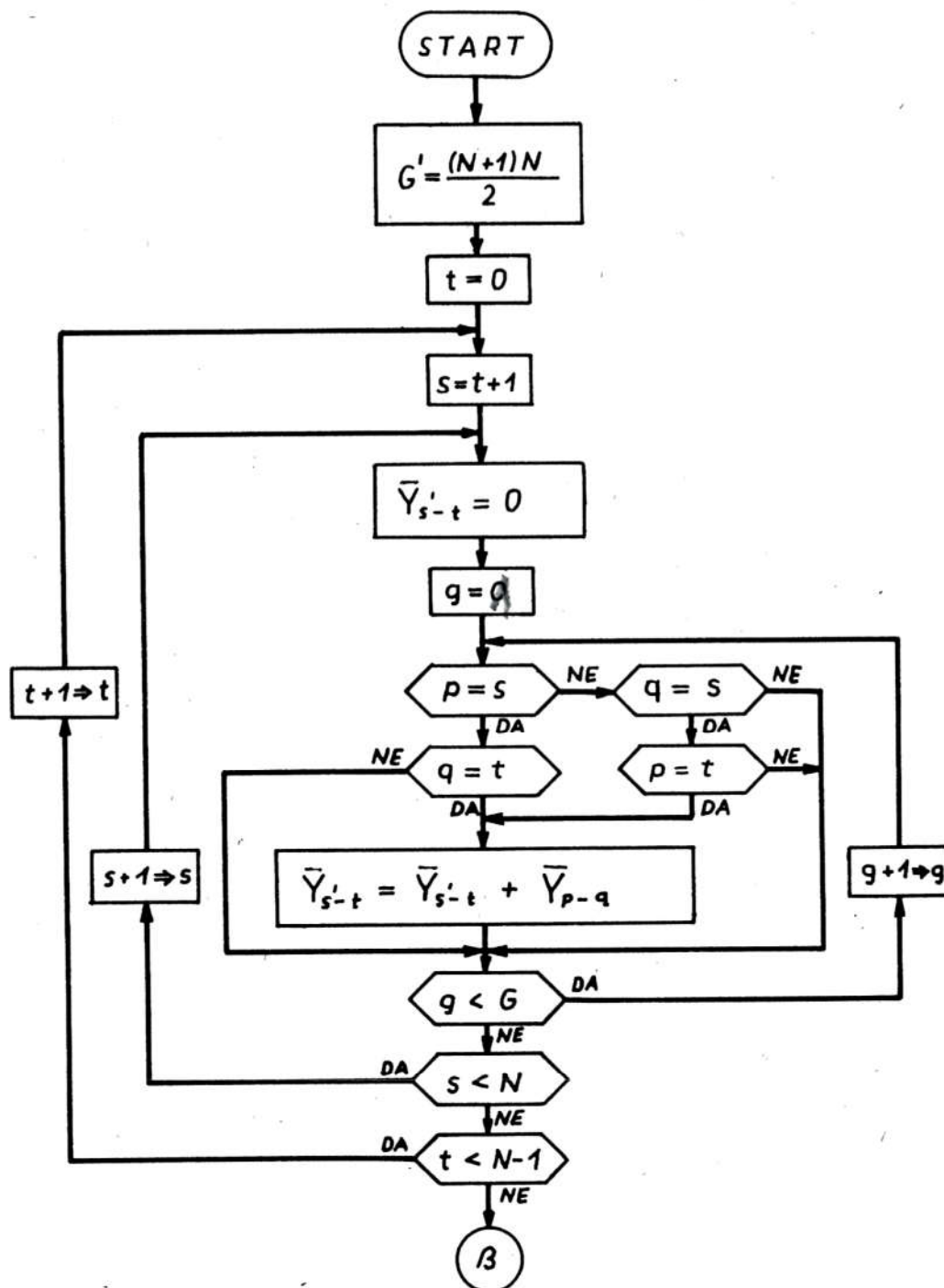
U drugoj petlji počinje redukcija i to od čvora najvećeg broja. Ovo postavlja uvjet numeriranja čvorova. Prvo se numeriraju čvorovi koji ostaju, a zatim čvorovi koji se reduciraju.

U svrhu redukcije čvora n najprije se zbroje grane vezane uz ovaj čvor uključujući i grane vezane za čvor nula. Zatim se računaju grane poligona prema relaciji 3-1. Ove grane se pribrajaju već postojećim granama. Slijedi poništavanje grana zvijezde reduciranog čvora. Varijabla n poprima vrijednosti od N do $M+1$, gdje je M najveći broj čvora mreže nakon redukcije.

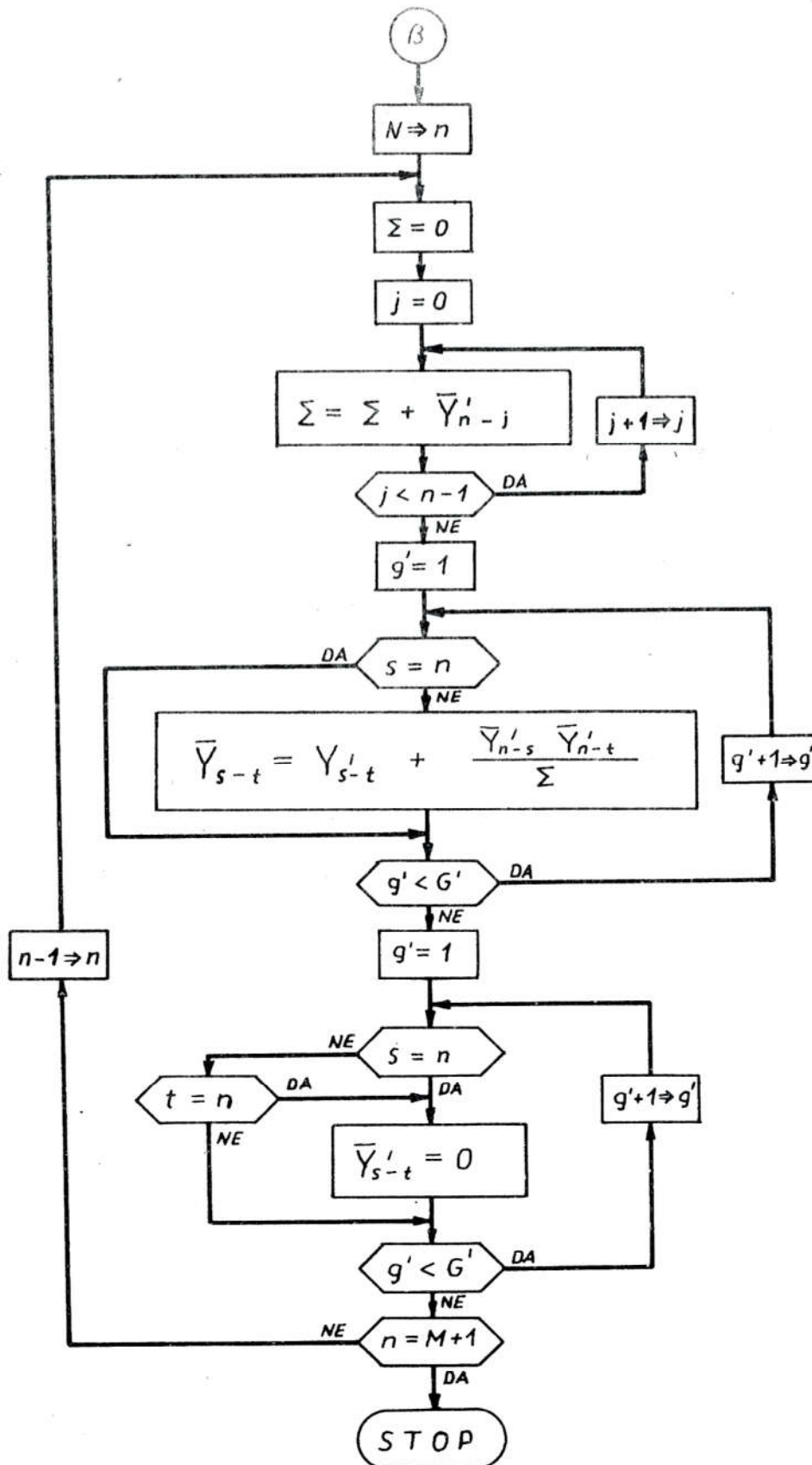
Nakon završetka redukcije ispisuje se lista grana reducirane mreže.



Slika 79. - Redukcija mreže metodom grane



Slika 80a - Redukcija mreže metodom grane (prvi dio)



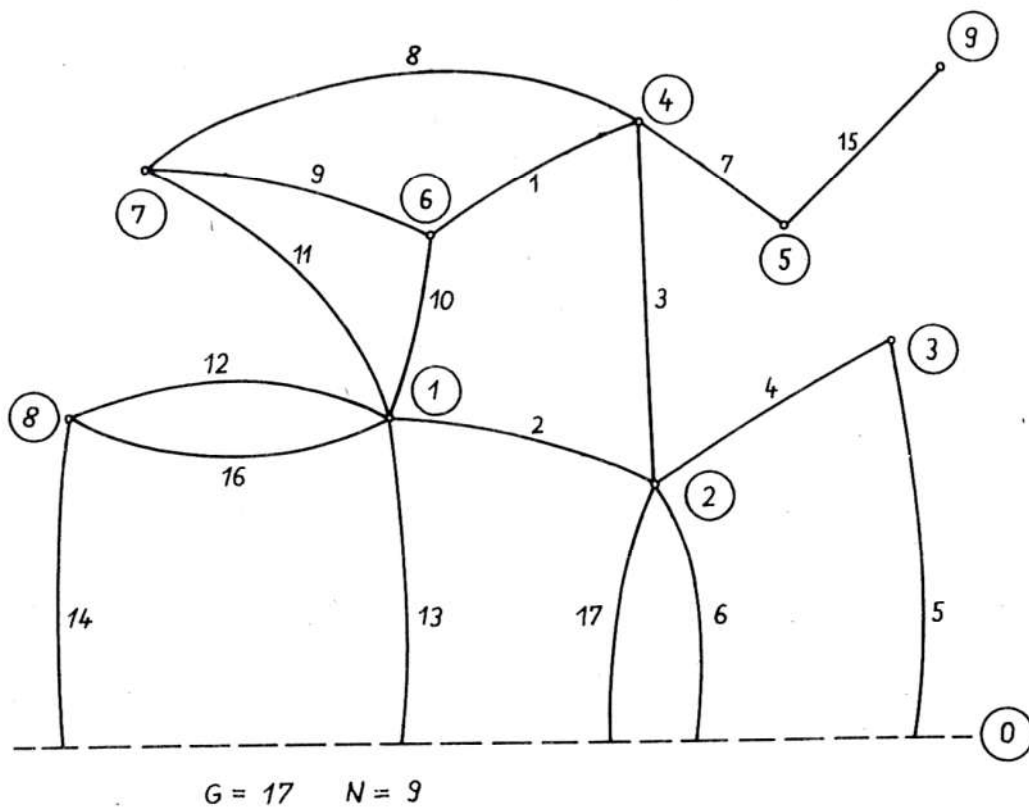
Slika 80b - Redukcija mreže metodom grane (nastavak i kraj)

Primjer 3.1 Na slici 81. nacrtan je graf mreže za testiranje metoda redukcije mreže, a u tablici 3.1 nalazi se lista grana iste mreže. Grane su u admitantnom obliku,

Zadatak je da se u metodi grane reducira zadana mreža na 4 čvora.

Postupak provodimo točno prema dijagramu toka. Formiramo listu grana g' , u kojoj je broj grana:

$$G' = \frac{9 \cdot 10}{2} = 45$$



Slika 81. - Zadana mreža za testiranje metoda redukcije mreže

Tablica 3,1 Lista grana test mreže

g	p	q	$\bar{y}_{p-q}$
1	4	6	0,47
2	1	2	1,26
3	2	4	0,83
4	2	3	0,93
5	0	3	1,56
6	0	2	1,42
7	4	5	0,75
8	4	7	0,91
9	6	7	0,85
10	1	6	0,66
11	1	7	0,59
12	1	8	0,78
13	0	1	1,1
14	0	8	1,3
15	5	9	1,3
16	1	8	0,5
17	0	2	1,0

U ovoj listi grana broj čvorova je još uvijek nepromijenjen, pa su zato u tablici 3.2 admitancije u koloni pod brojem 9.

Reducirajmo mrežu čvor po čvor. Odgovarajući stupac admitancija upišimo pod brojevima 8, 7, 6, 5 i 4. Zadnji stupac predstavlja listu admitancija reducirane mreže.

U računalu se promjena liste grana odvija na jednom mjestu, dok je ovdje prikazana lista grana svakog koraka.

Izmjene u listama grana izvršene su kako slijedi. Pod pojmom "promjena grana" misli se na grane koje ostaju, a mijenja im se admintancija.

Tablica 3.2

LISTE GRANA TOKOM REDUKCIJE

g	s	t	9	8	7	6	5	4
1	1	0	1,1	1,1	1,745	1,745	1,745	1,745
2	2	0	2,42	2,42	2,42	2,42	2,42	2,42
3	3	0	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56
4	4	0	0	0	0	0	0	0
5	5	0	0	0	0	0	0	0
6	6	0	0	0	0	0	0	0
7	7	0	0	0	0	0	0	0
8	8	0	1,3	1,3	0	0	0	0
9	9	0	0	0	0	0	0	0
10	2	1	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
11	3	1	0	0	0	0	0	0
12	4	1	0	0	0	0,228	0,645	0,645
13	5	1	0	0	0	0	0	0
14	6	1	0,66	0,66	0,66	0,873	0	0
15	7	1	0,59	0,59	0,59	0	0	0
16	8	1	1,28	1,28	0	0	0	0
17	9	1	0	0	0	0	0	0
18	3	2	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
19	4	2	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
20	5	2	0	0	0	0	0	0
21	6	2	0	0	0	0	0	0
22	7	2	0	0	0	0	0	0
23	8	2	0	0	0	0	0	0
24	9	2	0	0	0	0	0	0
25	4	3	0	0	0	0	0	0
26	5	3	0	0	0	0	0	0
27	6	3	0	0	0	0	0	0
28	7	3	0	0	0	0	0	0
29	8	3	0	0	0	0	0	0
30	9	3	0	0	0	0	0	0
31	5	4	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0

Tablica 3.2 (nastavak)

g'	s	t	9	8	7	6	5	4
32	6	4	0,47	0,47	0,47	0,799	0	0
33	7	4	0,91	0,91	0,91	0	0	0
34	8	4	0	0	0	0	0	0
35	9	4	0	0	0	0	0	0
36	6	5	0	0	0	0	0	0
37	7	5	0	0	0	0	0	0
38	8	5	0	0	0	0	0	0
39	9	5	1,3	0	0	0	0	0
40	7	6	0,85	0,85	0,85	0	0	0
41	8	6	0	0	0	0	0	0
42	9	6	0	0	0	0	0	0
43	8	7	0	0	0	0	0	0
44	9	7	0	0	0	0	0	0
45	9	8	0	0	0	0	0	0

1. korak $n = 9$

Promjena grana: nema

Briše se grana: $g' = 39$

2. korak $n = 8$

Promjena grana: $g' = 1$

Brišu se grane: $g' = 8$ i 16

3. korak $n = 7$

Promjena grana: $g' = 12, 14$ i 32

Brišu se grane: $g' = 15, 33$ i 40

4. korak $n = 6$

Promjena grana: $g' = 12$

Brišu se grane: $g' = 14$ i 32

5. korak $n = 5$

Promjena grana: nema

Brišu se grane: $g' = 31$

Došli smo do kraja, jer je $n = m + 1$

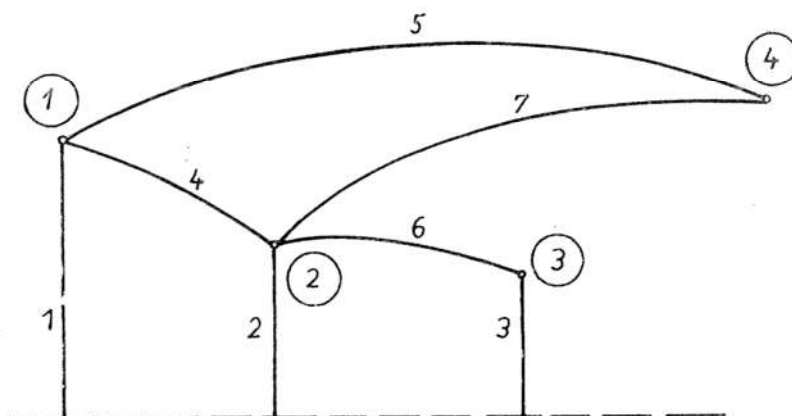
Formirajmo novu listu grana g'' i izbrišimo listu grana g'

Tablica 3.3

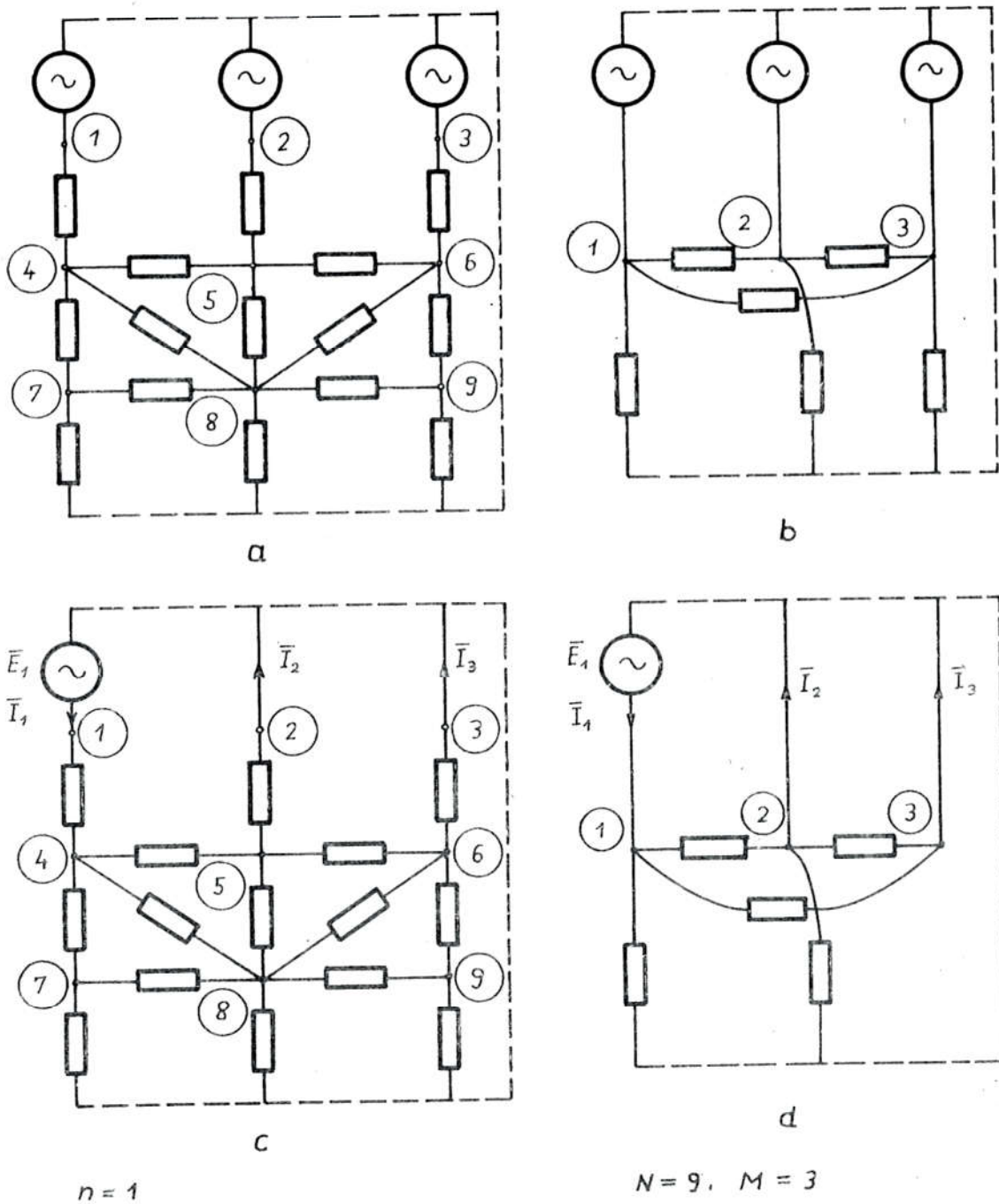
g''	s	t	$\bar{Y}_{s-t}''$
1	0	1	1,745
2	0	2	2,42
3	0	3	1,56
4	1	2	1,26
5	1	4	0,645
6	2	3	0,93
7	2	4	0,83

$$G'' = 7$$

Iz liste podataka grana u tablici 3.3 možemo nacrtati ekvivalentnu shemu reducirane mreže. Na slici 82. nacrtan je graf reducirane mreže.



Slika 82.- Graf reducirane mreže prema zadatku u primjeru 3.1.



Slika 83. - Metoda mrežnog analizatora za redukciju mreže
a - Zadana mreža, koju treba reducirati na 3 čvora
b - Reducirana mreža iz a
c - Računanje struja čvora mreže iz a za prvi stupac
d - Računanje struja čvora mreže iz b za prvi stupac

Naponi $\bar{E}_{M+1}, \bar{E}_{M+2}, \dots, \bar{E}_N$ mogu se izračunati iz $N - M$ jednažbi pasivnih čvorova:

$$\begin{aligned}
 0 &= \bar{Y}_{M+1,n} \bar{E}_n + \bar{Y}_{M+1,M+1} \bar{E}_{M+1} + \dots + \bar{Y}_{M+1,N} \bar{E}_N & 3-M+1 \\
 0 &= \bar{Y}_{M+2,n} \bar{E}_n + \bar{Y}_{M+2,M+1} \bar{E}_{M+1} + \dots + \bar{Y}_{M+2,N} \bar{E}_N & M+2 \\
 &\dots & \dots \\
 0 &= \bar{Y}_{N,n} \bar{E}_n + \bar{Y}_{N,M+1} \bar{E}_{M+1} + \dots + \bar{Y}_{N,N} \bar{E}_N & N
 \end{aligned}$$

$\bar{E}_n$ je zadana EMS, pa je stoga 3-6 sistem od $N-M$ linearnih jednažbi s $N-M$ nepoznanica. Možemo ih napisati preglednije:

$$\begin{bmatrix} \bar{Y}_{M+1,M+1} & \bar{Y}_{M+1,M+2} & \dots & \bar{Y}_{M+1,N} \\ \bar{Y}_{M+2,M+1} & \bar{Y}_{M+2,M+2} & \dots & \bar{Y}_{M+2,N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{Y}_{N,M+1} & \bar{Y}_{N,M+2} & \dots & \bar{Y}_{N,N} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{E}_{M+1} \\ \bar{E}_{M+2} \\ \dots \\ \bar{E}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\bar{Y}_{M+1,n} \bar{E}_n \\ -\bar{Y}_{M+2,n} \bar{E}_n \\ \dots \\ -\bar{Y}_{N,n} \bar{E}_n \end{bmatrix} \quad 3-7$$

Gornji sistem jednažbi riješimo na bilo koji poznati način. Obično je to takodjer iterativni postupak. Rješenja za $\bar{E}_{M+1}, \bar{E}_{M+2} \dots \bar{E}_n$ uvrstimo u relaciju 3-5.

Slijedi računanje struja $\bar{I}$ u jednažbama 3-5.

U reduciranoj mreži nema pasivnih čvorova. Analogno nereduciranoj mreži premostit ćemo sve EMS-e osim EMS u čvoru n i ispisati sistem jednažbi. Struje reducirane mreže jednake su strujama nereducirane mreže.

$$\bar{I}_1 = \bar{Y}_{1n} \bar{E}_n \quad 3-8a$$

$$\bar{I}_2 = \bar{Y}_{2n} \bar{E}_n \quad b$$

• • • • •

$$\bar{I}_n = \bar{Y}_{nn} \bar{E}_n \quad n$$

• • • • •

$$\bar{I}_M = \bar{Y}_{Mn} \bar{E}_n \quad M$$

U gornjim relacijama nepoznate su $\bar{Y}_{1n}, \bar{Y}_{2n}, \dots, \bar{Y}_{nn}, \dots, \bar{Y}_{Mn}$, pa ćemo zato i napisati

$$\bar{y}_{1n} = \bar{I}_1 / \bar{E}_n \quad 3-9a$$

$$\bar{Y}_{2n} = \bar{I}_2 / \bar{E}_n \quad b$$

• • • • •

$$\bar{Y}_{nn} = \bar{I}_n / \bar{E}_n \quad n$$

$\bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet$

$$\bar{y}_{Mn} = \bar{I}_M / \bar{E}_n \quad M$$

Lijeva strana relacije 3-9 upravo je n-ti stupac tražene matrice vlastitih i međjusobnih admitancija čvora reducirane mreže.

Ako odaberemo da je $\bar{E}_n = 1 + j0$, relacija 3-9 prelazi u:

$$\bar{y}_{1n} = \bar{I}_1 \quad 3-10a$$

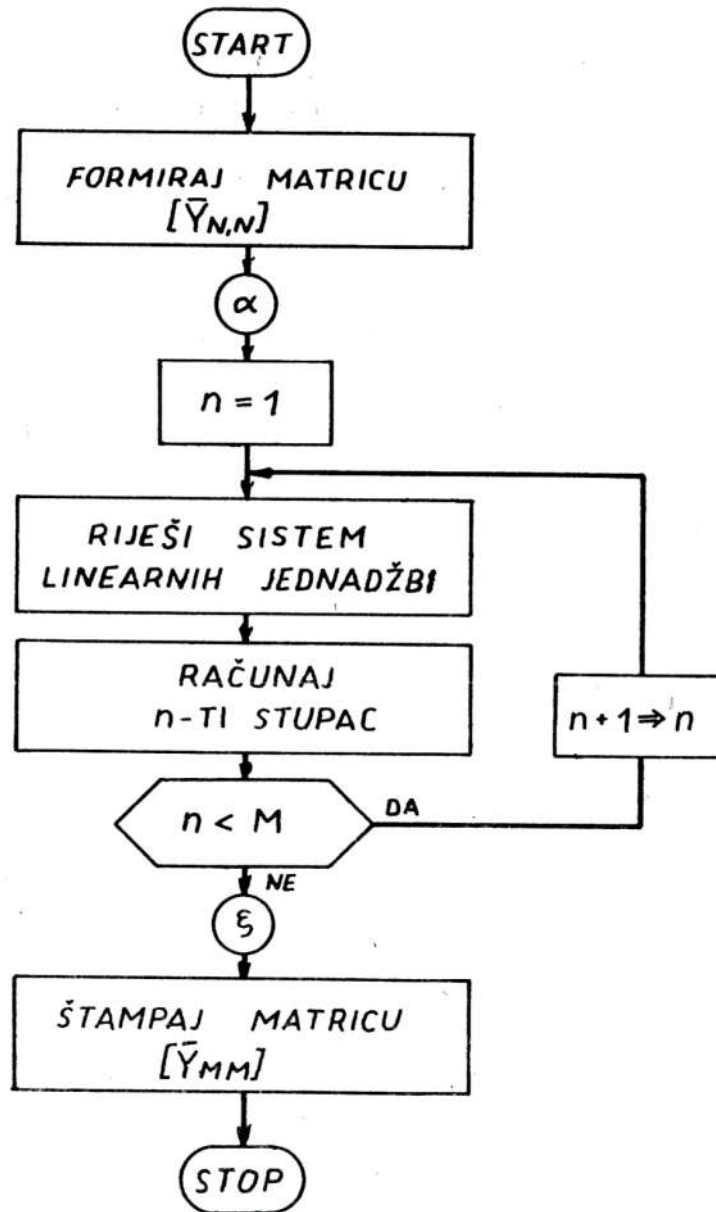
$$\bar{y}_{2n} = \bar{I}_2 \quad b$$

• • • • •

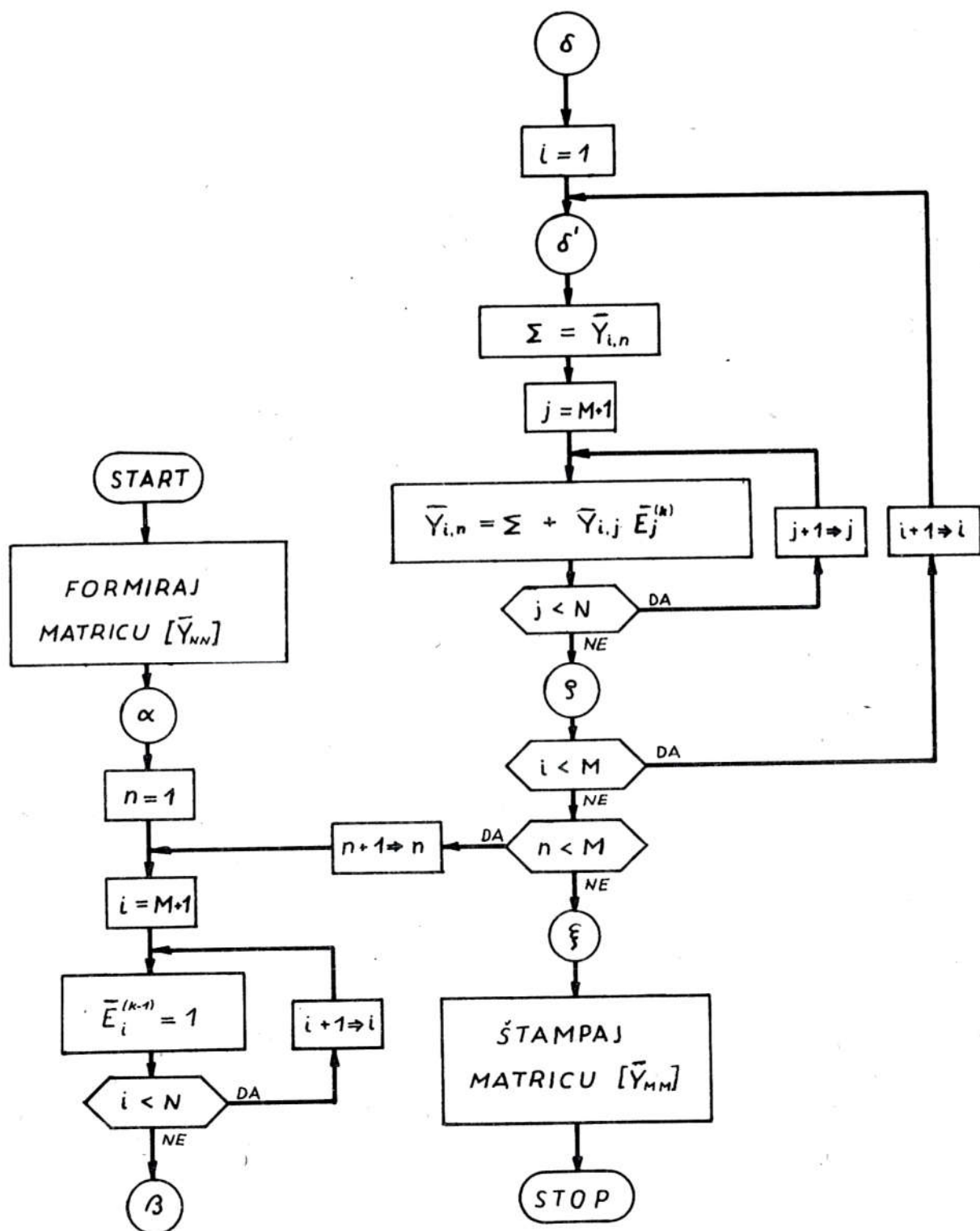
$$\bar{y}_{nn} = \bar{I}_n \quad n$$

• • • • •

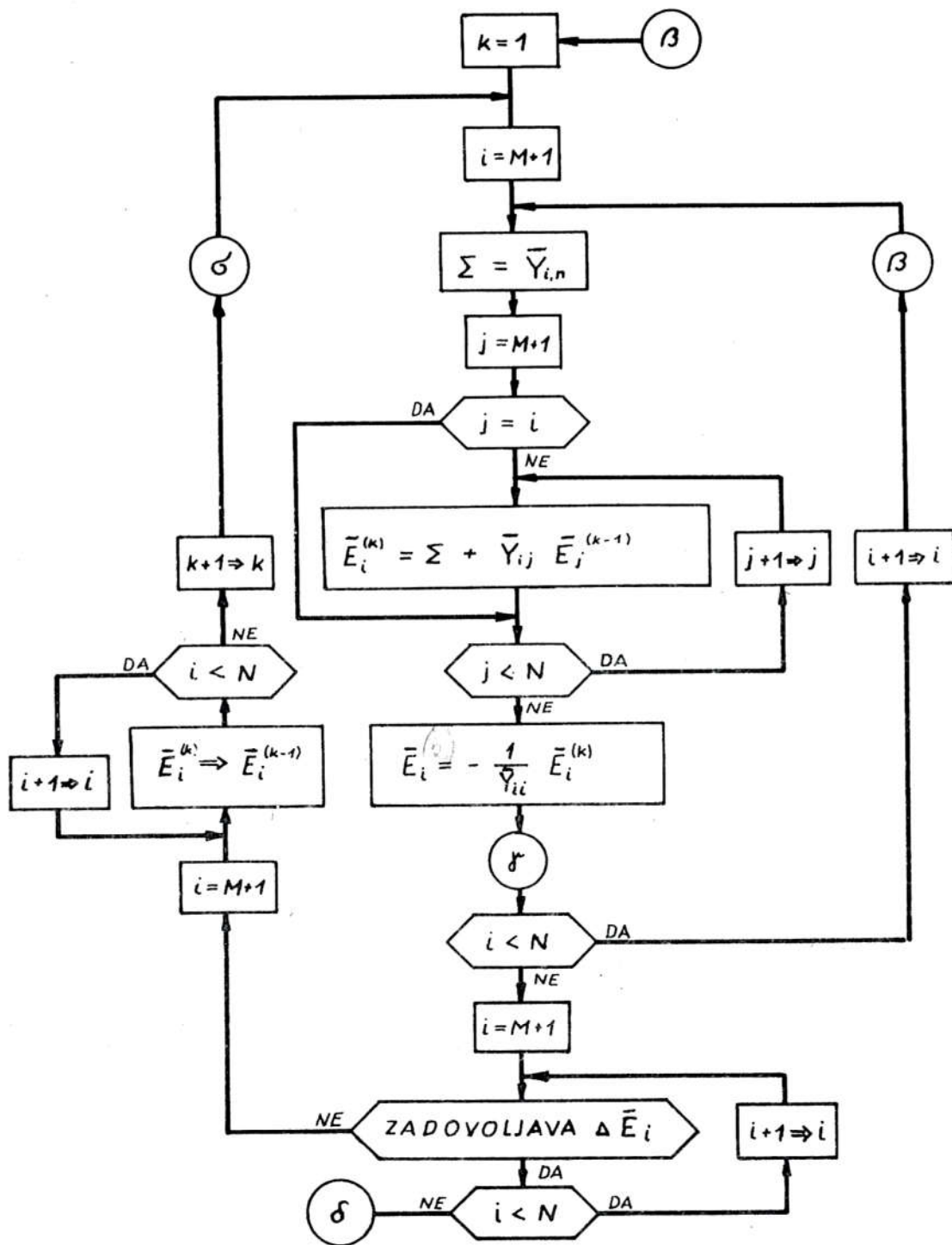
$$\bar{y}_{Mn} = \bar{I}_M \quad M$$



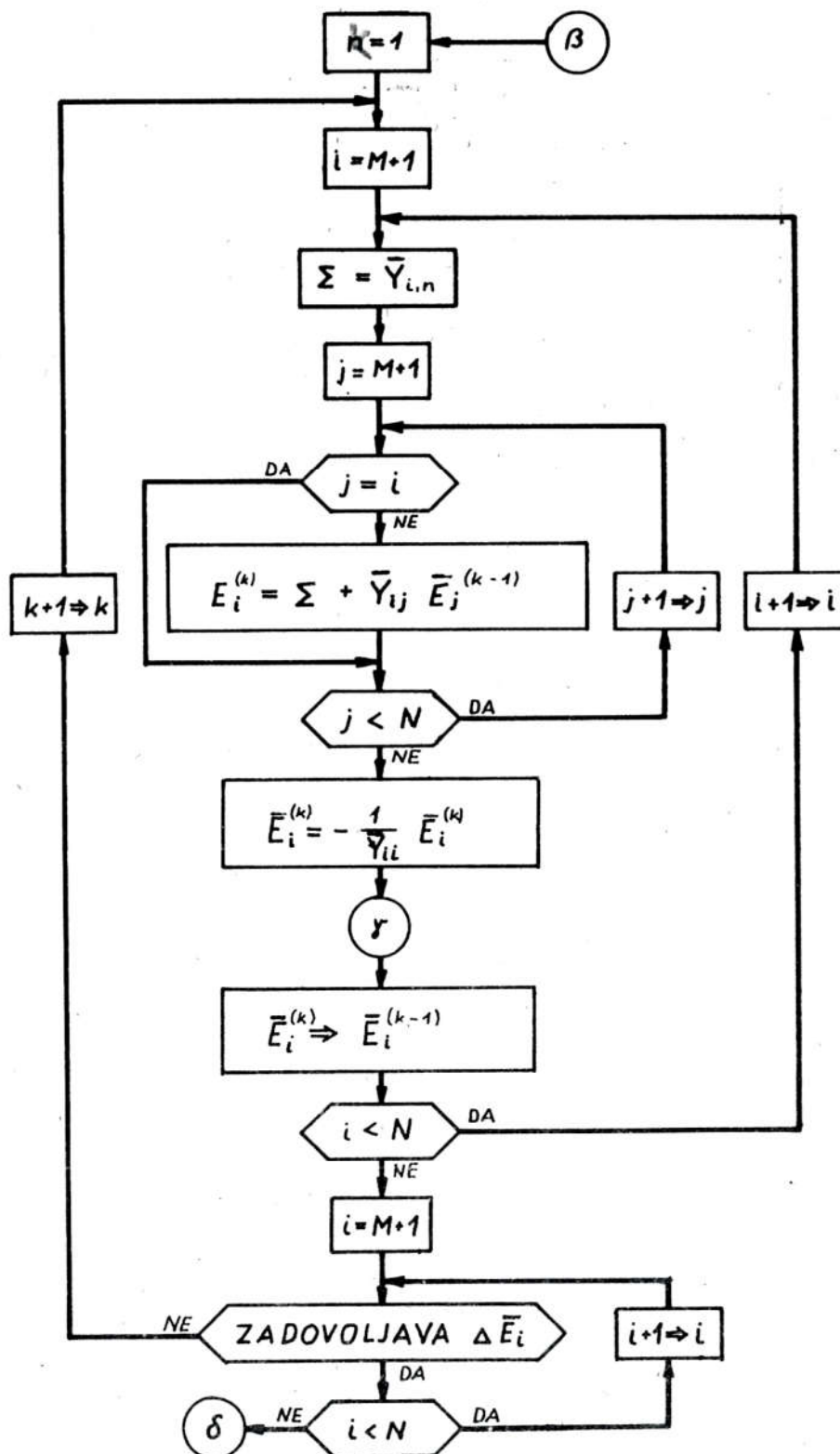
Slika 84.- Blok dijagram toka metode za redukciju mreže
metodom mrežnog analizatora



Slika 85,- Dijagram toka za redukciju mreže metodom mrežnog analizatora



Slika 86.- Dijagram toka za rješavanje sistema linearnih jednačbi po Gaussovoj iterativnoj metodi uz sl. 85.



Slika 87. - Dijagram toka za rješavanje sistema linearnih jednačbi po Gauss-Seidelovoj iterativnoj metodi, uz sl. 85.

Postupak se ponavlja za svaki čvor, odnosno n prima vrijednosti od 1 do M. Na kraju imamo izračunane sve stupce, tj. M stupaca tražene matrice reducirane mreže.

Na sl.84. nacrtan je blok dijagram toka za redukciju mreže metodom mrežnog analizatora. Odmah se može uočiti da se unutar petlje nalazi nalog "Riješi sistem linearnih jednačbi", te da ovo treba načiniti M puta.

Na sl.85. nacrtan je dijagram toka ove metode. Iterativni postupak za rješenje linearnih jednačbi nalazi se između β i δ , što se posebno nalazi na slikama 86, i 87. Na slici 86. imamo dijagram toka kada je primjenjen Gaussov iterativni postupak, a na sl.87. kada je primjenjen Gauss-Seidelov iterativni postupak.

Primjer 3.2 Mrežu iz primjera 3.1 reduciraj metodom mrežnog analizatora. Sistem linearnih jednačbi riješi iterativnim postupkom. Usporedi prednosti Gauss-Seidelovog iterativnog postupka pred Gaussovim

Matricu $[\bar{Y}]$ podijelimo na blokove kako slijedi:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	4,89	-1,26				-0,66	-0,59	-1,28	
2	-1,26	5,44	-0,93	-0,83					
3		-0,93	2,49						
4		-0,83		2,96	-0,75	-0,47	-0,91		
5				-0,75	2,05				-1,3
6	-0,66			-0,47		1,98	-0,85		
7	-0,59			-0,91		-0,85	2,35		
8	-1,28							2,58	
9					-1,3				1,3

Riješimo sistem linearnih jednažbi Gaussovim iterativnim postupkom.

$$\underline{n = 1}$$

$$\underline{k = 1}$$

$$\bar{E}_5^{(1)} = - \frac{1}{2,05} (0 - 1,31 \cdot 1) = 0,634$$

$$\bar{E}_6^{(1)} = - \frac{1}{1,98} (-0,66 - 0,85 \cdot 1) = 0,763$$

$$\bar{E}_7^{(1)} = - \frac{1}{2,35} (-0,59 - 0,85 \cdot 1) = 0,613$$

$$\bar{E}_8^{(1)} = - \frac{1}{2,58} (-1,28) = 0,496$$

$$\bar{E}_9^{(1)} = - \frac{1}{1,3} (0 - 1,3 \cdot 1) = 1$$

$$\underline{k = 2}$$

$$\bar{E}_5^{(2)} = - \frac{1}{2,05} (0 - 1,3 \cdot 1) = 0,634$$

$$\bar{E}_6^{(2)} = - \frac{1}{1,98} (-0,66 - 0,85 \cdot 0,613) = 0,596$$

$$\bar{E}_7^{(2)} = - \frac{1}{2,35} (-0,59 - 0,85 \cdot 0,763) = 0,527$$

$$\bar{E}_8^{(2)} = - \frac{1}{2,58} (-1,28) = 0,496$$

$$\bar{E}_9^{(2)} = - \frac{1}{1,3} (0 - 1,3 \cdot 0,634) = 0,634$$

$$\underline{k = 3}$$

$$\bar{E}_5^{(3)} = - \frac{1}{2,05} (0 - 1,3 \cdot 0,634) = 0,402$$

$$\bar{E}_6^{(3)} = - \frac{1}{1,98} (-0,66 - 0,85 \cdot 0,527) = 0,56$$

$$\bar{E}_7^{(3)} = - \frac{1}{2,35} (-0,59 - 0,85 \cdot 0,596) = 0,467$$

$$\bar{E}_8^{(3)} = - \frac{1}{2,58} (-1,28) = 0,496$$

$$\bar{E}_9^{(3)} = - \frac{1}{1,3} (0 - 1,3 \cdot 0,634) = 0,634$$

Na isti način proces teče dalje dok ne konvergira, što je pokazano u tablici 3.4.

Tablica 3.4

$n = 1$

k	$\bar{E}_5$	$\bar{E}_6$	$\bar{E}_7$	$\bar{E}_8$	$\bar{E}_9$
0	1	1	1	1	1
1	0,634	0,763	0,613	0,496	1
2	0,634	0,596	0,527	0,496	0,634
3	0,402	0,560	0,467	0,496	0,634
4	0,402	0,554	0,467	0,496	0,402
5	0,255	0,554	0,451	0,496	0,402
6	0,255	0,526	0,451	0,496	0,255
7	0,162	0,526	0,441	0,496	0,255
8	0,162	0,523	0,441	0,496	0,162
9	0,103	0,523	0,440	0,496	0,162
10	0,103	0,522	0,440	0,496	0,103
11	0,065	0,522	0,440	0,496	0,103
					
30	0,000	0,522	0,440	0,496	0,000

Sada možemo računati prvi stupac reducirane matrice ($n = 1$):

$$\bar{Y}_{11} = 4,89 - 0,66 \cdot 0,522 - 0,59 \cdot 0,440 - 1,28 \cdot 0,496 = 3,651$$

$$\bar{Y}_{21} = -1,26$$

$$\bar{Y}_{31} = 0$$

$$\bar{Y}_{41} = -0,75 \cdot 0 - 0,47 \cdot 0,522 - 0,91 \cdot 0,44 = 0,646$$

$$\underline{n = 2}$$

$$\underline{k = 1}$$

$$\bar{E}_5^{(1)} = -\frac{1}{2,05} (0 - 1,3 \cdot 1) = 0,634$$

$$\bar{E}_6^{(1)} = -\frac{1}{1,98} (0 - 0,85 \cdot 1) = 0,429$$

$$\bar{E}_7^{(1)} = -\frac{1}{2,35} (0 - 0,85 \cdot 1) = 0,362$$

$$\bar{E}_8^{(1)} = -\frac{1}{2,58} (0 - 0) = 0$$

$$\bar{E}_9^{(1)} = -\frac{1}{1,3} (0 - 1,3 \cdot 0,634) = 0,634$$

Proces teče dalje dok ne konvergira, što je prikazano u tablici 3.5.

Tablica 3.5

n = 2

k	$\bar{E}_5$	$\bar{E}_6$	$\bar{E}_7$	$\bar{E}_8$	$\bar{E}_9$
0	1	1	1	1	1
1	0,634	0,429	0,362	0	1
2	0,634	0,429	0,362	0	0,634
3	0,402	0,071	0,056	0	0,634
					
30	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Sada možemo računati drugi stupac reducirane matrice. (n = 2):

$$\bar{Y}_{12} = -1,26 - 0,66 \cdot 0 - 0,59 \cdot 0 - 1,28 \cdot 0 = -1,26$$

$$\bar{Y}_{22} = 5,44$$

$$\bar{Y}_{32} = -0,93$$

$$\bar{Y}_{42} = -0,83 - 0,75 \cdot 0 - 0,47 \cdot 0 - 0,91 \cdot 0 = -0,83$$

$$\underline{n = 3}$$

Računanje R linearnih jednažbi jednako je kao i kod $n = 2$.

Izračunajmo treći stupac reducirane matrice, tj. $n = 3$.

$$\bar{Y}_{13} = 0$$

$$\bar{Y}_{23} = -0,93$$

$$\bar{Y}_{33} = 2,49$$

$$\bar{Y}_{43} = 0$$

$$\underline{n = 4}$$

$$\underline{k = 1}$$

$$\bar{E}_5^{(1)} = -\frac{1}{2,05} (-0,75 - 1,3 \cdot 1) = 1$$

$$\bar{E}_6^{(1)} = -\frac{1}{1,98} (-0,47 - 0,85 \cdot 1) = 0,667$$

$$\bar{E}_7^{(1)} = -\frac{1}{2,35} (-0,91 - 0,85 \cdot 1) = 0,749$$

$$\bar{E}_8^{(1)} = -\frac{1}{2,58} (0 - 0) = 0$$

$$\bar{E}_9^{(1)} = -\frac{1}{1,3} (0 - 1,3 \cdot 1) = 1$$

$$\underline{k = 2}$$

$$\bar{E}_5^{(2)} = -\frac{1}{2,05} (-0,075 - 1,3 \cdot 1) = 1$$

$$\bar{E}_6^{(2)} = -\frac{1}{1,98} (-0,47 - 0,85 \cdot 0,749) = 0,559$$

$$\bar{E}_7^{(2)} = -\frac{1}{2,35} (-0,91 - 0,85 \cdot 0,667) = 0,628$$

$$\bar{E}_8^{(2)} = -\frac{1}{2,58} (0 - 0) = 0$$

$$\bar{E}_9^{(2)} = -\frac{1}{1,3} (0 - 1,3 \cdot 1) = 1$$

Proces teče dalje dok ne konvergira, što je prikazano u tablici 3.6.

Tablica 3.6

$n = 4$

k	$\bar{E}_5$	$\bar{E}_6$	$\bar{E}_7$	$\bar{E}_8$	$\bar{E}_9$
0	1	1	1	1	1
1	1	0,667	0,749	0	1
2	1	0,559	0,628	0	1
3	1	0,507	0,589	0	1
4	1	0,490	0,571	0	1
5	1	0,483	0,564	0	1
6	1	0,479	0,561	0	1
7	1	0,478	0,560	0	1
8	1	0,478	0,560	0	1

Sada izračunajmo četvrti stupac matrice reducirane mreže ($n = 4$):

$$\bar{Y}_{14} = 0 - 0,66 \cdot 0,478 - 0,59 \cdot 0,56 - 1,28 \cdot 0 = 0,646$$

$$\bar{Y}_{24} = -0,83$$

$$\bar{Y}_{34} = 0$$

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{44} &= 2,96 - 0,75 \cdot 1 - 0,47 \cdot 0,478 - 0,91 \cdot 0,56 = \\ &= 1,476 \end{aligned}$$

Mnogo brže konvergira Gauss-Seidelov iterativni proces, što je uočljivo ako usporedimo tablice 3.4, 3.5 i 3.6, s tablicama 3.7, 3.8 i 3.9.

Tablica 3.7

$n = 1$

k	$\bar{E}_5$	$\bar{E}_6$	$\bar{E}_7$	$\bar{E}_8$	$\bar{E}_9$
0	1	1	1	1	1
1	0,634	0,763	0,527	0,496	0,634
2	0,402	0,560	0,467	0,496	0,402
3	0,255	0,554	0,451	0,496	0,255
4	0,162	0,526	0,441	0,496	0,162
5	0,103	0,523	0,440	0,496	0,103
6	0,065	0,522	0,440	0,496	0,065
.					
17	0,000	0,522	0,440	0,496	0,000

Tablica 3.8

$n = 2$

k	$\bar{E}_5$	$\bar{E}_6$	$\bar{E}_7$	$\bar{E}_8$	$\bar{E}_9$
0	1	1	1	1	1
1	0,634	0,429	0,166	0,000	0,634
2	0,402	0,071	0,026	0,000	0,402
.					
7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Za $n = 3$ račun je isti kao za $n = 2$

Tablica 3.9

$n = 4$

k	$\bar{E}_5$	$\bar{E}_6$	$\bar{E}_7$	$\bar{E}_8$	$\bar{E}_9$
0	1	1	1	1	1
1	1	0,667	0,628	0	1
2	1	0,507	0,571	0	1
3	1	0,483	0,561	0	1
4	1	0,478	0,56	0	1
5	1	0,478	0,56	0	1

Iz izračunanih stupaca formirajmo matricu vlastitih i međusobnih admitancija reducirane mreže

$$[\hat{Y}] =$$

	1	2	3	4
1	3,651	-1,26		-0,645
2	-1,26	5,44	-0,93	-0,83
3		-0,93	2,49	
4	-0,645	-0,83		1,476

Primjer 3.3 Mrežu iz primjera 3.1 reduciraj metodom blok transformacije. Usporedi rezultat s rezultatima zadatka 3.1 i 3.2.

Iz liste grana formira se matrica

$$[\tilde{Y}] =$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	4,89	-1,26				-0,66	-0,59	-1,28	
2	-1,26	5,44	-0,93	-0,83					
3		-0,93	2,49						
4		-0,83		2,96	-0,75	-0,47	-0,91		
5				-0,75	2,05				-1,3
6	-0,66			-0,47		1,98	-0,85		
7	-0,59			-0,91		-0,85	2,35		
8	-1,28							2,58	
9					-1,3				1,3

1. korak $n = 9$

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	4,89	-1,26				-0,66	-0,59	-1,28
2	-1,26	5,44	-0,93	-0,83				
3		-0,93	2,49					
4		-0,83		2,96	-0,75	-0,47	-0,91	
5				-0,75	0,75			
6	-0,66			-0,47		1,98	-0,85	
7	-0,59			-0,91	-0,85	2,35		
8	-1,28							2,58

2. korak $n = 8$

	1	2	3	4	5	6	7
1	4,255	-1,26				-0,66	-0,59
2	-1,26	5,44	-0,93	-0,83			
3		-0,93	2,49				
4		-0,83		2,96	-0,75	-0,47	-0,91
5				-0,75	0,75		
6	-0,66			-0,47		1,98	-0,85
7	-0,59			-0,91		-0,85	2,35

3. korak $n = 7$

	1	2	3	4	5	6
1	4,107	-1,26		-0,228		-0,873
2	-1,26	5,44	-0,93	-0,83		
3		-0,93	2,49			
4	-0,228	-0,83		2,608	-0,75	-0,799
5				-0,75	0,75	
6	-0,873			-0,799		1,673

4. korak $n = 6$

	1	2	3	4	5
1	3,651	-1,26		-0,645	
2	-1,26	5,44	-0,93	-0,83	
3		-0,93	2,49		
4	0,645	-0,83		2,226	-0,75
5				-0,75	0,75

5. korak $n = 5$

	1	2	3	4
1	3,651	-1,26		-0,645
2	-1,26	5,44	-0,93	-0,83
3		-0,93	2,49	
4	-0,645	-0,83		1,476

Ovo je tražena matrica reducirane mreže !

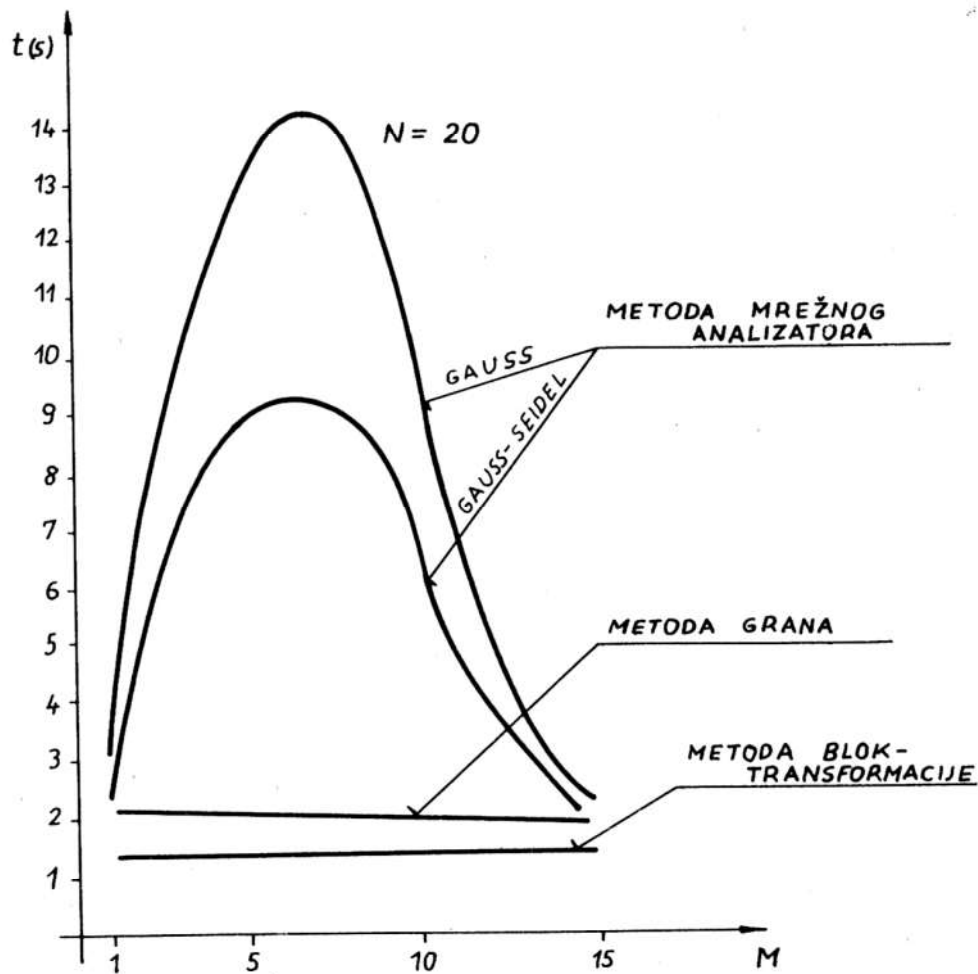
Sve tri metode dale su iste rezultate.

3.3 USPOREDBA METODA

Metode treba usporediti prema zauzeću memorije i trajanju proračuna.

Ako se radi o simetričnoj matrici, sve tri metode zauzimaju isti prostor, a to je $N(N+1)/2$, dok kod nesimetrične matrice prednost ima metoda grana.

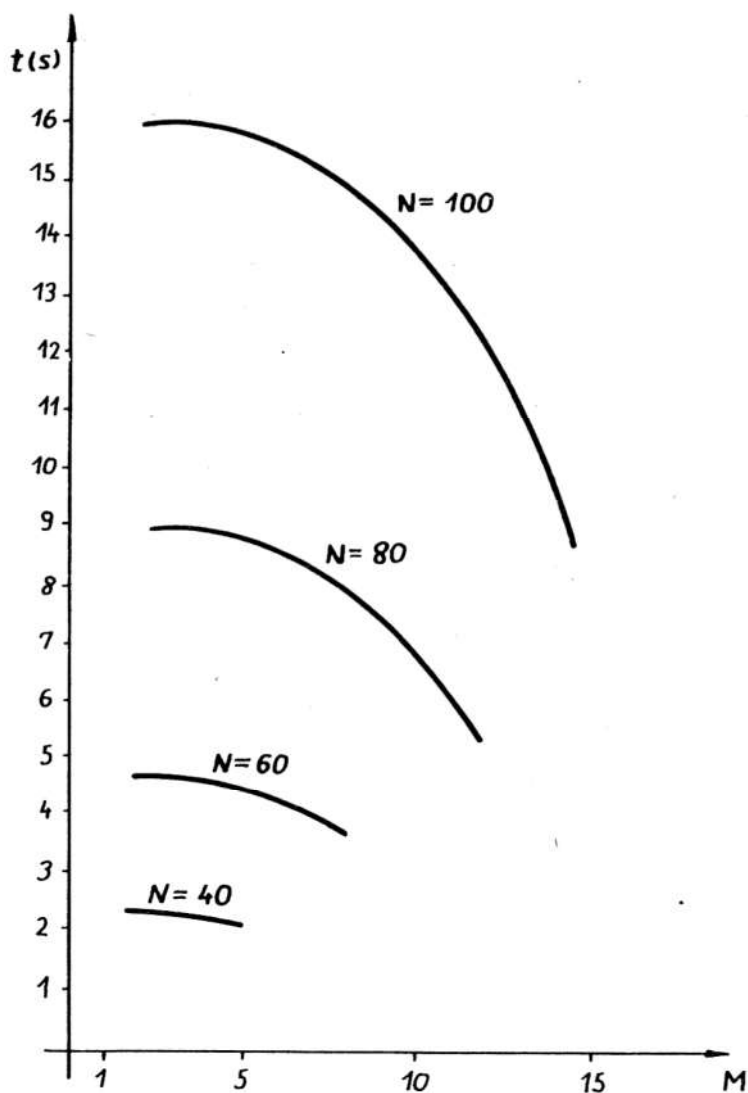
Uspoređivanje trajanja računanja je pokazalo da je od sve tri metode najbrža metoda blok transformacije, da je metoda grana



Slika 88.- Trajanje računa redukcije za razne metode ovisno o broju čvorova koji ostaju

nešto sporija, dok račun po metodi mrežnog analizatora traje neusporedivo duže. Razna optimiranja ne mogu bitno poboljšati položaj metode mrežnog analizatora u odnosu na ostale dvije metode, osim ako se reducira vrlo mali ili vrlo veliki broj čvorova u odnosu na ukupni broj čvorova mreže. Zato metodu mrežnog analizatora treba isključiti iz računanja redukcije mreže s velikim brojem čvorova.

Na sl. 88. pokazani su rezultati ispitivanja mreže od 20 čvorova za razne M (čvorovi koji ostaju). Mali broj čvorova ispitivane mreže (20) nije pokazao da li se sijeku krivulje metode grana i metode blok transformacije. Maksimum koji se pojavljuje u metodi mrežnog analizatora ovisi o rješavanju sistema linearnih jednažbi.



Slika 89 - Trajanje računa redukcije po metodi blok transformacije za mrežu s velikim brojem čvorova

Broj linearnih jednačbi koje treba riješiti u metodi mrežnog analizatora iznosi $M(N-M)$. Derivirajmo ovaj izraz po M i izjednačimo s nulom. Dobijemo da je maksimum kod $M=N/2$. U stvarnosti je krivulja nešto deformirana, a maksimum pomaknut radi ostalih utjecaja.

Ispitivanje na mreži s velikim brojem čvorova izvedeno je metodom blok transformacije. Na sl. 89, nalaze se vremena redukcije za mreže od 100, 80, 60 i 40 čvorova. Rezultati ovog ispitivanja pokazuju koliko može biti ekonomično reduciranje mreže dio po dio, ne samo radi okupiranja memorije, nego i zbog uštede na vremenu.

4. FORMIRANJE MATRICE $[\bar{Z}]$ MREŽE KOD VELIKOG BROJA ČVOROVA

4.1 UVOD

Iako istraživanje ponašanja elektroenergetskog sustava s pomoću elektroničkih računala ima veliki domet, često se nađemo u situaciji da je mreža ipak prevelika i to upravo za proračun matrice vlastitih i međusobnih impedancija čvora. Promatranu matricu označimo sa $[\bar{Z}]$.

Ova matrica se može izračunati na dva načina: direktno ili pak inverzijom matrice vlastitih i međusobnih admitancija čvora, označimo je sa $[\bar{Y}]$. Od direktnih metoda, kod velikog broja čvorova, prihvatljiva je metoda korak po korak, a za inverziju matrice $[\bar{Y}]$ prihvatljive su slijedeće metode: inverzija po Banachiewiczzevoj shemi, inverzija Gauss-Jordanovom eliminacijom i inverzija preko hibridne matrice.

U nekim od nabrojenih metoda može se izvesti proračun matrice $[\bar{Z}]$ koristeći jedino prostor memorije računala kojeg zauzima matrica. Kako za klasičan proračun kratkog spoja zadovoljava simetrična matrica $[\bar{Z}]$, vrlo je interesantan slučaj kada se ova matrica može proračunati i smjestiti na minimalan prostor.

Numeracija mreže mora odgovarati zahtjevima formiranja matrice. Nepravilno numeriranje može nastati kao posljedica greške ulaznih podataka, a isto tako i samog procesa računanja. To je problem s kojim se susrećemo relativno često, pa je potrebno naći prihvatljivo rješenje.

Kod točnijih proračuna pojavljuju se u reduciranoj mreži idealni transformatori i ne može se zanemariti utjecaj bliskih vodova. Iz teoretskog prikaza se može vidjeti način, na koji se i ovakvi zahtjevi mogu lako uključiti u programe.

4.2 METODA KORAK PO KORAK

Metoda korak po korak formira matricu $[\bar{Z}]$ direktno iz liste podataka. Na slici 90. prikazan je dijagram toka za računanje matrice $[\bar{Z}]$ ovom metodom, kada u mreži nema idealnih transformatora ni međusobnih utjecaja grana.

Na lijevoj strani je petlja za uključivanje zavisnih grana (stabla), a na desnoj je petlja za uključivanje nezavisnih grana. Lako je uočiti, da uključivanje nezavisnih grana traži daleko više vremena za računanje.

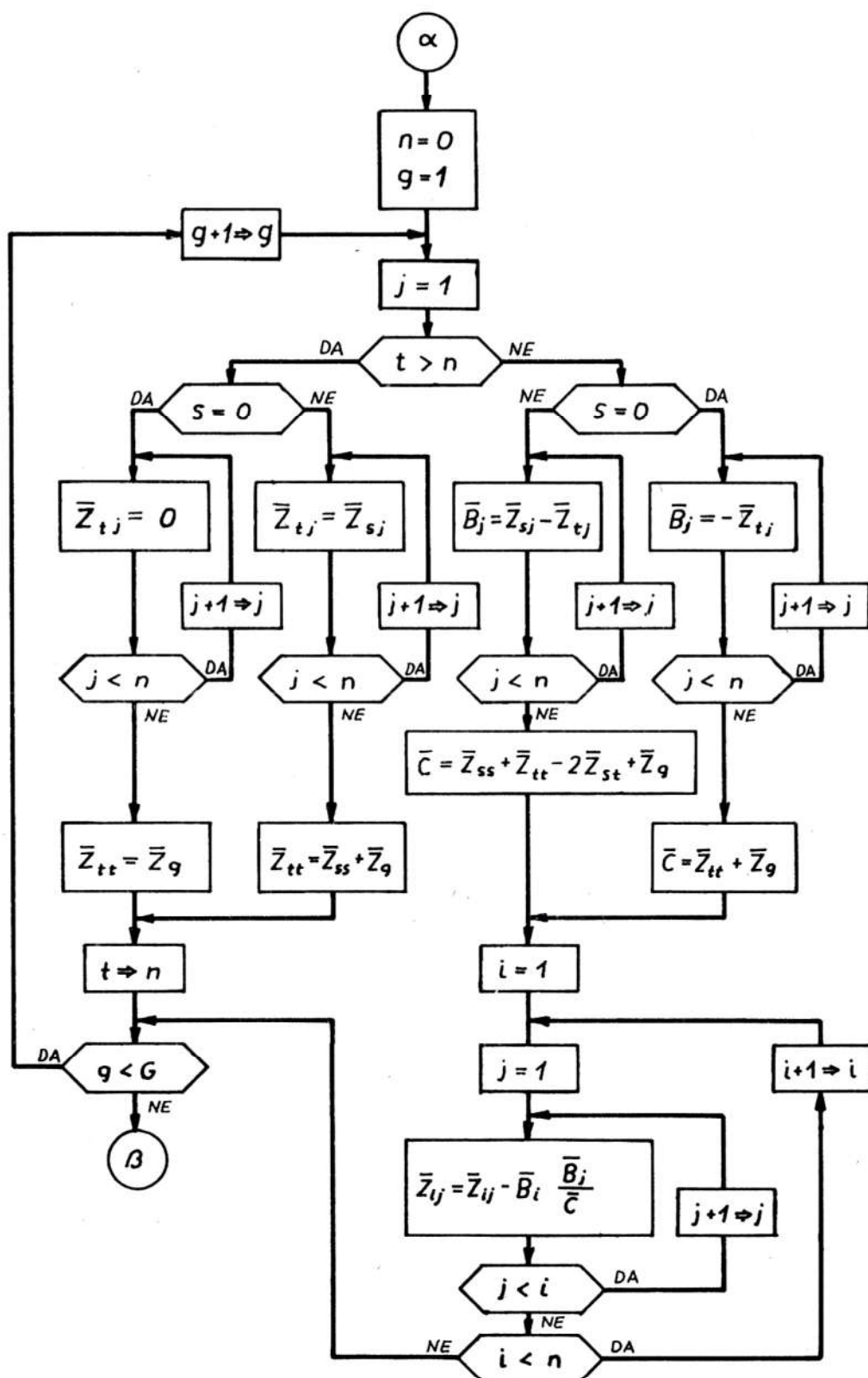
U svakom koraku mreža mora biti suvisla, pa je ovom zahtjevu poredjen redoslijed uključivanja grana. Sortiranje grana je prvi korak u sredjivanju liste grana. Ako je mreža i dalje nesuvisla, može se povezati granama beskonačne impedancije. Ovakovim granama mogu se povezati i čvorovi, koji su iz bilo kojeg razloga izostavljeni iz niza.

Mane ovakvog rješenja su:

1. Uključivanje grana beskonačne impedancije povećava broj grana i broj čvorova, što dovodi do dužeg računanja matrice i većeg zauzimanja prostora u memoriji računala.
2. Uključivanje grana beskonačne impedancije kvari točnost računa, jer se pojavljuju računske operacije zbrajanja i odbijanja brojeva nejednakog reda veličine.

Prednost je ovakvog rješenja, što se zadržava izvorna numeracija mreže. Ovo je naročito prikladno kod analiza u kojima dolazi do čestih promjena u nultom sistemu komponenata.

Istraživanja su pokazala da postoji optimalan veliki broj, koji igra ulogu beskonačne impedancije. Ako su djelatni otpori zanemareni, tj. kad u račun ulazi samo matrica $[X]$, a račun se vodi u metodi jediničnih vrijednosti, optimalni veliki broj iznosi 10^4 .



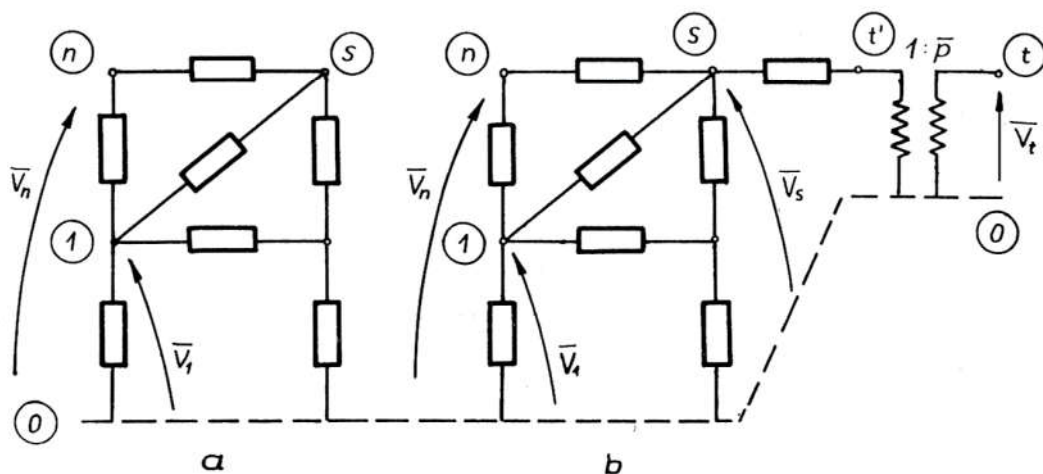
Slika 90,- Formiranje simetrične matrice $[\bar{Z}]$ metodom korak po korak

4.2.1 Uključivanje grane s idealnim transformatorom

Svaki slučaj uključivanja grane s više idealnih transformatora možemo svesti na slučaj uključivanja grane s jednim idealnim transformatorom, bilo uz čvor s ili uz čvor t. Zato možemo zamisliti kao opći slučaj da se idealni transformator nalazi uz čvor t i da ima kompleksni prijenosni omjer $\bar{p}$.

Uključivanje zavisne grane podvrgnut ćemo slijedećem postupku. Na slici 91. nacrtana je neka mreža prije (a) i poslije (b) dodavanja grane s-t u čvoru s.

Ako narinemo struju čvora $\bar{I}_s$ u čvor s na slici 91a i istu takvu struju $\bar{I}_t$ u čvor t na slici 91b, možemo zaključiti da su naponi $\bar{V}_i$ u mreži u oba slučaja jednaki i da vrijedi:



Slika 91.- Uključivanje zavisne grane

Za 91a:

$$\bar{Z}_{is} = \frac{\bar{V}_i}{\bar{I}_s}$$

4-1

$$\text{za 91b:} \quad \bar{z}_{it} = \frac{\bar{v}_i}{\bar{I}_t} \quad 4-2a$$

$$\frac{\bar{I}_t}{\bar{I}_t'} = \frac{1}{\bar{p}^*} \quad b$$

Iz uvjeta da je $\bar{I}_s$ jednako $\bar{I}_t$, slijedi jednakost napona istih čvorova u a i b, a iz ovoga

$$\bar{z}_{it} = \bar{z}_{is} \bar{p}^* \quad i = 1 \dots n \quad 4-3$$

Sada narinemo struje redom u sve čvorove na sl.91a, uključujući i čvor s. Iste struje narinemo redom u sve čvorove na slici 91b, izuzev čvora t, jer taj čvor u mreži na sl.91a ne postoji. Možemo zaključiti da je napon $\bar{v}_t$ jednak naponu $\bar{v}_s$, jer kroz priključenu granu s-t ne teče struja, pa nema pada napona. Zato vrijedi

$$\text{za 91a:} \quad \bar{z}_{sj} = \frac{\bar{v}_s}{\bar{I}_j} ; \quad 4-4$$

$$\text{za 91b:} \quad \bar{z}_{tj} = \frac{\bar{v}_t}{\bar{I}_j} = \frac{\bar{v}_s}{\bar{p} \bar{I}_j} , \quad 4-5$$

$$\text{što daje} \quad \bar{z}_{tj} = \bar{z}_{sj} \bar{p} \quad j = 1 \dots n \quad 4-6$$

Dijagonalni član dobijemo iz slijedećeg razmatranja:

$$\bar{z}_{tt} = \frac{\bar{v}_t}{\bar{I}_t} \quad 4-7a$$

$$\bar{z}_{ss} + \bar{z}_g = \frac{\bar{v}_t'}{\bar{I}_t'} = \frac{\bar{v}_t}{\bar{p} \bar{I}_t \bar{p}^*} = \bar{z}_{tt} \frac{1}{|\bar{p}|^2} \quad b$$

$$\text{što daje: } \bar{z}_{tt} = \bar{p}^2 (\bar{z}_{ss} + \bar{z}_g) \quad 4-8$$

Uključivanje nezavisne grane možemo podvrgnuti istom postupku i to tako da najprije uključimo dio grane $\bar{z}_g$, a zatim drugi dio zajedno s transformatorom. Dobijemo dva suvišna retka i stupca. Jednog retka i stupca se riješimo tako da koristimo uvjete na mjestu reza. Tako dobijemo jedan privremeni redak i stupac. Izrazi za ovaj privremeni redak i stupac, kada priključujemo granu sa idealnim transformatorom, glase;

$$\bar{z}_{iz} = \bar{z}_{is} - \bar{z}_{it} \frac{1}{\bar{p}^*} \quad i = 1 \dots n \quad 4-9$$

$$\bar{z}_{zj} = \bar{z}_{sj} - \bar{z}_{tj} \frac{1}{\bar{p}} \quad j = 1 \dots n \quad 4-10$$

$$\bar{z}_{zz} = \bar{z}_{ss} + \bar{z}_{tt} \left| \frac{1}{\bar{p}} \right|^2 - \bar{z}_{st} \frac{1}{\bar{p}^*} - \bar{z}_{ts} \frac{1}{\bar{p}} + \bar{z}_g \quad 4-11$$

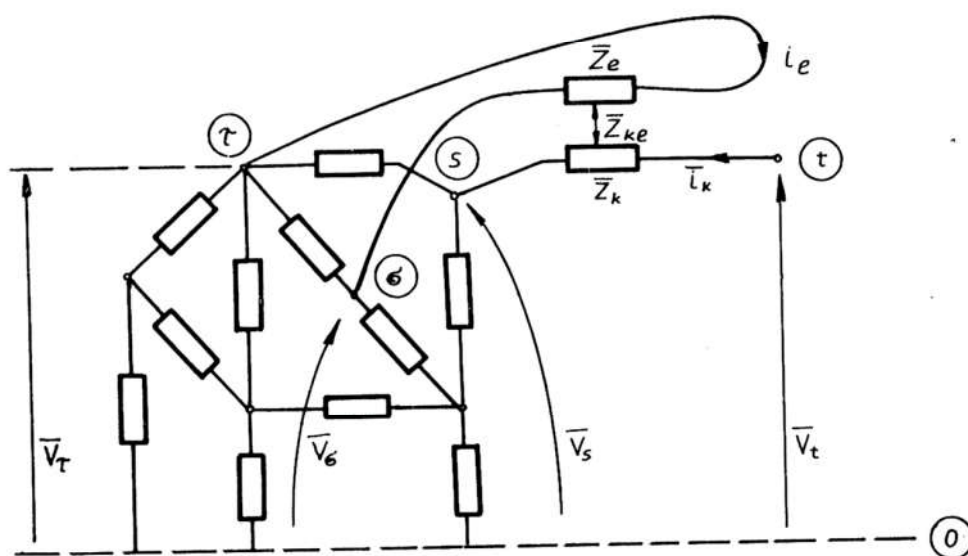
Ovog privremenog retka i stupca riješimo se blok transformacijom. Možemo konstatirati da matrica nije simetrična.

4.2.2 Uključivanje grane s međusobnim utjecajem

Zavisnu granu $\bar{z}_{s-t} = \bar{z}_k$ uključimo prema slici 92. Postoji međuin-
duktivna veza između grane $\bar{z}_{\sigma-\tau} = \bar{z}_\ell$ i grane $\bar{z}_k$. Grana $\bar{z}_\ell$ već po-
stoje u mreži.

Za odnose među granama $\bar{z}_k$ i $\bar{z}_\ell$ možemo napisati da je:

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_k \\ \bar{i}_\ell \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{y}_{kk} & \bar{y}_{k\ell} \\ \bar{y}_{\ell k} & \bar{y}_{\ell\ell} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{v}_k \\ \bar{v}_\ell \end{bmatrix} \quad 4-12$$



Slika 92.- Uključivanje zavisne grane sa medjuinduktivnom vezom s drugom granom

Narinemo struju $\bar{I}_j$ u čvor j, pa za napone čvorova s i t zaključujemo

$$\bar{V}_s = \bar{Z}_{sj} \bar{I}_j$$

$$\bar{V}_t = \bar{Z}_{tj} \bar{I}_j = \bar{V}_s + \bar{v}_k = \bar{Z}_{sj} \bar{I}_j + \bar{v}_k$$

Kroz granu $\bar{Z}_k$ ne teče struja, pa iz jednađbe 4-12 slijedi

$$0 = \bar{Y}_{kk} \bar{v}_k + \bar{Y}_{k\ell} \bar{v}_\ell$$

$$\bar{v}_k = - \frac{\bar{Y}_{k\ell}}{\bar{Y}_{kk}} \bar{v}_\ell$$

4-13

kako je: $\bar{v}_\ell = \bar{V}_\tau - \bar{V}_\sigma$

$$\text{to je ; } \bar{v}_k = - \frac{\bar{y}_{kl}}{\bar{y}_{kk}} (\bar{v}_\tau - \bar{v}_\sigma) = \frac{\bar{y}_{kl}}{\bar{y}_{kk}} (\bar{v}_\sigma - \bar{v}_\tau) \quad 4-14$$

$$\text{Sada je: } \bar{v}_t = \bar{z}_{sj} \bar{i}_j + \frac{\bar{y}_{kl}}{\bar{y}_{kk}} (\bar{v}_\sigma - \bar{v}_\tau) /: \bar{i}_j$$

$$\bar{z}_{tj} = \bar{z}_{sj} + \frac{\bar{y}_{kl}}{\bar{y}_{kk}} (\bar{z}_{\sigma j} - \bar{z}_{\tau j}) \quad j = 1 \dots n \quad 4-15$$

$\bar{z}_{it}$ računamo tako da narinemo struju $\bar{i}_\sigma$ u čvor σ , a struju grane $\bar{i}_l$ shvatimo kao struju čvora $\bar{i}_\sigma$ koja ulazi u čvor σ i struju čvora $\bar{i}_\tau$ koja izlazi iz čvora τ . Napon i-tog čvora iznosi:

$$\bar{v}_i = \bar{z}_{is} \bar{i}_s + \bar{z}_{i\sigma} \bar{i}_\sigma + \bar{z}_{i\tau} \bar{i}_\tau, \quad 4-16$$

odnosno

$$\bar{v}_i = \bar{z}_{is} \bar{i}_s + (\bar{z}_{i\sigma} - \bar{z}_{i\tau}) \bar{i}_l \quad 4-17$$

Relacije 4-12 vrijede i za slučaj kada je $\bar{v}_l = 0$, odnosno kada je grana $\bar{z}_l$ kratko spojena:

$$\bar{i}_k = \bar{y}_{kk} \bar{v}_k \quad 4-18a$$

$$\bar{i}_l = \bar{y}_{lk} \bar{v}_k, \quad b$$

iz čega slijedi omjer

$$\frac{\bar{i}_l}{\bar{i}_k} = \frac{\bar{y}_{lk}}{\bar{y}_{kk}} \quad 4-19$$

Izraz za $\bar{i}_l$ iz gornjeg omjera uvrstimo u relaciju 4-17. Pošto je

$$\bar{I}_k = \bar{I}_t = \bar{I}_s \quad 4-20$$

$$\bar{V}_i = \bar{Z}_{is} \bar{I}_t + (\bar{Z}_{i\sigma} - \bar{Z}_{i\tau}) \frac{\bar{Y}_{\ell k}}{\bar{Y}_{kk}} \bar{I}_t \quad 4-21$$

Podijelimo relaciju 4-21 s $\bar{I}_t$. Dobili smo traženi izraz

$$\bar{Z}_{it} = \bar{Z}_{is} + (\bar{Z}_{i\sigma} - \bar{Z}_{i\tau}) \frac{\bar{Y}_{\ell k}}{\bar{Y}_{kk}} \quad i = 1 \dots n$$

Dijagonalni član dobijemo tako da narinemo struju $\bar{I}_t$ u čvoru t.

Sada je $\bar{I}_k = \bar{I}_t$, pa je:

$$\begin{aligned} \bar{I}_t &= \bar{Y}_{kk} \bar{V}_{k\ell} + \bar{Y}_{k\ell} V = \bar{Y}_{kk} (\bar{V}_t - \bar{V}_s) + \\ &+ \bar{Y}_{k\ell} (\bar{V}_\tau - \bar{V}_\sigma) \quad /: \bar{I}_t \end{aligned}$$

$$1 = \bar{Y}_{kk} (\bar{Z}_{tt} - \bar{Z}_{st}) + \bar{Y}_{k\ell} (\bar{Z}_{\tau t} - \bar{Z}_{\sigma t})$$

Iz ovoga slijedi, da je dijagonalni član:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{tt} &= \bar{Z}_{st} + \frac{\bar{Y}_{k\ell}}{\bar{Y}_{kk}} (\bar{Z}_{\sigma t} - \bar{Z}_{\tau t}) + \frac{1}{\bar{Y}_{kk}} = \\ &= \bar{Z}_{ss} + \frac{\bar{Y}_{k\ell}}{\bar{Y}_{kk}} (\bar{Z}_{s\sigma} - \bar{Z}_{s\tau} + \bar{Z}_{\sigma t} - \bar{Z}_{\tau t}) + \bar{Z}_k \end{aligned}$$

Pošto je:

$$\bar{Z}_{\sigma t} = \bar{Z}_{\sigma s} + \frac{\bar{Y}_{k\ell}}{\bar{Y}_{kk}} (\bar{Z}_{\sigma\sigma} - \bar{Z}_{\sigma\tau})$$

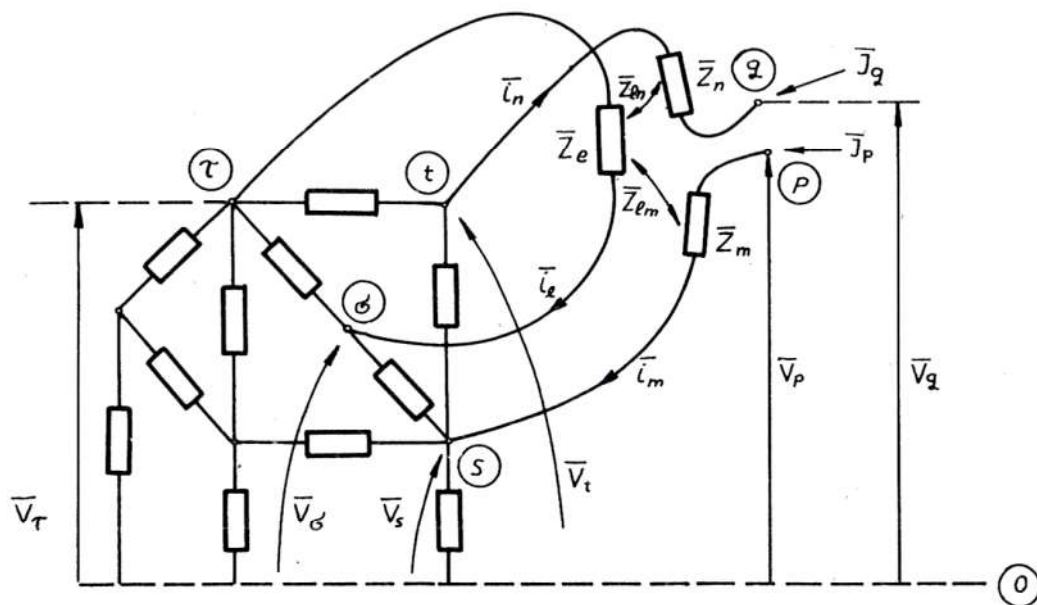
$$\bar{Z}_{\tau t} = \bar{Z}_{\tau s} + \frac{\bar{Y}_{k\ell}}{\bar{Y}_{kk}} (\bar{Z}_{\tau\sigma} - \bar{Z}_{\tau\tau})$$

možemo zaključiti:

$$\bar{z}_{tt} = \bar{z}_{ss} + \frac{\bar{y}_{k\ell}}{\bar{y}_{kk}} (2\bar{z}_{s\sigma} - 2\bar{z}_{s\tau} + \frac{\bar{y}_{k\ell}}{\bar{y}_{kk}} (\bar{z}_{\sigma\sigma} + \bar{z}_{\tau\tau} - 2\bar{z}_{\sigma\tau}) + \bar{z}_k \quad 4-22$$

Izrazi 4-15 do 4-22 prelaze u izraze za uključivanje grane bez međusobnog utjecaja, kada je $\bar{y}_{k\ell} = 0$.

Nezavisnu granu $g=k$ impedancije $\bar{z}_k$ između čvorova s i t , koji već postoje u mreži (slika 93), uključit ćemo tako da je presječemo na dvije grane $\bar{z}_{s-p} = \bar{z}_m$ i $\bar{z}_{t-q} = \bar{z}_n$. Nastaju dva nova čvora, p i q . Grane $\bar{z}_m$ i $\bar{z}_n$, nastale presjecanjem grane $\bar{z}_k$, uključujemo



$$\bar{i}_p = \bar{i}_m = \bar{i}_n = -\bar{i}_q = \bar{i}_z$$

$$\bar{V}_p = \bar{V}_q$$

Slika 93.- Uključivanje nezavisne grane s medjuinduktivnom ,
vezom s drugom granom

kao zavisne i to najprije granu $\bar{z}_m$, a zatim granu $\bar{z}_n$. Dobit ćemo dva suvišna retka i dva suvišna stupca. Sada koristimo činjenicu da je $\bar{v}_p = \bar{v}_q$ i da je $\bar{i}_p = -\bar{i}_q$. Odbijemo redak q od retka p i sredimo jednađžbe. Dobili smo jedan privremeni redak i jedan privremeni stupac, koji ćemo označiti sa z. Blok transformacijom riješit ćemo se i ovog suvišnog retka i stupca. Formule za privremeni redak i stupac dobiju se složenim preračunavanjem u biti jednostavnih izraza.

Ispisujemo jednađžbe:

$$\begin{aligned}\bar{v}_1 &= \bar{z}_{11} \bar{i}_1 + \dots + \bar{z}_{1\sigma} \bar{i}_\sigma + \dots + \bar{z}_{1\tau} \bar{i}_\tau + \dots + \bar{z}_{1s} \bar{i}_s + \dots + \\ &+ \bar{z}_{1t} \bar{i}_t + \dots + \bar{z}_{1p} \bar{i}_p + \bar{z}_{1q} \bar{i}_q\end{aligned}\quad 4-23$$

.....

$$\begin{aligned}\bar{v}_\sigma &= \bar{z}_{\sigma 1} \bar{i}_1 + \dots + \bar{z}_{\sigma\sigma} \bar{i}_\sigma + \dots + \bar{z}_{\sigma\tau} \bar{i}_\tau + \dots + \bar{z}_{\sigma s} \bar{i}_s + \dots + \\ &+ \bar{z}_{\sigma t} \bar{i}_t + \dots + \bar{z}_{\sigma p} \bar{i}_p + \bar{z}_{\sigma q} \bar{i}_q\end{aligned}$$

.....

$$\begin{aligned}\bar{v}_\tau &= \bar{z}_{\tau 1} \bar{i}_1 + \dots + \bar{z}_{\tau\sigma} \bar{i}_\sigma + \dots + \bar{z}_{\tau\tau} \bar{i}_\tau + \dots + \bar{z}_{\tau s} \bar{i}_s + \dots + \\ &+ \bar{z}_{\tau t} \bar{i}_t + \dots + \bar{z}_{\tau p} \bar{i}_p + \bar{z}_{\tau q} \bar{i}_q\end{aligned}$$

.....

$$\begin{aligned}\bar{v}_s &= \bar{z}_{s1} \bar{i}_1 + \dots + \bar{z}_{s\sigma} \bar{i}_\sigma + \dots + \bar{z}_{s\tau} \bar{i}_\tau + \dots + \bar{z}_{ss} \bar{i}_s + \dots + \\ &+ \bar{z}_{st} \bar{i}_t + \dots + \bar{z}_{sp} \bar{i}_p + \bar{z}_{sq} \bar{i}_q\end{aligned}$$

.....

$$\bar{v}_t = \bar{z}_{t1} \bar{i}_1 + \dots + \bar{z}_{t\sigma} \bar{i}_\sigma + \dots + \bar{z}_{t\tau} \bar{i}_\tau + \dots + \bar{z}_{ts} \bar{i}_s + \dots +$$

$$+ \frac{\bar{y}_{m\ell}}{\bar{y}_{mm}} \left[\bar{z}_{\sigma t} + \frac{\bar{y}_{n\ell}}{\bar{y}_{nn}} (\bar{z}_{\sigma\tau} - \bar{z}_{\sigma\sigma}) - \bar{z}_{\tau t} - \frac{\bar{y}_{n\ell}}{\bar{y}_{nn}} (\bar{z}_{\tau\tau} - \bar{z}_{\tau\sigma}) \right] \quad 4-24g$$

$$\begin{aligned} \bar{z}_{qp} &= \bar{z}_{tp} + \frac{\bar{y}_{n\ell}}{\bar{y}_{nn}} (\bar{z}_{\tau p} - \bar{z}_{\sigma p}) = \bar{z}_{ts} + \frac{\bar{y}_{m\ell}}{\bar{y}_{mm}} (\bar{z}_{t\sigma} - \bar{z}_{t\tau}) + \\ &+ \frac{\bar{y}_{n\ell}}{\bar{y}_{nn}} \left[\bar{z}_{\tau s} + \frac{\bar{y}_{m\ell}}{\bar{y}_{mm}} (\bar{z}_{\tau\sigma} - \bar{z}_{\tau\tau}) - \bar{z}_{\sigma s} - \frac{\bar{y}_{m\ell}}{\bar{y}_{mm}} (\bar{z}_{\sigma\sigma} - \bar{z}_{\sigma\tau}) \right] \quad h \end{aligned}$$

U relacijama 4-23 odbijemo q-tu jednađžbu od p-te jednađžbe i uvažimo da je:

$$\bar{I}_p = -\bar{I}_q = \bar{I}_z \quad 4-25a$$

$$\bar{V}_p = \bar{V}_q \quad b$$

Novi sistem jednađžbi glasi:

$$\begin{aligned} \bar{V}_1 &= \bar{z}_{11} \bar{I}_1 + \dots + \bar{z}_{1\sigma} \bar{I}_\sigma + \dots + \bar{z}_{1\tau} \bar{I}_\tau + \dots + \bar{z}_{1s} \bar{I}_s + \dots + \\ &+ \bar{z}_{1t} \bar{I}_t + \dots + \bar{z}_{1z} \bar{I}_z \end{aligned} \quad 4-26$$

.....

$$\begin{aligned} \bar{V}_\sigma &= \bar{z}_{\sigma 1} \bar{I}_1 + \dots + \bar{z}_{\sigma\sigma} \bar{I}_\sigma + \dots + \bar{z}_{\sigma\tau} \bar{I}_\tau + \dots + \bar{z}_{\sigma s} \bar{I}_s + \dots + \\ &+ \bar{z}_{\sigma t} \bar{I}_t + \dots + \bar{z}_{\sigma z} \bar{I}_z \end{aligned}$$

.....

$$\begin{aligned} \bar{V}_\tau &= \bar{z}_{\tau 1} \bar{I}_1 + \dots + \bar{z}_{\tau\sigma} \bar{I}_\sigma + \dots + \bar{z}_{\tau\tau} \bar{I}_\tau + \dots + \bar{z}_{\tau s} \bar{I}_s + \dots + \\ &+ \bar{z}_{\tau t} \bar{I}_t + \dots + \bar{z}_{\tau z} \bar{I}_z \end{aligned}$$

.....

$$\bar{V}_s = \bar{z}_{s1} \bar{I}_1 + \dots + \bar{z}_{s\sigma} \bar{I}_\sigma + \dots + \bar{z}_{s\tau} \bar{I}_\tau + \dots + \bar{z}_{ss} \bar{I}_s + \dots + \\ + \bar{z}_{st} \bar{I}_t + \dots + \bar{z}_{sz} \bar{I}_z$$

.....

$$\bar{V}_t = \bar{z}_{t1} \bar{I}_1 + \dots + \bar{z}_{t\sigma} \bar{I}_\sigma + \dots + \bar{z}_{t\tau} \bar{I}_\tau + \dots + \bar{z}_{ts} \bar{I}_s + \dots + \\ + \bar{z}_{tt} \bar{I}_t + \dots + \bar{z}_{tz} \bar{I}_z$$

.....

$$0 = \bar{z}_{z1} \bar{I}_1 + \dots + \bar{z}_{z\sigma} \bar{I}_\sigma + \dots + \bar{z}_{z\tau} \bar{I}_\tau + \dots + \bar{z}_{zs} \bar{I}_s + \dots + \\ + \bar{z}_{zt} \bar{I}_t + \dots + \bar{z}_{zz} \bar{I}_z$$

Radi lakšeg računanja pretpostavimo da je grana prekinuta u sredini. Tada je;

$$\bar{Y}_{m\ell} = \bar{Y}_{n\ell} = \bar{Y}_{k\ell} \quad 4-27a$$

$$\bar{Y}_{mm} = \bar{Y}_{nn} = \bar{Y}_{kk} \quad b$$

$$\bar{Z}_k = 2/\bar{Y}_{kk} \quad c$$

Takodjer moramo uzeti u obzir da je matrica simetrična, pa za privremeni redak i stupac dobijemo:

$$\bar{Z}_{iz} = \bar{z}_{ip} - \bar{z}_{iq} = \bar{z}_{is} + \frac{\bar{Y}_{m\ell}}{\bar{Y}_{mm}} (\bar{z}_{i\sigma} - \bar{z}_{i\tau}) - \bar{z}_{it} - \frac{\bar{Y}_{n\ell}}{\bar{Y}_{nn}} (\bar{z}_{i\tau} - \bar{z}_{i\sigma}) = \\ = \bar{z}_{is} - \bar{z}_{it} + 2 \frac{\bar{Y}_{k\ell}}{\bar{Y}_{kk}} (\bar{z}_{i\sigma} - \bar{z}_{i\tau}) \quad 4-28$$

$$\begin{aligned}\bar{z}_{zj} &= \bar{z}_{pj} - \bar{z}_{qj} = \bar{z}_{sj} + \frac{\bar{y}_{m\ell}}{\bar{y}_{mm}} (\bar{z}_{\sigma j} - \bar{z}_{\tau j}) - \bar{z}_{tj} - \frac{\bar{y}_{n\ell}}{\bar{y}_{nn}} (\bar{z}_{\tau j} - \bar{z}_{\sigma j}) = \\ &= \bar{z}_{sj} - \bar{z}_{tj} + 2 \frac{\bar{y}_{k\ell}}{\bar{y}_{kk}} (\bar{z}_{\sigma j} - \bar{z}_{\tau j})\end{aligned}\quad 4-29$$

$$\begin{aligned}\bar{z}_{zz} &= \bar{z}_{pp} - \bar{z}_{pq} - \bar{z}_{qp} + \bar{z}_{qq} = \\ &= \bar{z}_{ss} + \frac{\bar{y}_{m\ell}}{\bar{y}_{mm}} \left[2\bar{z}_{s\sigma} - 2\bar{z}_{s\tau} + \frac{\bar{y}_{m\ell}}{\bar{y}_{mm}} (\bar{z}_{\sigma\sigma} + \bar{z}_{\tau\tau} - 2\bar{z}_{\sigma\tau}) \right] + \\ &+ \bar{z}_m - \bar{z}_{st} - \frac{\bar{y}_{n\ell}}{\bar{y}_{nn}} (\bar{z}_{s\tau} - \bar{z}_{s\sigma}) - \frac{\bar{y}_{m\ell}}{\bar{y}_{mm}} \left[\bar{z}_{\sigma t} + \frac{\bar{y}_{n\ell}}{\bar{y}_{nn}} (\bar{z}_{\sigma\tau} - \bar{z}_{\sigma\sigma}) - \right. \\ &- \left. \bar{z}_{\tau t} - \frac{\bar{y}_{n\ell}}{\bar{y}_{nn}} (\bar{z}_{\tau\tau} - \bar{z}_{\tau\sigma}) \right] - \bar{z}_{ts} - \frac{\bar{y}_{m\ell}}{\bar{y}_{mm}} (\bar{z}_{t\sigma} - \bar{z}_{t\tau}) - \\ &- \frac{\bar{y}_{n\ell}}{\bar{y}_{nn}} \left[\bar{z}_{\tau s} + \frac{\bar{y}_{m\ell}}{\bar{y}_{mm}} (\bar{z}_{\tau\sigma} - \bar{z}_{\tau\tau}) - \bar{z}_{\sigma s} - \frac{\bar{y}_{m\ell}}{\bar{y}_{mm}} (\bar{z}_{\sigma\sigma} - \bar{z}_{\sigma\tau}) \right] + \\ &+ \bar{z}_{tt} + \frac{\bar{y}_{n\ell}}{\bar{y}_{nn}} \left[2\bar{z}_{t\tau} - 2\bar{z}_{t\sigma} + \frac{\bar{y}_{n\ell}}{\bar{y}_{nn}} (\bar{z}_{\sigma\sigma} + \bar{z}_{\tau\tau} - 2\bar{z}_{\sigma\tau}) \right] + \bar{z}_n = \\ &= \bar{z}_{ss} + \bar{z}_k/2 - \bar{z}_{st} - \bar{z}_{st} + \bar{z}_k/2 + \bar{z}_{tt} + \\ &+ 4 \frac{\bar{y}_{k\ell}}{\bar{y}_{kk}} (\bar{z}_{s\sigma} - \bar{z}_{s\tau} - \bar{z}_{t\sigma} + \bar{z}_{t\tau}) + \\ &+ 4 \left(\frac{\bar{y}_{k\ell}}{\bar{y}_{kk}} \right)^2 (\bar{z}_{\sigma\sigma} + \bar{z}_{\tau\tau} - 2\bar{z}_{\sigma\tau}) = \\ &= \bar{z}_{ss} - 2\bar{z}_{st} + \bar{z}_k + 2\bar{y}_{k\ell} \bar{z}_k (\bar{z}_{s\sigma} - \bar{z}_{s\tau} - \bar{z}_{t\sigma} + \bar{z}_{t\tau}) + \\ &+ \bar{y}_{k\ell}^2 \bar{z}_k^2 (\bar{z}_{\sigma\sigma} + \bar{z}_{\tau\tau} - 2\bar{z}_{\sigma\tau}) + \bar{z}_{tt}\end{aligned}\quad 4-30$$

Upravo smo dobili tražene relacije za proračun privremenog retka i stupca:

$$\bar{z}_{iz} = \bar{z}_{is} - \bar{z}_{it} + (\bar{z}_{i\sigma} - \bar{z}_{i\tau}) \bar{y}_{k\ell} \bar{z}_k \quad 4-31$$

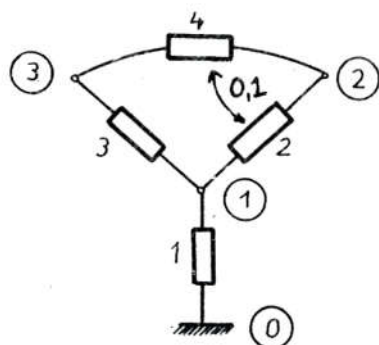
$i = 1, 2, \dots, n$

$$\bar{z}_{zj} = \bar{z}_{sj} - \bar{z}_{tj} + (\bar{z}_{\sigma j} - \bar{z}_{\tau j}) \bar{y}_{k\ell} \bar{z}_k \quad 4-32$$

$j = 1, 2, \dots, n$

$$\begin{aligned} \bar{z}_{zz} = & \bar{z}_{ss} + \bar{z}_{tt} - 2 \bar{z}_{st} + \bar{z}_k + \\ & + 2(\bar{z}_{s\sigma} - \bar{z}_{s\tau} - \bar{z}_{t\sigma} + \bar{z}_{t\tau}) \bar{y}_{k\ell} \bar{z}_k + \\ & + (\bar{z}_{\sigma\sigma} + \bar{z}_{\tau\tau} - 2 \bar{z}_{\sigma\tau}) \bar{y}_{k\ell}^2 \bar{z}_k^2 \end{aligned} \quad 4-33$$

Primjer 4.1 Pretpostavimo mrežu kao na slici 94. Međuinduktivni utjecaj postoji između grana 2 i 4.



a - ekvivalentna shema mreže

g	s	t	$\bar{z}_{s-t}$	σ	τ	$\bar{z}_{\sigma-\tau}$
1	0	1	0,2			
2	1	2	0,5	2	3	0,1
3	1	3	1,0			
4	2	3	0,3	2	1	0,1

b - lista grana

Slika 94. - Mreža sa međusobnim utjecajem grana

Izračunajmo matricu mreže sa slike 94a metodom korak po korak uključivanjem grana redoslijedom prema listi grana sa sl.94b.

1. korak, uključujemo granu 1:

$$[\bar{Z}] = \begin{matrix} & 1 \\ 1 & \begin{bmatrix} 0,2 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

2. korak, uključujemo granu 2:

$$[\bar{Z}] = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,2 & 0,2 \\ 0,2 & 0,7 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

3. korak, uključujemo granu 3:

$$[\bar{Z}] = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ 0,2 & 0,7 & 0,2 \\ 0,2 & 0,2 & 1,2 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

4. korak, uključujemo granu 4:

Računamo matricu vlastitih i međusobnih impedancija grana mreže:

$$[\bar{Z}_g] = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,2 & & & \\ & 0,5 & & 0,1 \\ & & 1,0 & \\ & 0,1 & & 0,3 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Inverzijom ove matrice dobijemo matricu vlastitih i međusobnih admitancija grana mreže:

$$[\bar{Y}_g] =$$

	1	2	3	4
1	5			
2		2,143		-0,714
3			1,0	
4		-0,714		3,57

Iz gornje matrice slijedi podmatrica:

$$[\bar{Y}_{2,4}] =$$

	1	2
1	2,143	-0,714
2	-0,714	3,57

Matricu $[\bar{Y}_{2,4}]$ mogli smo dobiti inverzijom podmatrice $[\bar{Z}_{2,4}]$, jer u mreži nije bilo drugih međusobnih utjecaja.

Možemo utvrditi da je za našu mrežu kod uključivanja grane 4:
 $s = 2, t = 3, \sigma = 2, \tau = 1, \bar{Y}_{kl} = \bar{Y}_{4,2} = -0,714, \bar{Z}_g = \bar{Z}_k = 0,3$.

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{1z} &= \bar{Z}_{12} - \bar{Z}_{13} + (\bar{Z}_{12} - \bar{Z}_{11})\bar{Y}_{4,2} \bar{Z}_4 = \\ &= 0,2 - 0,2 + (0,2 - 0,2)(-0,714)0,3 = 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{2z} &= \bar{Z}_{22} - \bar{Z}_{23} + (\bar{Z}_{22} - \bar{Z}_{12})\bar{Y}_{4,2} \bar{Z}_4 = \\ &= 0,7 - 0,2 + (0,7 - 0,2)(-0,714)0,3 = 0,393\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{3z} &= \bar{Z}_{32} - \bar{Z}_{33} + (\bar{Z}_{32} - \bar{Z}_{31})\bar{Y}_{4,2} \bar{Z}_4 = \\ &= 0,2 - 1,2 + (0,2 - 0,2)(-0,714)0,3 = -1,0\end{aligned}$$

$$\bar{Z}_{zz} = \bar{Z}_{22} + \bar{Z}_{33} - 2 \bar{Z}_{23} + \bar{Z}_4 +$$

$$\begin{aligned}
 &+ 2(\bar{z}_{22} - \bar{z}_{21} - \bar{z}_{32} + \bar{z}_{31}) \bar{y}_{4,2} \bar{z}_4 + \\
 &+ (\bar{z}_{22} + \bar{z}_{11} - 2\bar{z}_{12}) \bar{y}_{4,2}^2 \bar{z}_4^2 = \\
 &= 0,7 + 1,2 - 0,4 + 0,3 + 2(0,7 - 0,2 - 0,2 + \\
 &+ 0,2) (-0,714) 0,3 + (0,2 + 0,7 - 0,4) (-0,714)^2 0,3^2 = 1,609
 \end{aligned}$$

Ispisujemo povećanu matricu:

	1	2	3	4
1	0,2	0,2	0,2	0
2	0,2	0,7	0,2	0,393
3	0,2	0,2	1,2	-1,0
4	0	0,393	-1,0	1,609

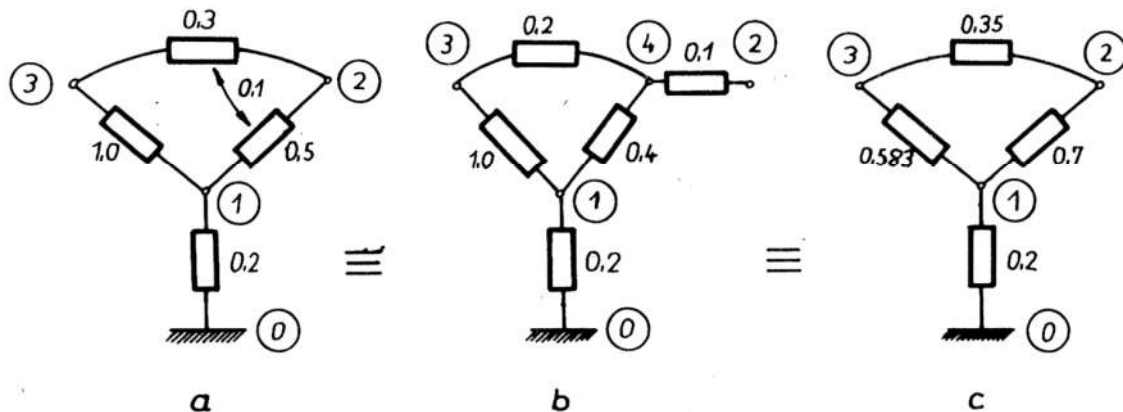
Blok transformacijom se riješimo suvišnog retka i stupca:

$$[\bar{z}] = \begin{bmatrix} 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ 0,2 & 0,7 & 0,2 \\ 0,2 & 0,2 & 1,2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0,393 \\ -1,0 \end{bmatrix} \times \frac{1}{1,609} \times \begin{bmatrix} 0 & 0,393 & -1,0 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ 0,2 & 0,7 & 0,2 \\ 0,2 & 0,2 & 1,2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,096 & -0,244 \\ 0 & -0,244 & 0,622 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ 0,2 & 0,604 & 0,444 \\ 0,2 & 0,444 & 0,578 \end{bmatrix}$$

Kontrola:

Kontrolu rezultata ćemo provesti tako da ćemo se riješiti međusobnog utjecaja grana na klasičan način. Mreža sa slike 94 će se transformirati prema slici 95abc.



Slika 95.- Transformacija mreže na klasičan način

$$\bar{z}_{2-3} = \bar{z}_a = 0,3$$

$$\bar{z}_{1-2} = \bar{z}_b = 0,5$$

$$\bar{z}_{ab} = 0,1$$

$$\bar{z}_{3-4} = \bar{z}_a - \bar{z}_{ab} = 0,3 - 0,1 = 0,2$$

$$\bar{z}_{1-4} = \bar{z}_b - \bar{z}_{ab} = 0,5 - 0,1 = 0,4$$

$$\bar{z}_{2-4} = \bar{z}_{ab} = 0,1$$

Pretvorimo zvijezdu u trokut i riješimo se čvora 4.

Izračunajmo matricu mreže sa slike 95c metodom korak po korak. U četvrtom koraku dobit ćemo povećanu matricu, tj. matricu s privremenim retkom i stupcem.

$$[\bar{Z}] = \begin{bmatrix} 0,2 & 0,2 & 0,2 & 0 \\ 0,2 & 0,9 & 0,2 & 0,7 \\ 0,2 & 0,2 & 0,783 & -0,583 \\ 0 & 0,7 & -0,583 & 1,633 \end{bmatrix}$$

$$[\bar{Z}] = \begin{bmatrix} 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ 0,2 & 0,9 & 0,2 \\ 0,2 & 0,2 & 0,783 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0,7 \\ -0,583 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{1,633} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0,7 & -0,583 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ 0,2 & 0,9 & 0,2 \\ 0,2 & 0,2 & 0,783 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,3 & -0,249 \\ 0 & -0,249 & 0,208 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ 0,2 & 0,6 & 0,449 \\ 0,2 & 0,449 & 0,575 \end{bmatrix}$$

Dobili smo isti rezultat !

4.2.3 Prenumeriranje mreže za metodu korak po korak

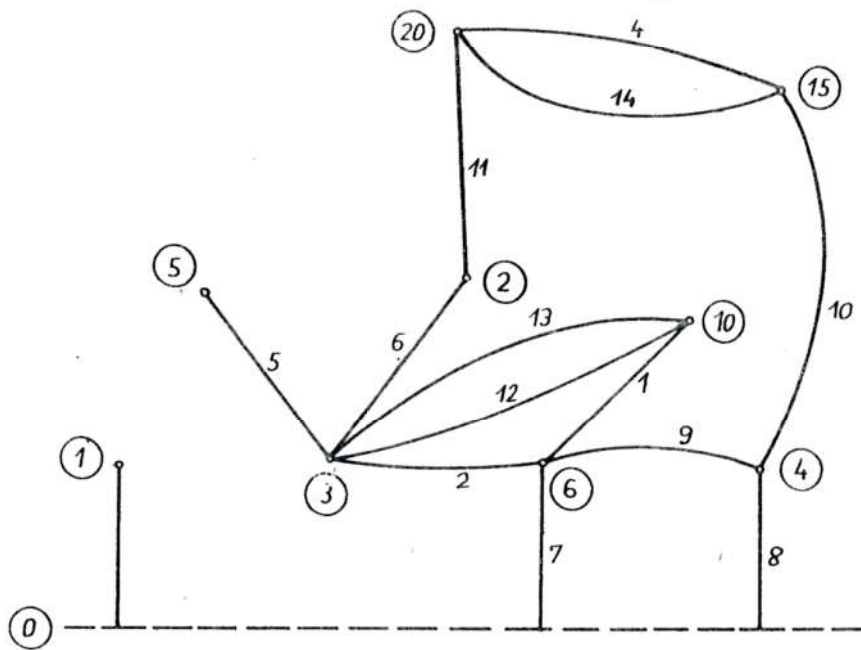
Na slici 96. nalazi se dijagram toka za prenumeriranje mreže, tako da nova numeracija odgovara formiranju matrice $[\bar{Z}]$ u metodi korak po korak. Najprije se grane slože tako da zadovoljavaju uvjet stalne suvislosti mreže, ako se grane uključuju redom. Prenumeriranje dolazi sasvim na kraju.

Postupak se sastoji u tome da iz izvorne liste grana, $g = 1 \dots G$, stvaramo novu listu grana $g' = 1 \dots G'$, u kojoj redoslijed grana osigurava suvislost mreže u svakom koraku. Stvaranje nove liste grana popraćeno je poništavanjem odgovarajuće grane u staroj listi grana, pa zato kažemo da grane prebacujemo iz stare u novu listu grana.

U listu čvorova π uključujemo referentni čvor, nazovimo ga prvi novi čvor. Zato u prvom koraku prebacujemo sve grane vezane upravo za ovaj čvor. U drugom koraku istražujemo iz liste grana g' drugi novi čvor i uključujemo ga u listu čvorova π . prebacujemo sve grane vezane za ovaj čvor. U trećem koraku iz liste g' uzimamo treći novi čvor i uključujemo ga u listu čvorova π . Prebacujemo sve grane vezane za ovaj čvor, jasno, ako već nisu prebačene odnosno poništene u staroj listi grana g . Proces teče dalje dok se ne prebace sve grane iz liste g u listu g' i dok se iz liste g' ne uključe svi čvorovi u listu čvorova π .

Na kraju procesa imamo novu listu grana sa starim čvorovima s i t . U listi čvorova π poredani su čvorovi onako kako ih treba uključivati da bi mreža u svakom koraku bila suvisla, a to znači da im numeracija mora odgovarati redoslijedu. Ta nova numeracija je pridružena broju čvorova π kao broj σ .

Primjer 4.2 Na slici 97a nalazi se numerirani graf test mreže za prenumeriranje, a na slici 97b, u tablici 4.1 nalazi se lista grana kojom je zadana topologija i parametri mreže. Možemo pratiti formiranje liste prebačenih grana g' i liste prebačenih čvorova π .



a - graf mreže

Tablica 4.1

g	s_g	t_g	$\bar{z}_g$	$\bar{y}_g$
1	10	6	1,2	0,833
2	3	6	0,9	1,111
3	0	1	2,3	0,435
4	15	20	1,5	0,667
5	3	5	1,1	0,909
6	2	3	0,8	1,25
7	0	6	1,9	0,526
8	0	4	1,7	0,588
9	4	6	0,5	2,0
10	4	15	0,3	3,333
11	2	20	1,8	0,556
12	3	10	2,1	0,476
13	3	10	2,2	0,455
14	20	15	1,6	0,625

b - lista grana

Slika 97. - Test mreža za prenumeriranje

1. korak: $v = 0$

g	s_g	t_g
1	10	6
2	3	6
3	0	0
4	15	20
5	3	5
6	2	3
7	0	0
8	0	0
9	4	6
10	4	15
11	2	20
12	3	10
13	3	10
14	20	15

g'	s_g	t_g
1	0	1
2	0	6
3	0	4

i	π_i
1	0

Prebačene grane:

$g = 3, 7 \text{ i } 8$

2. korak: $v = 1$

i	π_i
1	0
2	1

Nema prebačenih grana

3. korak: $v = 6$

g	s_g	t_g
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	15	20
5	3	5
6	2	3
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	4	15
11	2	20
12	3	10
13	3	10
14	20	15

g'	s_g	t_g
1	0	1
2	0	6
3	0	4
4	10	6
5	3	6
6	4	6

i	π_i
1	0
2	1
3	6

Prebačene grane:

$g = 1, 2 \text{ i } 9$

9. korak: $v = 2$

g	s_g	t_g
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0

g'	s_g	t_g
1	0	1
2	0	6
3	0	4
4	10	6
5	3	6
6	4	6
7	4	15
8	3	10
9	3	10
10	3	5
11	2	3
12	15	20
13	20	15
14	2	20

i	π_i
1	0
2	1
3	6
4	4
5	10
6	3
7	15
8	5
9	2

Prebačene grane:

$g = 4, 5, 6, 10, 11,$
 $12, 13 \text{ i } 14$

10. korak: $v = 20$

i	π_i
1	0
2	1
3	6
4	4
5	10
6	3
7	15
8	5
9	2
10	20

Nema prebačenih grana

Slijedi nova numeracija čvorova σ_i i nova lista grana (tablice 4.2 i 4.3):

Tablica 4.2

i	π_i	σ_i
1	0	0
2	1	1
3	6	2
4	4	3
5	10	4
6	3	5
7	15	6
8	5	7
9	2	8
10	20	9

Tablica 4.3

g'	$s_{g'}$	$t_{g'}$	$\bar{z}_{g'}$
1	0	1	2,3
2	0	2	1,9
3	0	3	1,7
4	4	2	1,2
5	5	2	0,9
6	3	2	0,5
7	3	6	0,3
8	5	4	2,1
9	5	4	2,1
10	5	7	1,1
11	8	5	0,8
12	6	9	1,5
13	9	6	1,6
14	8	9	1,8

4.3 INVERZIJA MATRICE $[\bar{Y}]$

Jedan od načina da se izračuna matrica $[\bar{Z}]$, tj. matrica vlastitih i međusobnih impedancija čvora velikog elektroenergetskog sistema je svakako inverzija matrice vlastitih i međusobnih admitancija čvora, matrice $[\bar{Y}]$. Matrica $[\bar{Y}]$ se formira vrlo jednostavno, a često je već formirana za druge analize. Problem je u inverziji ove matrice.

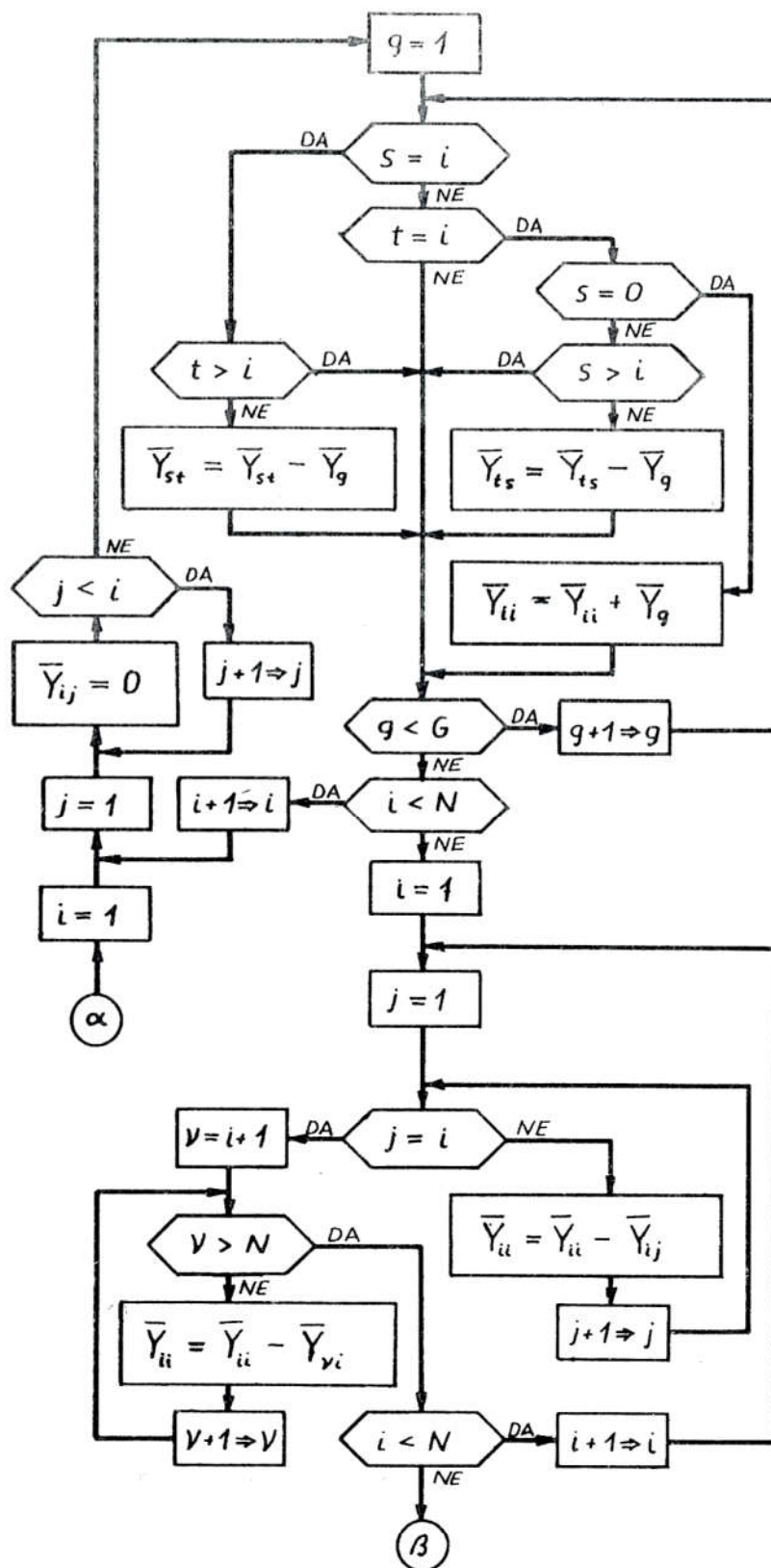
Ispitane su tri metode prihvatljive kod velikog broja čvorova: inverzija po Banachiewiczzevoj shemi, Gauss-Jordanovoj eliminaciji i preko hibridne matrice. Nastojalo se da svaka od metoda zauzme što manje mjesta u memoriji elektroničkog računala i da vrijeme računanja bude što kraće. Ako je matrica $[\bar{Y}]$ sastavni dio formiranja matrice $[\bar{Z}]$ na ovaj način, u ispitivanju se uključilo formiranje matrice $[\bar{Y}]$ i prenumeriranje mreže za ovu matricu.

Na kraju su usporedjene spomenute metode inverzije matrice $[\bar{Y}]$ međusobno i metodom formiranja matrice $[\bar{Z}]$ korak po korak.

4.3.1 Formiranje matrice $[\bar{Y}]$

Na slici 98. nalazi se dijagram toka za formiranje trokuta iz matrice $[\bar{Y}]$. Proces se sastoji iz dva dijela, dvije velike petlje u dijagramu toka. U prvom dijelu, redak po redak, formira se nepotpuna matrica. Najprije se u redak upišu nule, a zatim se redak definitivno popunjava izvandijagonalnim članovima, dok se dijagonalni član ispunjava samo sumom admitancija grana, koje su vezane za referentni čvor. U drugom dijelu formiraju se definitivno dijagonalni članovi. Po ovom dijagramu toka formira se donji trokut iz matrice $[\bar{Y}]$. Formiranje gornjeg trokuta iz matrice dobije se malim zahvatom u dijagramu toka sa sl. 98.

Na slici 99. prikazan je proces prenumeriranja mreže za formiranje matrice $[\bar{Y}]$. Jedini je zahtjev, da čvorovi budu numerirani redom od 1(1)N. Izvornoj numeraciji π_i čvorova pridružuje se nova numeracija σ_i , koja udovoljava gornjem zahtjevu.



Slika 98.- Dijagram toka za formiranje matrice $[\bar{Y}]$

Primjer 4.3 Za mrežu sa sl.97. izvedi prenumeriranje radi formiranja matrice $[\bar{Y}]$.

Rješenje je u tablici 4.4.

Tablica 4.4

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
π_i	0	10	6	3	1	15	20	5	2	4
σ_i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

4.3.2 Inverzija po Banachiewiczzevoj shemi

Svaka kvadratna matrica može se rastaviti u produkt dviju trokutastih matrica. Pri tome su svi dijagonalni elementi lijeve matrice u produktu jednaki jedinici. To je donja trokutasta matrica $[C]$. Desna matrica je gornja trokutasta matrica $[B]$. Ako je zadana kvadratna matrica označena sa $[A]$, tada je:

$$[\bar{A}] = [\bar{C}] [\bar{B}], \quad 4-34$$

odnosno

$$[\bar{A}]^{-1} = [\bar{B}]^{-1} [\bar{C}]^{-1} \quad 4-35$$

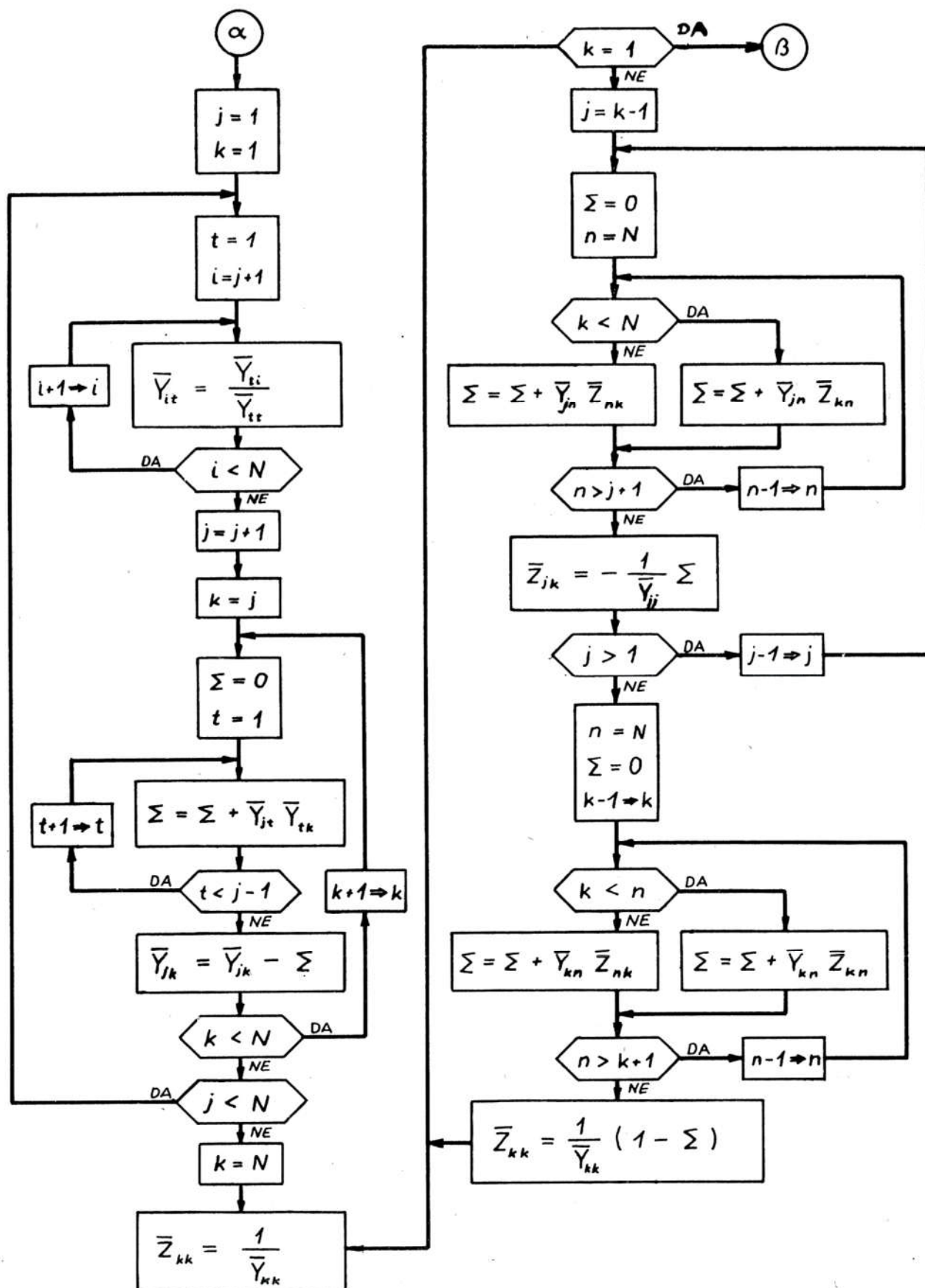
U općem obliku elementi matrice $[B]$ i $[C]$ jesu

$$\bar{b}_{jk} = \bar{a}_{jk} - \sum_{t=1}^{j-1} \bar{c}_{jt} \bar{b}_{tk} \quad 4-36$$

$$\bar{c}_{jk} = \frac{1}{\bar{b}_{kk}} (\bar{a}_{jk} - \sum_{t=1}^{k-1} \bar{c}_{jt} \bar{b}_{tk}) \quad 4-37$$

Ako je matrica $[A]$ simetrična matrica, formula 4-37 prelazi u oblik:

$$\bar{c}_{jk} = \frac{\bar{b}_{jk}}{\bar{b}_{kk}} \quad 4-38$$



Slika 100.- Inverzija po Banchiewiczzevoj shemi

Elementi inverzne simetrične matrice mogu se odmah ispisati.

Takova je i matrica $[\bar{Z}] = [\bar{Y}]^{-1}$, pa je stoga

$$\bar{z}_{kk} = \frac{1 - \bar{b}_{kn}\bar{z}_{nk} - \bar{b}_{k,n-1}\bar{z}_{n-1,k} \dots \bar{b}_{k,k+1}\bar{z}_{k+1,k}}{\bar{b}_{kk}} ; \quad 4-39$$

$$\bar{z}_{jk} = - \frac{\bar{b}_{jn}\bar{z}_{nk} + \bar{b}_{j,n-1}\bar{z}_{n-1,k} \dots \bar{b}_{j,k+1}\bar{z}_{j+1,k}}{\bar{b}_{jj}} , \quad 4-40$$

gdje je:

$$j = k-1, k-2, \dots, 2, 1$$

$$k = n, n-1, n-2, \dots, 2, 1$$

Dijagram toka na slici 100 koristi relacije 4-36, 4-38, 4-39 i 4-40. Može se odmah prepoznati petlja u kojoj se računaju matrice $[\bar{B}]$ i $[\bar{C}]$ i petlja u kojoj se računa matrica $[\bar{Z}]$. Matrice $[\bar{B}]$ i $[\bar{C}]$ su smještene na mjestu matrice $[\bar{Y}]$ s tim da matrici $[\bar{C}]$ nije upisan dijagonalni član.

Cijeli postupak, točno onako kako računa računalo, prikazan je na slijedećem primjeru.

Primjer 4.4 Zadana je matrica

$$[\bar{Y}] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline .8 & -2 & -1 \\ \hline -2 & 5,333 & -3,333 \\ \hline -1 & -3,333 & 4,333 \\ \hline \end{array}$$

Ovu matricu treba invertirati slijedeći dijagram toka na sl.100.

Na mjestu matrice $[\bar{Y}]$ upisujemo matrice $[\bar{B}]$ i $[\bar{C}]$:

$$\underline{j = 1} \quad \underline{k = 1} \quad \underline{t = 1} \quad \underline{i = 2}$$

$$\bar{Y}_{21} = \frac{\bar{Y}_{12}}{\bar{Y}_{11}} = \frac{-2}{8} = -0,25$$

$$\bar{Y}_{31} = \frac{\bar{Y}_{13}}{\bar{Y}_{11}} = \frac{-1}{8} = -0,125$$

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

8	-2	-1
-0,25	5,333	-3,333
-0,125	-3,333	4,333

$$\underline{j = 2} \quad \underline{k = 2} \quad \underline{t = 1}$$

$$\varepsilon = \bar{Y}_{21} \bar{Y}_{22} = (-0,25)(-2) = 0,5$$

$$\bar{Y}_{22} = \bar{Y}_{22} - \varepsilon = 5,333 - 0,5 = 4,833$$

$$\underline{k = 3} \quad \underline{t = 1}$$

$$\varepsilon = \bar{Y}_{21} \bar{Y}_{13} = (-0,25)(-1) = 0,25$$

$$\bar{Y}_{23} = \bar{Y}_{23} - \varepsilon = -3,333 - 0,25 = -3,583$$

$$\bar{Y}_{32} = \frac{\bar{Y}_{23}}{\bar{Y}_{33}} = \frac{-3,583}{4,832} = -0,742$$

$$[\bar{Y}] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 8 & -2 & -1 \\ \hline -0,25 & 4,833 & -3,583 \\ \hline 0,125 & -0,742 & 4,333 \\ \hline \end{array}$$

$$\underline{j = 3} \quad \underline{k = 3} \quad \underline{t = 1,2}$$

$$\varepsilon = \bar{Y}_{31} \bar{Y}_{13} + \bar{Y}_{32} \bar{Y}_{23} = (-0,125) (-1) + (-0,742) (-3,583) = 2,78$$

$$\bar{Y}_{33} = \bar{Y}_{33} - \varepsilon = 4,333 - 2,78 = 1,553$$

$$[\bar{Y}] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 8 & -2 & -1 \\ \hline -0,25 & 4,833 & -3,583 \\ \hline 0,125 & -0,742 & 1,553 \\ \hline \end{array}$$

Sada na mjestu matrice $[\bar{Y}]$ imamo upisanu matricu $[\bar{B}]$ i matricu $[\bar{C}]$ bez dijagonalnih članova. Slijedi računanje matrice $[\bar{Z}]$.

Na mjestu matrice $[\bar{Y}]$ ne možemo upisivati matricu $[\bar{Z}]$. Ovu matricu moramo formirati na drugom mjestu memorije. Pošto je matrica simetrična, dovoljno je rezervirati prostor za gornji trokut iz matrice:

$$\underline{k = 3}$$

$$\bar{Z}_{33} = \frac{1}{\bar{Y}_{33}} = \frac{1}{1,553} = 0,644$$

$$\underline{j = 2} \quad \underline{n = 3}$$

$$\varepsilon = \bar{Y}_{23} \bar{Z}_{33} = (-3,583) 0,644 = -2,307$$

$$\bar{Z}_{23} = - \frac{1}{\bar{Y}_{22}} \varepsilon = - \frac{1}{4,832} (-2,307) = 0,477$$

$$\underline{j = 1} \quad \underline{n = 3, 2}$$

$$\Sigma = \bar{Y}_{13} \bar{Z}_{33} + \bar{Y}_{12} \bar{Z}_{23} = (-1) 0,644 + (-2) 0,477 = -1,598$$

$$\bar{Z}_{13} = - \frac{1}{\bar{Y}_{11}} \Sigma = - \frac{1}{8} (-1,598) = 0,2$$

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

		0,2
		0,477
		0,644

$$\underline{k = 2}$$

$$\underline{n = 3}$$

$$\Sigma = \bar{Y}_{23} \bar{Z}_{23} = (-3,583) 0,477 = -1,709$$

$$\bar{Z}_{22} = \frac{1}{\bar{Y}_{22}} (1 - \Sigma) = \frac{1}{4,833} (2,709) = 0,561$$

$$\underline{j = 1} \quad \underline{n = 3, 2}$$

$$\Sigma = \bar{Y}_{13} \bar{Z}_{23} + \bar{Y}_{12} \bar{Z}_{22} = (-1) 0,477 + (-2) 0,561 = -1,599$$

$$\bar{Z}_{12} \Sigma = - \frac{1}{\bar{Y}_{11}} = \frac{-1}{8} (-1,599) = 0,2$$

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

	0,2	0,2
	0,561	0,477
		0,644

$$\underline{k = 1}$$

$$\underline{n = 3, 2}$$

$$\varepsilon = \bar{Y}_{13} \bar{Z}_{13} + \bar{Y}_{12} \bar{Z}_{12} = (-1) 0,2 + (-2) 0,2 = -0,6$$

$$\bar{Z}_{11} = \frac{1}{\bar{Y}_{11}} (1 - \varepsilon) = \frac{1}{8} 1,6 = 0,2$$

$$[\bar{Z}] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ \hline & 0,561 & 0,477 \\ \hline & & 0,644 \\ \hline \end{array}$$

4.3.3 Inverzija Gauss-Jordanovom eliminacijom

Ova se metoda temelji na primjeni elementarnih transformacija.

Napišimo matričnu jednadžbu

$$[A] [X] = [J] \quad 4-41$$

Ovu jednadžbu pomnožimo sa $[A]^{-1}$ i to s lijeve strane. Dobit ćemo:

$$[J] [X] = [A]^{-1} \quad 4-42$$

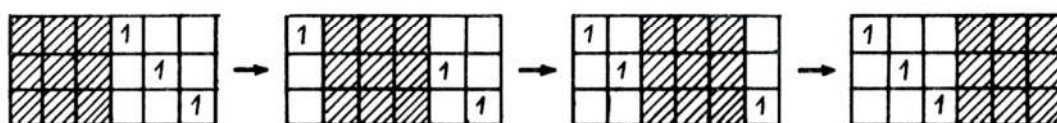
Usporedimo jednadžbe 4-41 i 4-42. Vidimo da primjena iste transformacije, koja $[A]$ prevodi u $[J]$, prevodi $[J]$ u $[A]^{-1}$.

Elementarne transformacije primijenimo na blok matricu $[B]$

$$[B] = \begin{array}{|c|c|} \hline \bar{Y} & J \\ \hline \end{array} \quad 4-43$$

Dobit ćemo:

$$[C] = \begin{array}{|c|c|} \hline J & \bar{Z} \\ \hline \end{array} \quad 4-44$$



Slika 101.- Premještanje stupaca jedinične matrice

Matrica $[\bar{B}]$ i matrica $[\bar{C}]$ sadrže jediničnu matricu, koja se postepeno, stupac po stupac, premješta sa desne strane u bloku na lijevu stranu. Ovo je prikazano na slici 101. za matricu dimenzije 3x3.

Dijagram toka na slici 102. radjen je tako, što koristi primjenu elementarnih transformacija po Gauss-Jordanovoj shemi, ali bez upisivanja matrice $[J]$. Potreban prostor nije više $nx2n$, nego samo nxn .

Primjer 4.5 Zadana je matrica $[\bar{Y}]$, ista kao u prethodnom primjeru. Ovu matricu treba invertirati prema dijagramu toka sa slike 102.

$$[\bar{A}] = \begin{bmatrix} 8 & -2 & -1 \\ -2 & 5,333 & -3,333 \\ -1 & -3,333 & 4,333 \end{bmatrix}$$

$$\underline{v = 1} \quad \underline{i = 2} \quad \underline{j = 2}$$

$$\bar{a}_{22} = \bar{a}_{22} - \frac{\bar{a}_{12} \bar{a}_{21}}{\bar{a}_{11}} = 5,333 - \frac{(-2)(-2)}{8} = 4,833$$

$$\underline{j = 3}$$

$$\bar{a}_{23} = \bar{a}_{23} - \frac{\bar{a}_{13} \bar{a}_{21}}{\bar{a}_{11}} = -3,333 - \frac{(-1)(-2)}{8} = -3,583$$

$$\underline{j = 1}$$

$$\bar{a}_{21} = - \frac{\bar{a}_{21}}{\bar{a}_{11}} = - \frac{-2}{8} = 0,25$$

$$\underline{i = 3} \quad \underline{j = 2}$$

$$\bar{a}_{32} = \bar{a}_{32} - \frac{\bar{a}_{12} \bar{a}_{31}}{\bar{a}_{11}} = -3,333 - \frac{(-2)(-1)}{8} = -3,583$$

$$\underline{j = 3}$$

$$\bar{a}_{33} = \bar{a}_{33} - \frac{\bar{a}_{13} \bar{a}_{31}}{\bar{a}_{11}} = 4,333 - \frac{(-1)(-1)}{8} = 4,208$$

$$\underline{j = 1}$$

$$\bar{a}_{31} = - \frac{\bar{a}_{31}}{\bar{a}_{11}} = - \frac{-1}{8} = 0,125$$

$$\underline{i = 1} \quad \underline{j = 2}$$

$$\bar{a}_{12} = \frac{\bar{a}_{12}}{\bar{a}_{11}} = \frac{-2}{8} = -0,25$$

$$\underline{j = 3}$$

$$\bar{a}_{13} = \frac{\bar{a}_{13}}{\bar{a}_{11}} = \frac{-1}{8} = -0,125$$

$$\underline{j = 1}$$

$$\bar{a}_{11} = \frac{1}{\bar{a}_{11}} = \frac{1}{8} = 0,125$$

$$[\bar{A}] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0,125 & -0,25 & -0,125 \\ \hline 0,25 & 4,833 & -3,583 \\ \hline 0,125 & -3,583 & 4,208 \\ \hline \end{array}$$

$$\underline{v = 2} \quad \underline{i = 1} \quad \underline{j = 1}$$

$$\bar{a}_{11} = \bar{a}_{11} - \frac{\bar{a}_{21} \bar{a}_{12}}{\bar{a}_{22}} = 0,125 - \frac{0,25 (-0,25)}{4,833} = 0,138$$

$$\underline{j = 3}$$

$$\bar{a}_{13} = \bar{a}_{13} - \frac{\bar{a}_{23} \bar{a}_{12}}{\bar{a}_{22}} = -0,125 - \frac{(-3,583) (-0,25)}{4,833} = -0,31$$

$$\underline{j = 2}$$

$$\bar{a}_{12} = - \frac{\bar{a}_{12}}{\bar{a}_{22}} = - \frac{-0,025}{4,833} = 0,052$$

$$\underline{i = 3} \quad \underline{j = 1}$$

$$\bar{a}_{31} = \bar{a}_{31} - \frac{\bar{a}_{21} \bar{a}_{32}}{\bar{a}_{22}} = 0,125 - \frac{0,25 (-3,583)}{4,833} = 0,31$$

$$\underline{j = 3}$$

$$\bar{a}_{33} = \bar{a}_{33} - \frac{\bar{a}_{23} \bar{a}_{32}}{\bar{a}_{22}} = 4,083 - \frac{0,25 (-3,583)}{4,833} = 1,552$$

$$\underline{j = 2}$$

$$\bar{a}_{32} = - \frac{\bar{a}_{32}}{\bar{a}_{22}} = - \frac{-3,583}{4,833} = 0,741$$

$$\underline{i = 2} \quad \underline{j = 1}$$

$$\bar{a}_{21} = \frac{\bar{a}_{21}}{\bar{a}_{22}} = \frac{0,25}{4,833} = 0,052$$

$$\underline{j = 3}$$

$$\bar{a}_{23} = \frac{\bar{a}_{23}}{\bar{a}_{22}} = \frac{-3,583}{4,833} = -0,741$$

$$\underline{j = 2}$$

$$\bar{a}_{22} = \frac{1}{\bar{a}_{22}} = \frac{1}{4,833} = 0,207$$

$$[\bar{A}] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0,138 & 0,052 & -0,31 \\ \hline 0,052 & 0,207 & -0,741 \\ \hline 0,31 & 0,741 & 1,552 \\ \hline \end{array}$$

$$\underline{v = 3} \quad \underline{i = 1} \quad \underline{j = 1}$$

$$\bar{a}_{11} = \bar{a}_{11} - \frac{\bar{a}_{31} \bar{a}_{13}}{\bar{a}_{33}} = 0,138 - \frac{0,31 (-0,31)}{1,552} = 0,2$$

$$\underline{j = 2}$$

$$\bar{a}_{12} = \bar{a}_{12} - \frac{\bar{a}_{32} \bar{a}_{12}}{\bar{a}_{33}} = 0,052 - \frac{0,741 (-0,31)}{1,552} = 0,2$$

$$\underline{j = 3}$$

$$\bar{a}_{13} = - \frac{\bar{a}_{13}}{\bar{a}_{33}} = - \frac{-0,31}{1,552} = 0,2$$

$$\underline{i = 2} \quad \underline{j = 1}$$

$$\bar{a}_{21} = \bar{a}_{21} - \frac{\bar{a}_{31} \bar{a}_{23}}{\bar{a}_{33}} = 0,052 - \frac{0,31 (-0,741)}{1,552} = 0,2$$

$$\underline{j = 2}$$

$$\bar{a}_{22} = \bar{a}_{22} - \frac{\bar{a}_{32} \bar{a}_{23}}{\bar{a}_{33}} = 0,207 - \frac{0,741 (-0,741)}{1,552} = 0,561$$

$$\underline{j = 3}$$

$$\bar{a}_{23} = - \frac{\bar{a}_{23}}{\bar{a}_{23}} = - \frac{-0,741}{1,552} = 0,477$$

$$\underline{i = 3} \quad \underline{j = 1}$$

$$\bar{a}_{31} = \frac{\bar{a}_{31}}{\bar{a}_{33}} = \frac{0,31}{1,552} = 0,2$$

$$\underline{j = 2}$$

$$\bar{a}_{32} = \frac{\bar{a}_{32}}{\bar{a}_{33}} = \frac{0,741}{1,552} = 0,477$$

$$\underline{j = 3}$$

$$\bar{a}_{33} = \frac{1}{\bar{a}_{33}} = \frac{1}{1,552} = 0,644$$

$$[\bar{A}] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ \hline 0,2 & 0,561 & 0,477 \\ \hline 0,2 & 0,477 & 0,644 \\ \hline \end{array}$$

4.3.4 Inverzija preko hibridne matrice

Prilike u elektroenergetskom sistemu definiramo u metodi čvora sistemom jednažbi:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_m \\ \bar{I}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{mm} & \bar{Y}_{mp} \\ \bar{Y}_{pm} & \bar{Y}_{pp} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{E}_m \\ \bar{E}_p \end{bmatrix} \quad 4-45$$

gdje je $m + p = n$.

Relacija 4-45 daje nam matrične jednažbe:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{E}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{Y}_{mp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{E}_p \end{bmatrix} \quad 4-46a$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{pm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{E}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{Y}_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{E}_p \end{bmatrix} \quad b$$

Matrica $\begin{bmatrix} \bar{Y}_{mm} \end{bmatrix}$ je kvadratna matrica, te prema tome ima inverznu matricu. Pomnožimo jednažbu 4-46a s matricom $\begin{bmatrix} \bar{Y}_{mm} \end{bmatrix}^{-1}$. Dobit ćemo:

$$\begin{bmatrix} \bar{Y}_{mm} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{I}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{E}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{Y}_{mm} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{Y}_{mp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{E}_p \end{bmatrix}$$

iz čega slijedi izraz za $\begin{bmatrix} \bar{E}_m \end{bmatrix}$:

$$\begin{bmatrix} \bar{E}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{mm} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{I}_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{Y}_{mm} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{Y}_{mp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{E}_p \end{bmatrix} \quad 4-47a$$

odnosno:

$$-\begin{bmatrix} \bar{E}_m \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} \bar{Y}_{mm} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{I}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{Y}_{mm} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{Y}_{mp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{E}_p \end{bmatrix} \quad b$$

Relaciju 4-47a uvrstimo u 4-46b i sredimo. Dobit ćemo:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{pm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{Y}_{mm} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{I}_m \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} \bar{Y}_{pp} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{Y}_{pm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{Y}_{mm} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{Y}_{mp} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \bar{E}_p \end{bmatrix} \quad 4-48$$

Relacije 4-47b i 4-48 možemo ispisati kao jednu matričnu jednadžbu.

$$\begin{bmatrix} -\bar{E}_m \\ \bar{I}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{H}_{mm} & \bar{H}_{mp} \\ \bar{H}_{pm} & \bar{H}_{pp} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{I}_m \\ \bar{E}_p \end{bmatrix} \quad 4-49$$

Matrica $[\bar{H}]$ je hibridna matrica. Njezini članovi su:

$$\begin{bmatrix} \bar{H}_{mm} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \bar{Y}_{mm} \end{bmatrix}^{-1} \quad 4-50a$$

$$\begin{bmatrix} \bar{H}_{mp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{mm} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{Y}_{mp} \end{bmatrix} \quad b$$

$$\begin{bmatrix} \bar{H}_{pm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{pm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{Y}_{mm} \end{bmatrix}^{-1} \quad c$$

$$\begin{bmatrix} \bar{H}_{pp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{pp} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{Y}_{pm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{Y}_{mm} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{Y}_{mp} \end{bmatrix} \quad d$$

Matrica $[\bar{H}]$ je simetrična matrica. Usporedimo li relaciju 4-45 s relacijom 4-49, vidimo da je došlo do izmjene m varijabli.

Izmjenu varijabli možemo provesti samo za jedan čvor. Neka je čvor v. Tada relacije 4-50 prelaze u:

$$\bar{h}_{vv} = \frac{1}{\bar{Y}_{vv}} \quad 4-51a$$

$$\begin{bmatrix} \bar{H}_{vp} \end{bmatrix} = \frac{1}{\bar{Y}_{vv}} \begin{bmatrix} \bar{Y}_{vp} \end{bmatrix} \quad b$$

$$\begin{bmatrix} \bar{H}_{pv} \end{bmatrix} = \frac{1}{\bar{Y}_{vv}} \begin{bmatrix} \bar{Y}_{pv} \end{bmatrix} \quad c$$

$$[\bar{H}_{pp}] = [\bar{Y}_{pp}] - \frac{1}{\bar{Y}_{vv}} [\bar{Y}_{pv}] [\bar{Y}_{vp}] \quad 4-51d$$

Izmjenit ćemo sve varijable. Tada v poprima vrijednosti od 1(1)n. Rezultat je matrica koja pomnožena s (-1) daje matricu $[\bar{Z}]$.

Na slici 103. nacrtan je dijagram toka za inverziju matrice $[\bar{Y}]$ ovom metodom. Potreban prostor u svim koracima za proračun i smještaj matrice je jedan. te isti prostor i to $n(n+1)/2$.

Primjer 4.6 Zadana je matrica $[\bar{Y}]$, ista kao u prvom primjeru. Ovu matricu treba invertirati prema dijagramu toka sa slike 103.

$$[\bar{A}] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 8 & -2 & -1 \\ \hline & 5,333 & -3,333 \\ \hline & & 4,333 \\ \hline \end{array}$$

$$\underline{v = 1} \quad \underline{i = 2} \quad \underline{j = 2}$$

$$\bar{B} = \bar{a}_{12} = -2 \quad \bar{C} = \bar{a}_{12} = -2$$

$$\bar{a}_{22} = \bar{a}_{22} - \frac{\bar{B} \bar{C}}{\bar{a}_{11}} = 5,333 - \frac{(-2)(-2)}{8} = 4,833$$

$$\underline{j = 3}$$

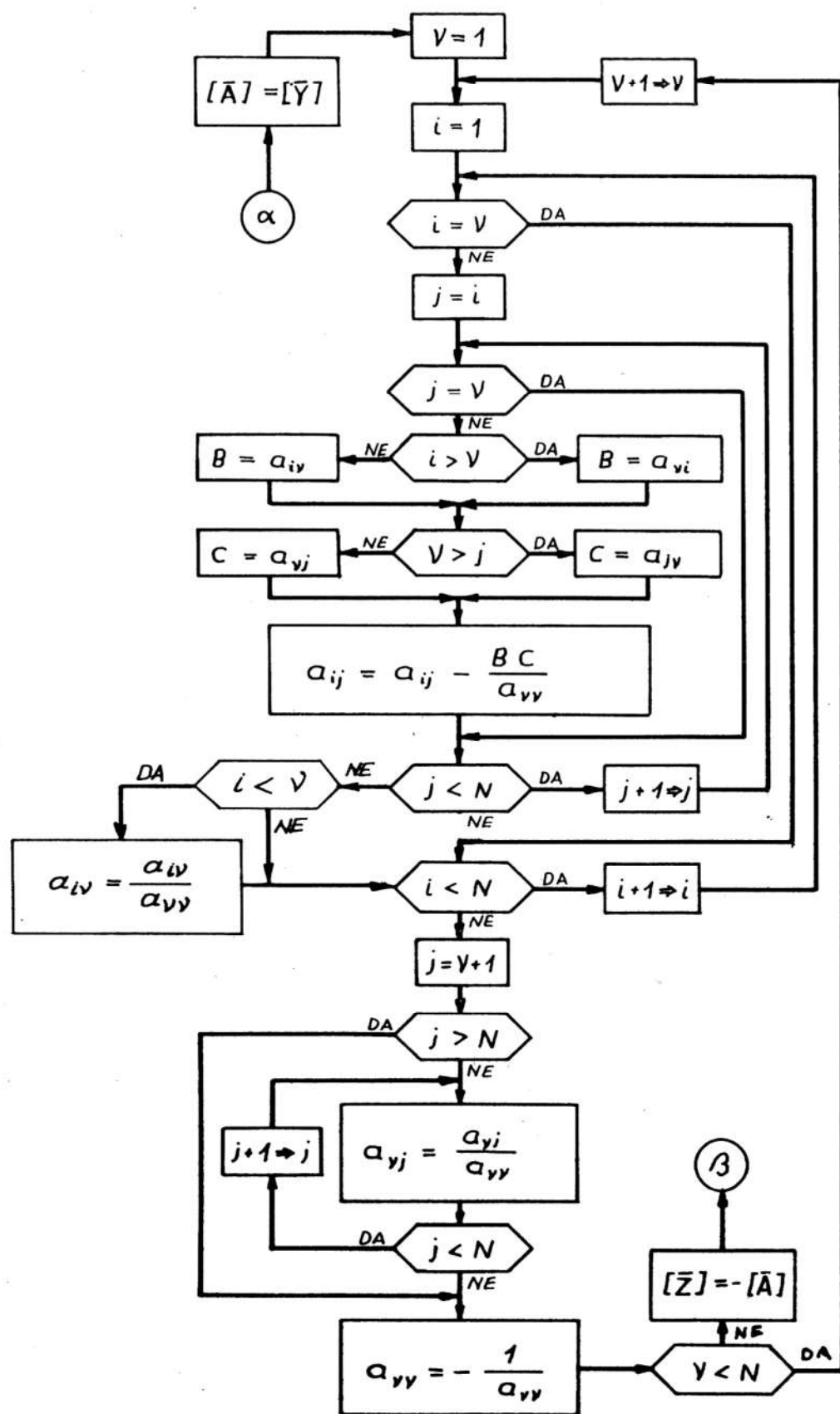
$$\bar{B} = \bar{a}_{12} = -2 \quad \bar{C} = \bar{a}_{13} = -1$$

$$\bar{a}_{23} = \bar{a}_{23} - \frac{\bar{B} \bar{C}}{\bar{a}_{11}} = -3,333 - \frac{(-2)(-1)}{8} = -3,583$$

$$\underline{i = 3} \quad \underline{j = 3}$$

$$\bar{B} = \bar{a}_{13} = -1 \quad \bar{C} = \bar{a}_{13} = -1$$

$$\bar{a}_{33} = \bar{a}_{33} - \frac{\bar{B} \bar{C}}{\bar{a}_{11}} = 4,333 - \frac{(-1)(-1)}{8} = 4,208$$



Slika 103.- Inverzija preko hibridne matrice

$$\underline{j = 2}$$

$$\bar{a}_{12} = \frac{\bar{a}_{12}}{\bar{a}_{11}} = \frac{-2}{8} = -0,25$$

$$\underline{j = 3}$$

$$\bar{a}_{13} = \frac{\bar{a}_{13}}{\bar{a}_{11}} = -\frac{1}{8} = -0,125$$

$$\bar{a}_{11} = \frac{1}{\bar{a}_{11}} = -\frac{1}{8} = -0,125$$

$$[\bar{A}] =$$

-0,125	-0,25	-0,125
	4,833	-3,583
		4,208

$$\underline{v = 2} \quad \underline{i = 1} \quad \underline{j = 1}$$

$$\bar{B} = \bar{a}_{12} = -0,25$$

$$\bar{C} = \bar{a}_{12} = -0,25$$

$$\bar{a}_{11} = \bar{a}_{11} - \frac{\bar{B} \bar{C}}{\bar{a}_{22}} = -0,125 - \frac{(-0,25)(-0,25)}{4,833} = -0,138$$

$$\underline{j = 3}$$

$$\bar{B} = \bar{a}_{12} = -0,25$$

$$\bar{C} = \bar{a}_{23} = -3,583$$

$$\bar{a}_{13} = \bar{a}_{13} - \frac{\bar{B} \bar{C}}{\bar{a}_{22}} = -0,125 - \frac{(-0,25)(-3,583)}{4,833} = -0,31$$

$$\underline{j = 2}$$

$$\bar{a}_{12} = \frac{\bar{a}_{12}}{\bar{a}_{22}} = \frac{-0,25}{4,833} = -0,052$$

$$\underline{i = 3} \quad \underline{j = 3}$$

$$\bar{B} = \bar{a}_{23} = -3,583$$

$$\bar{C} = \bar{a}_{23} = -3,583$$

$$\bar{a}_{33} = \bar{a}_{33} - \frac{\bar{B} \bar{C}}{\bar{a}_{22}} = 4,208 - \frac{(-3,583)(-3,583)}{4,833} = 1,552$$

$$\underline{j = 3}$$

$$\bar{a}_{23} = \frac{\bar{a}_{23}}{\bar{a}_{22}} = \frac{-3,583}{4,833} = -0,742$$

$$\bar{a}_{22} = -\frac{1}{\bar{a}_{22}} = -\frac{1}{4,833} = -0,207$$

$$[\bar{A}] =$$

-0,138	-0,052	-0,31
	-0,207	-0,742
		1,552

$$\underline{v = 3} \quad \underline{i = 1} \quad \underline{j = 1}$$

$$\bar{B} = \bar{a}_{13} = -0,31$$

$$\bar{C} = \bar{a}_{13} = -0,31$$

$$\bar{a}_{11} = \bar{a}_{11} - \frac{\bar{B} \bar{C}}{\bar{a}_{33}} = -0,138 - \frac{(-0,31)(-0,31)}{1,552} = -0,2$$

$$\underline{j = 2}$$

$$\bar{B} = \bar{a}_{13} = -0,31$$

$$\bar{C} = \bar{a}_{23} = -0,742$$

$$\bar{a}_{12} = \bar{a}_{12} - \frac{\bar{B} \bar{C}}{\bar{a}_{33}} = -0,052 - \frac{(-0,31)(-0,742)}{1,552} = -0,2$$

$$\underline{j = 3}$$

$$\bar{a}_{13} = \frac{\bar{a}_{13}}{\bar{a}_{33}} = - \frac{0,31}{1,552} = -0,2$$

$$\underline{i = 2} \quad \underline{j = 2}$$

$$\bar{B} = \bar{a}_{23} = -0,742 \quad \bar{C} = \bar{a}_{23} = -0,742$$

$$\bar{a}_{22} = \bar{a}_{22} - \frac{\bar{B} \bar{C}}{\bar{a}_{33}} = -0,207 - \frac{(-0,742)(-0,742)}{1,552} = -0,562$$

$$\underline{j = 3}$$

$$\bar{a}_{23} = \frac{\bar{a}_{23}}{\bar{a}_{33}} = \frac{-0,742}{1,552} = -0,478$$

$$\bar{a}_{33} = - \frac{1}{\bar{a}_{33}} = - \frac{1}{1,552} = -0,644$$

$$[\bar{A}] =$$

-0,2	-0,2	-0,2
	-0,562	-0,478
		-0,644

$$[\bar{Z}]$$

0,2	0,2	0,2
	0,562	0,478
		0,644

4.4 ZAKLJUČAK

Na kraju je potrebno usporediti promatrane metode za formiranje matrice $[\bar{Z}]$ po zauzeću memorije i po vremenu računanja elektoničkog računala.

Metoda korak po korak i metoda inverzije matrice $[\bar{Y}]$ preko hibridne zauzimaju za simetričnu matricu $N(N+1)/2$ riječi, a za nesimetričnu N^2 riječi.

Metoda inverzije matrice $[\bar{Y}]$ Gauss-Jordanovom eliminacijom traži N^2 riječi u memoriji, bez obzira da li se radi o simetričnoj ili nesimetričnoj matrici.

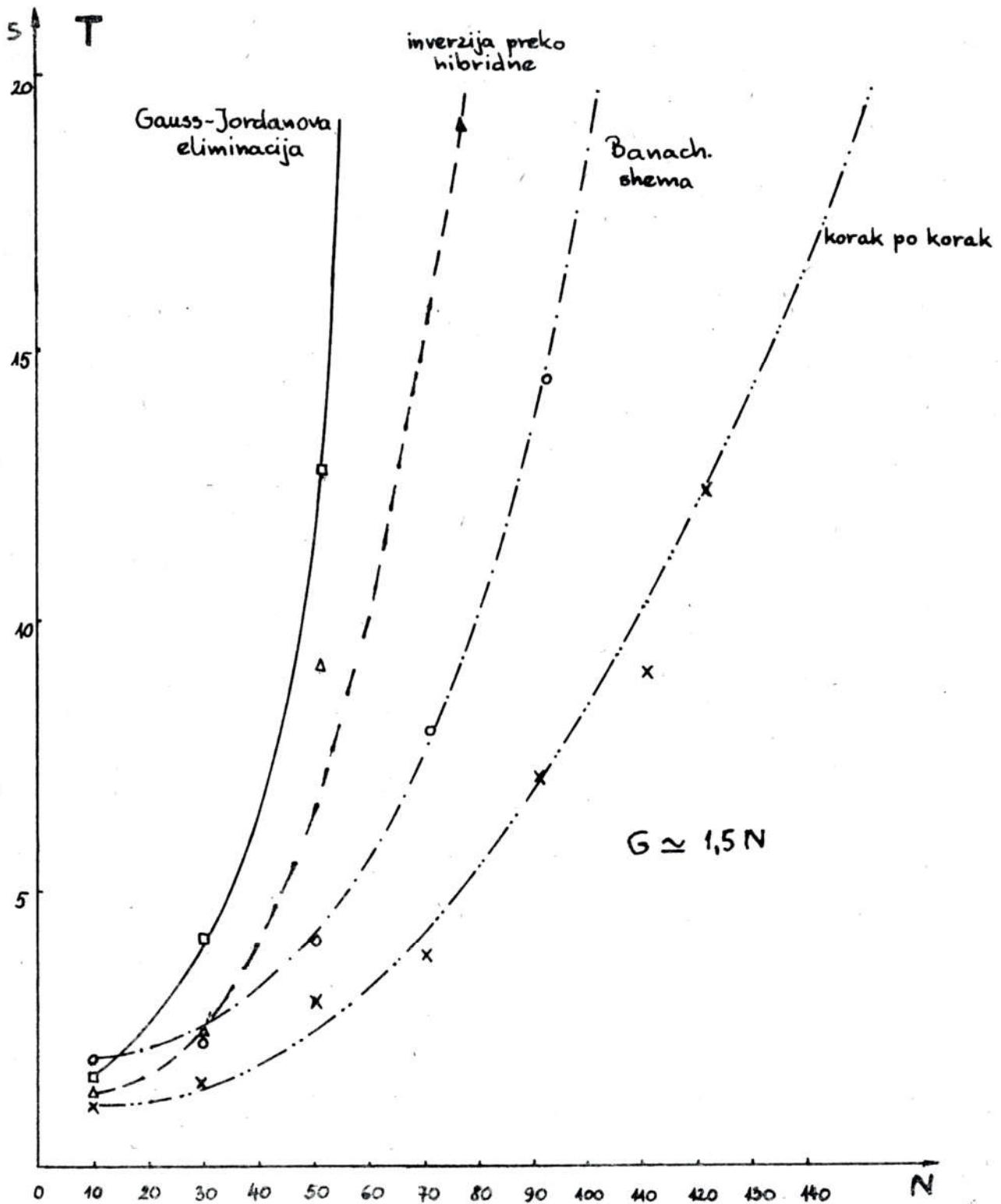
Metoda inverzije matrice $[\bar{Y}]$ po Banachiewiczzevoj shemi zahtijeva za simetričnu matricu prema priloženom dijagramu toka $N(3N+1)/2$ riječi. U ovoj metodi se može postići daljnja ušteda na prostoru, ako se trokuti iz matrica $[\bar{B}]$ i $[\bar{C}]$ formiraju posebno, a zatim se na mjestu matrice $[\bar{C}]$ formira matrica $[\bar{Z}]$. U tom slučaju je potreban prostor od $N(N+1)$ riječi, što je praktički jednako kao i za metodu koja koristi Gauss-Jordanovu eliminaciju.

Prema tome, za formiranje simetrične matrice $[\bar{Z}]$ dolazi u obzir metoda korak po korak i metoda inverzije matrice $[\bar{Y}]$ preko hibridne.

Vrijeme računanja ovisi o više faktora i teško ga je obuhvatiti matematičkom formulom.

U metodi korak po korak najgori je slučaj, kada najprije uključimo zavisne grane, a zatim nezavisne. Zato ćemo nastojati tako numerirati mrežu i tako formirati listu grana, da uključivanje nezavisnih grana uslijedi što ranije, jer će tada vrijeme računanja biti najkraće.

Metode koje koriste inverziju matrice $[\bar{Y}]$ za formiranje matrice $[\bar{Z}]$ moraju najprije izračunati matricu $[\bar{Y}]$. Ovom vremenu treba dodati vrijeme za inverziju. Što se može zaključiti iz pokazanih primjera, za formiranje simetrične matrice $[\bar{Z}]$ najbrža je metoda korak po korak. Na slici 104. prikazani su rezultati istraživanja na mrežama kod kojih je $G \approx 1,5$ N.



Sl. 104. - Vrijeme računanja matrice $[\bar{Z}]$

5. RASPODJELA TROSTRUKE NULTE KOMPONENTE STRUJE KROZ ZEMlju, DOZEMNU UŽAD I UZEMLJENJA

5.1 UVOD

Primarna uloga tzv. dozemnog, zemljovodnog ili gromobranskog užeta kao zaštitnog užeta, koje na sebe prima atmosferska pražnjenja, danas se dopunjuje novim zahtjevima. Jedan od zahtjeva je svakako pozitivna uloga dozemnog užeta u vladanju tokovima struje nultog sistema komponenata, čiji je utjecaj velik na uredno vođenje pogona, na investicije u uzemljenja objekata, na sistem mreža izvan elektroenergetskog sistema, itd.

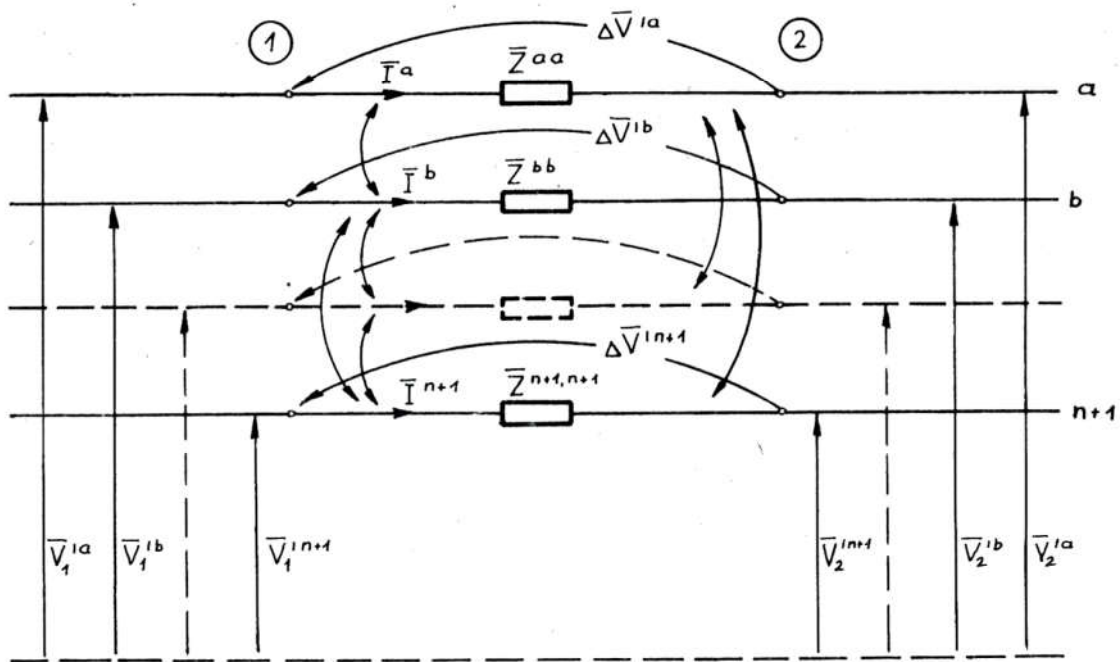
Analitički pristup problemu uključuje u prvom redu proračun povratnog puta trostruke nulte komponente struje, što je interesantno sa stanovišta strujnog opterećenja zaštitnog užeta, doprinos uzemljenju dalekovodnih stupova, uzemljenju postrojenja i naponu koraka i dodira.

Trostruka nulta komponenta struje, čija se raspodjela ovdje razrađuje kao slijedeći korak analize, dobivena je računom kratkog spoja u kojemu se otpori uzemljenja stupova i stanica ne uzimaju u obzir. Ovo nema većeg utjecaja na iznos trostruke nulte komponente struje, ali zato bitno utječe na njezinu raspodjelu na zemlju i dozemnu užad.

Osnova proračuna su Carsonove formule, s pomoću kojih računamo matricu jediničnih impedancija vodiča. U ovu matricu kao povratni vodič uključena je zemlja i neposredno uzemljena dozemna užad. Zato je interpretacija ove matrice, odnosno Carsonovih formula od izuzetnog značenja za prijelaz natrag na originalni sistem u kojemu se zemlja, dozemna užad i uzemljenja pojavljuju u svojim pravim fizikalnim odnosima.

5.2 ZEMLJA KAO POVRATNI VODIČ

Zamislimo vod od $n+1$ vodiča (slika 105.). Promatramo dio voda između 1 i 2 i na tom dijelu zanemarimo odvodjenje struje preko poprečnih grana. Naponi $\bar{V}^a$, $\bar{V}^b$, ... $\bar{V}^{n+1}$ su naponi prema nekoj referentnoj točki sistema.



Slika 105. - Vod od $n+1$ vodiča

Za vod sa slike 105 možemo postaviti jednačbe

$$\bar{V}_1^a - \bar{V}_2^a = \Delta \bar{V}_{1-2}^a = \bar{Z}_{1-2}^{aa} \bar{I}_{1-2}^a + \bar{Z}_{1-2}^{ab} \bar{I}_{1-2}^b \dots \bar{Z}_{1-2}^{a,n+1} \bar{I}_{1-2}^{n+1} \quad 5-1a$$

$$\bar{V}_1^b - \bar{V}_2^b = \Delta \bar{V}_{1-2}^b = \bar{Z}_{1-2}^{ba} \bar{I}_{1-2}^a + \bar{Z}_{1-2}^{bb} \bar{I}_{1-2}^b \dots \bar{Z}_{1-2}^{b,n+1} \bar{I}_{1-2}^{n+1} \quad b$$

.....

$$\bar{V}_1^{n+1} - \bar{V}_2^{n+1} = \Delta \bar{V}_{1-2}^{n+1} = \bar{Z}_{1-2}^{n+1,a} \bar{I}_{1-2}^a + \dots + \bar{Z}_{1-2}^{n+1,n+1} \bar{I}_{1-2}^{n+1} \quad (n+1)$$

odnosno

$$\left[\Delta \bar{V}_{1-2}^{ab..(n+1)} \right] = \left[\bar{Z}_{1-2}^{ab..(n+1)} \right] \left[\bar{I}_{1-2}^{ab..(n+1)} \right] \quad 5-4$$

Sada odbijemo relaciju 5-1(n+1) redom od 5-1a, 5-1b .. 5-1n i uvažimo da je

$$\sum_{i=a}^{n+1} \bar{I}_{1-2}^i = 0 \quad 5-3$$

Slijedi da je

$$\begin{aligned} \Delta \bar{V}_{1-2}^a - \Delta \bar{V}_{1-2}^{n+1} &= (\bar{Z}_{1-2}^{aa} - \bar{Z}_{1-2}^{n+1,a} - \bar{Z}_{1-2}^{a,n+1} + \bar{Z}_{1-2}^{n+1,n+1}) \bar{I}_{1-2}^a + \\ &+ (\bar{Z}_{1-2}^{ab} - \bar{Z}_{1-2}^{n+1,b} - \bar{Z}_{1-2}^{a,n+1} + \bar{Z}_{1-2}^{n+1,n+1}) \bar{I}_{1-2}^b + \\ &+ \dots + \\ &+ (\bar{Z}_{1-2}^{an} - \bar{Z}_{1-2}^{n+1,n} - \bar{Z}_{1-2}^{a,n+1} + \bar{Z}_{1-2}^{n+1,n+1}) \bar{I}_{1-2}^n \end{aligned} \quad 5-4a$$

$$\begin{aligned} \Delta \bar{V}_{1-2}^b - \Delta \bar{V}_{1-2}^{n+1} &= (\bar{Z}_{1-2}^{ba} - \bar{Z}_{1-2}^{n+1,a} - \bar{Z}_{1-2}^{b,n+1} + \bar{Z}_{1-2}^{n+1,n+1}) \bar{I}_{1-2}^a + \\ &+ (\bar{Z}_{1-2}^{bb} - \bar{Z}_{1-2}^{n+1,b} - \bar{Z}_{1-2}^{b,n+1} + \bar{Z}_{1-2}^{n+1,n+1}) \bar{I}_{1-2}^b + \\ &+ \dots + \\ &+ (\bar{Z}_{1-2}^{bn} - \bar{Z}_{1-2}^{n+1,n} - \bar{Z}_{1-2}^{n,n+1} + \bar{Z}_{1-2}^{n+1,n+1}) \bar{I}_{1-2}^n \end{aligned} \quad b$$

.....

$$\begin{aligned} \Delta \bar{V}_{1-2}^n - \Delta \bar{V}_{1-2}^{n+1} &= (\bar{Z}_{1-2}^{na} - \bar{Z}_{1-2}^{n+1,a} - \bar{Z}_{1-2}^{n,n+1} + \bar{Z}_{1-2}^{n+1,n+1}) \bar{I}_{1-2}^a + \\ &+ (\bar{Z}_{1-2}^{nb} - \bar{Z}_{1-2}^{n+1,b} - \bar{Z}_{1-2}^{n,n+1} + \bar{Z}_{1-2}^{n+1,n+1}) \bar{I}_{1-2}^b + \\ &+ \dots + \end{aligned}$$

$$+ (\bar{z}_{1-2}^{nn} - \bar{z}_{1-2}^{n+1,n} - \bar{z}_{1-2}^{n,n+1} + \bar{z}_{1-2}^{n+1,n+1}) \bar{I}_{1-2}^n \quad 5-4n$$

odnosno:

$$[\Delta \bar{V}_{1-2}^{ab..n}] = [\Delta \bar{V}_{1-2}^{ab..n}] - [\Delta \bar{V}_{1-2}^{n+1}] = [\bar{z}_{1-2}^{ab..n}] [\bar{I}_{1-2}^{ab..n}] \quad 5-5$$

Dobili smo sistem od n jednađžbi. U matrici koeficijenata ovih jednađžbi eliminiran je redak i stupac povratnog vodiča.

Za lijevu stranu relacije 5-4 vrijedi

$$\begin{aligned} \Delta \bar{V}_{1-2}^a - \Delta \bar{V}_{1-2}^{n+1} &= (\bar{V}_1^a - \bar{V}_1^{n+1}) - (\bar{V}_2^a - \bar{V}_2^{n+1}) = \\ &= \Delta \bar{V}_{1-2}^a = \bar{V}_1^a - \bar{V}_2^a \end{aligned} \quad 5-6a$$

$$\begin{aligned} \Delta \bar{V}_{1-2}^b - \Delta \bar{V}_{1-2}^{n+1} &= (\bar{V}_1^b - \bar{V}_1^{n+1}) - (\bar{V}_2^b - \bar{V}_2^{n+1}) = \\ &= \Delta \bar{V}_{1-2}^b = \bar{V}_1^b - \bar{V}_2^b \end{aligned} \quad b$$

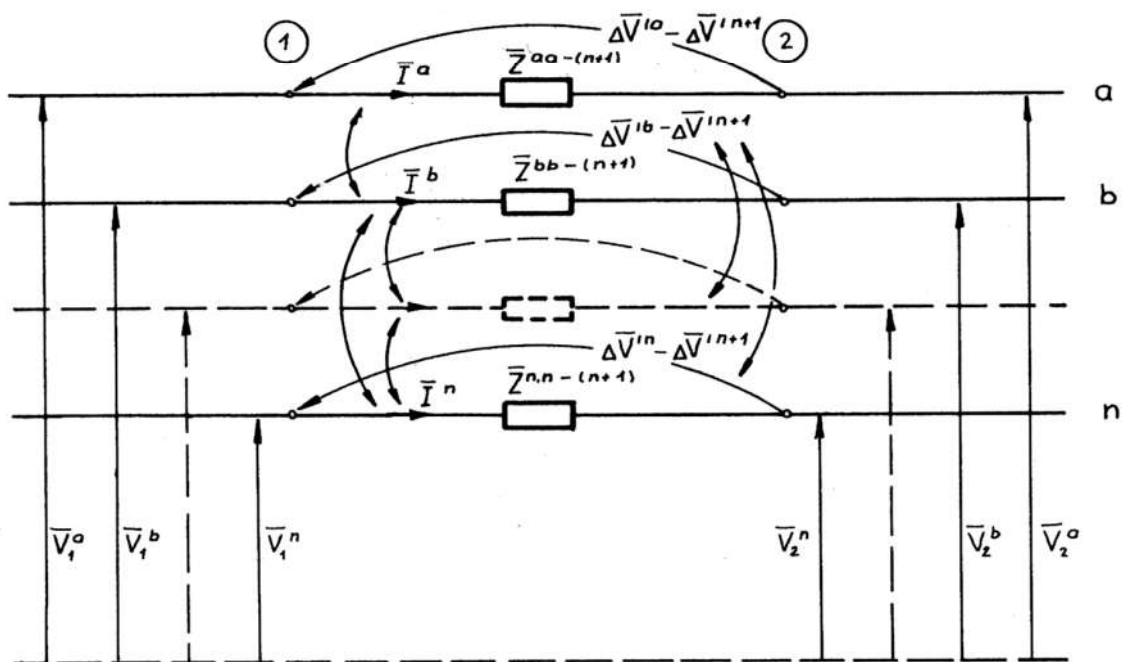
.....

$$\begin{aligned} \Delta \bar{V}_{1-2}^n - \Delta \bar{V}_{1-2}^{n+1} &= (\bar{V}_1^n - \bar{V}_1^{n+1}) - (\bar{V}_2^n - \bar{V}_2^{n+1}) = \\ &= \Delta \bar{V}_{1-2}^n = \bar{V}_1^n - \bar{V}_2^n \end{aligned} \quad c$$

odnosno takodjer:

$$[\Delta \bar{V}_{1-2}^{ab..n}] = [\bar{V}_1^{ab..n}] - [\bar{V}_2^{ab..n}] \quad 5-7$$

Relacije 5-4 i 5-6 omogućuju crtanje sistema od n vodiča analognog sistemu slike 105, što je i učinjeno na sl.106.



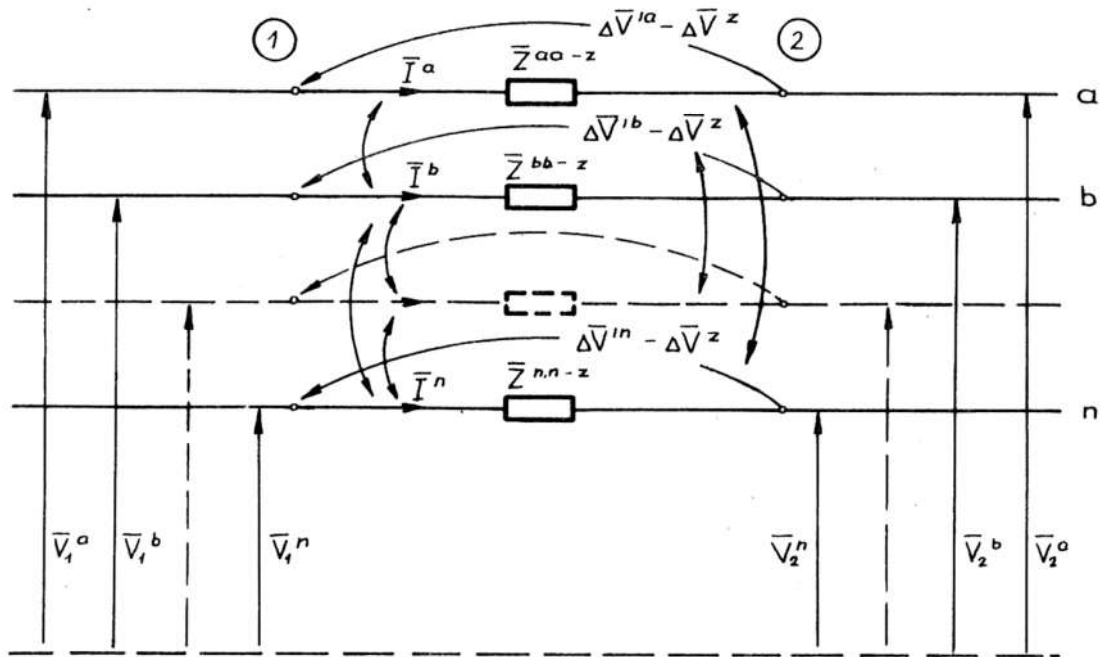
Slika 106.- Sistem sa sl.105 nakon eliminiranja povratnog vodiča

Članovi matrice koeficijenata iz relacije 5-5, kako se to vidi na desnoj strani jednačbi 5-4a ... 5-4n, zadrže vlastitu impedanciju povratnog vodiča i međusobne impedancije između povratnog i ostalih vodiča. Vrijedi da je

$$\bar{z}_{1-2}^{ii-(n+1)} = \bar{z}_{1-2}^{ii} - \bar{z}_{1-2}^{n+1,i} - \bar{z}_{1-2}^{i,n+1} + \bar{z}_{1-2}^{n+1,n+1} \quad 5-8a$$

$$\bar{z}_{1-2}^{ij-(n+1)} = \bar{z}_{1-2}^{ij} - \bar{z}_{1-2}^{n+1,j} - \bar{z}_{1-2}^{i,n+1} + \bar{z}_{1-2}^{n+1,n+1} \quad b$$

Ako je zemlja povratni vodič ne možemo jednostavno odrediti impedancije u 5-8ab, pa koristimo Carsonove formule. Vlastite i međusobne impedancije vodiča, u kojima je sadržana zemlja kao povratni vodič, označit ćemo sa $\bar{z}^{ii-z}$ i $\bar{z}^{ij-z}$. Slika 106 prelazi u sl.107.



Slika 107. - Model voda nakon eliminirane zemlje kao povratnog vodiča

Neka je model sa sl.107. infinitezimalni dio voda. Za ovaj dio voda postavljamo jednadžbe

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \bar{V}^a \\ \bar{V}^b \\ \dots \\ \bar{V}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{jj}^{aa-z} & \bar{Z}_{jj}^{ab-z} & \dots & \bar{Z}_{jj}^{an-z} \\ \bar{Z}_{jj}^{ba-z} & \bar{Z}_{jj}^{bb-z} & \dots & \bar{Z}_{jj}^{bn-z} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{Z}_{jj}^{na-z} & \bar{Z}_{jj}^{nb-z} & \dots & \bar{Z}_{jj}^{nn-z} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{I}^a \\ \bar{I}^b \\ \dots \\ \bar{I}^n \end{bmatrix} \quad 5-9$$

odnosno

$$-\frac{d}{dx} [\bar{V}^{ab\dots n}] = [\bar{Z}_{jj}^{ab\dots n-z}] [\bar{I}^{ab\dots n}] \quad 5-10$$

Elementi matrice $[\bar{Z}_{jj}^{ab\dots n-z}]$ su;

$$\bar{z}_j^{ii-z} = R_j + 0,05 + j(0,1445 \log \frac{658}{r} \sqrt{\frac{\rho}{f}} + 0,0157 |\Omega/\text{km}| \quad 5-11a$$

$$\bar{z}_j^{ij-z} = 0,05 + j 0,1445 \log \frac{658}{D_{ij}} \sqrt{\frac{\rho}{f}} |\Omega/\text{km}| \quad b$$

za μ_r vodiča jednako jedinici.

Promatrajmo vod ili dionicu voda kraću od 200 km. Uzdužnu matricu vlastitih i međusobnih impedancija vodiča π -scheme dobijemo množenjem matrice $[\bar{z}^{ab..n}]$ s dužinom voda odnosno dionice.

Jednadžbe modela sa sl.107 za dužinu od 1 do 2 glase

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_1^a - \bar{v}_2^a \\ \bar{v}_1^b - \bar{v}_2^b \\ \dots \\ \bar{v}_1^n - \bar{v}_2^n \end{bmatrix} = \ell_{1-2} \begin{bmatrix} \bar{z}_j^{aa-z} & \bar{z}_j^{ab-z} & \dots & \bar{z}_j^{an-z} \\ \bar{z}_j^{ba-z} & \bar{z}_j^{bb-z} & \dots & \bar{z}_j^{bn-z} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{z}_j^{na-z} & \bar{z}_j^{nb-z} & \dots & \bar{z}_j^{nn-z} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{i}_{1-2}^a \\ \bar{i}_{1-2}^b \\ \dots \\ \bar{i}_{1-2}^n \end{bmatrix} \quad 5-12$$

odnosno

$$[\Delta \bar{v}_{1-2}^{ab..n}] = \ell_{1-2} [\bar{z}_j^{ab..n-z}] [\bar{i}_{1-2}^{ab..n}] \quad 5-13$$

5.2.1 Vod bez dozemnog užeta

Za vod bez dozemnog užeta relacija glasi:

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{V}_{1-2}^a \\ \Delta \bar{V}_{1-2}^b \\ \Delta \bar{V}_{1-2}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}_1^a - \bar{V}_2^a \\ \bar{V}_1^b - \bar{V}_2^b \\ \bar{V}_1^c - \bar{V}_2^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{z}_{1-2}^{aa-z} & \bar{z}_{1-2}^{ab-z} & \bar{z}_{1-2}^{ac-z} \\ \bar{z}_{1-2}^{ba-z} & \bar{z}_{1-2}^{bb-z} & \bar{z}_{1-2}^{bc-z} \\ \bar{z}_{1-2}^{ca-z} & \bar{z}_{1-2}^{cb-z} & \bar{z}_{1-2}^{cc-z} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{I}_{1-2}^a \\ \bar{I}_{1-2}^b \\ \bar{I}_{1-2}^c \end{bmatrix} \quad 5-14$$

ili

$$[\Delta \bar{V}_{1-2}^{abc}] = [\bar{V}_1^{abc}] - [\bar{V}_2^{abc}] = [\bar{z}_{1-2}^{abc-z}] [\bar{I}_{1-2}^{abc}] \quad 5-15$$

prema do sada izloženom u relaciji 5-14 znači:

$$\begin{aligned} \bar{V}_1^a &= \text{napon faze a prema zemlji u 1} \\ \bar{V}_1^b &= \text{napon faze b prema zemlji u 1} \\ \bar{V}_1^c &= \text{napon faze c prema zemlji u 1} \\ \bar{V}_2^a &= \text{napon faze a prema zemlji u 2} \\ \bar{V}_2^b &= \text{napon faze b prema zemlji u 2} \\ \bar{V}_2^c &= \text{napon faze c prema zemlji u 2} \end{aligned}$$

Slijedi dalje :

$$\Delta \bar{V}_{1-2}^a = \Delta \bar{V}_{1-2}^{\bar{a}} - \Delta \bar{V}_{1-2}^z \quad 5-16a$$

$$\Delta \bar{V}_{1-2}^b = \Delta \bar{V}_{1-2}^{\bar{b}} - \Delta \bar{V}_{1-2}^z \quad b$$

$$\Delta \bar{V}_{1-2}^c = \Delta \bar{V}_{1-2}^{\bar{c}} - \Delta \bar{V}_{1-2}^z \quad c$$

ili

$$[\Delta \bar{V}_{1-2}^{abc}] = [\Delta \bar{V}_{1-2}^{abc}] - [\Delta \bar{V}_{1-2}^z] \quad 5-17$$

Stvarna razlika napona faza između 1 i 2 jest vektor $[\Delta \bar{V}_{1-2}^{abc}]$
U normalnom pogonu kroz zemlju ne teče struja, pa je

$$\Delta \bar{V}_{1-2}^z = 0 \quad 5-18$$

$$[\Delta \bar{V}_{1-2}^{abc}] = [\Delta \bar{V}_{1-2}^{abc}] \quad 5-19$$

Ako kroz zemlju teče struja, vrijede relacije 5-17.

U Carsonovim formulama udaljenost vodiča abc od vodiča koji nadomješta zemlju iznosi D_e , gdje je:

$$D_e^2 = 658 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad 5-20$$

Ova udaljenost ne ovisi o geometrijskim odnosima među vodičima i zemljom, te je stoga jednaka za sve tri faze. Također u Carsonovim formulama izlazi da je nadomjesni reducirani polumjer vodiča koji nadomješta zemlju jednak 1 m.

Ako zemlju nadomjestimo reduciranim polumjerom 1 m na udaljenosti D_e od faznih vodiča možemo napisati matricu jediničnih vlastitih i međusobnih induktiviteta;

$$[L_j^{abcz}] = 2 \cdot 10^{-4} \begin{bmatrix} \ln \frac{1}{r'} & \ln \frac{1}{D_{ab}} & \ln \frac{1}{D_{ac}} & \ln \frac{1}{D_e} \\ \ln \frac{1}{D_{ba}} & \ln \frac{1}{r'} & \ln \frac{1}{D_{bc}} & \ln \frac{1}{D_e} \\ \ln \frac{1}{D_{ca}} & \ln \frac{1}{D_{cb}} & \ln \frac{1}{r'} & \ln \frac{1}{D_e} \\ \ln \frac{1}{D_e} & \ln \frac{1}{D_e} & \ln \frac{1}{D_e} & \ln \frac{1}{1} \end{bmatrix} |H/km| \quad 5-21$$

gdje je $\ln \frac{1}{1} = 0$.

Carsonovi izrazi daju takodjer matricu vlastitih i medjusobnih djelatnih otpora. Ova matrica je dijagonalna matrica:

$$[R_j^{abcz}] = \begin{bmatrix} R_j & & & \\ & R_j & & \\ & & R_j & \\ & & & \pi^2 f \end{bmatrix} |\Omega/\text{km}| \quad 5-22$$

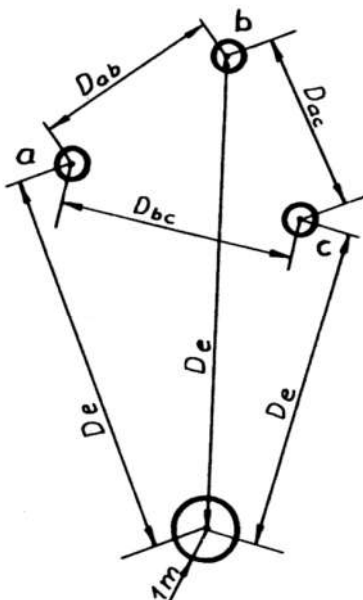
Možemo napisati matricu vlastitih i medjusobnih jediničnih impedancija

$$[\bar{Z}_j^{abcz}] = [R_j^{abcz}] + j\omega [L_j^{abcz}] \quad |\Omega/\text{km}| \quad 5-23a$$

Radi boljeg pregleda ispišimo ovu matricu:

$$[\bar{Z}_j^{abcz}] = \begin{bmatrix} R_j & 0 & 0 & 0 \\ \omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1}{r'} & \omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1}{D_{ab}} & \omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1}{D_{ac}} & \omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1}{D_e} \\ 0 & R_j & 0 & 0 \\ \omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1}{D_{ba}} & \omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1}{r'} & \omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1}{D_{bc}} & \omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1}{D_e} \\ 0 & 0 & R_j & 0 \\ \omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1}{D_{ca}} & \omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1}{D_{cb}} & j\omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1}{r'} & \omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1}{D_e} \\ 0 & 0 & 0 & 0,05 \\ \omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1}{D_e} & \omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1}{D_e} & \omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1}{D_e} & 0 \end{bmatrix} |\Omega/\text{km}| \quad 5-23b$$

Na sl.108 prikazane su geometrijske veličine koje ulaze u matricu $[\bar{z}_j^{abcz}]$.



Slika 108.- Vodiči trofaznog voda i zemlja po Carsonovim formulama

Množenjem relacije 5-23 s ℓ_{1-2} dobijemo uzdužnu matricu impedancija u π -shemi voda, odnosno dionice:

$$[\bar{z}_{1-2}^{abcz}] = [R_{1-2}^{abcz}] + j\omega [L_{1-2}^{abcz}] \quad 5-24$$

Provedimo kontrolu prema 5-8 za jedinični dio voda:

$$\begin{aligned} \bar{z}_j^{aa-z} &= \bar{z}_j^{aa} - 2 \bar{z}_j^{az} + \bar{z}_j^{zz} = \\ &= j\omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1}{r'} + R_j - 2j\omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1}{D_e} + \pi^2 f = \\ &= R_j + 0,05 + j\omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_e^2}{r'} = \\ &= R_j + 0,05 + j\omega 2 \cdot 10^{-4} (\ln \frac{D_e^2}{r} + L_u) \quad |\Omega/\text{km}| \end{aligned} \quad 5-25a$$

$$\bar{z}_j^{bb-z} = \bar{z}_j^{cc-z} = \bar{z}_j^{aa-z} \quad 5-25b$$

$$\begin{aligned} \bar{z}_j^{ab-z} &= \bar{z}_j^{ab} - \bar{z}_j^{az} - \bar{z}_j^{bz} + \bar{z}_j^{zz} = \\ &= j \omega 2 \cdot 10^{-4} \left(\ln \frac{1}{D_{ab}} - \ln \frac{1}{D_e} - \ln \frac{1}{D_e} \right) + \pi^2 f = \\ &= 0,05 + j \omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_e^2}{D_{ab}} \quad |\Omega/\text{km}| \quad 5-25c \end{aligned}$$

$$\bar{z}_j^{ba-z} = \bar{z}_j^{ab-z} \quad d$$

$$\bar{z}_j^{ac-z} = 0,05 + j \omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_e^2}{D_{ac}} \quad |\Omega/\text{km}| \quad e$$

$$\bar{z}_j^{ca-z} = \bar{z}_j^{ac-z} \quad f$$

$$\bar{z}_j^{bc-z} = 0,05 + j \omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_e^2}{D_{bc}} \quad |\Omega/\text{km}| \quad g$$

$$\bar{z}_j^{cb-z} = \bar{z}_j^{bc-z} \quad h$$

Množenje jedinične matrice $[\bar{z}_j^{abcz}]$ s ℓ_{1-2} da bi se dobila matrica $[\bar{z}_{1-2}^{abcz}]$ krije u sebi pretpostavku homogenih vodiča i homogenog specifičnog otpora zemlje na dužini ℓ_{1-2} .

Izračunajmo pad napona $\Delta \bar{V}_{1-2}^z$. Kroz zemlju prolazi trostruka nulta komponenta struje:

$$\bar{I}_{1-2}^z = - (\bar{I}_{1-2}^a + \bar{I}_{1-2}^b + \bar{I}_{1-2}^c) \quad 5-26$$

pa je pad napona

$$\begin{aligned}
 \Delta \bar{V}_{1-2}^z &= \bar{z}_{1-2}^{za} \bar{I}_{1-2}^a + \bar{z}_{1-2}^{zb} \bar{I}_{1-2}^b + \bar{z}_{1-2}^{zc} \bar{I}_{1-2}^c + \bar{z}_{1-2}^{zz} \bar{I}_{1-2}^z = \\
 &= (\bar{z}_{1-2}^{za} - \bar{z}_{1-2}^{zz}) \bar{I}_{1-2}^a + (\bar{z}_{1-2}^{zb} - \bar{z}_{1-2}^{zz}) \bar{I}_{1-2}^b + \\
 &+ (\bar{z}_{1-2}^{zc} - \bar{z}_{1-2}^{zz}) \bar{I}_{1-2}^c
 \end{aligned}
 \tag{5-27}$$

$$\begin{aligned}
 (\bar{z}_{1-2}^{za} - \bar{z}_{1-2}^{zz}) &= (\bar{z}_{1-2}^{zb} - \bar{z}_{1-2}^{zz}) = (\bar{z}_{1-2}^{zc} - \bar{z}_{1-2}^{zz}) = \\
 &= \ell_{1-2} (j\omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1}{D_e} - \pi^2 f) = -(0,05 + j\omega 10^{-4} \ln 658 \sqrt{\frac{\rho}{f}}) \ell_{1-2}
 \end{aligned}
 \tag{5-28}$$

Slijedi :

$$\Delta \bar{V}_{1-2}^z = \ell_{1-2} (0,05 - j\omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1}{D_e}) \bar{I}_{1-2}^z
 \tag{5-29}$$

Stvarni pad napona prema 5-16.

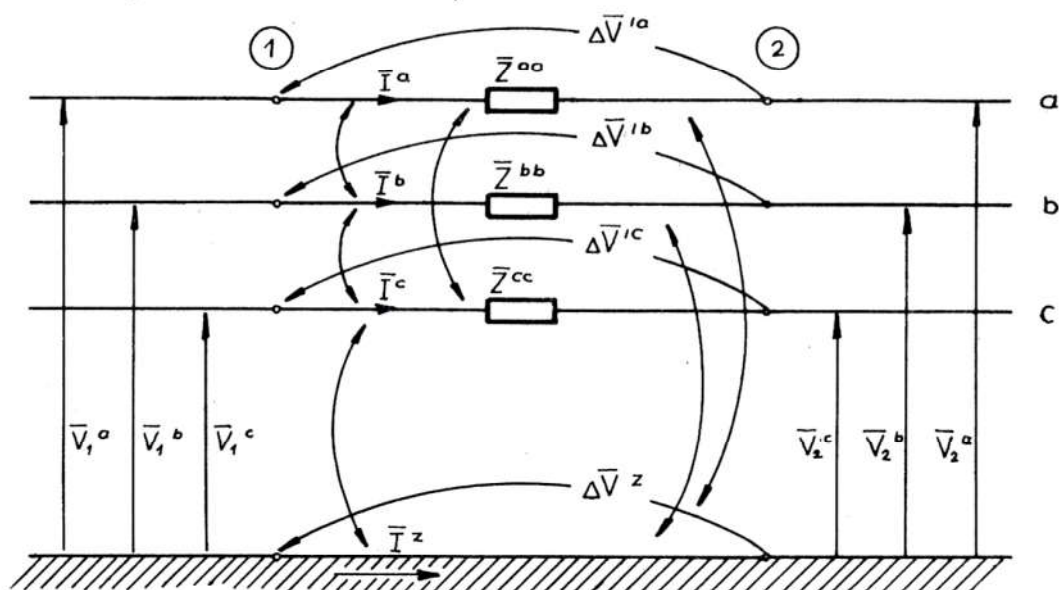
$$\begin{aligned}
 \Delta \bar{V}_{1-2}^a &= \Delta \bar{V}_{1-2}^a + \Delta \bar{V}_{1-2}^z = \\
 &= \ell_{1-2} \left[(R_j + j\omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_e}{r}) \bar{I}_{1-2}^a + \right. \\
 &\left. + j\omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_e}{D_{ab}} \bar{I}_{1-2}^b + j\omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_e}{D_{ac}} \bar{I}_{1-2}^c \right]
 \end{aligned}
 \tag{5-30a}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta \bar{V}_{1-2}^b &= \Delta \bar{V}_{1-2}^b + \Delta \bar{V}_{1-2}^z = \\
 &= \ell_{1-2} \left[j\omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_e}{D_{ba}} \bar{I}_{1-2}^a + \right. \\
 &\left. + (R_j + j\omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_e}{r}) \bar{I}_{1-2}^b + j\omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_e}{D_{bc}} \bar{I}_{1-2}^c \right]
 \end{aligned}
 \tag{b}$$

$$\Delta \bar{V}_{1-2}^c = \Delta \bar{V}_{1-2}^c + \Delta \bar{V}_{1-2}^z =$$

$$= \ell_{1-2} \left[j\omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_e}{D_{ca}} \bar{I}_{1-2}^a + \right. \\ \left. + j\omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_e}{D_{cb}} \bar{I}_{1-2}^b + (R_j + j\omega 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_e}{r}) \bar{I}_{1-2}^c \right] \quad 5-30c$$

Na slici 109, prikazane su veličine prema relacijama



Slika 109.- Model trofaznog voda sa zemljom kao povratnim vodičem

5.2.2 Vod s. dozemnom užadi

Neka vod ima jedno dozemno uže. Ispišimo matricu jediničnih vlastitih i međusobnih impedancija po relacijama 5-11 i pomnožimo ovu matricu s ℓ_{1-2} . Sada možemo ispisati relacije koje opisuju vod, odnosno dionicu, između 1 i 2 ako je povratni put struje dozemno uže i zemlja, a zemlja je već eliminirana.

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{V}_{1-2}^a \\ \Delta \bar{V}_{1-2}^b \\ \Delta \bar{V}_{1-2}^c \\ \Delta \bar{V}_{1-2}^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}_1^a - \bar{V}_2^a \\ \bar{V}_1^b - \bar{V}_2^b \\ \bar{V}_1^c - \bar{V}_2^c \\ \bar{V}_1^p - \bar{V}_2^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{z}_{1-2}^{aa-z} & \bar{z}_{1-2}^{ab-z} & \bar{z}_{1-2}^{ac-z} & \bar{z}_{1-2}^{ap-z} \\ \bar{z}_{1-2}^{ba-z} & \bar{z}_{1-2}^{bb-z} & \bar{z}_{1-2}^{bc-z} & \bar{z}_{1-2}^{bp-z} \\ \bar{z}_{1-2}^{ca-z} & \bar{z}_{1-2}^{cb-z} & \bar{z}_{1-2}^{cc-z} & \bar{z}_{1-2}^{cp-z} \\ \bar{z}_{1-2}^{pa-z} & \bar{z}_{1-2}^{pb-z} & \bar{z}_{1-2}^{pc-z} & \bar{z}_{1-2}^{pp-z} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{I}_{1-2}^a \\ \bar{I}_{1-2}^b \\ \bar{I}_{1-2}^c \\ \bar{I}_{1-2}^p \end{bmatrix} \quad 5-31$$

Naka je dozemno uže uzemljeno u 1 i 2. Tada je:

$$\bar{V}_1^p = \bar{V}_2^p = 0, \quad 5-32$$

pa je i:

$$\Delta \bar{V}_{1-2}^p = 0 \quad 5-33$$

Blok transformacijom možemo se riješiti p-tog retka i p-tog stupca. Dobili smo sistem od 3 ekvivalentna fazna vodiča. Ako vod ima dva dozemna užeta, postupak je isti.

Pretpostavka o homogenom otporu vodiča i zemlje između 1 i 2 ujedno je pretpostavka da je u svakoj točki voda jednak potencijal na dozemnom užetu i zemlji, ako je ujedno zanemaren otpor uzemljenja stanica i stupova.

U računu kratkog spoja uvijek polazimo od gore navedenih pretpostavki. Ove greške su male prema ostalim pojednostavljenjima. Međutim, raspodjela i izračunane struje kratkog spoja ovise o stvarnim prilikama između 1 i 2.

U slijedećem tekstu izostavit ćemo indekse koji označavaju da se radi o matrici u kojoj je eliminirana zemlja kao povratni vodič. Isto tako bit će izostavljeni indeksi 1-2 i na ovo mjesto upisan broj dionice.

5.3 RASPODJELA $\bar{I}_k^{-0}$

Neka su nam iz računa kratkog spoja poznate struje faza. Uz poznatu matricu $[\bar{Z}^{\text{vodiča}}]$, nakon eliminiranja snopa, možemo izračunati struje kroz dozemnu užad i struju kroz zemlju.

Pretpostaviti ćemo dozemni spoj u K na radijalnomvodu dijela sistema sa jednim uzemljenim zvjezdištem (slika 110. i 111.).

Za jednostruki dalekovod sa jednim dozemnim užetom jednačbe glase (sl.110a i 111.a):

$$\bar{Z}^{aa} \bar{I}^a + \bar{Z}^{ab} \bar{I}^b + \bar{Z}^{ac} \bar{I}^c + \bar{Z}^{ap} \bar{I}^p = \Delta \bar{V}^a \quad 5-34a$$

$$\bar{Z}^{ba} \bar{I}^a + \bar{Z}^{bb} \bar{I}^b + \bar{Z}^{bc} \bar{I}^c + \bar{Z}^{bp} \bar{I}^p = \Delta \bar{V}^b \quad b$$

$$\bar{Z}^{ca} \bar{I}^a + \bar{Z}^{cb} \bar{I}^b + \bar{Z}^{cc} \bar{I}^c + \bar{Z}^{cp} \bar{I}^p = \Delta \bar{V}^c \quad c$$

$$\bar{Z}^{pa} \bar{I}^a + \bar{Z}^{pb} \bar{I}^b + \bar{Z}^{pc} \bar{I}^c + \bar{Z}^{pp} \bar{I}^p = 0, \quad d$$

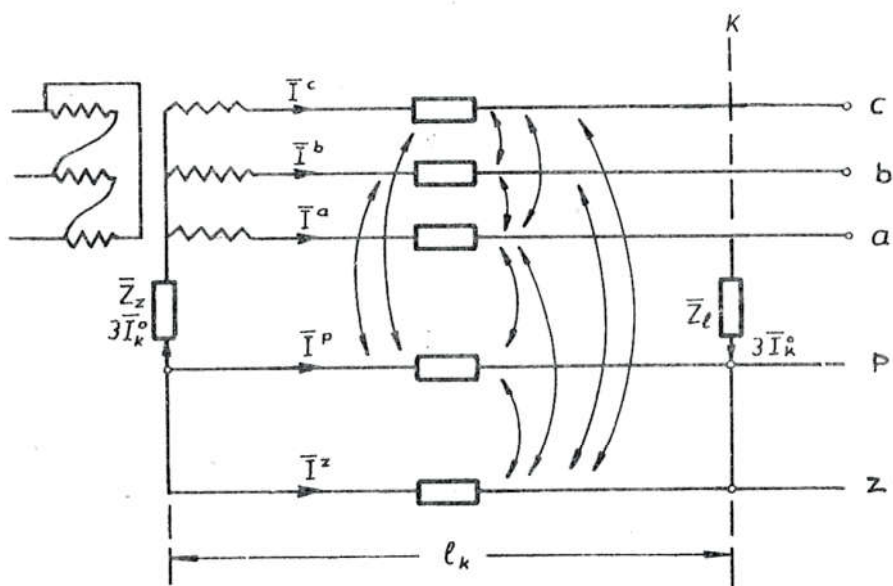
pa je stoga struja kroz dozemno uže iz relacije 5-34d

$$\bar{I}^p = - \frac{\bar{Z}^{pa} \bar{I}^a + \bar{Z}^{pb} \bar{I}^b + \bar{Z}^{pc} \bar{I}^c}{\bar{Z}^{pp}}, \quad 5-35$$

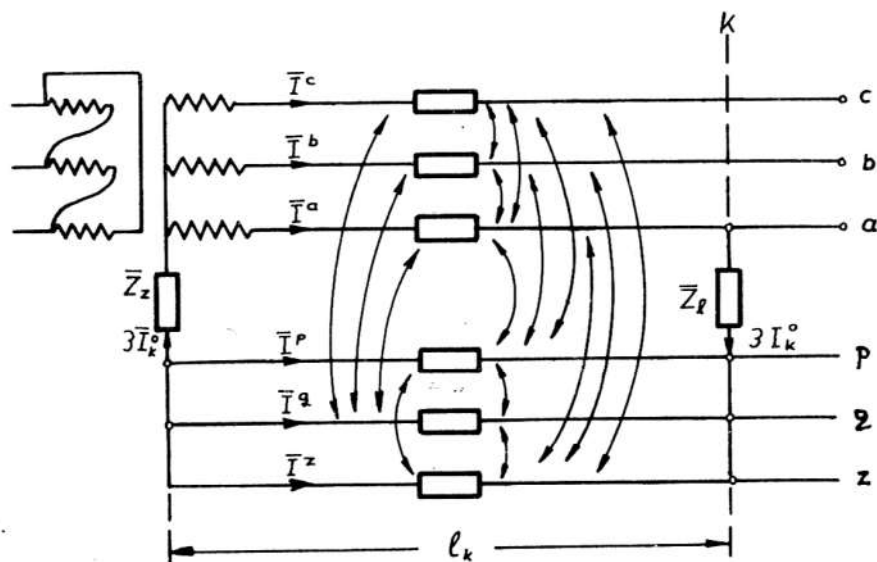
i struja kroz zemlju

$$\bar{I}^z = - (\bar{I}^a + \bar{I}^b + \bar{I}^c + \bar{I}^p) \quad 5-36$$

Za jednostruki dalekovod s dva dozemna užeta (sl.110b i 111.b) jednačbe glase:

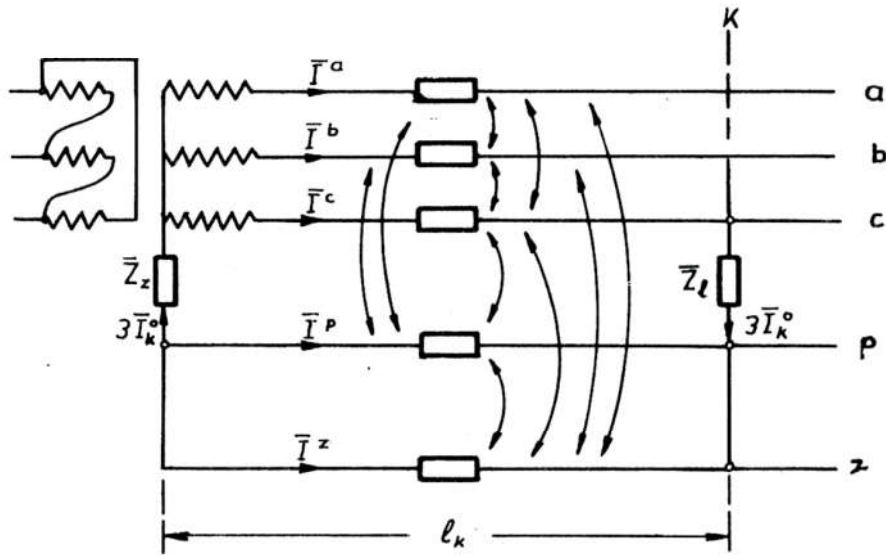


a) vod sa jednim dozemnim užetom

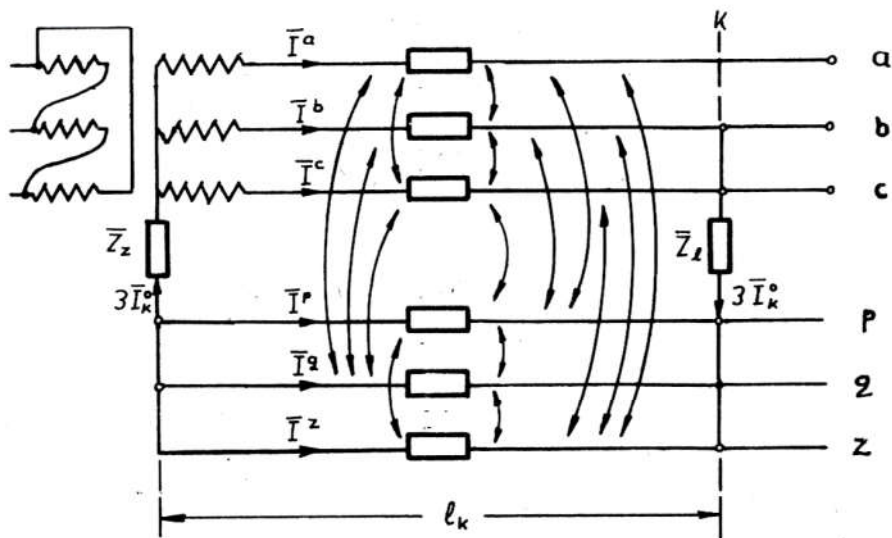


b) vod s dva dozemna užeta

Slika 110. - Modeli radijalnog voda uz beskonačno mali otpor uzemljenja pogodjenog stupa i uzemljenja stanice. Jednopolni kratki spoj u čvoru k



a) vod sa jednim dozemnim užetom



b) vod s dva dozemna užeta

Slika 111. - Modeli radijalnog voda uz beskonačno mali otpor uzemljenja pogodjenog stupa i uzemljenja stanice. Dvopolni kratki spoj sa spojem sa zemljom u čvoru k

$$\bar{z}^{aa} \bar{I}^a + \bar{z}^{ab} \bar{I}^b + \bar{z}^{ac} \bar{I}^c + \bar{z}^{ap} \bar{I}^p + \bar{z}^{aq} \bar{I}^q = \Delta \bar{V}^a \quad 5-37a$$

$$\bar{z}^{ba} \bar{I}^a + \bar{z}^{bb} \bar{I}^b + \bar{z}^{bc} \bar{I}^c + \bar{z}^{bp} \bar{I}^p + \bar{z}^{bq} \bar{I}^q = \Delta \bar{V}^b \quad b$$

$$\bar{z}^{ca} \bar{I}^a + \bar{z}^{cb} \bar{I}^b + \bar{z}^{cc} \bar{I}^c + \bar{z}^{cp} \bar{I}^p + \bar{z}^{cq} \bar{I}^q = \Delta \bar{V}^c \quad c$$

$$\bar{z}^{pa} \bar{I}^a + \bar{z}^{pb} \bar{I}^b + \bar{z}^{pc} \bar{I}^c + \bar{z}^{pp} \bar{I}^p + \bar{z}^{pq} \bar{I}^q = 0 \quad d$$

$$\bar{z}^{qa} \bar{I}^a + \bar{z}^{qb} \bar{I}^b + \bar{z}^{qc} \bar{I}^c + \bar{z}^{qp} \bar{I}^p + \bar{z}^{qq} \bar{I}^q = 0 \quad e$$

Struje kroz dozemnu užad dobijemo iz jednačbi 5-37d i 5-37e, tako da ih riješimo po $\bar{I}^p$ i $\bar{I}^q$. Dobijemo izraze

$$\bar{I}^p = \frac{\bar{z}^{qq} A - \bar{z}^{qp} B}{\bar{z}^{pq} \bar{z}^{qp} - \bar{z}^{pp} \bar{z}^{qq}} \quad 5-38a$$

$$\bar{I}^q = \frac{\bar{z}^{pp} B - \bar{z}^{qp} A}{\bar{z}^{pq} \bar{z}^{qp} - \bar{z}^{pp} \bar{z}^{qq}} \quad b$$

gdje je

$$A = \bar{z}^{pa} \bar{I}^a + \bar{z}^{pb} \bar{I}^b + \bar{z}^{pc} \bar{I}^c \quad 5-39a$$

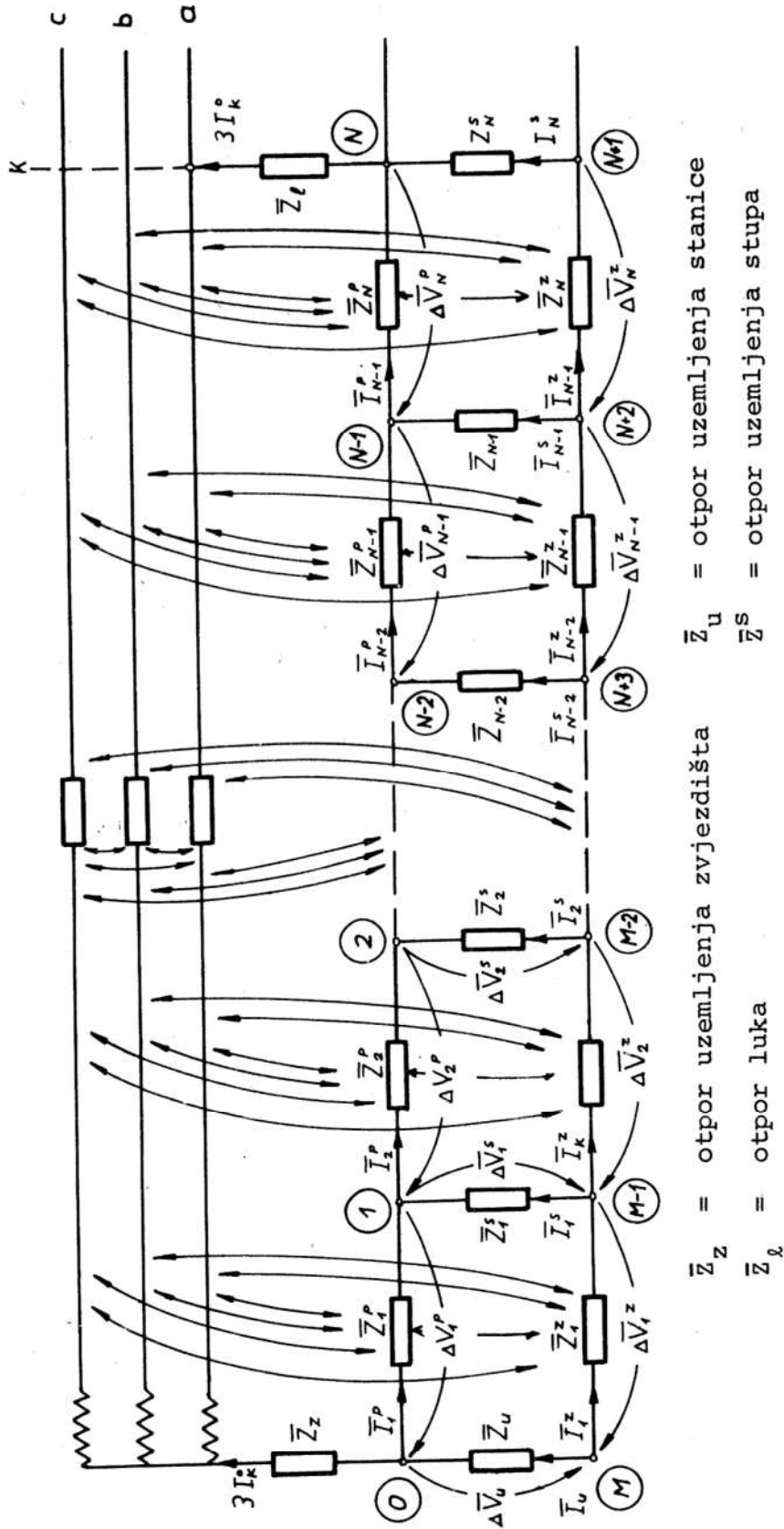
$$B = \bar{z}^{qa} \bar{I}^a + \bar{z}^{qb} \bar{I}^b + \bar{z}^{qc} \bar{I}^c \quad b$$

i struju kroz zemlju

$$\bar{I}^z = - (\bar{I}^a + \bar{I}^b + \bar{I}^c + \bar{I}^p + \bar{I}^q) \quad 5-40$$

U ovim relacijama pretpostavljeno je da je pad napona na uzemljenju stanice i pogodjenom stupu jednak nuli i da nema struje kroz uzemljenja ostalih stupova, što nije tačno.

Postavimo model voda prema sl.112. Vod je podijeljen na onoliko dionica koliko ima stupova do mjesta dozemnog spoja, u ovom



Slika 112.- Model radijalnog jednostrukog voda s jednim dozemnim užetom.
Jednopolni kratki spoj na N -tom stupu

slučaju jednopolnog kratkog spoja. Dužina dionica jednaka je dužini raspona između dva stupa.

Prema sl.112, možemo postaviti za svaku dionicu posebno da je obilazni napon petlje jednak nuli.

Za prvu dionicu

$$\Delta \bar{V}_1^P + \Delta \bar{V}_u - \Delta \bar{V}_1^Z - \Delta \bar{V}_1^S = 0 \quad 5-41$$

Za n-tu dionicu

$$\Delta \bar{V}_n^P + \Delta \bar{V}_{n-1}^S - \Delta \bar{V}_n^Z - \Delta \bar{V}_n^S = 0 \quad 5-42$$

$$n = 2, \dots, N-1$$

Za N-tu dionicu

$$\Delta \bar{V}_N^P + \Delta \bar{V}_{N-1}^S - \Delta \bar{V}_N^Z - \Delta \bar{V}_N^S = 0 \quad 5-43$$

Kod pisanja Carsonovih izraza za članove matrice $[\bar{Z}_j^{\text{vodiča}}]$ pretpostavili smo da je:

$$\Delta \bar{V}_u = \Delta \bar{V}_1^S = 0 \quad 5-44a$$

$$\Delta \bar{V}_1^P - \Delta \bar{V}_1^Z = 0 \quad b$$

$$\Delta \bar{V}_{n-1}^S = \Delta \bar{V}_n^S = 0 \quad 5-45a$$

$$\Delta \bar{V}_n^P - \Delta \bar{V}_n^Z = 0 \quad b$$

$$n = 2, 3, \dots, N-1$$

$$\Delta \bar{V}_{N-1}^S = \Delta \bar{V}_N^S = 0 \quad 5-46a$$

$$\Delta \bar{V}_N^P - \Delta \bar{V}_N^Z = 0 \quad b$$

$$\begin{array}{rcl}
 \bar{I}_{N-1}^P - \bar{I}_N^P + \bar{I}_{N-1}^S & = & 0 \quad 5-48N-1 \\
 \bar{I}_N^P + \bar{I}_N^S + \bar{I}_N & = & 0 \quad N \\
 \bar{I}_N^Z + \bar{I}_N^S & = & 0 \quad N+1 \\
 \bar{I}_{N-1}^Z - \bar{I}_N^Z - \bar{I}_{N-1}^S & = & 0 \quad N+2 \\
 \bar{I}_{N-2}^Z - \bar{I}_{N-1}^Z - \bar{I}_{N-2}^S & = & 0 \quad N+3 \\
 . & . & . \\
 \bar{I}_2^Z - \bar{I}_3^Z - \bar{I}_2^S & = & 0 \quad M-1 \\
 \bar{I}_1^Z - \bar{I}_u & = & 0 \quad M
 \end{array}$$

Zadnji N+1 jednadžbi daje relaciju:

$$\bar{I}_u + \bar{I}_1^S + \bar{I}_2^S + \dots + \bar{I}_N^S = 0 \quad 5-49$$

Dobili smo 2N+1 jednadžbu s 2N+1 nepoznanicom.

Vidimo da nije potrebno poznavati $\bar{Z}_1^Z, \bar{Z}_2^Z, \dots, \bar{Z}_N^Z$ da bi se riješio problem. Ove konstante su na određen način već sadržane u Carsonovim formulama.

Nastavimo s rješavanjem jednadžbi tako da iz relacije 5-49 izrazimo $\bar{I}_u$ i uvrstimo u ostale. Dobili smo 2N jednadžbi s 2N nepoznanica. To su struje $\bar{I}_1^P, \bar{I}_2^P, \dots, \bar{I}_N^P$ i struje $\bar{I}_1^S, \bar{I}_2^S, \dots, \bar{I}_N^S$. Koristimo dalje da se struje $\bar{I}_1^S \dots \bar{I}_N^S$ mogu lako izraziti s strujama $\bar{I}_1^P \dots \bar{I}_N^P$. Dobili smo N jednadžbi sa N nepoznanica, koje u sredjenom obliku glase

$$\begin{aligned}
 (\bar{z}_1^{pp} + \bar{z}_u + \bar{z}_1^s) \bar{I}_1^p - \bar{z}_1^s \bar{I}_2^p &= - \bar{z}_u \bar{I}_k - A_1 & 5-50a \\
 - \bar{z}_1^s \bar{I}_1^p + (\bar{z}_2^{pp} + \bar{z}_1^s + \bar{z}_2^s) \bar{I}_2^p - \bar{z}_2^s \bar{I}_3^p &= - A_2 & b \\
 - \bar{z}_2^s \bar{I}_2^p + (\bar{z}_3^{pp} + \bar{z}_2^s + \bar{z}_3^s) \bar{I}_3^p - \bar{z}_3^s \bar{I}_4^p &= - A_3 & c \\
 & & . . \\
 - \bar{z}_{n-1}^s \bar{I}_{n-1}^p + (\bar{z}_n^{pp} + \bar{z}_{n-1}^s + \bar{z}_n^s) \bar{I}_n^p - \bar{z}_n^s \bar{I}_{n+1}^p &= - A_n & n \\
 & & . . \\
 - \bar{z}_{N-2}^s \bar{I}_{N-2}^p + (\bar{z}_{N-1}^{pp} + \bar{z}_{N-2}^s + \bar{z}_{N-1}^s) \bar{I}_{N-1}^p - \bar{z}_{N-1}^s \bar{I}_N^p &= - A_{N-1} & N-1 \\
 - \bar{z}_{N-1}^s \bar{I}_{N-1}^p + (\bar{z}_N^{pp} + \bar{z}_{N-1}^s + \bar{z}_N^s) \bar{I}_N^p &= - A_N - \bar{z}_N^s \bar{I}_k & N
 \end{aligned}$$

Uvodimo:

$$\begin{aligned}
 p_{11} &= \bar{z}_1^{pp} + \bar{z}_u + \bar{z}_1^s & 5-51a \\
 p_{12} &= p_{21} = - \bar{z}_1^s & b \\
 p_{22} &= \bar{z}_2^{pp} + \bar{z}_1^s + \bar{z}_2^s & c \\
 p_{23} &= p_{32} = - \bar{z}_2^s & d \\
 p_{33} &= \bar{z}_3^{pp} + \bar{z}_2^s + \bar{z}_3^s & e \\
 & & . . \\
 p_{n-1,n} &= p_{n,n-1} = - \bar{z}_{n-1}^s & n-1 \\
 p_{nn} &= \bar{z}_n^{pp} + \bar{z}_{n-1}^s + \bar{z}_n^s & n \\
 p_{n,n+1} &= p_{n+1,n} = - \bar{z}_n^s & n+1 \\
 & & . .
 \end{aligned}$$

$$P_{NN} = \bar{z}_N^{PP} + \bar{z}_{N-1}^S + \bar{z}_N^S \quad 5-51N$$

$$- \bar{z}_u \bar{I}_k - A_1 = B_1 \quad 5-52a$$

$$- A_2 = B_2 \quad b$$

$$\dots \quad \dots$$

$$- A_{N-1} = B_{N-1} \quad N-1$$

$$- A_N - \bar{z}_N^S \bar{I}_k = B_N \quad N$$

Sada jednađbe izgledaju ovako:

$$P_{11} \bar{I}_1^P + P_{12} \bar{I}_2^P = B_1 \quad 5-53a$$

$$P_{12} \bar{I}_1^P + P_{22} \bar{I}_2^P + P_{23} \bar{I}_3^P = B_2 \quad b$$

$$\dots \quad \dots$$

$$P_{N-2,N-1} \bar{I}_{N-2}^P + P_{N-1,N-1} \bar{I}_{N-1}^P + P_{N-1,N} \bar{I}_N^P = B_{N-1} \quad N-1$$

$$P_{N-1,N} \bar{I}_{N-1}^P + P_{N,N} \bar{I}_N^P = B_N, \quad N$$

pa je matrica koeficijenata:

$$[P] = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline P_{11} & P_{12} & & & & \\ \hline P_{21} & P_{22} & P_{23} & & & \\ \hline & \dots & \dots & \dots & & \\ \hline & & P_{N-2,N-3} & P_{N-2,N-2} & P_{N-2,N-1} & \\ \hline & & & P_{N-1,N-2} & P_{N-1,N-1} & P_{N-1,N} \\ \hline & & & & P_{N,N-1} & P_{N,N} \\ \hline \end{array} \quad 5-54$$

Ovakva matrica omogućava jednostavno rješenje sistema jednažbi. Iz prve jednažbe izrazimo $\bar{I}_1^P$ i uvrstimo u drugu jednažbu. Iz ove jednažbe izrazimo $\bar{I}_2^P$ i uvrstimo u treću jednažbu i tako redom. Zadnja jednažba dat će rješenje za $\bar{I}_N^P$. Vraćanjem natrag dobit ćemo rješenje za sve $\bar{I}^P$.

Zbog velikog broja jednažbi uvodimo slijedeće konstante

$$C_1 = \frac{B_1}{P_{11}} \quad 5-55a$$

$$C_{12} = \frac{P_{12}}{P_{11}} \quad b$$

..... ..

$$C_n = \frac{B_n + P_{n,n+1} C_{n-1}}{P_{nn} - P_{n-1,n} C_{n-1,n}} \quad n$$

n = 2, 3... (N-1)

..... ..

$$C_N = \frac{B_N - P_{N-1,N} C_{N-1}}{P_{N,N} - P_{N-1,N} C_{N-1,N}} \quad N$$

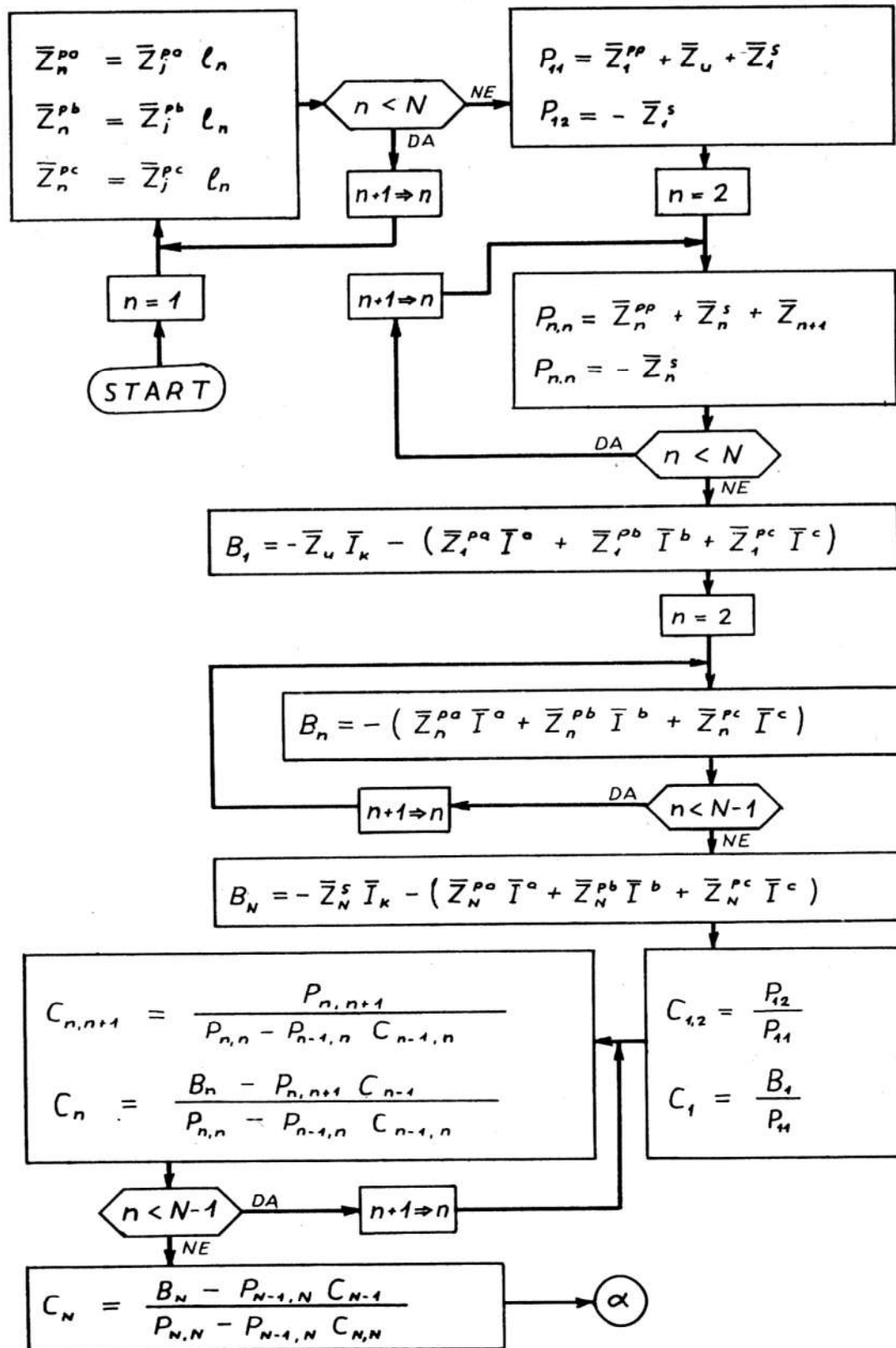
Dijagrami toka na slikama 113 i 114 pokazuju tok proračuna.

Primjer 5.1 Traži se raspodjela struje kroz dozemno uže, zemlju, uzemljenja stupova i stanice kod pojave jednopolnog kratkog spoja na šestom stupu radijalnog voda.

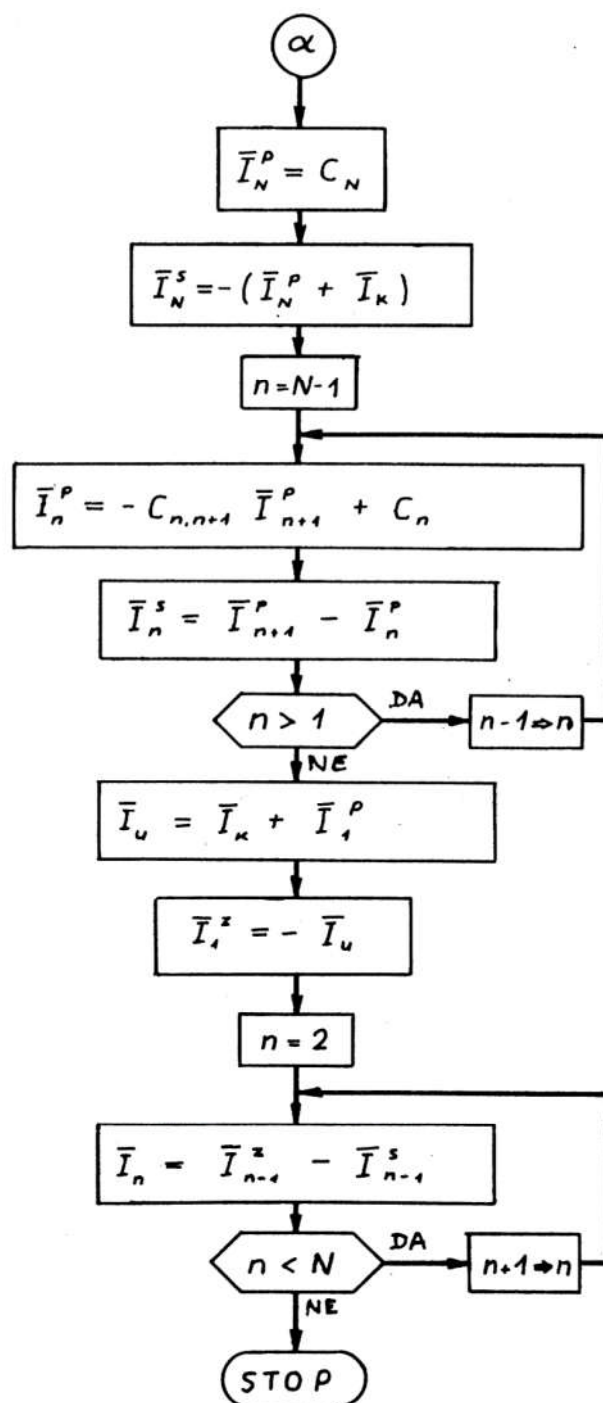
Iz računa jednopolnog kratkog spoja u čvoru K (šesti stup voda) poznata nam je struja $3I_k^O = 1000 \text{ A}$.

Dužina dionica

$$l_1 = l_2 = \dots = l_6 = 300 \text{ m}$$



Slika 113.- Dijagram toka pripremnog dijela programa RTNKS



Slika 114.- Dijagram toka računanja struja programa RTNKS

Otpor uzemljenja stupova je:

$$\bar{z}_1^s = \bar{z}_2^s = \dots = \bar{z}_6^s = 10 \, |\Omega|$$

Vlastite i međusobne impedancije dozemnog užeta su:

$$\bar{z}_1^{pa} = \bar{z}_2^{pa} = \dots = \bar{z}_6^{pa} = 0,05 + j \, 0,33 \, |\Omega/\text{km}|$$

$$\bar{z}_1^{pb} = \bar{z}_2^{pb} = \dots = \bar{z}_6^{pb} = 0,05 + j \, 0,33 \, |\Omega/\text{km}|$$

$$\bar{z}_1^{pc} = \bar{z}_2^{pc} = \dots = \bar{z}_6^{pc} = 0,05 + j \, 0,33 \, |\Omega/\text{km}|$$

$$\bar{z}_1^{pp} = \bar{z}_2^{pp} = \dots = \bar{z}_6^{pp} = 0,79 + j \, 0,81 \, |\Omega/\text{km}|$$

Otpor uzemljenja stanice je:

$$\bar{z}_u = 0,5 \, |\Omega|$$

Računajmo točno prema dijagramu toka:

$$\bar{z}_1^{pa} \ell_1 = (0,05 + j \, 0,33) \, 0,3 = 0,015 + j \, 0,099 \, |\Omega|$$

$$\bar{z}_2^{pa} \ell_2 = \dots = \bar{z}_6^{pa} \ell_6 = \bar{z}_1^{pb} \ell_1 = \dots = \bar{z}_6^{pb} \ell_6 = \bar{z}_1^{pc} \ell_1 = \dots = \bar{z}_6^{pc} \ell_6 = \bar{z}_1^{pa} \ell_1$$

$$P_{11} = 0,237 + j \, 0,243 + 0,5 + 10 = 10,737 + j \, 0,243$$

$$P_{12} = -10$$

$$P_{22} = 0,237 + j \, 0,243 + 20 = 20,237 + j \, 0,243$$

$$B_1 = -(0,015 + j \, 0,099) (-j \, 1000) - 0,5 (-j \, 1000) = -99 + j \, 515$$

$$B_2 = B_3 = \dots = B_5 = -(0,015 + j0,099)(-j1000) = -99 + j 15$$

$$B_6 = -10(-j1000) - (0,015 + j0,099)(-j1000) = -11 + j10015$$

$$C_{1,2} = \frac{-10}{10,737 + j0,243} = - 0,931 + j 0,021$$

$$C_1 = \frac{-99 + j 515}{10,737 + j0,243} = - 8,126 + j 48,103$$

$$C_{2,3} = \frac{-10}{10,927 + j0,453} = - 0,914 + j 0,038$$

$$C_2 = \frac{-180,26 + j496,03}{10,927 + j0,453} = - 14,591 + j 46,022$$

$$C_{3,4} = \frac{-10}{11,097 + j0,623} = - 0,898 + j 0,05$$

$$C_3 = \frac{-244,91 + j475,22}{11,097 + j0,623} = - 19,666 + j 43,994$$

$$C_{4,5} = \frac{-10}{11,257 + j0,743} = - 0,884 + j 0,058$$

$$C_4 = \frac{-295,66 + j454,94}{11,257 + j0,743} = - 23,498 + j 41,932$$

$$C_{5,6} = \frac{-10}{11,397 + j0,823} = - 0,873 + j 0,063$$

$$C_5 = \frac{-333,98 + j434,32}{11,397 + j0,823} = - 26,42 + j 40,02$$

$$C_6 = \frac{-363,2 + j10415,2}{11,507 + j0,873} = 37,178 + j 907,478$$

$$\bar{I}_6^P = 37,178 + j 907,478 |A|$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_5^P &= (0,873 - j0,063) (37,178 + j907,478) - 26,42 + j40,02 = \\ &= 63,208 + j 829,906 |A|\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_4^P &= (0,884 - j0,058) (63,208 + j829,906) - 23,498 + j41,932 = \\ &= 80,512 + j 771,903 |A|\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_3^P &= (0,898 - j0,05) (80,512 + j771,903) - 19,666 + j43,994 = \\ &= 91,229 + j 733,137 |A|\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_2^P &= (0,914 - j0,038) (91,229 + j733,137) - 14,591 + j46,022 = \\ &= 96,652 + j 712,643 |A|\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_1^P &= (0,931 - j0,021) (96,652 + j712,643) - 8,126 + j48,103 = \\ &= 96,823 + j 709,544 |A|\end{aligned}$$

$$\bar{I}_u = 96,823 + j 709,544 - j1000 = 96,823 - j 290,456 |A|$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_1^S &= 96,652 + j 712,643 - 96,823 - j 709,544 = \\ &= - 0,171 + j 3,099 |A|\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_2^S &= 91,229 + j 733,137 - 96,652 - j 712,643 = \\ &= - 5,423 + j 20,494 |A|\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_3^S &= 80,512 + j 771,903 - 91,229 - j 733,137 = \\ &= - 10,717 + j 38,766 |A|\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_4^S &= 63,208 + j 829,906 - 80,512 - j 771,903 = \\ &= - 17,304 + j 58,003 |A|\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_5^S &= 37,178 + j 907,478 - 63,208 - j 829,906 = \\ &= - 26,03 + j 77,572 |A|\end{aligned}$$

$$\bar{I}_6^S = j 1000 - 37,178 - j 907,478 = - 37,178 + j 92,522 |A|$$

$$\bar{I}_1^Z = - 96,823 + j 290,456 |A|$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_2^Z &= - 96,823 + j 290,456 + 0,171 - j 3,099 = \\ &= - 96,652 + j 287,357 |A|\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_3^Z &= - 96,652 + j 287,357 + 5,423 - j 20,494 = \\ &= - 91,229 + j 266,863 |A|\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_4^Z &= - 91,229 + j 266,863 + 10,717 - j 38,766 = \\ &= - 80,512 + j 228,097 |A|\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_5^Z &= - 80,512 + j 228,097 + 17,304 - j 58,003 = \\ &= - 63,208 + j 170,094 |A|\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_6^Z &= - 63,208 + j 170,094 + 26,03 - j 77,572 = \\ &= - 37,178 + j 92,522 |A|\end{aligned}$$

Rezultati su unešeni u povratni put struje na slici 115.

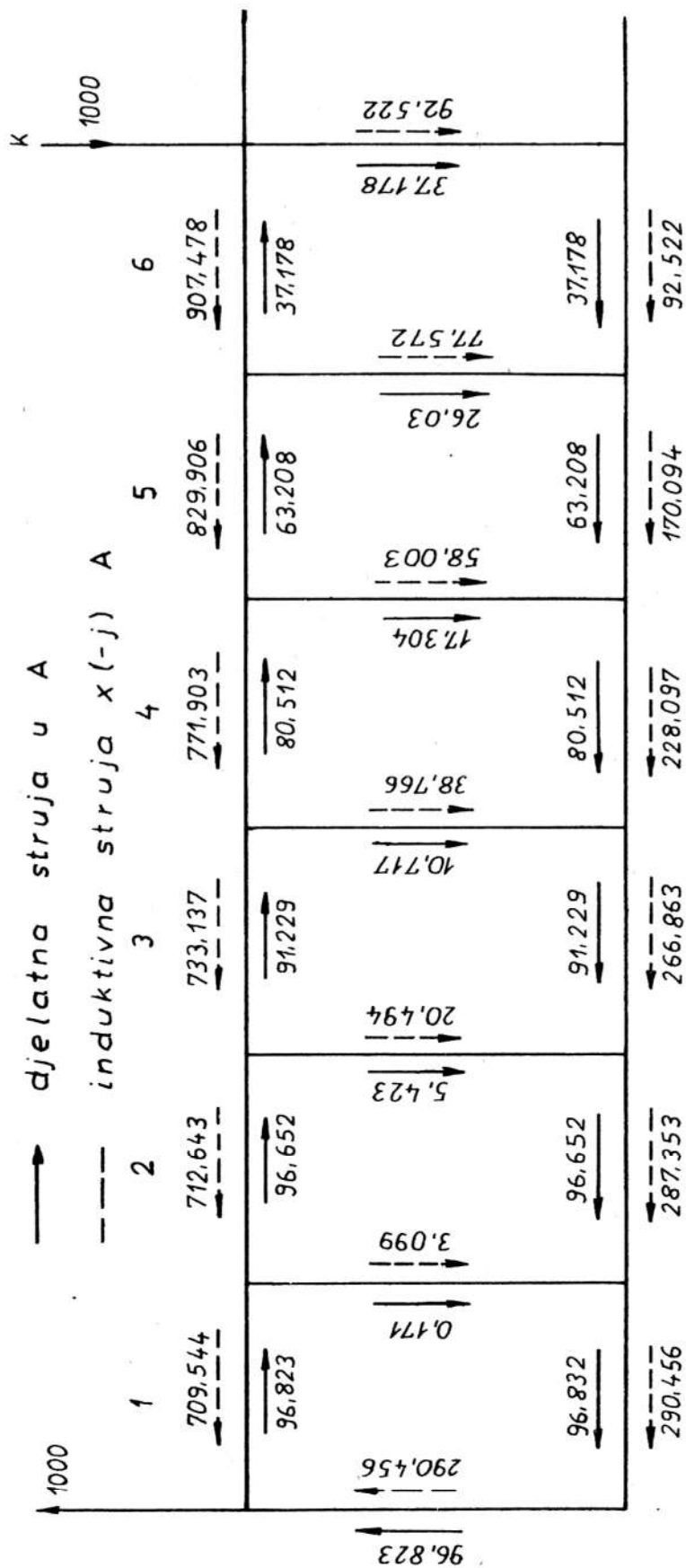
Ako računamo po relacijama 5-35 i 5-36, tj. ako ne uzimamo u račun otpor uzemljenja stanice i stupova, dobit ćemo raspodjelu prema slici 116.

$$\bar{Z}^{pa} = (0,015 + j 0,099) 6 = 0,090 + j 0,594 |\Omega|$$

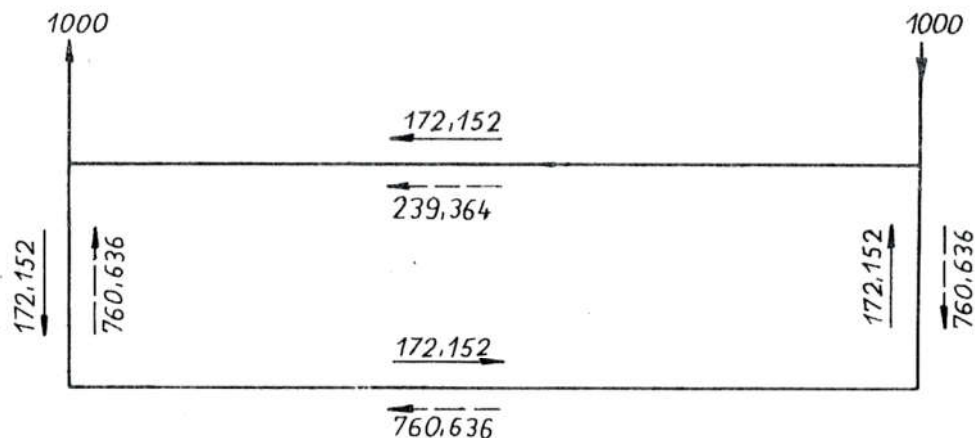
$$\bar{Z}^{pp} = (0,237 + j 0,243) 6 = 1,422 + j 1,458 |\Omega|$$

$$\begin{aligned}\bar{I}^P &= - \frac{\bar{Z}^{pa} \bar{I}^a}{\bar{Z}^{pp}} = - \frac{(0,09 + j0,594)(-j1000)}{1,422 + j1,458} = \\ &= - 172,152 + j 239,364 |A|\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}^Z &= - (-j1000 - 172,152 + j 239,364) = \\ &= 172,152 + j 760,636 |A|\end{aligned}$$



Slika 115.- Raspodjela struja ako su otpori poprečnih grana povratnog puta struje različiti od nule



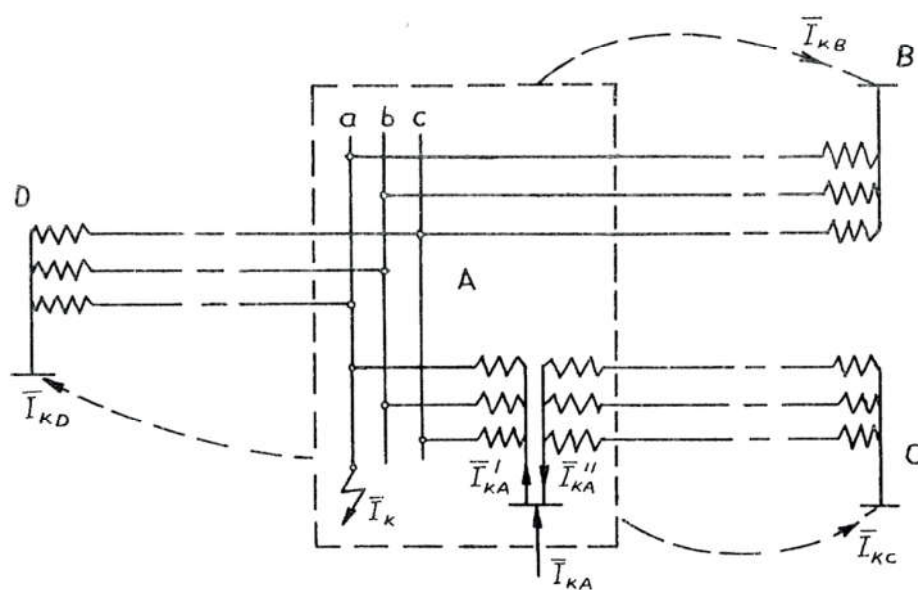
djelatna struja u A
induktivna struja $x(-j)$ A

Slika 116.- Raspodjela struja ako je beskonačno mali otpor uzemljenja pogodjenog stupa i uzemljenja stanice. Dozemno uže je na cijeloj dužini na potencijalu zemlje, tj. u ulozi protutežnog užeta

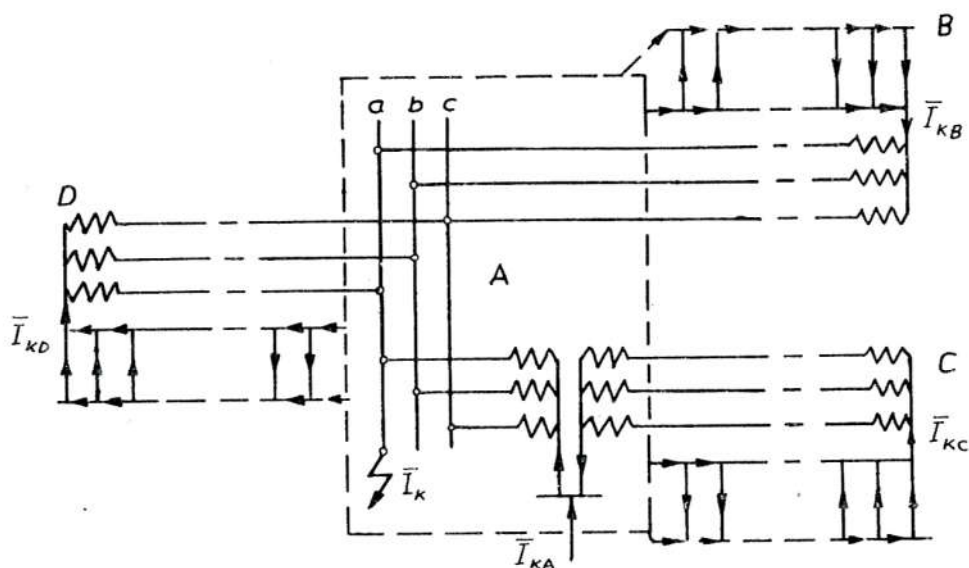
5.4 MJESTO KRATKOG SPOJA

Kratki spoj može nastati na sabirnicama postrojenja (sl.117) ili na vodu (sl.118). Neka je to jednopolni kratki spoj kada je $3 \bar{I}_k^0 = \bar{I}_k$. U slučajevima kada je kratki spoj izvan postrojenja, pretpostavit ćemo da je on toliko blizu postrojenju da je struja kratkog spoja ista kao da je kratki spoj u postrojenju, pa i ista raspodjela ove struje na vodove koji su neposredno vezani za mjesto kvara.

Za slučaj na sl.117a struja koja ulazi, odnosno izlazi iz uzemljivača, iznosi:

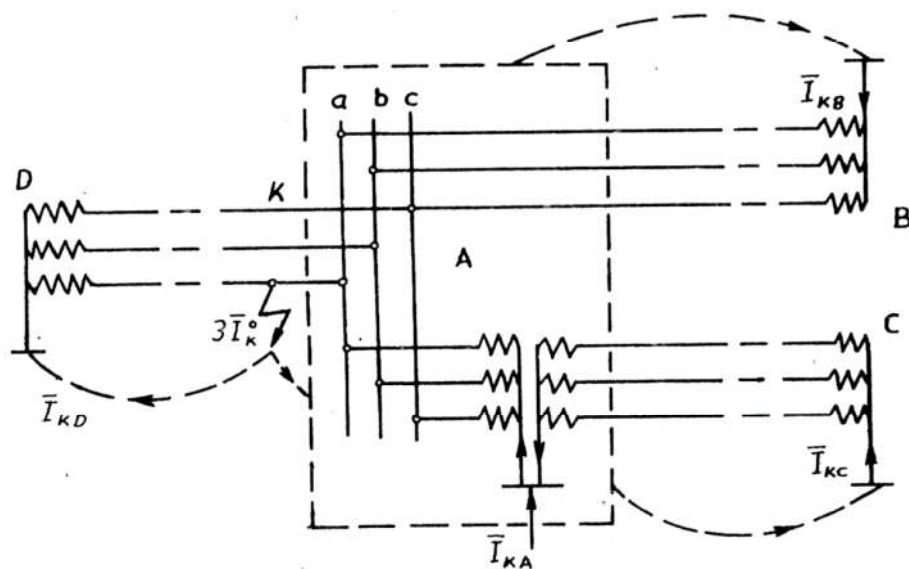


a) dalekovodi bez zaštitnog užeta

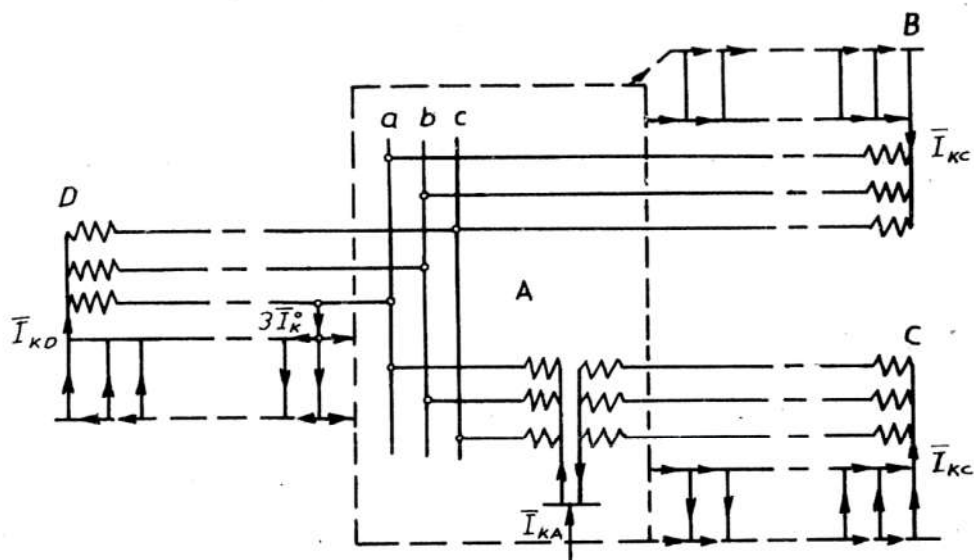


b) dalekovodi sa zaštitnim užetom

Slika 117. - Jednopolni kratki spoj unutar postrojenja A



a) dalekovodi bez zaštitnog užeta



b) dalekovodi sa zaštitnim užetom

Slika 118.- Jednopolni kratki spoj izvan postrojenja A

$$\bar{I}_u = \bar{I}_k - \bar{I}_{kA} = \bar{I}_{kB} + \bar{I}_{kC} + \bar{I}_{kD} \quad 5-56$$

a za slučaj na sl.118a

$$\bar{I}_u = \bar{I}_k - \bar{I}_{kD} = \bar{I}_{kB} + \bar{I}_{kC} + \bar{I}_{kA} \quad 5-57$$

Vidimo da se strujno opterećenje uzemljivača bitno razlikuje u oba slučaja. U slučaju na sl.117a ovo opterećenje ovisi prvenstveno o broju transformatora, grupi spoja i tretmanu zvjezdista, dok u drugom slučaju dominiraju parametri pogodjenog voda. Ne treba zaboraviti da je ipak raspodjela struja ovisna o svim faktorima, kao što se to vidi iz relacije 5-56 i 5-57.

Na slikama 117b i 118b prikazani su isti primjeri s tom razlikom, što vodovi imaju dozemna užeta. Poznata struja iz raspodjele na vodove sa slika 117a odnosno 118a sada se dijeli na struju kroz zemlju i struju kroz dozemnu užad. Rasterećenje uzemljivača je očito, a može se proračunati prema relacijama 5-53a-N, u kojima struju kratkog spoja zamijenimo sa strujama raspodjele.

5.5 POSEBNI SLUČAJEVI

5.5.1 Zanemaren otpor uzemljenja stupova, osim pogodjenog stupa:

$$\bar{Z}_n^s = 0 \quad n = 1..(N-1) \quad 5-58$$

Relacije 5-51a-N prelaze u

$$P_{11} = \bar{Z}_1^{pp} + \bar{Z}_u \quad 5-59a$$

$$P_{nn} = \bar{Z}_n^{pp} \quad n = 2..(N-1) \quad b$$

$$P_{ij} = 0 \quad i = j = 1..N \quad 5-59c$$

$$P_{NN} = \bar{Z}_N^{PP} + \bar{Z}_N^S \quad d$$

Matrica koeficijenata je dijagonalna matrica.

Primjer 5.2 Na šestom stupu radijalnog voda nastao je jednopolni kratki spoj. Poznato je:

$$\bar{Z}_u = 0,5 \quad |\Omega|$$

$$\bar{Z}_1^{PP} = \bar{Z}_2^{PP} = \dots = \bar{Z}_6^{PP} = 0,237 + j0,243 \quad |\Omega|$$

$$\bar{Z}_6^S = 10 \quad |\Omega|$$

$$A_1 = A_2 = \dots = A_6 = 99 - j 15 \quad |V|$$

$$\bar{I}_k = - j 1000 \quad |A|$$

Rezultati proračuna ucrtani su na slici 119.

5.5.2 Otpor uzemljenja stupova beskonačan. Izolacija probijena na pogodjenom stupu:

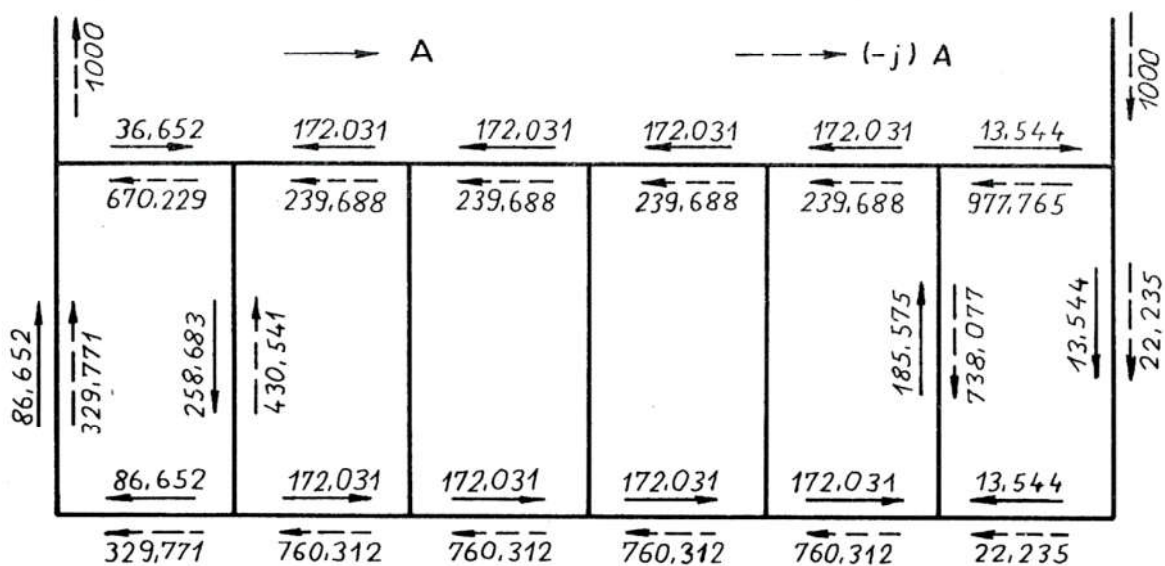
$$\bar{Z}_n^S = \infty \quad n = 1..(N-1), \quad 5-60$$

Stoga je

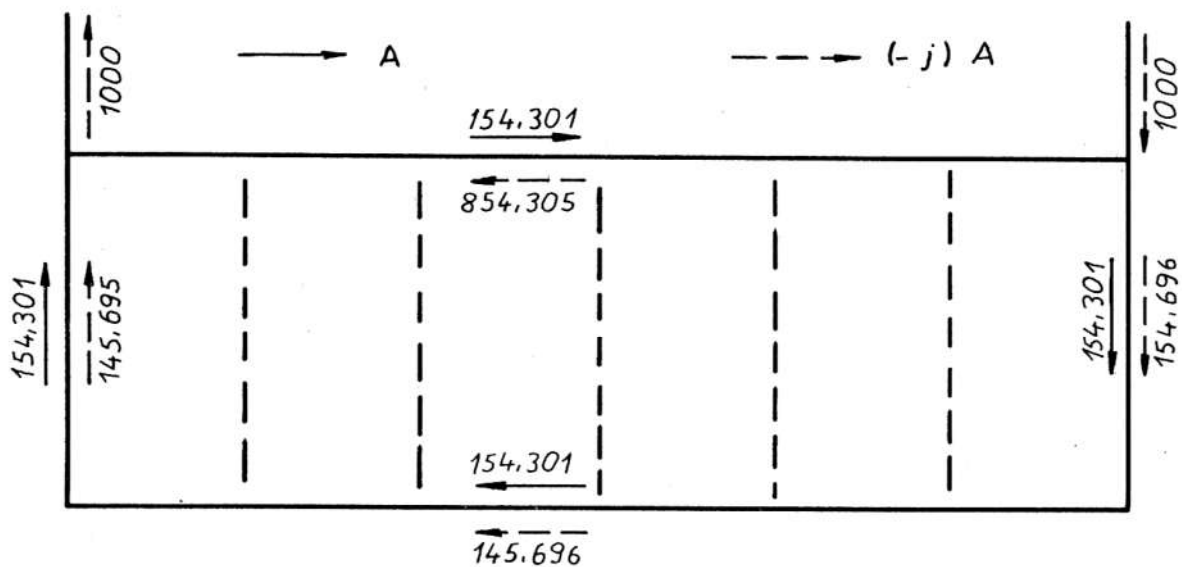
$$\bar{I}_n^S = 0 \quad n = 1..(N-1), \quad 5-61$$

i radi toga

$$\bar{I}_n^P = \bar{I}^P \quad n = 1..N \quad 5-62$$



Slika 119. - Raspodjela struje $3 \bar{I}_k^0$ na zemlju i dozemno uže, ako je zanemaren otpor uzemljenja stupova osim pogodjenog stupa



Slika 120. - Raspodjela struje $3 \bar{I}_k^0$ na zemlju i dozemno uže ako je otpor uzemljenja stupova beskonačan, a izolacija probijena na pogodjenom stupu

Iz relacija

$$\sum A_n + \bar{I}^P \bar{Z}^{PP} = -(\bar{Z}_u + \bar{Z}_n^S) \bar{I} \quad 5-63$$

$$-\bar{I}_n^P + \bar{I}_u - \bar{I}_k = 0 \quad 5-64$$

dobijemo izraz za struju $\bar{I}^P$:

$$\bar{I}^P = \frac{-\sum A_n - (\bar{Z}_u + \bar{Z}_N^S) \bar{I}_k}{\sum \bar{Z}_n^{PP} + \bar{Z}_u + \bar{Z}_N^S} = \frac{-A - (\bar{Z}_u + \bar{Z}_N^S) \bar{I}_k}{\bar{Z}^{PP} + \bar{Z}_u + \bar{Z}_N^S} \quad 5-65$$

Primjer 5.3 Na šestom stupu radijalnog voda nastao je jednopolni kratki spoj. Potrebni podaci kao u primjeru 5.2.

Rezultati proračuna ucrtani su na slici 120.

5.5.3 Dva dozemna užeta, jedno uzemljeno, a drugo izolirano

U nekim se zemljama jedno od dva dozemna užeta izolira od stupova, kako bi se u stacionarnom pogonu izbjegle inducirane struje u zamkama koje tvori uzemljena dozemna užad u svakom rasponu.

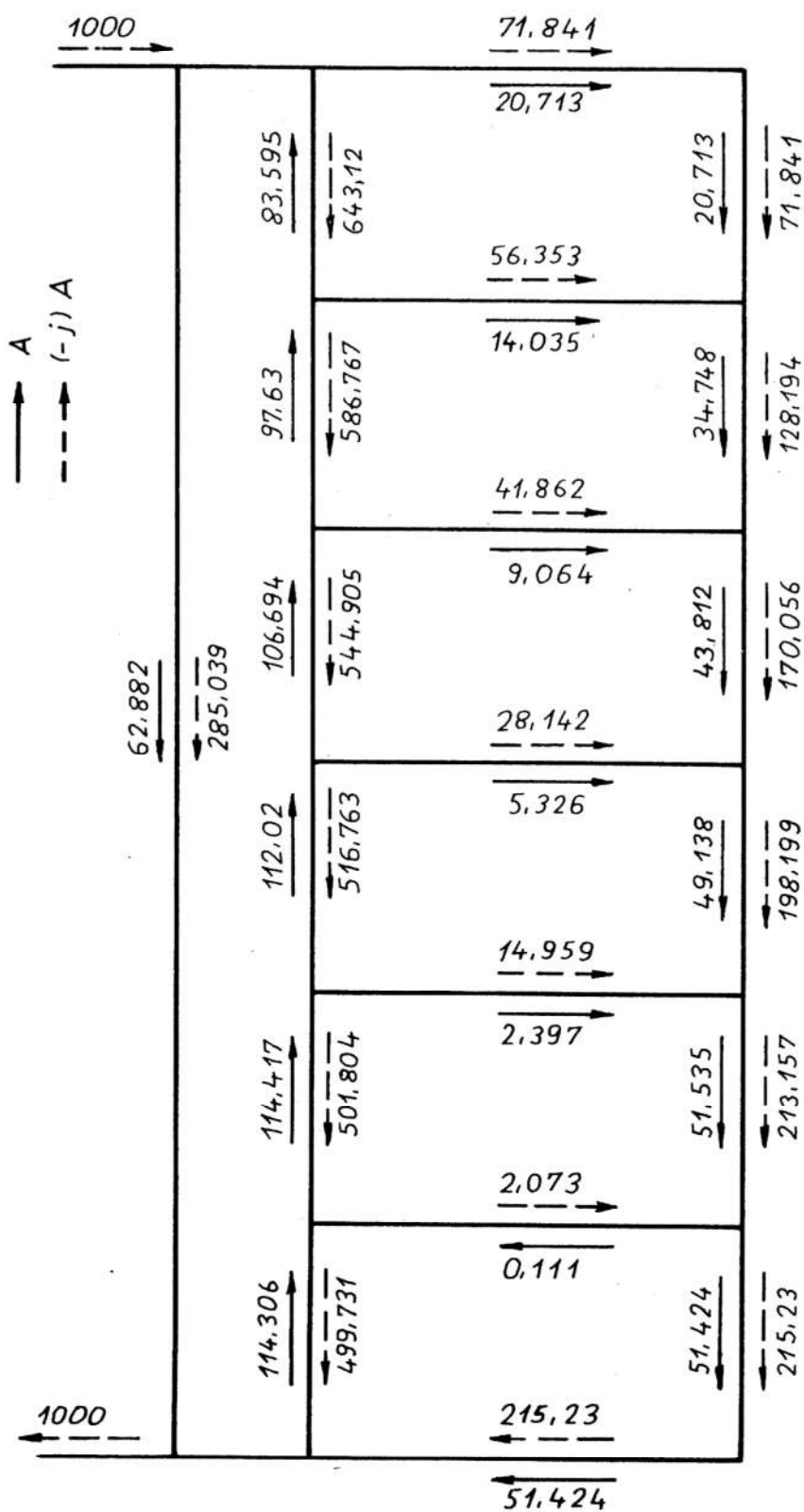
Postavimo N jednadžbi za N dionica dozemnog užeta p , koje je uzemljeno preko svakog stupa. Za izolirano dozemno uže q postavimo jednu jednadžbu. Ovim jednadžbama dodajmo još jednadžbe čvorova. Nakon sredjivanja imamo $N+1$ jednadžbu s $N+1$ nepoznanicom.

$$(\bar{Z}_1^{PP} + \bar{Z}_u + \bar{Z}_1^S) \bar{I}_1^P - \bar{Z}_1^S \bar{I}_2^P + \bar{Z}_u \bar{I}^q = -A_1 - \bar{Z}_u \bar{I}_k \quad 5-66a$$

$$-\bar{Z}_1^S \bar{I}_1^P + (\bar{Z}_1^{PP} + \bar{Z}_2^S + \bar{Z}_1^S) \bar{I}_2^P - \bar{Z}_2^S \bar{I}_3^P + \bar{Z}_2^{Pq} \bar{I}^q = -A_2 \quad b$$

.....

$$-\bar{Z}_{N-2}^S \bar{I}_{N-2}^P + (\bar{Z}_{N-1}^{PP} + \bar{Z}_{N-1}^S + \bar{Z}_{N-2}^S) \bar{I}_{N-1}^P - \bar{Z}_{N-1}^S \bar{I}_N^P + \bar{Z}_{N-1}^{Pq} \bar{I}^q = -A_{N-1} \quad N-1$$



Slika 121. - Raspodjela struje $3 \bar{I}_k^0$ na zemlju i dozemnu užad
 ako je jedno dozemno uže uzemljeno, a drugo izolirano

$$-\bar{z}_{N-1}^s \bar{I}_{N-1}^p + (\bar{z}_N^{pp} + \bar{z}_N^s + \bar{z}_{N-1}^s) \bar{I}_N^p + (\bar{z}_N^{pq} + \bar{z}_N^s) \bar{I}^q = -A_N - \bar{z}_N^s I_k \quad N$$

$$(\bar{z}_1^{qp} + \bar{z}_u) \bar{I}_1^p + \bar{z}_2^{qp} \bar{I}_2^p + \dots + (\bar{z}_N^{qp} + \bar{z}_N^s) \bar{I}_N^p + (\bar{z}^{qp} + \bar{z}_u + \bar{z}_N^s) \bar{I}^q = -Q - \bar{z}_N^s \bar{I}_k \quad N+1$$

$$Q = \bar{z}^{qa} \bar{I}^a + \bar{z}^{qb} \bar{I}^b + \bar{z}^{qc} \bar{I}^c \quad 5-67$$

Primjer 5.4 Na šestom stupu radijalnog voda nastao je jednopolni kratki spoj. Vod ima dva dozemna užeta od kojih je jedno uzemljeno, a drugo izolirano. Poznato je

$$\bar{z}^{qq} = 1,422 + j 1,458 |\Omega|$$

$$Q = 594 - j 90 \quad |\Omega|$$

$$\bar{z}^{qp} = \bar{z}_2^{qp} = \dots = \bar{z}_6^{qp} = 0,012 + j 0,1 |\Omega|$$

Ostali potrebni podaci su kao u primjeru 5.2.

Rezultati proračuna ucrtani su na slici 121.

5.6 ZAKLJUČAK

Idealizirani slučajevi u izloženom razmatranju omogućuju nam sagledavanje dijela problematike u vezi s dozemnom užadi i uzemljenjima.

Promatrane slučajeve možemo svrstati na slijedeći način:

Na slici 115. je opći slučaj kada su otpori poprečnih grana povratnog puta 3 $\bar{I}_k^0$ različiti od nule, a specifični otpor zemlje konstantan duž voda.

Slijedi slučaj u kojemu je otpor uzemljenja pogodjenog stupa i otpor uzemljenja stanice jednak nuli. Dozemno uže je na cijeloj dužini na potencijalu zemlje, tj. dozemno uže igra ulogu protu-

težnog užeta. Preko 75% struje kratkog spoja (induktivne struje) preuzima zemlja, a ostatak dozemno uže (slika 116).

Gornjem slučaju vrlo je bliska raspodjela struje na sl.119, kada je zanemaren otpor uzemljenja stupova osim pogodjenog stupa i stanice. Neposredna uzemljenja prvih stupova preuzimaju struje, dok su struje uzemljenja ostalih stupova jednake nuli, jer ne postoji razlika napona. Dodatni uvjet za ovakovu raspodjelu svakako je jednak specifični otpor zemlje duž voda.

Upravo drugu krajnost predstavlja raspodjela $3 \bar{I}_k^0$ kada je dozemno uže izolirano, a izolacija probijena na pogodjenom stupu. Tada dozemno uže preuzima glavninu struje kratkog spoja (u primjeru preko 85%), a zemlja ostatak (sl.120).

Zanimljiv je slučaj nejednake uloge dozemne užadi, ako se jedno dozemno uže izolira, u cilju sprečavanja neželjenih struja u petljama koje tvore stupovi s dozemnom užadi. Na mjestu kratkog spoja slaba izolacija izoliranog užeta je uvijek probijena. Prema primjeru na slici 121. izolirano uže preuzelo je manje od 30% struje kratkog spoja, a uzemljeno uže preko 50%, dok je zemlja sudjelovala sa cca 20%. Dobila se vrlo povoljna raspodjela struje kratkog spoja, u kojoj upravo uzemljeno uže preuzima na sebe glavninu opterećenja.

Narinuta čisto induktivna struja kratkog spoja na sklop induktivnih i djelatnih otpora izaziva cirkulaciju dodatne djelatne komponente struje. U svakom presjeku voda, uključujući i zemlju, suma induktivnih komponenata struja jednaka je narinutoj induktivnoj struji, a suma djelatnih komponenata struja jednaka je nuli.

Analizirani slučajevi pokazuju da način galvanske povezanosti dozemnog užeta, te otpori uzemljenja stupova i transformatorske stanice bitno utječu na raspodjelu struje jednopolnog kratkog spoja na alternativne povratne puteve.

6. ISKAPČANJA I PREKIDI NA JEDNOSTRUKOM DALEKOVODU

6.1 UVOD

Iskapčanje jedne faze dalekovoda, tj. jednopolno iskapčanje dalekovoda, je pogonski slučaj, koji je sastavni dio procesa kod jednopolnog automatskog ponovnog ukapčanja. Uobičajeno je da se proračun struja i napona za ovaj slučaj izvodi uz zanemarenje poprečnih admitancija, što u mrežama visokih i vrlo visokih napona može dovesti do većih pogrešaka u proračunu. Današnje tehničke mogućnosti računanja su stalni izazov za reviziju stavova po pitanju raznih zanemarenja, te je ovdje za slučaj iskapčanja jedne faze jednostrukog dalekovoda, pokazan opseg računanja kad nema zanemarenja, utjecaj zanemarenja na račun dinamičke stabilnosti kao i zanimljivi podaci koje pruža točan proračun.

Prekidi jedne ili dviju faza dalekovoda nastaju kada pri iskapčanju, odnosno ukapčanju sklopke, ne iskopčaju odnosno ne ukopčaju sva tri pola, kao i kada dodje do otpajanja jednog ili dva mosta na rasteretnom stupu bez pojave električnog luka. Cirkulacija nulte komponente struje u mreži za vrijeme prekida faze izaziva smetnje u telefonskim linijama na vrlo širokom geografskom području, dok su u samoj visokonaponskoj mreži nesimetrije uslijed prekida slabo izražene, pa se događa na pogonsko osoblje sporo reagira na intervencije pošte.

U daljnjem tekstu prikazan je za oba slučaja dalekovoda sa prekidom trofazni matematički model bez zanemarenih poprečnih grana, te matematički modeli sa zanemarenim poprečnim granama. Analizirani su utjecaji zanemarenja, a kroz primjere dan je uvid u praktičnu primjenu.

6.2 ISKOPČANA JEDNA FAZA

Jednopolno iskapčanje voda specijalno je zanimljivo u ispitivanju dinamičke stabilnosti. S obzirom da je ovaj račun sam po sebi kompliciran i dugotrajan, računanje beznaponske pauze bez uobičajenih zanemarenja je poseban, ali ne i nezavediv problem. Kod jednopolnog automatskog ukapčanja beznaponska pauza može trajati i nekoliko sekunda. Zato je u nekim analizama važno dobiti točne podatke o električnim prilikama u sistemu za vrijeme ovog pogonskog stanja.

U klasičnom računu iskopčane jedne faze zanemaruju se poprečne grane pogodjenog dalekovoda. Prema uvjetima na mjestu prekida ostvaruje se model mreže u sistemu simetričnih komponenata. Ovo dalje omogućuje da se model svede na modificiranu ekvivalentnu shemu direktnog sistema.

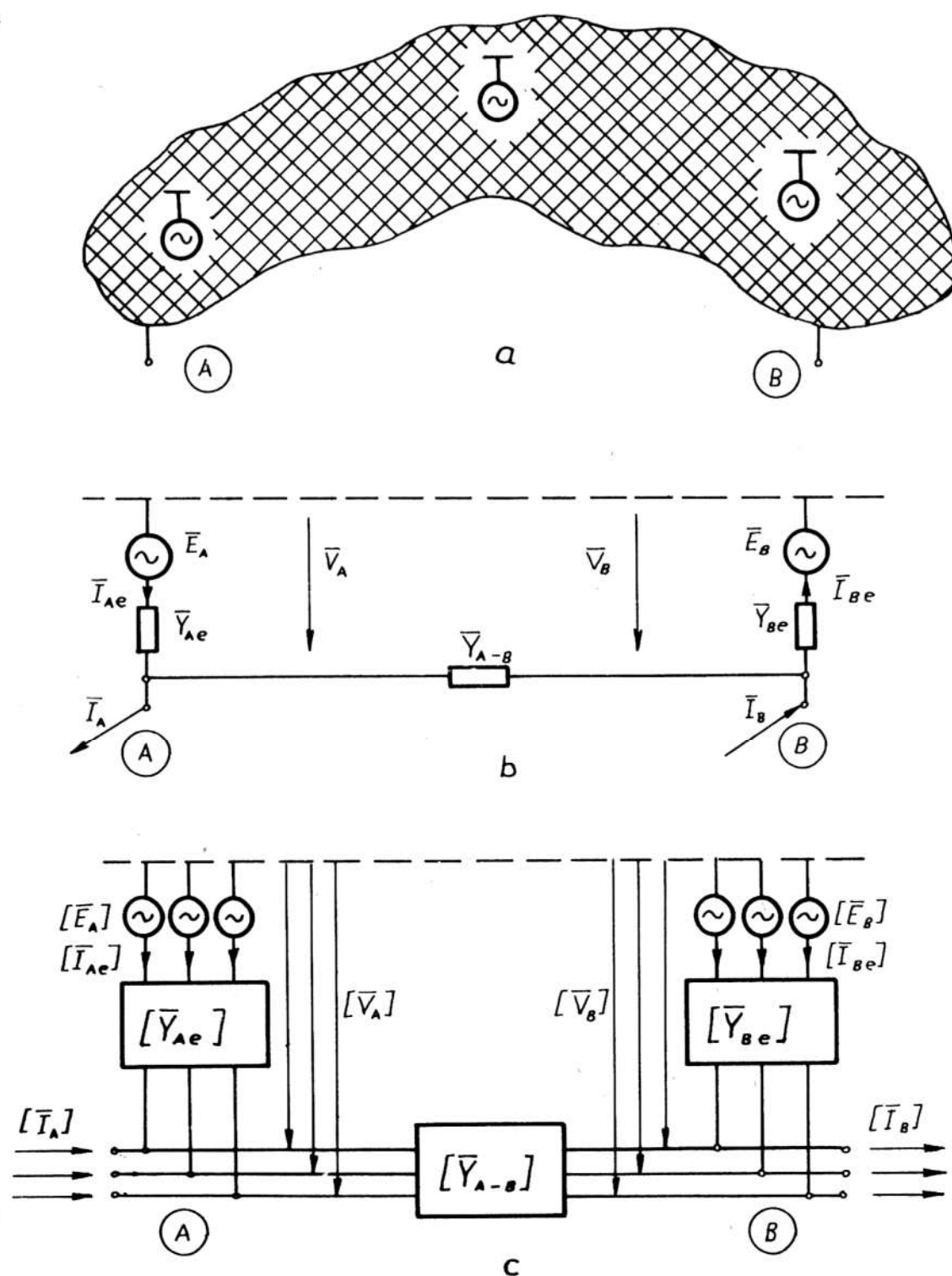
Model mreže s uključenim poprečnim granama π sheme pogodjenog dalekovoda ne pruža takovo jednostavno rješenje. Zato je pokušano da se problem riješi na trofaznom modelu mreže.

6.2.1 Matematički model

Svaku aktivnu mrežu gledanu iz tri čvora (sabirnice A, sabirnice B i zemlja) možemo nadomjestiti ekvivalentnom shemom prema sl. 122. Na slici 122a je zadana mreža, a na slikama 122b i 122c jednofazna odnosno trofazna shema iste mreže.

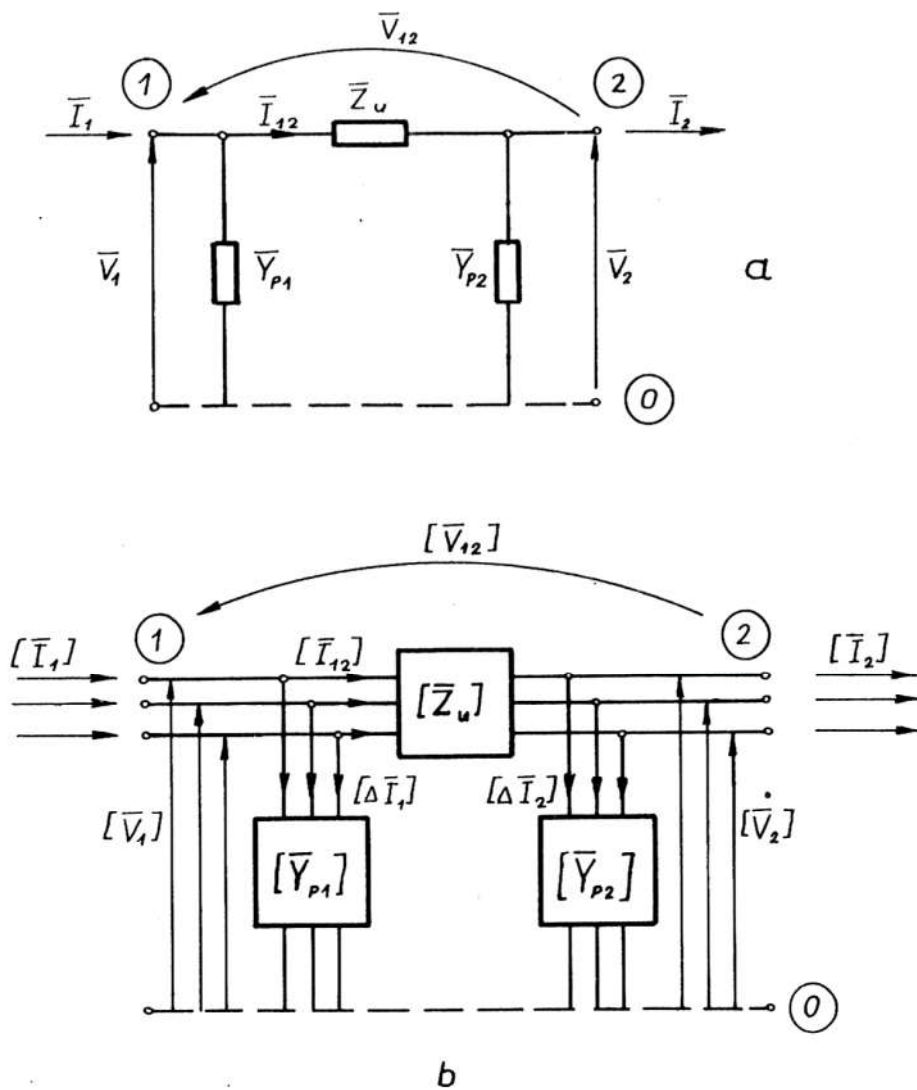
Mreži sa slike 122, priključit ćemo u čvorovima A i B jednostruki dalekovod, čije su jednofazna i trofazna π shema prikazane na sl. 123.

Ovisno o zadatku biramo metodu u kojoj ćemo opisati električne prilike u zadanoj mreži. Za naš slučaj odabrana je metoda čvora. Upravo u ovoj metodi posebno ćemo opisati prilike u mreži sa sl. 122, a posebno prilike na dalekovodu sa sl. 123. Vezu između mreže i dalekovoda ostvarujemo preko nule sistema i preko napona i struja čvora u čvorovima A i B, odnosno 1 i 2. Na slici 124 pokazana je mreža i mreži priključeni dalekovod. U stvari je u čvo-

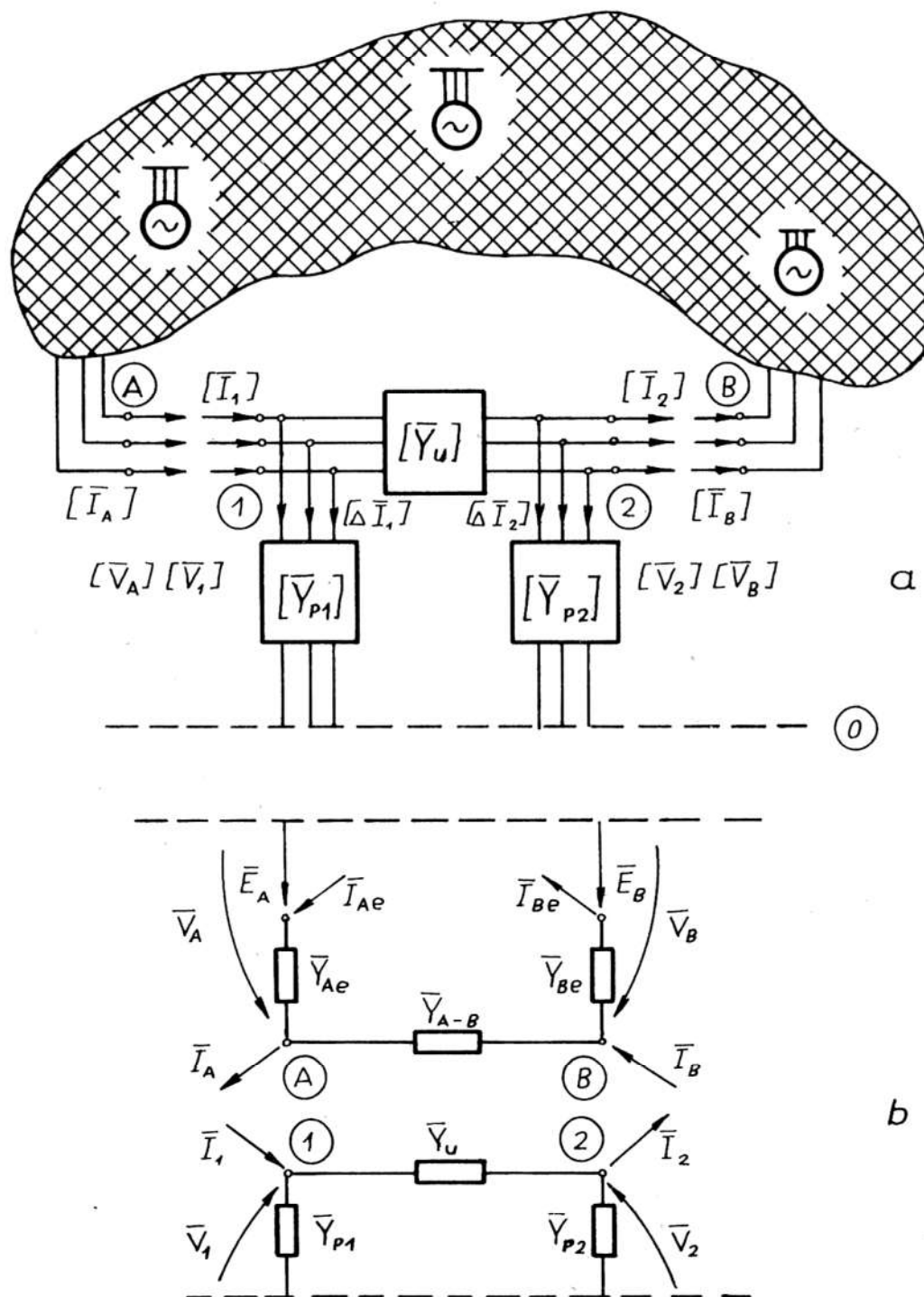


Slika 122.- Zadana aktivna mreža

- a) jednopolni prikaz
- b) jednofazna ekvivalentna shema
- c) trofazna ekvivalentna shema



Slika 123. - Jednostruki dalekovod
 a) jednofazna π shema
 b) trofazna π shema



Slika 124.- Priključivanje dalekovoda 1-2 mreži u čvorovima A i B

a) trofazna shema
b) jednofazna shema

rovima A i B, odnosno 1 i 2 izvršen presjek, a struje grana postale su struje čvora.

Slijedi ispisivanje jednađžbi za sistem sa slike 124.

$$[\bar{I}_1] = ([\bar{Y}_{p1}] + [\bar{Y}_u]) [\bar{V}_1] - [\bar{Y}_u] [\bar{V}_2] \quad 6-1a$$

$$[\bar{I}_2] = [\bar{Y}_u] [\bar{V}_1] - ([\bar{Y}_{p2}] + [\bar{Y}_u]) [\bar{V}_2] \quad b$$

$$[\bar{I}_A] = -([\bar{Y}_{Ae}] + [\bar{Y}_{A-B}]) [\bar{V}_A] + [\bar{Y}_{A-B}] [\bar{V}_B] + [\bar{Y}_{Ae}] [\bar{E}_A] \quad c$$

$$[\bar{I}_B] = -[\bar{Y}_{A-B}] [\bar{V}_A] + ([\bar{Y}_{Be}] + [\bar{Y}_{A-B}]) [\bar{V}_B] - [\bar{Y}_{Be}] [\bar{E}_B] \quad d$$

$$[\bar{I}_{Ae}] = -[\bar{Y}_{Ae}] [\bar{V}_A] + [\bar{Y}_{Ae}] [\bar{E}_A] \quad e$$

$$[\bar{I}_{Be}] = [\bar{Y}_{Be}] [\bar{V}_B] - [\bar{Y}_{Be}] [\bar{E}_B] \quad f$$

Dobili smo 18 jednađžbi s 30 nepoznanica. Za bilo koji pogonski slučaj postavljamo uvjete povezivanja čvora 1 sa čvorom A i čvora 2 sa čvorom B.

U slučaju bez prekida uvjeti povezivanja su:

$$[\bar{I}_A] = [\bar{I}_1] \quad 6-2a$$

$$[\bar{I}_B] = [\bar{I}_2] \quad b$$

$$[\bar{V}_A] = [\bar{V}_1] \quad c$$

$$[\bar{V}_B] = [\bar{V}_2] \quad d$$

što predstavlja dodatnih 12 jednađžbi. Ako uvrstimo 6-2a-d u 6-1a-f dobijemo 18 jednađžbi s 18 nepoznanica. U jednađžbama 6-1a-d ne pojavljuju se struje $\bar{I}_{Ae}$ i struje $\bar{I}_{Be}$, pa možemo najprije riješiti sustav jednađžbi 6-1a-d, a nakon toga 6-1e-f.

Problem smo sveli na rješavanje sustava od 12 jednažbi s 12 nepoznanica.

I za sve ostale slučajeve povezivanja voda 1-2 s mrežom u čvorovima A-B svodimo sustav jednažbi na 18 jednažbi s 18 nepoznanica, odnosno na sustav jednažbi od 12 jednažbi s 12 nepoznanica.

Uvjeti povezivanja čvora 1 sa čvorom A i čvora 2 sa čvorom B u slučaju iskapčanja faze su:

$$\bar{I}_1^a = \bar{I}_2^a = \bar{I}_A^a = \bar{I}_B^a = 0 \quad 6-3a$$

$$\bar{I}_A^b = \bar{I}_1^b \quad b$$

$$\bar{I}_A^c = \bar{I}_1^c \quad c$$

$$\bar{I}_B^b = \bar{I}_2^b \quad d$$

$$\bar{I}_B^c = \bar{I}_2^c \quad e$$

$$\bar{V}_A^b = \bar{V}_1^b \quad f$$

$$\bar{V}_A^c = \bar{V}_1^c \quad g$$

$$\bar{V}_B^b = \bar{V}_2^b \quad h$$

$$\bar{V}_B^c = \bar{V}_2^c \quad i$$

Uvedimo:

$$[\bar{Y}_{p1}] + [\bar{Y}_u] = [\bar{Y}_1] \quad 6-4a$$

$$[\bar{Y}_{p2}] + [\bar{Y}_u] = [\bar{Y}_2] \quad b$$

$$[\bar{Y}_{Ae}] + [\bar{Y}_{A-B}] = [\bar{Y}_A] \quad c$$

$$[\bar{Y}_{Be}] + [\bar{Y}_{A-B}] = [\bar{Y}_B] \quad d$$

$\overline{Y}_1^{aa}$		$\overline{Y}_1^{ab}$	$\overline{Y}_1^{ac}$	$-\overline{Y}_u^{aa}$		$-\overline{Y}_u^{ab}$	$-\overline{Y}_u^{ac}$					0
$\overline{Y}_1^{ba}$		$\overline{Y}_1^{bb}$	$\overline{Y}_1^{bc}$	$-\overline{Y}_u^{ba}$		$-\overline{Y}_u^{bb}$	$-\overline{Y}_u^{bc}$	$-1,0$ $0,0$				0
$\overline{Y}_1^{ca}$		$\overline{Y}_1^{cb}$	$\overline{Y}_1^{cc}$	$-\overline{Y}_u^{ca}$		$-\overline{Y}_u^{cb}$	$-\overline{Y}_u^{cc}$	$-1,0$ $0,0$				0
$-\overline{Y}_u^{aa}$		$-\overline{Y}_u^{ab}$	$-\overline{Y}_u^{ac}$	$\overline{Y}_2^{aa}$		$\overline{Y}_2^{ab}$	$\overline{Y}_2^{ac}$					0
$-\overline{Y}_u^{ba}$		$-\overline{Y}_u^{bb}$	$-\overline{Y}_u^{bc}$	$\overline{Y}_2^{ba}$		$\overline{Y}_2^{bb}$	$\overline{Y}_2^{bc}$		$1,0$ $0,0$			0
$-\overline{Y}_u^{ca}$		$-\overline{Y}_u^{cb}$	$-\overline{Y}_u^{cc}$	$\overline{Y}_2^{ca}$		$\overline{Y}_2^{cb}$	$\overline{Y}_2^{cc}$			$1,0$ $0,0$		0
	$\overline{Y}_A^{aa}$	$\overline{Y}_A^{ab}$	$\overline{Y}_A^{ac}$		$-\overline{Y}_{A-B}^{aa}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{ab}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{ac}$					$[\overline{Y}_{Ae}^a][\overline{E}_A]$
	$\overline{Y}_A^{ba}$	$\overline{Y}_A^{bb}$	$\overline{Y}_A^{bc}$		$-\overline{Y}_{A-B}^{ba}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{bb}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{bc}$	$1,0$ $0,0$				$[\overline{Y}_{Ae}^b][\overline{E}_A]$
	$\overline{Y}_A^{ca}$	$\overline{Y}_A^{cb}$	$\overline{Y}_A^{cc}$		$-\overline{Y}_{A-B}^{ca}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{cb}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{cc}$	$1,0$ $0,0$				$[\overline{Y}_{Ae}^c][\overline{E}_A]$
	$-\overline{Y}_{A-B}^{aa}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{ab}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{ac}$		$\overline{Y}_B^{aa}$	$\overline{Y}_B^{ab}$	$\overline{Y}_B^{ac}$					$[\overline{Y}_{Be}^a][\overline{E}_B]$
	$-\overline{Y}_{A-B}^{ba}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{bb}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{bc}$		$\overline{Y}_B^{ba}$	$\overline{Y}_B^{bb}$	$\overline{Y}_B^{bc}$		$-1,0$ $0,0$			$[\overline{Y}_{Be}^b][\overline{E}_B]$
	$-\overline{Y}_{A-B}^{ca}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{cb}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{cc}$		$\overline{Y}_B^{ca}$	$\overline{Y}_B^{cb}$	$\overline{Y}_B^{cc}$			$-1,0$ $0,0$		$[\overline{Y}_{Be}^c][\overline{E}_B]$

Proširena matrica koeficijenata jednađbi u kojima nepoznanice su redom:

$$\bar{V}_1^a, \bar{V}_A^a, \bar{V}_A^b, \bar{V}_A^c, \bar{V}_2^a, \bar{V}_B^a, \bar{V}_B^b, \bar{V}_B^c, \bar{V}_A^b, \bar{V}_A^c, \bar{V}_B^b, \bar{V}_B^c,$$

glasi prema 6-5, u kojoj su $[\bar{Y}_{Ae}^a]$, $[\bar{Y}_{Ae}^b]$ i $[\bar{Y}_{Ae}^c]$ redni vektori matrice $[\bar{Y}_{Ae}]$.

6.2.2 Model idealne mreže

Utjecaj poprečnih grana dalekovoda ispitat ćemo na mreži u kojoj smo pretpostavili da je:

$$[\bar{Y}_{p1}] = [\bar{Y}_{p2}] = [\bar{Y}_p] \quad 6-6a$$

$$[\bar{Y}_{Ae}] = [\bar{Y}_{Be}] = [\bar{Y}_E] \quad b$$

i da su međusobno jednaki dijagonalni članovi i međusobno jednaki izvandijagonalni članovi u svim matricama vlastitih i međusobnih admitancija, koje se pojavljuju u proračunu.

Uvedimo dalje da je:

$$[\bar{I}_1] + [\bar{I}_2] = [\bar{I}_{12}] \quad 6-7a$$

$$[\bar{I}_A] + [\bar{I}_B] = [\bar{I}_{AB}] \quad b$$

$$[\bar{I}_{Ae}] + [\bar{I}_{Be}] = [\bar{I}_{ABe}] \quad c$$

$$[\bar{V}_1] - [\bar{V}_2] = [\bar{V}_{12}] \quad d$$

$$[\bar{V}_A] - [\bar{V}_B] = [\bar{V}_{AB}] \quad e$$

$$[\bar{E}_A] - [\bar{E}_B] = [\bar{E}_{AB}] \quad f$$

Sada relacije 6-1a-f prelaze u:

$$[\bar{I}_{12}] = (2[\bar{Y}_u] + [\bar{Y}_p])[\bar{V}_{12}] \quad 6-8a$$

$$[\bar{I}_{AB}] = -(2[\bar{Y}_{A-B}] + [\bar{Y}_E])[\bar{V}_{AB}] + [\bar{Y}_E][\bar{E}_{AB}] \quad b$$

$$[\bar{I}_{ABe}] = [\bar{Y}_E](\bar{V}_{AB} - \bar{E}_{AB}) \quad c$$

Relacije 6-8abc predstavljaju sustav od 9 jednažbi s 15 nepoznanica, odnosno relacije 6-8ab predstavljaju sustav od 6 jednažbi s 12 nepoznanica.

Uvedimo dalje da je:

$$2[\bar{Y}_u] + [\bar{Y}_p] = [\bar{Y}_{12}] \quad 6-9a$$

$$2[\bar{Y}_{A-B}] + [\bar{Y}_E] = [\bar{Y}_{AB}] \quad b$$

Sustav jednažbi 6-8abc pišemo sada jednostavno

$$[\bar{I}_{12}] = [\bar{Y}_{12}][\bar{V}_{12}] \quad 6-10a$$

$$[\bar{I}_{AB}] = -[\bar{Y}_{AB}][\bar{V}_{AB}] + [\bar{Y}_E][\bar{E}_{AB}] \quad b$$

$$[\bar{I}_{ABe}] = [\bar{Y}_E](\bar{V}_{AB} - \bar{E}_{AB}) \quad c$$

Za slučaj iskopčane faze a postavljamo 6 uvjeta

$$\bar{I}_{12}^a = \bar{I}_{AB}^a = 0 \quad 6-11a$$

$$\bar{I}_{12}^b = \bar{I}_{AB}^b \quad b$$

$$\bar{I}_{12}^c = \bar{I}_{AB}^c \quad c$$

$$\bar{V}_{12}^b = \bar{V}_{AB}^b \quad 6-11d$$

$$\bar{V}_{12}^c = \bar{V}_{AB}^c \quad e$$

Uvrstimo 6-11a-e u 6-10a-c. Dobili smo sustav od 9 jednađžbi s 9 nepoznanica, odnosno sustav od 6 jednađžbi sa 6 nepoznanica. Nepoznanice su:

$$\bar{V}_{12}^a, \bar{V}_{AB}^a, \bar{V}_{AB}^b, \bar{V}_{AB}^c, \bar{I}_{AB}^b, \bar{I}_{AB}^c, \bar{I}_{ABe}^a, \bar{I}_{ABe}^b, \bar{I}_{ABe}^c$$

odnosno

$$\bar{V}_{12}^a, \bar{V}_{AB}^a, \bar{V}_{AB}^b, \bar{V}_{AB}^c, \bar{I}_{AB}^b, \bar{I}_{AB}^c$$

Uz malo truda može se eliminiranjem dobiti sustav od 3 jednađžbe s 3 nepoznanice. Te nepoznanice su:

$$\bar{V}_{AB}^a, \bar{V}_{AB}^b, \bar{V}_{AB}^c$$

a proširena matrica koeficijenata tog sustava jednađžbi je prema 6-12.

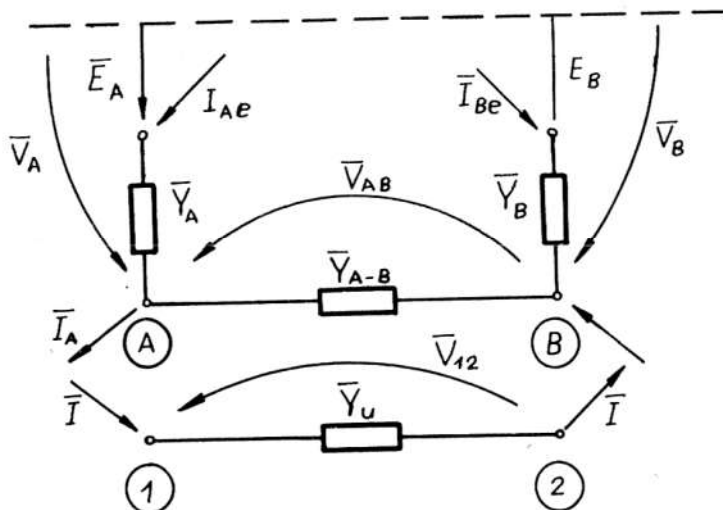
$\bar{Y}_{AB}^s$	$\bar{Y}_{AB}^m$	$\bar{Y}_{AB}^m$	$(\bar{Y}_E^s - \bar{Y}_E^m) \bar{E}_{AB}^a$
$\bar{Y}_{AB}^m$	$\bar{Y}_{AB}^s - \frac{(\bar{Y}_{12}^m)^2}{\bar{Y}_{12}^s} + \bar{Y}_{12}^s$	$\bar{Y}_{AB}^m - \frac{(\bar{Y}_{12}^m)^2}{\bar{Y}_{12}^s} + \bar{Y}_{12}^m$	$(\bar{Y}_E^s - \bar{Y}_E^m) \bar{E}_{AB}^b$
$\bar{Y}_{AB}^n$	$\bar{Y}_{AB}^m - \frac{(\bar{Y}_{12}^m)^2}{\bar{Y}_{12}^s} + \bar{Y}_{12}^m$	$\bar{Y}_{AB}^s - \frac{(\bar{Y}_{12}^m)^2}{\bar{Y}_{12}^s} + \bar{Y}_{12}^s$	$(\bar{Y}_E^s - \bar{Y}_E^m) \bar{E}_{AB}^c$

Iz matrice koeficijenata možemo zaključiti slijedeće:

- 1) Matrica koeficijenata je simetrična matrica. Međutim, razlike u dijagonalnim elementima međusobno i izvandijagonalnim elementima međusobno su takove da se primjenom simetrične transformacije ne može dobiti dijagonalna matrica, pa prema tome ni nezavisni sistemi simetričnih komponenata. Ovo je razumljivo, jer je nesimetrija uključena u matricu.
- 2) Utjecaj poprečnih grana dalekovoda je zanemariv. U računu se poprečna admitancija zbraja uzdužnoj i ovu povećava odnosno smanjuje, samo za nekoliko postotaka.

6.2.3 Zanemarena poprečna grana

- U ovom slučaju model mreže sa slike 124b prelazi u model mreže sa slike 125. Ovdje moramo uočiti da se ne može izračunati napon prema zemlji točaka 1 i 2 iskopčane faze, jer je to neodređena veličina. Može se samo izračunati razlika napona između točaka 1 i 2 iskopčane faze:



Slika 125.- Jednofazna ekvivalentna shema mreže kada su zanemarene poprečne grane pogodjenog dalekovoda

$\overline{Y}_u^s$		$\overline{Y}_u^m$	$\overline{Y}_u^m$	$\overline{Y}_u^m$		$-\overline{Y}_u^m$	$-\overline{Y}_u^m$			0
$\overline{Y}_u^m$		$\overline{Y}_u^s$	$\overline{Y}_u^m$	$\overline{Y}_u^m$		$-\overline{Y}_u^s$	$-\overline{Y}_u^m$	$-1,0$ $0,0$		0
$\overline{Y}_u^m$		$\overline{Y}_u^m$	$\overline{Y}_u^s$	$\overline{Y}_u^s$		$-\overline{Y}_u^m$	$-\overline{Y}_u^s$	$-1,0$ $0,0$		0
	$\overline{Y}_A^{aa}$	$\overline{Y}_A^{ab}$	$\overline{Y}_A^{ac}$	$\overline{Y}_A^{ac}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{aa}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{ab}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{ac}$			$[\overline{Y}_{Ae}^a] [\overline{E}_A]$
	$\overline{Y}_A^{ba}$	$\overline{Y}_A^{bb}$	$\overline{Y}_A^{bc}$	$\overline{Y}_A^{bc}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{ba}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{bb}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{bc}$	$1,0$ $0,0$		$[\overline{Y}_{Ae}^b] [\overline{E}_A]$
	$\overline{Y}_A^{ca}$	$\overline{Y}_A^{cb}$	$\overline{Y}_A^{cc}$	$\overline{Y}_A^{cc}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{ca}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{cb}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{cc}$	$1,0$ $0,0$		$[\overline{Y}_{Ae}^c] [\overline{E}_A]$
	$-\overline{Y}_{A-B}^{aa}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{ab}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{ac}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{ac}$	$\overline{Y}_B^{aa}$	$\overline{Y}_B^{ab}$	$\overline{Y}_B^{ac}$			$[\overline{Y}_{Be}^a] [\overline{E}_B]$
	$-\overline{Y}_{A-B}^{ba}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{bb}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{bc}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{bc}$	$\overline{Y}_B^{ba}$	$\overline{Y}_B^{bb}$	$\overline{Y}_B^{bc}$	$-1,0$ $0,0$		$[\overline{Y}_{Be}^b] [\overline{E}_B]$
	$-\overline{Y}_{A-B}^{ca}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{cb}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{cc}$	$-\overline{Y}_{A-B}^{cc}$	$\overline{Y}_B^{ca}$	$\overline{Y}_B^{cb}$	$\overline{Y}_B^{cc}$	$-1,0$ $0,0$		$[\overline{Y}_{Be}^c] [\overline{E}_B]$

$$[\bar{V}_{12}] = [\bar{V}_1] - [\bar{V}_2]$$

Tada sistem 124a-s od 18 jednađžbi s 18 nepoznanica prelazi u sistem od 15 jednađžbi s 15 nepoznanica. Ako izostavimo zadnjih 6 imamo sistem od 9 jednađžbi s 9 nepoznanica. Proširena je matrica ovog sistema jednađžbi, prema 6-13.

Model mreže prema slici 125. možemo promatrati u simetričnim komponentama. Pošto u ovom slučaju vrijedi:

$$[\bar{I}_1] = [\bar{I}_2] = [\bar{I}] \quad 6-14$$

$$\bar{I}^a = 0, \quad 6-15$$

to za razlike napona možemo napisati:

$$\bar{V}_{12}^a = \bar{Z}_u^m \bar{I}^b + \bar{Z}_u^m \bar{I}^c \quad 6-16a$$

$$\bar{V}_{12}^b = \bar{Z}_u^s \bar{I}^b + \bar{Z}_u^m \bar{I}^c = \bar{V}_{AB}^b \quad b$$

$$\bar{V}_{12}^c = \bar{Z}_u^m \bar{I}^b + \bar{Z}_u^s \bar{I}^c = \bar{V}_{AB}^c \quad c$$

Relacije 6-16b i c izrazimo sa simetričnim komponentama

$$a^2 \bar{V}_{AB}^1 + a \bar{V}_{AB}^2 + \bar{V}_{AB}^0 = \bar{Z}_u^s (a^2 \bar{I}^1 + a \bar{I}^2 + \bar{I}^0) + \bar{Z}_u^m (a \bar{I}^1 + a^2 \bar{I}^2 + \bar{I}^0) \quad 6-17a$$

$$a \bar{V}_{AB}^1 + a^2 \bar{V}_{AB}^2 + \bar{V}_{AB}^0 = \bar{Z}_u^m (a^2 \bar{I}^1 + a \bar{I}^2 + \bar{I}^0) + \bar{Z}_u^s (a \bar{I}^1 + a^2 \bar{I}^2 + \bar{I}^0) \quad b$$

Zbrajanjem i odbijanjem jednađžbi 6-17a i 6-17b, te uz uvažavanje da je $\bar{I}^a = 0$, dobit ćemo uvjete povezivanja u čvorovima A i B:

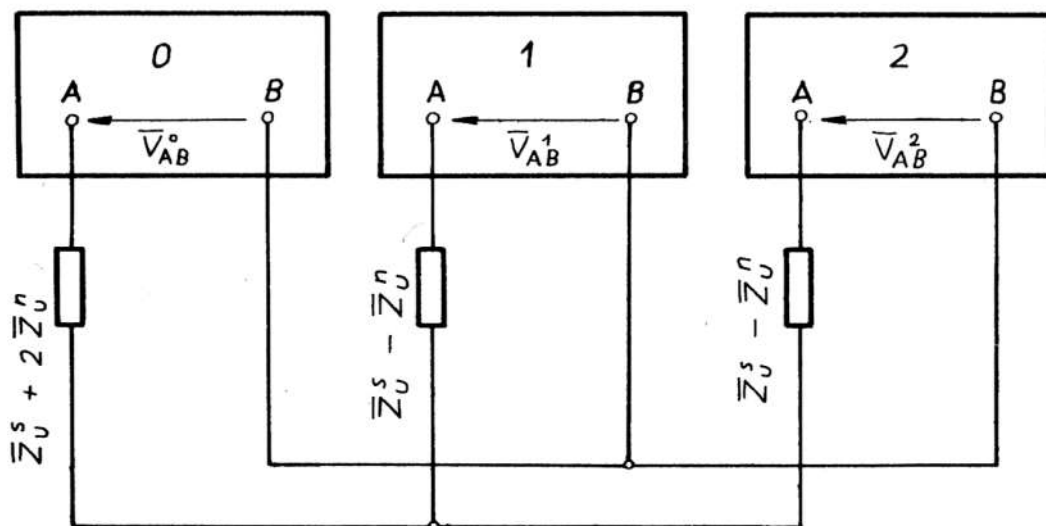
$$\bar{I}^0 + \bar{I}^1 + \bar{I}^2 = 0 \quad 6-18a$$

$$\bar{V}_{AB}^1 - (\bar{Z}_u^s - \bar{Z}_u^m) \bar{I}^1 = \bar{V}_{AB}^2 - (\bar{Z}_u^s - \bar{Z}_u^m) \bar{I}^2 = \bar{V}_{AB}^0 - (\bar{Z}_u^s + 2\bar{Z}_u^m) \bar{I}^0 \quad b$$

odnosno

$$\bar{V}_{AB}^1 - \bar{Z}_u^1 \bar{I}^1 = \bar{V}_{AB}^2 - \bar{Z}_u^2 \bar{I}^2 = \bar{V}_{AB}^0 - \bar{Z}_u^0 \bar{I}^0 \quad c$$

Na slici 126 povezani su sistemi komponentata prema uvjetima koje daju relacije 6-18a i 6-18b.

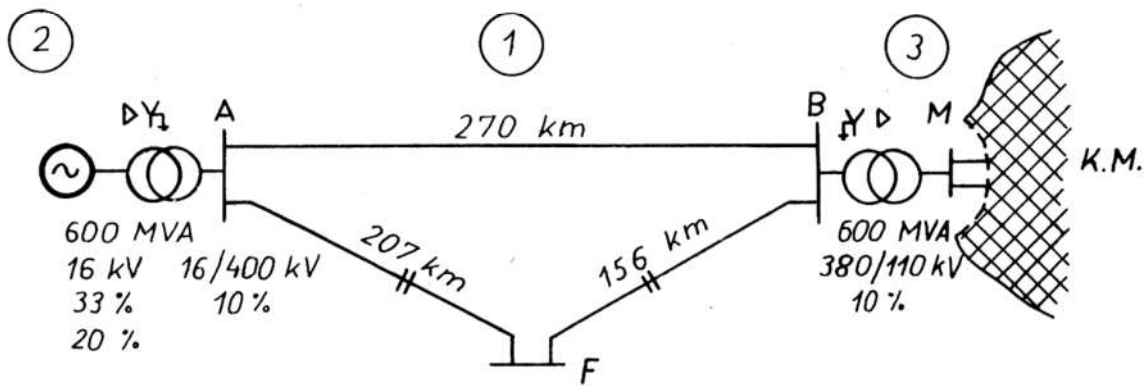


Slika 126.- Povezivanje sistema komponentata mreže prema relacijama 6-18a i 6-18b

Slijedi računanje struja i napona originalnog sistema.

Daljnje je zanemarenje ako pretpostavimo da je $\bar{Z}_u^m = 0$ ili, što se često radi, da su sve tri impedancije jednake pogonskoj impedanciji. Ovo nema nikakvog smisla, jer ne pojednostavnjuje proračun, a daje krive rezultate.

Primjer 6.1 U mreži sa slike 127 iskopčana je faza a dalekovo-
da A-B. Osim podataka na slici poznata je uzdužna matrica ekvi-
valentnih faznih vodiča $[\bar{Z}_u]$ i poprečna matrica ekvivalentnih
faznih vodiča $[\bar{Y}_p]$ za vod A-B, te inverzne matrice ovih matrica,
tj. $[\bar{Y}_u]$ i $[\bar{Z}_p]$. Za vodove A-C i C-B treba pretpostaviti iste
parametre kao i za vod A-B.



Slika 127. - Zadana mreža

Proračun treba dati podatke o električnim prilikama na pogo-
djenom vođu u jednom odredjenom momentu, koji je definiran iz-
nosom i kutem elektromotorne sile generatora u odnosu na napon
krute mreže kao referentni.

Radi pojednostavnjenja računa, u primjeru ćemo zanemariti os-
tale poprečne grane u mreži.

Račun ćemo provesti u jediničnim vrijednostima:

$$\bar{E} = 17,9424 + j 12,8224$$

$$\bar{U}_D = 110,0 + j 0 \quad |kV|$$

$$[\bar{z}_u] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 33,66375 & 25,19201 & 25,19201 \\ 128,95886 & 41,07715 & 41,07715 \\ \hline 25,19201 & 33,66375 & 25,19201 \\ 41,07715 & 128,95886 & 41,07715 \\ \hline 25,19201 & 15,19201 & 33,66375 \\ 41,07715 & 41,07715 & 128,95886 \\ \hline \end{array} \quad |\Omega|$$

$$[\bar{y}_p] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0,62321 & 0,37336 & 0,37336 \\ 435,72320 & -42,75814 & -42,75814 \\ \hline 0,37336 & 0,62321 & 0,37336 \\ -42,75814 & 435,72320 & -42,75814 \\ \hline 0,37336 & 0,37336 & 0,62321 \\ -42,75814 & -42,75814 & 435,72320 \\ \hline \end{array} \quad 10^{-6} |S|$$

$$[\bar{y}_u] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1267,151 & 180,324 & 180,324 \\ -8879,054 & 2395,155 & 2395,155 \\ \hline 180,324 & 1267,151 & 180,324 \\ 2395,155 & -8879,054 & 2395,155 \\ \hline 180,324 & 180,324 & 1267,151 \\ 2395,155 & 2395,155 & -8879,054 \\ \hline \end{array} \quad 10^{-6} |S|$$

$$[\bar{z}_p] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 4,435 & 3,342 & 3,342 \\ -2344,121 & -252,457 & -252,457 \\ \hline 3,342 & 4,435 & 3,342 \\ -252,457 & -2344,121 & -252,457 \\ \hline 3,342 & 3,342 & 4,435 \\ -252,457 & -252,457 & -2344,121 \\ \hline \end{array} \quad |\Omega|$$

Izračunajmo bazne i jedinične vrijednosti:

$$S_B = 400 \text{ MVA}$$

$$U_{B1} = 400 \text{ kV}$$

$$U_{B2} = 16 \text{ kV}$$

$$U_{B3} = 115,789 \text{ kV}$$

$$Z_{B1} = 400 \text{ } \Omega$$

$$Z_{B2} = 0,64$$

$$Z_{B3} = 33,518 \text{ } \Omega$$

Izračunajmo jedinične vrijednosti:

$$\bar{e} = 1,1214 + j 0,8014$$

$$\bar{u} = 0,95$$

$$x_G^1 = 0,22$$

$$x_G^2 = 0,1333$$

$$x_{TA} = 0,0667$$

$$x_{TB} = 0,0602$$

$$[\bar{z}_u] =$$

0,0842	0,063	0,063
0,3224	0,1027	0,1027
0,063	0,0842	0,063
0,1027	0,3224	0,1027
0,063	0,063	0,0842
0,1027	0,1027	0,3224

$$[\bar{y}_p] =$$

0,0002	0,0001	0,0001
0,1743	-0,0171	-0,0171
0,0001	0,0002	0,0001
-0,0171	0,1743	-0,0171
0,0001	0,0001	0,0002
-0,0171	-0,0171	0,1743

$$[\bar{y}_u] = \begin{bmatrix} 0,5069 & 0,0721 & 0,0721 \\ -3,5516 & 0,9581 & 0,9581 \\ 0,0721 & 0,5069 & 0,0721 \\ 0,9581 & -3,6616 & 0,9581 \\ 0,0721 & 0,0721 & 0,5069 \\ 0,9581 & 0,9581 & -3,5516 \end{bmatrix}$$

$$[\bar{z}_p] = \begin{bmatrix} 0,0110 & 0,0084 & 0,0084 \\ -5,8603 & -0,6311 & -0,6311 \\ 0,0084 & 0,0110 & 0,0084 \\ -0,6311 & -5,8603 & -0,6311 \\ 0,0084 & 0,0084 & 0,0110 \\ -0,6311 & -0,6311 & -5,8603 \end{bmatrix}$$

Matrica bloka generator-transformator izgleda ovako:

$$x_A^1 = x_G^1 + x_{TA}^1 = 0,22 + 0,0667 = 0,2867$$

$$x_A^2 = x_G^2 + x_{TA}^2 = 0,1333 + 0,0667 = 0,2$$

$$x_A^0 = x_{TA}^0 = 0,0667$$

$$[\bar{z}_{Ae}^{012}] = \begin{bmatrix} j0,0667 & & \\ & j0,2867 & \\ & & j0,2 \end{bmatrix}$$

$$[\bar{y}_{Ae}^{012}] = \begin{bmatrix} -j14,9925 & & \\ & -j3,488 & \\ & & -j5,0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{y}_{Ae}^{aa} = \frac{1}{3} (\bar{y}^{00} + \bar{y}^{11} + \bar{y}^{22}) = -j7,8268$$

$$\bar{y}_{Ae}^{ab} = \frac{1}{3} (\bar{y}^{00} + a \bar{y}^{11} + a^2 \bar{y}^{22}) = -0,4365 - j3,5828$$

$$\bar{y}_{Ae}^{ba} = \frac{1}{3} (\bar{y}^{00} + a^2 \bar{y}^{11} + a \bar{y}^{22}) = -0,4365 - j3,5828$$

$$[\bar{y}_{Ae}^{abc}] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0,0 & -0,4365 & 0,4365 \\ \hline -7,8268 & -3,5828 & -3,5828 \\ \hline 0,4365 & 0,0 & -0,4365 \\ \hline -3,5828 & -7,8268 & -3,5828 \\ \hline -0,4365 & 0,4365 & 0,0 \\ \hline -3,5828 & -3,5828 & -7,8268 \\ \hline \end{array}$$

$$[\bar{y}_{Be}^{abc}] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -j16,6113 & & \\ \hline & -j16,6113 & \\ \hline & & -j16,6113 \\ \hline \end{array}$$

$$[\bar{y}_{A-B}^{abc}] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0,7547 & 0,1073 & 0,1073 \\ \hline -5,2879 & 1,4265 & 1,4265 \\ \hline 0,1073 & 0,7547 & 0,1073 \\ \hline 1,4265 & -5,2879 & 1,4265 \\ \hline 0,1073 & 0,1073 & 0,7574 \\ \hline 1,4265 & 1,4265 & -5,2879 \\ \hline \end{array}$$

$$\bar{y}_u^s + \bar{y}_p^s = 0,5071 - j 3,3773$$

$$\bar{y}_u^m + \bar{y}_p^m = 0,0722 + j 0,941$$

$$\bar{y}_{Ae}^s + \bar{y}_{A-B}^s = 0,7547 - j 13,1147$$

$$\bar{y}_{Ae}^{m1} + \bar{y}_{A-B}^m = -0,3292 - j 2,1563$$

$$\bar{y}_{Ae}^{m2} + \bar{y}_{A-B}^m = 0,5438 - j 2,1563$$

$$\bar{y}_{Be}^{m1} + \bar{y}_{A-B}^m = \bar{y}_{Be}^{m2} + \bar{y}_{A-B}^m = 0,1073 + j 1,4265$$

$$\bar{y}_{Be}^s + \bar{y}_{A-B}^s = 0,7547 - j 21,8992$$

$$\bar{e}_A^a = 1,1214 + j 0,8014$$

$$\bar{e}_A^b = 0,1333 - j 1,3718$$

$$\bar{e}_A^c = -1,2547 + j 0,5704$$

$$\bar{e}_B^a = 0,95$$

$$\bar{e}_B^b = -0,475 - j 0,8227$$

$$\bar{e}_B^c = -0,475 + j 0,8227$$

$$\bar{y}_{Ae}^{aa} \bar{e}_A^a + \bar{y}_{Ae}^{ab} \bar{e}_A^b + \bar{y}_{Ae}^{ac} \bar{e}_A^c = 2,7953 - j 3,9114$$

$$\bar{y}_{Ae}^{ba} \bar{e}_A^a + \bar{y}_{Ae}^{bb} \bar{e}_A^b + \bar{y}_{Ae}^{bc} \bar{e}_A^c = -4,7849 - j 0,465$$

$$\bar{y}_{Ae}^{ca} \bar{e}_A^a + \bar{y}_{Ae}^{cb} \bar{e}_A^b + \bar{y}_{Ae}^{cc} \bar{e}_A^c = 1,9896 + j 4,376$$

$$\bar{y}_{Be}^{aa} \bar{e}_B^a + \bar{y}_{Be}^{ab} \bar{e}_B^b + \bar{y}_{Be}^{ac} \bar{e}_B^c = 0,0 - j 15,7824$$

$$\bar{y}_{Be}^{ba} \bar{e}_B^a + \bar{y}_{Be}^{bb} \bar{e}_B^b + \bar{y}_{Be}^{bc} \bar{e}_B^c = -13,6676 + j 7,8912$$

$$\bar{y}_{Be}^{ca} \bar{e}_B^a + \bar{y}_{Be}^{cb} \bar{e}_B^b + \bar{y}_{Be}^{cc} \bar{e}_B^c = 13,6676 + j 7,8912$$

Ispišimo proširenu matricu koeficijenata prema tablici 6.1.

Tablica 6.1

0,5071 -3,3773		0,0722 0,941	0,0722 0,941	-0,5069 3,5516		-0,0721 -0,9581	-0,0721 -0,9581					0
0,0722 0,941		0,5071 -3,3773	0,0722 0,941	-0,0721 -0,9581		-0,5069 3,5516	-0,0721 -0,9581	-1,0 0,0				0
0,0722 0,941		0,0722 0,941	0,5071 -3,3773	-0,0721 -0,9581		-0,0721 -0,9581	-0,5069 3,5516	-1,0 0,0				0
-0,5069 3,5516		-0,0721 -0,9581	-0,0721 -0,9581	0,5071 -3,3773		0,0722 0,941	0,0722 0,941					0
-0,0721 -0,9581		-0,5069 3,5516	-0,0721 -0,9581	0,0722 0,941		0,5071 -3,3773	0,0722 0,941	1,0 0,0				0
-0,0721 -0,9581		-0,0721 -0,9581	-0,5069 3,5516	0,0722 0,941		0,0722 0,941	0,5071 -3,3773				1,0 0,0	0
	0,7547 -13,1147	-0,3292 -2,1563	0,5438 -2,1563		-0,7547 5,2879	-0,1073 -1,4265	-0,1073 -1,4265					2,7953 -3,9114
	0,5438 -2,1563	0,7547 -13,1147	-0,3292 -2,1563		-0,1073 -1,4265	-0,7547 5,2879	-0,1073 -1,4265	1,0 0,0				-4,7849 -0,465
	-0,3292 -2,1563	0,5438 -2,1563	0,7547 -13,1147		-0,1073 -1,4265	-0,7547 5,2879	-0,1073 5,2879	1,0 0,0				1,9896 4,376
	-0,7547 5,2879	-0,1073 -1,4265	-0,1073 -1,4265		0,7547 -21,8992	0,1073 1,4265	0,1073 1,4265					0,00 -15,7824
	-0,1073 -1,4265	-0,7547 5,2879	-0,1073 -1,4265		0,1073 1,4265	0,7547 -21,8992	0,1073 1,4265	-1,0 0,0				-13,6676 7,8912
	-0,1073 -1,4265	-0,1073 -1,4265	-0,7547 5,2879		0,1073 1,4265	0,1073 1,4265	0,7547 -21,8992				-1,0 0,0	-13,6676 7,8912

Rješenje jednažbi daje

$$\bar{v}_1^a = -0,1141 - j 0,0447$$

$$\bar{v}_A^a = 1,0402 + j 0,3263$$

$$\bar{v}_A^b = -0,2819 - j 1,0591$$

$$\bar{v}_A^c = -0,7666 + j 0,7527$$

$$\bar{v}_2^a = -0,0847 + j 0,0020$$

$$\bar{v}_B^a = 0,9692 + j 0,0933$$

$$\bar{v}_B^b = -0,3899 - j 0,9143$$

$$\bar{v}_B^c = -0,5906 + j 0,7991$$

$$\bar{i}_A^b = -0,1887 - j 0,6948$$

$$\bar{i}_A^c = -0,2150 + j 0,5365$$

$$\bar{i}_B^b = -0,5582 - j 0,6041$$

$$\bar{i}_B^c = 0,0903 + j 0,7580$$

i dalje

$$\bar{i}_{Ae}^a = 1,5511 - j 0,3171$$

$$\bar{i}_{Ae}^b = -1,1503 - j 1,5049$$

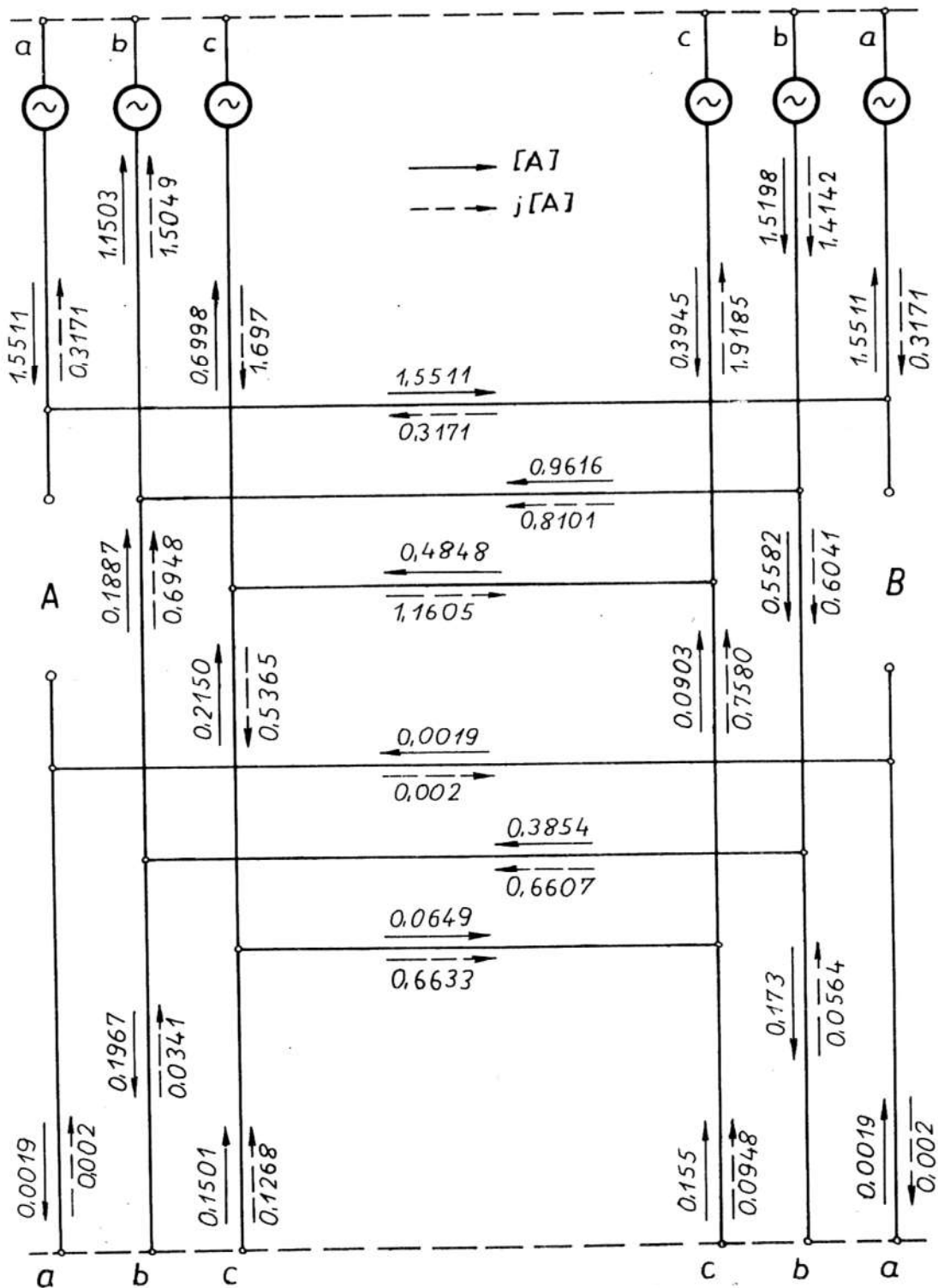
$$\bar{i}_{Ae}^c = -0,6998 + j 1,6970$$

$$\bar{i}_{Be}^a = 1,5511 - j 0,3171$$

$$\bar{i}_{Be}^b = -1,5198 - j 1,4142$$

$$\bar{i}_{Be}^c = -0,3945 + j 1,9185$$

Iz ovoga možemo lako izračunati ostale veličine. Rezultati su uneseni u trofaznu shemu mreže i dalekovoda na slici 128.



Slika 128, - Struje i naponi u mreži sa sl. 127 ako su uzete u obzir poprečne grane dalekovoda

U ovom primjeru kroz generatore ne teče nulta komponenta struje; u A zato, jer se tu nalazi stvarni generator (blok), a u B zato, jer je ekvivalentni generator vezan s prijenosom A-B preko transformatora u spoju zvijezda trokut i nema mogućnosti da se nulta komponenta struje generirana u 400 kV mreži prenese u 110 kV mrežu, bez obzira da li je ta mreža na nekom drugom mjestu uzemljena ili ne.

Nulta komponenta struje u A je:

$$\bar{i}_{Ae}^0 = \frac{1}{3} (\bar{i}_{Ae}^a + \bar{i}_{Ae}^b + \bar{i}_{Ae}^c) = -0,0997 - j 0,0417$$

Struja generatora u A je:

$$\bar{i}_{AG}^a = \bar{i}_{Ae}^a - \bar{i}_{Ae}^0 = 1,6508 - j 0,2754$$

$$\bar{i}_{AG}^b = \bar{i}_{Ae}^b - \bar{i}_{Ae}^0 = -1,0506 - j 1,4632$$

$$\bar{i}_{AG}^c = \bar{i}_{Ae}^c - \bar{i}_{Ae}^0 = -0,6001 + j 1,7387$$

Nulta komponenta struje u B je:

$$\bar{i}_{Be}^0 = \frac{1}{3} (\bar{i}_{Be}^a + \bar{i}_{Be}^b + \bar{i}_{Be}^c) = -0,1211 + j 0,0624$$

Struja generatora u B je:

$$\bar{i}_{BG}^a = \bar{i}_{Be}^a - \bar{i}_{Be}^0 = 1,6722 - j 0,3795$$

$$\bar{i}_{BG}^b = \bar{i}_{Be}^b - \bar{i}_{Be}^0 = -1,3987 - j 1,4766$$

$$\bar{i}_{BG}^c = \bar{i}_{Be}^c - \bar{i}_{Be}^0 = -0,2734 + j 1,8561$$

Snaga generatora u A je:

$$[\bar{s}_A] = [\bar{e}_A]^t [\bar{i}_{AG}^*] = \begin{bmatrix} 1,1214 & 0,1333 & -1,2547 \\ 0,8014 & -1,3718 & 0,5704 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1,6508 \\ 0,2754 \\ -1,0506 \\ 1,4632 \\ -0,6001 \\ -1,7387 \end{bmatrix} = 5,2424 + j4,9318$$

Snaga generatora u B je:

$$[\bar{s}_B] = [\bar{e}_B]^t [\bar{i}_{BG}^*] = \begin{bmatrix} 0,9500 & -0,4750 & -0,4750 \\ 0,0000 & -0,8227 & 0,8227 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1,6722 \\ 0,3795 \\ -1,3987 \\ 1,4766 \\ -0,2734 \\ -1,8561 \end{bmatrix} = 5,1246 + j1,4666$$

Primjer 6.2 Zadatak iz primjera 6.1. treba riješiti uz zanemarene poprečne grane dalekovoda.

Ispišimo proširenu matricu koeficijenata prema 6-13, tj. ispišimo tablicu 6.2.

Rješenje jednadžbi daje:

$$\begin{aligned} \bar{v}_{12}^a &= -0,0274 - j 0,0460 \\ \bar{v}_A^a &= 1,0340 + j 0,3252 \\ \bar{v}_A^b &= -0,2783 - j 1,0347 \\ \bar{v}_A^c &= -0,7538 + j 0,7320 \\ \bar{v}_B^a &= 0,9674 + j 0,0929 \\ \bar{v}_B^b &= -0,3870 - j 0,8983 \\ \bar{v}_B^c &= -0,5820 + j 0,7852 \\ \bar{i}^b &= -0,3486 - j 0,6533 \\ \bar{i}^c &= -0,0955 + j 0,6480 \end{aligned}$$

Tablica 6.2

0,5069 -3,5516		0,0721 0,9581	0,0721 0,9581		-0,0721 -0,9581	-0,0721 -0,9581			0
0,0721 0,9581		0,5069 -3,5516	0,0721 0,9581		-0,0721 3,5516	-0,0721 -0,9581	-1,0 0,0		0
0,0721 0,9581		0,0721 0,9581	0,5069 -3,5516		-0,0721 -0,9581	-0,5069 3,5516	-1,0 0,0		0
	0,7547 -13,1147	-0,3292 -2,1563	0,5438 -2,1563	-0,7547 5,2879	-0,1073 -1,4265	-0,1073 -1,4265			2,7953 -3,9114
	0,5438 -2,1563	0,7547 -13,1147	-3,3292 -2,1563	-0,1073 -1,4265	-0,7547 5,2879	-0,1073 -1,4265	1,0 0,0		-4,7849 -0,465
	-0,3292 -2,1563	0,5438 -2,1563	0,7547 -13,1147	-0,1073 -1,4265	-0,1073 -1,4265	-0,7547 5,2879	1,0 0,0		1,9896 4,376
	-0,7547 5,2879	-0,1073 -1,4265	-0,1073 -1,4265	0,7547 -21,8992	0,1073 1,4265	0,1073 1,4265			0,0 -15,7824
	-0,1073 -1,4265	-0,7547 5,2879	-0,1073 -1,4265	0,1073 1,4265	0,7547 -21,8992	0,1073 1,4265	-1,0 0,0		-13,6676 7,8912
	-0,1073 -1,4265	-0,1073 -1,4265	-0,7547 5,2879	0,1073 1,4265	0,7547 1,4265	0,7547 -21,8992	-1,0 0,0		-13,6676 7,8912

i dalje

$$\bar{i}_e^a = 1,5423 - j 0,2872$$

$$\bar{i}_e^b = -1,2546 - j 1,4619$$

$$\bar{i}_e^c = -0,6245 + j 1,7767$$

Iz ovoga možemo lako izračunati ostale veličine. Rezultati su unešeni u trofaznu shemu mreže i dalekovoda na slici 129.

Nulta komponenta struje u A, odnosno u B je:

$$\bar{i}_e^0 = \frac{1}{3} (\bar{i}_e^a + \bar{i}_e^b + \bar{i}_e^c) = -0,1123 + j0,0092$$

Struja generatora u A, odnosno u B je:

$$\bar{i}_G^a = \bar{i}_e^a - \bar{i}_e^0 = 1,6546 - j 0,2964$$

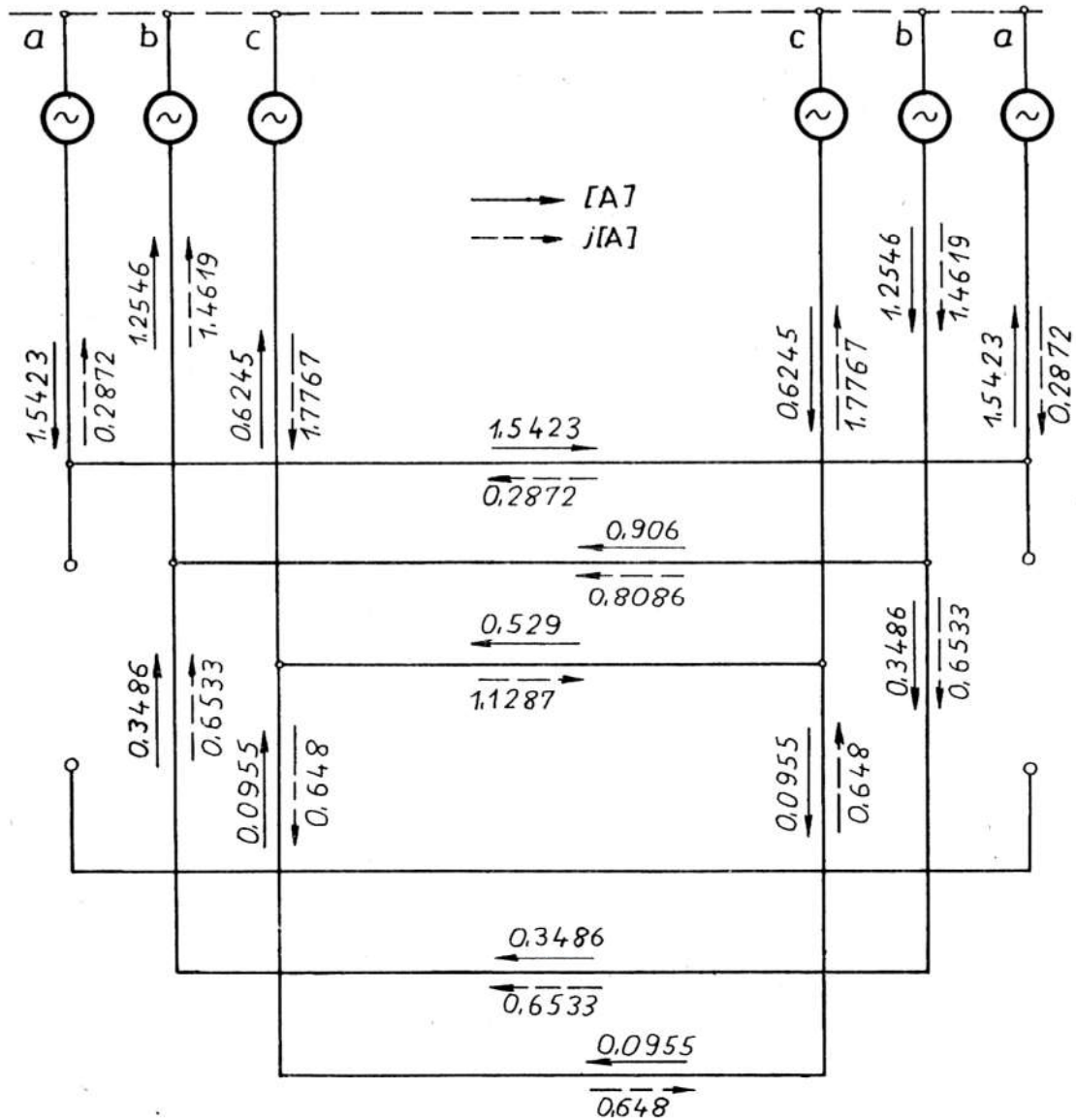
$$\bar{i}_G^b = \bar{i}_e^b - \bar{i}_e^0 = -1,1423 - j 1,4711$$

$$\bar{i}_G^c = \bar{i}_e^c - \bar{i}_e^0 = -0,5122 + j 1,7675$$

Snaga generatora u A je:

$$[\bar{s}_A] = [\bar{e}_A]^t [\bar{i}_G^*] = \begin{bmatrix} 1,1214 & 0,1333 & -1,2547 \\ 0,8014 & -1,3718 & 0,5704 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1,6546 \\ 0,2964 \\ -1,1423 \\ 1,4711 \\ -0,5122 \\ -1,7675 \end{bmatrix} = \boxed{5,1345 + j5,3470}$$

Snaga generatora u B je:



Slika 129.- Struje i naponi u mreži sa sl.127. ako nisu uzete u obzir poprečne grane dalekovoda

$$[\bar{s}_B] = [e_B]^t [i_G^*] = \begin{bmatrix} 0,9500 & -0,4750 & -0,4750 \\ 0,0000 & -0,8227 & 0,8227 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1,6546 \\ 0,2964 \\ -1,1423 \\ 1,4711 \\ -0,5122 \\ -1,7675 \end{bmatrix} = \boxed{5,0224 + j 0,9408}$$

Primjer 6.3 Zadatak iz primjera 6.1 treba riješiti u sistemu simetričnih komponenta.

Postavimo mreže direktnog, inverznog i nultog sistema komponenta i povežemo ih prema slici 126. Dobili smo mrežu koja je prikazana na slici 130a.

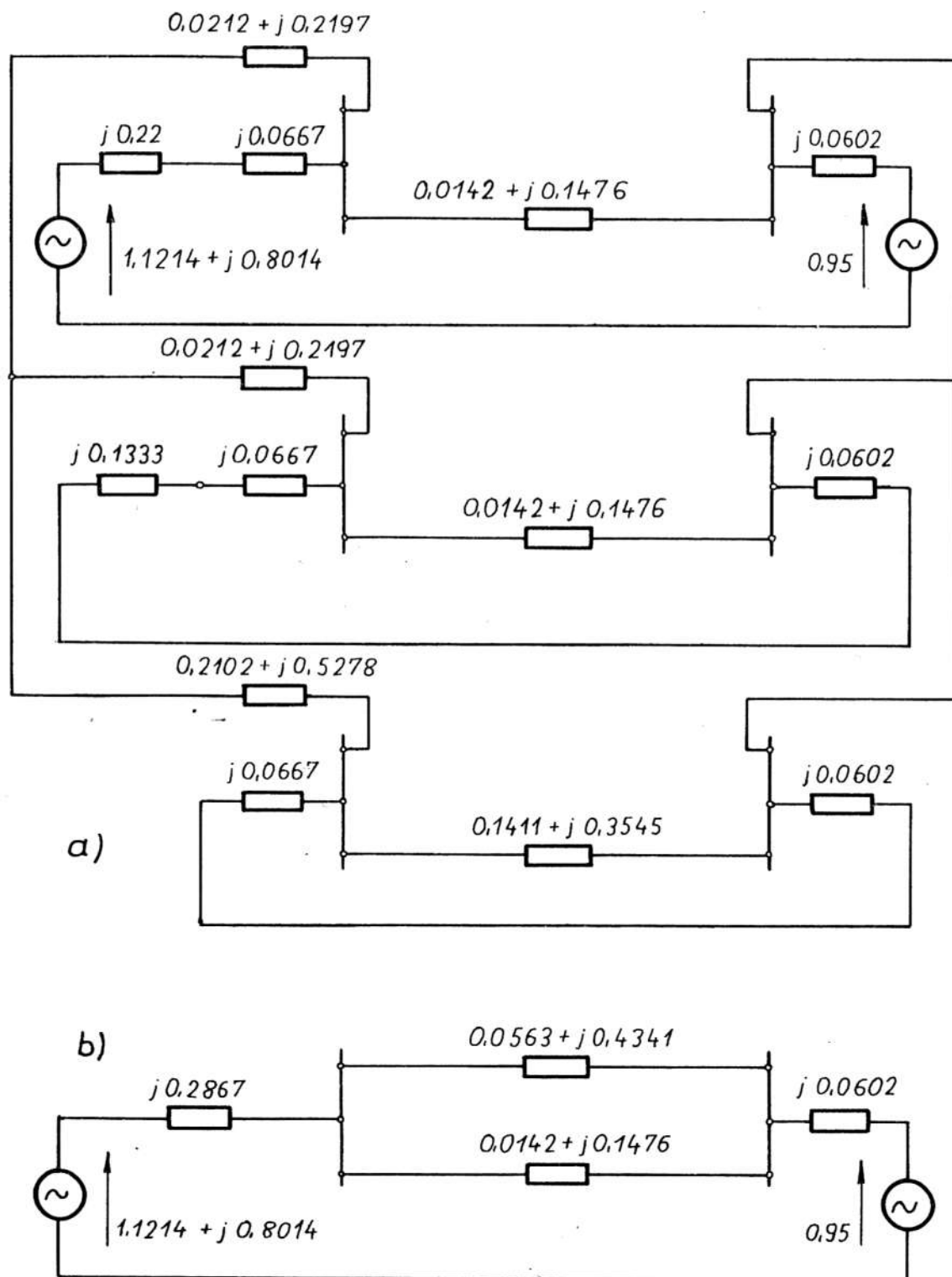
Sada izračunajmo impedanciju kvara tako da transfiguriramo inverzni i nulti sistem zajedno s impedancijama izvan sistema komponenta u jednu impedanciju. U našem slučaju to je impedancija $0,01411 + j 0,03545$, a uključuje se u direktni sistem između A i B (sl.130b). Slijedi računanje mreže sa slike 130b. Rezultati ovog proračuna uneseni su u ekvivalentnu shemu na slici 131a.

Iz raspodjele struja u mreži na slici 131a izračunajmo raspodjelu struja u cijeloj mreži komponenta sa slike 130a. Rezultati se nalaze na slici 131b. Po poznatim formulama vratimo se iz sistema komponenta u originalnu mrežu.

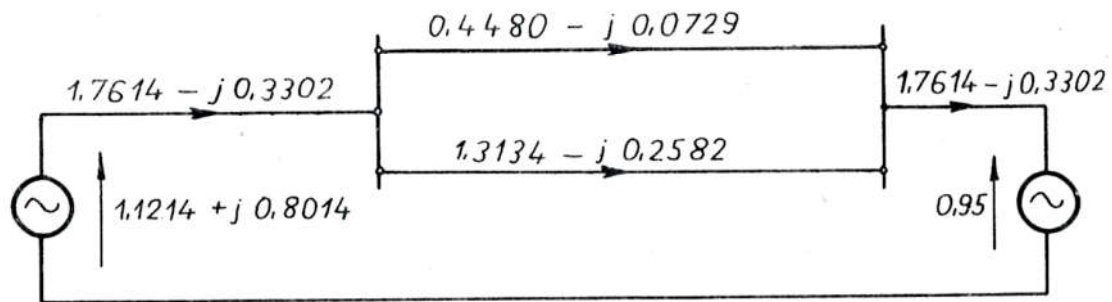
Radi usporedbe s rezultatima proračuna u primjerima 6.1 i 6.2 izračunajmo snage generatora:

$$\begin{aligned} \bar{s}_A &= (1,1214 + j 0,8014)(1,7614 + j 0,3302) = \\ &= 1,7106 + j 1,7819 \end{aligned}$$

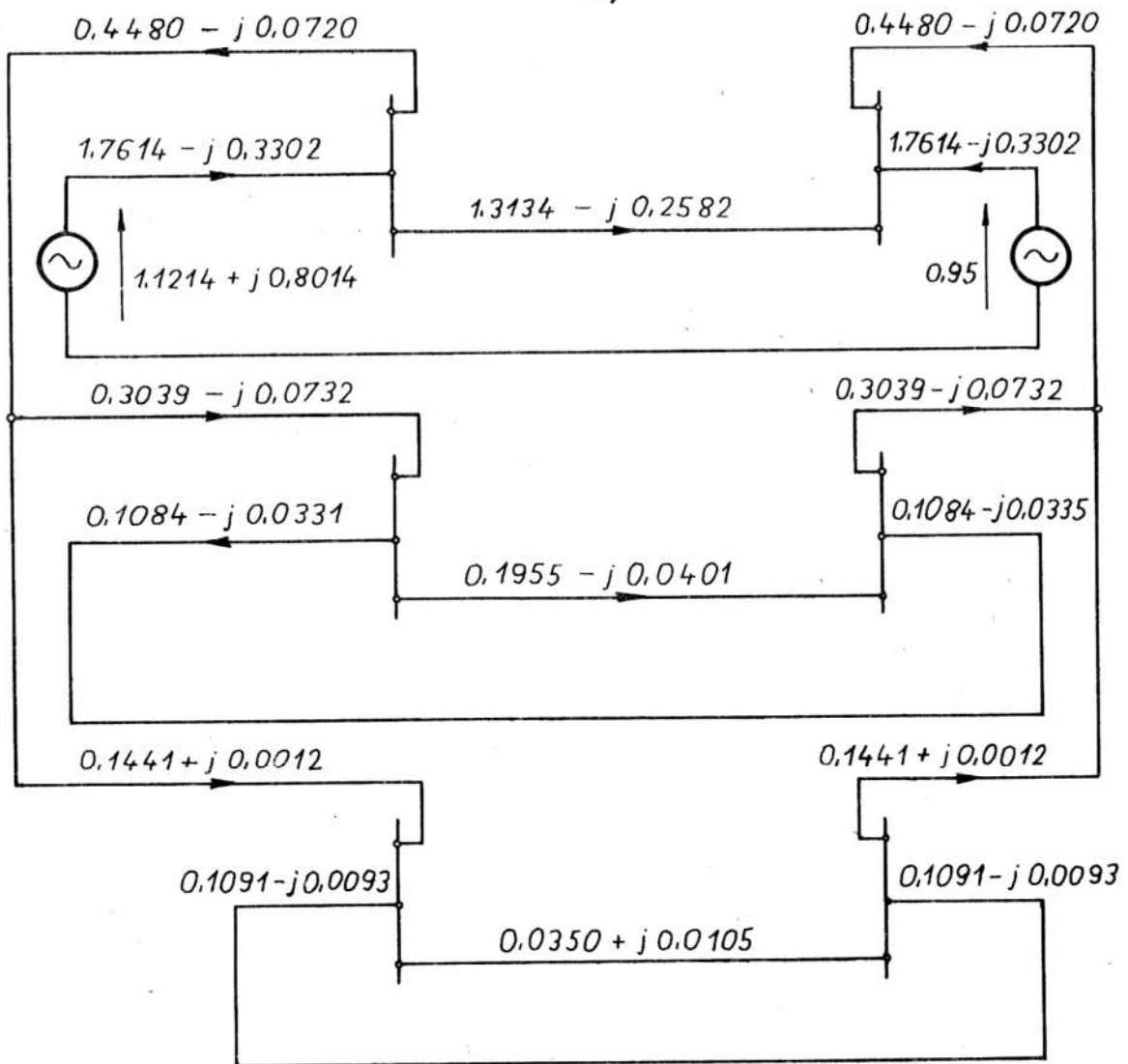
$$\bar{s}_B = 0,95 (1,7614 + j 0,3302) - 1,6733 + j 0,3137$$



Slika 130. - a) Sistem simetričnih komponenta mreže sa sl.127;
jednopolno iskopčan vod 1-2; poprečne grane voda
zanemarene,
b) Direktni sistem s uključenom impedancijom kvara



a)



b)

Slika 131. - a) Raspodjela struja u ekvivalentnoj shemi na sl.130b)
b) Raspodjela struja u ekvivalentnoj shemi na sl.130a)

Ove jedinične snage treba množiti s trofaznom baznom snagom da bi se dobile fizikalne veličine, dok u prijašnjim slučajevima jedinične snage treba množiti s jednofaznom baznom snagom. Zato ćemo, radi usporedbe, gore izračunane snage pomnožiti s 3. Dobit ćemo:

$$\bar{s}_A = 5,1318 + j 5,3456$$

$$\bar{s}_B = 5,0199 + j 0,9411$$

6.2.4 Zaključak

Tri proračuna električnih veličina, ako je iskopčana jedna faza dalekovoda, pokazala su svoje dobre i loše strane.

Najkompletniji i najtočniji je trofazni proračun ako su uzete u račun poprečne konstante dalekovoda. U ovom slučaju mogu se izračunati naponi prema zemlji na krajevima iskopčane faze. Račun daje prvenstveno struje i napone faza, a snage generatora se računaju na kraju.

Ostala dva računa daju električne veličine u mreži ako su zane-marene poprečne grane dalekovoda. Trofazni proračun daje, također, prvenstveno struje i napone faza, a snage generatora na kraju. Račun sa simetričnim komponentama pruža mogućnost brzog proračuna odane električne snage generatora, a da se ne moraju računati raspodjela struje i iznosi napona u mreži.

Zanemarenje poprečnih grana dalekovoda donosi grešku, čiji red veličine nije veći od ostalih grešaka u računu. Zato bez posebnog razloga nećemo poprečne grane pogodjenog dalekovoda uzimati u obzir. Ovo nam daje mogućnost da u proračunu dinamičke stabilnosti koristimo simetrične komponente. Tako na najbrži način dolazimo do podatka o odanim električnim snagama generatora, što u mreži s velikim brojem generatora može značiti veliku uštedu na vremenu računanja elektroničkog računala.

6.3 PREKID JEDNE FAZE ILI DVIJU FAZA

Pristup problemu kod prekida jedne odnosno dviju faza je istovje-
tan sa onim kod iskopčane faze, a za primjer se koristi ista pri-
jenosna mreža.

Mjesto prekida je negdje na vodu. Specijalni slučaj prekida na
krajevima ne može se uključiti u pokazani trofazni model. Prekid
na jednom od krajeva zahtijeva posebnu matematičku obradu, koju je
lako izvesti primjenjujući istu metodu.

6.3.1 Osnova matematičkog modela

Na slici 132a prikazana je trofazna, a na slici 132b jednofazna
shema mreže kojoj se u čvorovima A i B priključuje dalekovod. Da-
lekovod je prekinut u fazi a, odnosno b i c na udaljenosti c% od
A, odnosno d% od B. Mjesto prekida je C na strani A, odnosno D na
strani B.

Ispišimo jednadžbe za mrežu na sl.132

$$[\bar{I}_1] = (c[\bar{Y}_p] + \frac{1}{c}[\bar{Y}_u])[\bar{V}_1] - \frac{1}{c}[\bar{Y}_u][\bar{V}_C] \quad 6-19a$$

$$[\bar{I}_C] = \frac{1}{c}[\bar{Y}_u][\bar{V}_1] - (c[\bar{Y}_p] + \frac{1}{c}[\bar{Y}_u])[\bar{V}_C] \quad b$$

$$[\bar{I}_D] = (d[\bar{Y}_p] + \frac{1}{d}[\bar{Y}_u])[\bar{V}_D] - \frac{1}{d}[\bar{Y}_u][\bar{V}_2] \quad c$$

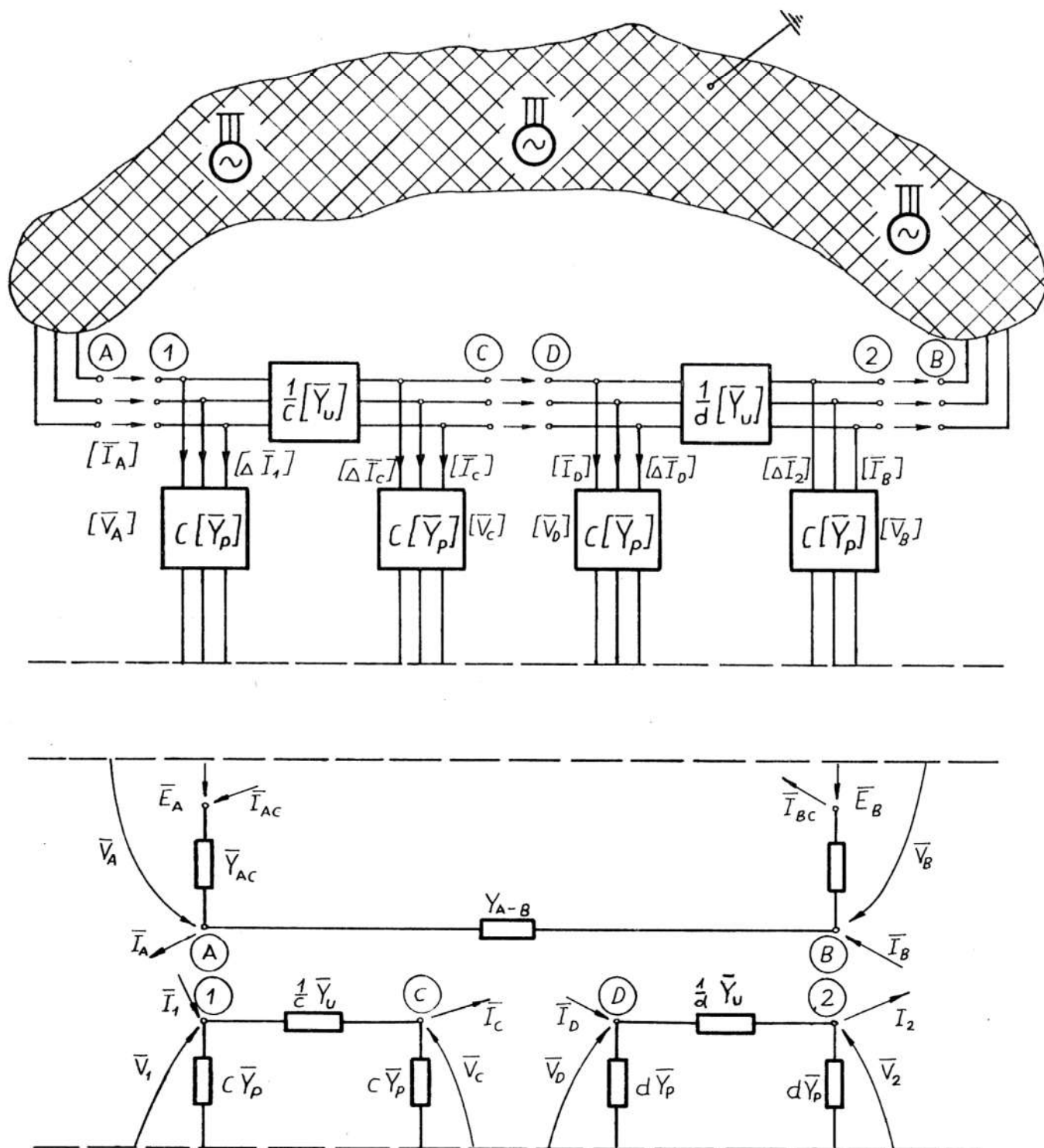
$$[\bar{I}_2] = \frac{1}{d}[\bar{Y}_u][\bar{V}_D] - (d[\bar{Y}_p] + \frac{1}{d}[\bar{Y}_u])[\bar{V}_2] \quad d$$

$$[\bar{I}_A] = - ([\bar{Y}_{Ae}] + [\bar{Y}_{A-B}])[\bar{V}_A] + [\bar{Y}_{A-B}][\bar{V}_B] + [\bar{Y}_{Ae}][\bar{E}_A] \quad e$$

$$[\bar{I}_B] = - [\bar{Y}_{A-B}][\bar{V}_A] + ([\bar{Y}_{Be}] + [\bar{Y}_{A-B}])[\bar{V}_B] - [\bar{Y}_{Be}][\bar{E}_B] \quad f$$

$$[\bar{I}_{Ae}] = - [\bar{Y}_{Ae}][\bar{V}_A] + [\bar{Y}_{Ae}][\bar{E}_A] \quad g$$

$$[\bar{I}_{Be}] = [\bar{Y}_{Be}][\bar{V}_B] - [\bar{Y}_{Be}][\bar{E}_B] \quad h$$



Slika 132.- Priključivanje dalekovoda s prekidom na mrežu
a) trofazna shema
b) jednofazna shema

Dobili smo 24 jednađžbe sa 42 nepoznanice, odnosno 18 jednađžbi s 36 nepoznanica, ako se koriste samo jednađžbe 6-19a-f.

Uvjeti povezivanja A s 1 i B s 2 su:

$$[\bar{I}_A] = [\bar{I}_1] \quad 6-20a$$

$$[\bar{I}_B] = [\bar{I}_2] \quad b$$

$$[\bar{V}_A] = [\bar{V}_1] \quad c$$

$$[\bar{V}_B] = [\bar{V}_2] \quad d$$

Uvrstimo 6-20a-d u 6-21a-h:

$$[\bar{I}_A]' = (c[\bar{Y}_p] + \frac{1}{c}[\bar{Y}_u])[\bar{V}_A] - \frac{1}{c}[\bar{Y}_u][\bar{V}_C] \quad 6-21a$$

$$[\bar{I}_C] = \frac{1}{c}[\bar{Y}_u][\bar{V}_A] - (c[\bar{Y}_p] + \frac{1}{c}[\bar{Y}_u])[\bar{V}_C] \quad b$$

$$[\bar{I}_D] = (d[\bar{Y}_p] + \frac{1}{d}[\bar{Y}_u])[\bar{V}_D] - \frac{1}{d}[\bar{Y}_u][\bar{V}_B] \quad c$$

$$[\bar{I}_B] = \frac{1}{d}[\bar{Y}_u][\bar{V}_D] - (d[\bar{Y}_p] + \frac{1}{d}[\bar{Y}_u])[\bar{V}_B] \quad d$$

$$[\bar{I}_A] = -([\bar{Y}_{Ae}] + [\bar{Y}_{A-B}])[\bar{V}_A] + [\bar{Y}_{A-B}][\bar{V}_B] + [\bar{Y}_{Ae}][\bar{E}_A] \quad e$$

$$[\bar{I}_B] = -[\bar{Y}_{A-B}][\bar{V}_A] + ([\bar{Y}_{Be}] + [\bar{Y}_{A-B}])[\bar{V}_B] - [\bar{Y}_{Be}][\bar{E}_B] \quad f$$

$$[\bar{I}_{Ae}] = -[\bar{Y}_{Ae}][\bar{V}_A] + [\bar{Y}_{Ae}][\bar{E}_A] \quad g$$

$$[\bar{I}_{Be}] = [\bar{Y}_{Be}][\bar{V}_B] - [\bar{Y}_{Be}][\bar{E}_B] \quad h$$

Dobili smo sistem od 24 jednađžbe s 30 nepoznanica, odnosno 18 jednađžbi s 24 nepoznanice. Uvedimo:

$$[\bar{Y}_C] = c[\bar{Y}_P] + \frac{1}{c}[\bar{Y}_u] \quad 6-22a$$

$$[\bar{Y}_D] = d[\bar{Y}_P] + \frac{1}{d}[\bar{Y}_u] \quad b$$

$$[\bar{Y}_A] = [\bar{Y}_{Ae}] + [\bar{Y}_{A-B}] \quad c$$

$$[\bar{Y}_B] = [\bar{Y}_{Be}] + [\bar{Y}_{A-B}] \quad d$$

pa jednadžbe 6-21a-f ispišimo:

$$[\bar{Y}_C][\bar{V}_A] - \frac{1}{c}[\bar{Y}_u][\bar{V}_C] - [\bar{I}_A] = [0] \quad 6-23a$$

$$- \frac{1}{c}[\bar{Y}_u][\bar{V}_A] + [\bar{Y}_C][\bar{V}_C] + [\bar{I}_C] = [0] \quad b$$

$$[\bar{Y}_D][\bar{V}_D] - \frac{1}{d}[\bar{Y}_u][\bar{V}_B] - [\bar{I}_D] = [0] \quad c$$

$$- \frac{1}{d}[\bar{Y}_u][\bar{V}_D] + [\bar{Y}_D][\bar{V}_B] + [\bar{I}_B] = [0] \quad d$$

$$[\bar{Y}_A][\bar{V}_A] - [\bar{Y}_{A-B}][\bar{V}_B] + [\bar{I}_A] = [\bar{Y}_{Ae}][\bar{E}_A] \quad e$$

$$- [\bar{Y}_{A-B}][\bar{V}_A] + [\bar{Y}_B][\bar{V}_B] - [\bar{I}_B] = [\bar{Y}_{Be}][\bar{E}_B] \quad f$$

Ako iz jednadžbi 6-23a-f eliminiramo $[\bar{I}_A]$ i $[\bar{I}_B]$, dobit ćemo sistem od 12 jednadžbi s 18 nepoznanica. To su:

$$([\bar{Y}_A] + [\bar{Y}_C])[\bar{V}_A] - [\bar{Y}_{A-B}][\bar{V}_B] - \frac{1}{c}[\bar{Y}_u][\bar{V}_C] = [\bar{Y}_{Ae}][\bar{E}_A] \quad 6-24a$$

$$- [\bar{Y}_{A-B}][\bar{V}_A] + ([\bar{Y}_B] + [\bar{Y}_D])[\bar{V}_B] - \frac{1}{d}[\bar{Y}_u][\bar{V}_D] = [\bar{Y}_{Be}][\bar{E}_B] \quad b$$

$$- \frac{1}{c}[\bar{Y}_u][\bar{V}_A] + [\bar{Y}_C][\bar{V}_C] + [\bar{I}_C] = [0] \quad c$$

$$- \frac{1}{d}[\bar{Y}_u][\bar{V}_B] + [\bar{Y}_D][\bar{V}_D] - [\bar{I}_D] = [0]$$

Radi lakšeg ispisivanja označit ćemo dalje

$$[\bar{Y}_{A-}] = [\bar{Y}_A] + [\bar{Y}_C] = [\bar{Y}_{Ae}] + [\bar{Y}_{A-B}] + c[\bar{Y}_p] + \frac{1}{c}[\bar{Y}_u] \quad 6-25a$$

$$[\bar{Y}_{B-}] = [\bar{Y}_B] + [\bar{Y}_D] = [\bar{Y}_{Be}] + [\bar{Y}_{A-B}] + d[\bar{Y}_p] + \frac{1}{d}[\bar{Y}_u] \quad b$$

Sada relacije 6-24a-d glase

$$[\bar{Y}_{A-}][\bar{V}_A] - [\bar{Y}_{A-B}][\bar{V}_B] - \frac{1}{c}[\bar{Y}_u][\bar{V}_C] = [\bar{Y}_{Ae}][\bar{E}_A] \quad 6-26a$$

$$-[\bar{Y}_{A-B}][\bar{V}_A] + [\bar{Y}_{B-}][\bar{V}_B] - \frac{1}{d}[\bar{Y}_u][\bar{V}_D] = [\bar{Y}_{Be}][\bar{E}_B] \quad b$$

$$- \frac{1}{2}[\bar{Y}_u][\bar{V}_A] + [\bar{Y}_C][\bar{V}_C] + [\bar{I}_C] = [0] \quad c$$

$$- \frac{1}{d}[\bar{Y}_u][\bar{V}_B] + [\bar{Y}_D][\bar{V}_D] - [\bar{I}_D] = [0] \quad d$$

Upravo će nam jednađžbe 6-26a-d poslužiti za trofazno rješenje zadatka.

Na mjestu prekida postavimo uvjete. Ovi uvjeti nam donose 6 jednađžbi i sistem postaje rješiv.

Zanemarimo li poprečne grane dalekovoda moramo uvažiti:

$$[\bar{Y}_p] = [0] \quad 6-27a$$

$$[\bar{I}_A] = [\bar{I}_C] \quad b$$

$$[\bar{I}_B] = [\bar{I}_D] , \quad c$$

pa sistem jednađžbi 6-21a-f prelazi u :

$$[\bar{I}_A] + [\bar{Y}_A][\bar{V}_A] - [\bar{Y}_{A-B}][\bar{V}_B] = [\bar{Y}_{Ae}][\bar{E}_A] \quad 6-28a$$

$$-[\bar{I}_B] - [\bar{Y}_{A-B}][\bar{V}_A] + [\bar{Y}_B][\bar{V}_B] = [\bar{Y}_{Be}][\bar{E}_B] \quad b$$

$$\frac{1}{c}[\bar{Y}_u][\bar{V}_A] - \frac{1}{c}[\bar{Y}_u][\bar{V}_C] - [\bar{I}_A] = [0] \quad c$$

$$\frac{1}{d}[\bar{Y}_u][\bar{V}_B] - \frac{1}{d}[\bar{Y}_u][\bar{V}_D] + [\bar{I}_B] = [0] \quad d$$

Dobili smo 12 jednađžbi s 18 nepoznanica. Uvjeti na mjestu prekida daju još 6 jednađžbi i sistem postaje rješiv.

6.3.2. Prekid faze a negdje na vodu

Uv dimo uvjete povezivanja na mjestu prekida

$$\bar{I}_C^a = \bar{I}_D^a = 0 \quad 6-29a$$

$$\bar{I}_C^b = \bar{I}_D^b = \bar{I}^b \quad b$$

$$\bar{I}_C^c = \bar{I}_D^c = \bar{I}^c \quad c$$

$$\bar{V}_C^b = \bar{V}_D^b = \bar{V}^b \quad d$$

$$\bar{V}_C^c = \bar{V}_D^c = \bar{V}^c \quad e$$

i uvrstimo u 6-26a-d. Rezultat je 12 jednađžbi s 12 nepoznanica. Proširena matrica koeficijenata ovih jednađžbi glasi prema izrazu 6-30.

Nepoznanice su, redom:

$$\bar{V}_A^a, \bar{V}_A^b, \bar{V}_A^c, \bar{V}_B^a, \bar{V}_B^b, \bar{V}_B^c, \bar{V}_C^a, \bar{V}_C^b, \bar{V}_C^c, \bar{V}_D^a, \bar{I}^b, \bar{I}^c$$

$\bar{Y}_{A.}^{aa}$	$\bar{Y}_{A.}^{ab}$	$\bar{Y}_{A.}^{ac}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{aa}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{ab}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{ac}$	$-\frac{1}{C}\bar{Y}_{.u}^{ss}$		$-\frac{1}{C}\bar{Y}_{.u}^{sm}$	$-\frac{1}{C}\bar{Y}_{.u}^{sm}$				$[\bar{Y}_{Ae}^a]$ $[\bar{E}_A]$
$\bar{Y}_{A.}^{ba}$	$\bar{Y}_{A.}^{bb}$	$\bar{Y}_{A.}^{bc}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{ba}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{bb}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{bc}$	$-\frac{1}{C}\bar{Y}_{.u}^{sm}$		$-\frac{1}{C}\bar{Y}_{.u}^{ss}$	$-\frac{1}{C}\bar{Y}_{.u}^{sm}$				$[\bar{Y}_{Ae}^b]$ $[\bar{E}_A]$
$\bar{Y}_{A.}^{ca}$	$\bar{Y}_{A.}^{cb}$	$\bar{Y}_{A.}^{cc}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{ca}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{cb}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{cc}$	$-\frac{1}{C}\bar{Y}_{.u}^{sm}$		$-\frac{1}{C}\bar{Y}_{.u}^{ss}$	$-\frac{1}{C}\bar{Y}_{.u}^{sm}$				$[\bar{Y}_{Ae}^c]$ $[\bar{E}_A]$
$-\bar{Y}_{A-B}^{aa}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{ab}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{ac}$	$\bar{Y}_{B.}^{aa}$	$\bar{Y}_{B.}^{ab}$	$\bar{Y}_{B.}^{ac}$		$-\frac{1}{D}\bar{Y}_{.u}^{ss}$	$-\frac{1}{D}\bar{Y}_{.u}^{sm}$	$-\frac{1}{D}\bar{Y}_{.u}^{sm}$				$[\bar{Y}_{Be}^a]$ $[\bar{E}_B]$
$-\bar{Y}_{A-B}^{ba}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{bb}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{bc}$	$\bar{Y}_{B.}^{ba}$	$\bar{Y}_{B.}^{bb}$	$\bar{Y}_{B.}^{bc}$		$-\frac{1}{D}\bar{Y}_{.u}^{sm}$	$-\frac{1}{D}\bar{Y}_{.u}^{ss}$	$-\frac{1}{D}\bar{Y}_{.u}^{sm}$				$[\bar{Y}_{Be}^b]$ $[\bar{E}_B]$
$-\bar{Y}_{A-B}^{ca}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{cb}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{cc}$	$\bar{Y}_{B.}^{ca}$	$\bar{Y}_{B.}^{cb}$	$\bar{Y}_{B.}^{cc}$		$-\frac{1}{D}\bar{Y}_{.u}^{sm}$	$-\frac{1}{D}\bar{Y}_{.u}^{ss}$	$-\frac{1}{D}\bar{Y}_{.u}^{sm}$				$[\bar{Y}_{Be}^c]$ $[\bar{E}_B]$
$-\frac{1}{C}\bar{Y}_{.u}^{ss}$	$-\frac{1}{C}\bar{Y}_{.u}^{sm}$	$-\frac{1}{C}\bar{Y}_{.u}^{sm}$				$\bar{Y}_{.c}^{ss}$		$\bar{Y}_{.c}^{sm}$	$\bar{Y}_{.c}^{sm}$				
$-\frac{1}{C}\bar{Y}_{.u}^{sm}$	$-\frac{1}{C}\bar{Y}_{.u}^{ss}$	$-\frac{1}{C}\bar{Y}_{.u}^{ss}$				$\bar{Y}_{.c}^{sm}$		$\bar{Y}_{.c}^{ss}$	$\bar{Y}_{.c}^{ss}$	1			
$-\frac{1}{C}\bar{Y}_{.u}^{ss}$	$-\frac{1}{C}\bar{Y}_{.u}^{sm}$	$-\frac{1}{C}\bar{Y}_{.u}^{sm}$				$\bar{Y}_{.c}^{sm}$		$\bar{Y}_{.c}^{ss}$	$\bar{Y}_{.c}^{ss}$		1		
			$-\frac{1}{D}\bar{Y}_{.u}^{ss}$	$-\frac{1}{D}\bar{Y}_{.u}^{sm}$	$-\frac{1}{D}\bar{Y}_{.u}^{sm}$		$\bar{Y}_{.D}^{ss}$	$\bar{Y}_{.D}^{sm}$	$\bar{Y}_{.D}^{sm}$				
			$-\frac{1}{D}\bar{Y}_{.u}^{sm}$	$-\frac{1}{D}\bar{Y}_{.u}^{ss}$	$-\frac{1}{D}\bar{Y}_{.u}^{ss}$		$\bar{Y}_{.D}^{sm}$	$\bar{Y}_{.D}^{ss}$	$\bar{Y}_{.D}^{ss}$	-1			
			$-\frac{1}{D}\bar{Y}_{.u}^{sm}$	$-\frac{1}{D}\bar{Y}_{.u}^{ss}$	$-\frac{1}{D}\bar{Y}_{.u}^{ss}$		$\bar{Y}_{.D}^{sm}$	$\bar{Y}_{.D}^{ss}$	$\bar{Y}_{.D}^{ss}$		-1		

Ako zanemarimo poprečne grane, imamo također sistem od 12 jednažbi s 18 nepoznanica prema relacijama 6-28a-d.

Uvjeti povezivanja na mjestu prekida su:

$$\bar{I}_A^a = \bar{I}_B^a = 0 \quad 6-31a$$

$$\bar{I}_A^b = \bar{I}_B^b = \bar{I}^b \quad b$$

$$\bar{I}_A^c = \bar{I}_B^c = \bar{I}^c \quad c$$

$$\bar{V}_C^b = \bar{V}_D^b = \bar{V}^b \quad d$$

$$\bar{V}_C^c = \bar{V}_D^c = \bar{V}^c \quad e$$

Ove uvjete uvrstimo u relacije 6-28a-d. Dobili smo sistem od 12 jednažbi s 12 nepoznanica. Proširena matrica koeficijenata ovog sistema glasi prema izrazu 6-32.

Ako su zanemarene poprečne grane dalekovoda, problem je rješiv u simetričnim komponentama.

Uvjete postavljamo na mjestu prekida:

$$\bar{I}_C^a = \bar{I}_D^a = 0 \quad 6-33a$$

$$\bar{V}_{CD}^b = \bar{V}_C^b - \bar{V}_D^b = 0 \quad b$$

$$\bar{V}_{CD}^c = \bar{V}_C^c - \bar{V}_D^c = 0 \quad c$$

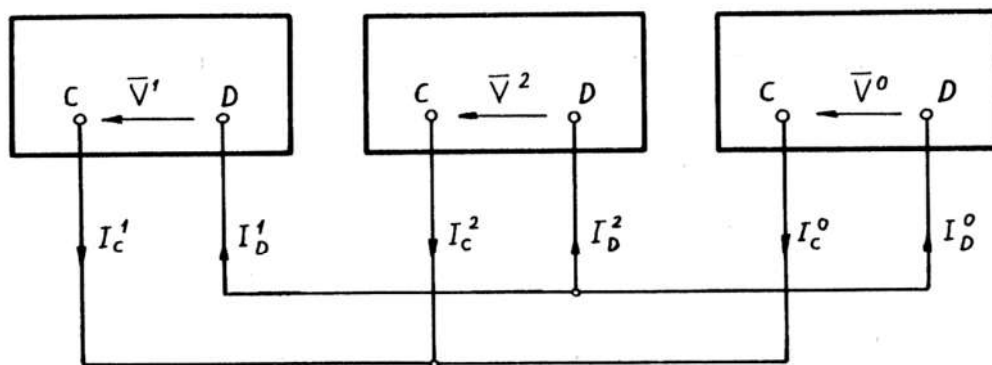
Ove uvjete izrazimo sa simetričnim komponentama i sredimo. Dobit ćemo uvjete povezivanja sistema komponenata na mjestu prekida.

$$\bar{I}_C^1 + \bar{I}_C^2 + \bar{I}_C^0 = \bar{I}_D^1 + \bar{I}_D^2 + \bar{I}_D^0 = 0 \quad 6-34$$

$$\bar{V}_{CD}^1 = \bar{V}_{CD}^2 = \bar{V}_{CD}^0 \quad 6-35$$

$\bar{y}_{A-}^{aa}$	$\bar{y}_{A-}^{ab}$	$\bar{y}_{A-}^{ac}$	$-\bar{y}_{A-B}^{aa}$	$-\bar{y}_{A-B}^{ab}$	$-\bar{y}_{A-B}^{ac}$							$[\bar{y}_{Ae}^a] [\bar{E}_A]$
$\bar{y}_{A-}^{ba}$	$\bar{y}_{A-}^{bb}$	$\bar{y}_{A-}^{bc}$	$-\bar{y}_{A-B}^{ba}$	$-\bar{y}_{A-B}^{bb}$	$-\bar{y}_{A-B}^{bc}$				1			$[\bar{y}_{Ae}^b] [\bar{E}_A]$
$\bar{y}_{A-}^{ca}$	$\bar{y}_{A-}^{cb}$	$\bar{y}_{A-}^{cc}$	$-\bar{y}_{A-B}^{ca}$	$-\bar{y}_{A-B}^{cb}$	$-\bar{y}_{A-B}^{cc}$					1		$[\bar{y}_{Ae}^c] [\bar{E}_A]$
$-\bar{y}_{A-B}^{aa}$	$-\bar{y}_{A-B}^{ab}$	$-\bar{y}_{A-B}^{ac}$	$\bar{y}_B^{aa}$	$\bar{y}_B^{ab}$	$\bar{y}_B^{ac}$							$[\bar{y}_{Be}^a] [\bar{E}_B]$
$-\bar{y}_{A-B}^{ba}$	$-\bar{y}_{A-B}^{bb}$	$-\bar{y}_{A-B}^{bc}$	$\bar{y}_B^{ba}$	$\bar{y}_B^{bb}$	$\bar{y}_B^{bc}$				-1			$[\bar{y}_{Be}^b] [\bar{E}_B]$
$-\bar{y}_{A-B}^{ca}$	$-\bar{y}_{A-B}^{cb}$	$-\bar{y}_{A-B}^{cc}$	$\bar{y}_B^{ca}$	$\bar{y}_B^{cb}$	$\bar{y}_B^{cc}$					-1		$[\bar{y}_{Be}^c] [\bar{E}_B]$
$\frac{1}{c} \bar{y}_{A-}^{sa}$	$\frac{1}{c} \bar{y}_{A-}^{sb}$	$\frac{1}{c} \bar{y}_{A-}^{sc}$				$-\frac{1}{c} \bar{y}_{A-}^{sa}$		$-\frac{1}{c} \bar{y}_{A-}^{sb}$	$-\frac{1}{c} \bar{y}_{A-}^{sc}$			
$\frac{1}{c} \bar{y}_{A-}^{sa}$	$\frac{1}{c} \bar{y}_{A-}^{sb}$	$\frac{1}{c} \bar{y}_{A-}^{sc}$						$-\frac{1}{c} \bar{y}_{A-}^{sa}$	$-\frac{1}{c} \bar{y}_{A-}^{sb}$	$-\frac{1}{c} \bar{y}_{A-}^{sc}$		
$\frac{1}{c} \bar{y}_{A-}^{sa}$	$\frac{1}{c} \bar{y}_{A-}^{sb}$	$\frac{1}{c} \bar{y}_{A-}^{sc}$						$-\frac{1}{c} \bar{y}_{A-}^{sa}$	$-\frac{1}{c} \bar{y}_{A-}^{sb}$	$-\frac{1}{c} \bar{y}_{A-}^{sc}$	-1	
			$\frac{1}{d} \bar{y}_{A-}^{sa}$	$\frac{1}{d} \bar{y}_{A-}^{sb}$	$\frac{1}{d} \bar{y}_{A-}^{sc}$		$-\frac{1}{d} \bar{y}_{A-}^{sa}$	$-\frac{1}{d} \bar{y}_{A-}^{sb}$	$-\frac{1}{d} \bar{y}_{A-}^{sc}$			
			$\frac{1}{d} \bar{y}_{A-}^{sa}$	$\frac{1}{d} \bar{y}_{A-}^{sb}$	$\frac{1}{d} \bar{y}_{A-}^{sc}$			$-\frac{1}{d} \bar{y}_{A-}^{sa}$	$-\frac{1}{d} \bar{y}_{A-}^{sb}$	$-\frac{1}{d} \bar{y}_{A-}^{sc}$	1	
			$\frac{1}{d} \bar{y}_{A-}^{sa}$	$\frac{1}{d} \bar{y}_{A-}^{sb}$	$\frac{1}{d} \bar{y}_{A-}^{sc}$			$-\frac{1}{d} \bar{y}_{A-}^{sa}$	$-\frac{1}{d} \bar{y}_{A-}^{sb}$	$-\frac{1}{d} \bar{y}_{A-}^{sc}$		

Na slici 133 povezani su sistemi komponenata prema uvjetima 6-34 i 6-35.



Slika 133.- Povezivanje sistema simetričnih komponenata
prekid faze a

6.3.3 Prekid faze b i c negdje na vodu

Uvedimo uvjete povezivanja na mjestu prekida:

$$\bar{I}_C^a = \bar{I}_D^a = \bar{I}^a \quad 6-36a$$

$$\bar{I}_C^b = \bar{I}_D^b = \bar{I}_C^c = \bar{I}_D^c = 0 \quad b$$

$$\bar{V}_C^a = \bar{V}_D^a = \bar{V}^a \quad c$$

i uvrstimo u 6-24a-d. Rezultat je 12 jednažbi s 12 nepoznanica. Proširena matrica koeficijenata ovog sistema jednažbi glasi prema tablici 6-37.

Nepoznanice su, redom:

$$\bar{V}_A^a, \bar{V}_A^b, \bar{V}_A^c, \bar{V}_B^a, \bar{V}_B^b, \bar{V}_B^c, \bar{V}^a, \bar{V}_C^b, \bar{V}_C^c, \bar{V}_D^b, \bar{V}_D^c, \bar{I}^a$$

$\bar{Y}_A^{aa}$	$\bar{Y}_A^{ab}$	$\bar{Y}_A^{ac}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{aa}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{ab}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{ac}$	$-\frac{1}{C}\bar{Y}_u^s$	$-\frac{1}{C}\bar{Y}_u^m$				$\begin{bmatrix} \bar{Y}_{Ae}^a \\ \bar{E}_A \end{bmatrix}$
$\bar{Y}_A^{ba}$	$\bar{Y}_A^{bb}$	$\bar{Y}_A^{bc}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{ba}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{bb}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{bc}$	$-\frac{1}{C}\bar{Y}_u^s$	$-\frac{1}{C}\bar{Y}_u^m$				$\begin{bmatrix} \bar{Y}_{Ae}^b \\ \bar{E}_A \end{bmatrix}$
$\bar{Y}_A^{ca}$	$\bar{Y}_A^{cb}$	$\bar{Y}_A^{cc}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{ca}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{cb}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{cc}$	$-\frac{1}{C}\bar{Y}_u^s$	$-\frac{1}{C}\bar{Y}_u^m$				$\begin{bmatrix} \bar{Y}_{Ae}^c \\ \bar{E}_A \end{bmatrix}$
$-\bar{Y}_{A-B}^{aa}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{ab}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{ac}$	$\bar{Y}_B^{aa}$	$\bar{Y}_B^{ab}$	$\bar{Y}_B^{ac}$	$-\frac{1}{d}\bar{Y}_u^s$	$-\frac{1}{d}\bar{Y}_u^m$	$-\frac{1}{d}\bar{Y}_u^s$	$-\frac{1}{d}\bar{Y}_u^m$		$\begin{bmatrix} \bar{Y}_{Be}^a \\ \bar{E}_B \end{bmatrix}$
$-\bar{Y}_{A-B}^{ba}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{bb}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{bc}$	$\bar{Y}_B^{ba}$	$\bar{Y}_B^{bb}$	$\bar{Y}_B^{bc}$	$-\frac{1}{d}\bar{Y}_u^s$	$-\frac{1}{d}\bar{Y}_u^m$	$-\frac{1}{d}\bar{Y}_u^s$	$-\frac{1}{d}\bar{Y}_u^m$		$\begin{bmatrix} \bar{Y}_{Be}^b \\ \bar{E}_B \end{bmatrix}$
$-\bar{Y}_{A-B}^{ca}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{cb}$	$-\bar{Y}_{A-B}^{cc}$	$\bar{Y}_B^{ca}$	$\bar{Y}_B^{cb}$	$\bar{Y}_B^{cc}$	$-\frac{1}{d}\bar{Y}_u^s$	$-\frac{1}{d}\bar{Y}_u^m$	$-\frac{1}{d}\bar{Y}_u^s$	$-\frac{1}{d}\bar{Y}_u^m$		$\begin{bmatrix} \bar{Y}_{Be}^c \\ \bar{E}_B \end{bmatrix}$
$-\frac{1}{C}\bar{Y}_u^s$	$-\frac{1}{C}\bar{Y}_u^m$	$-\frac{1}{C}\bar{Y}_u^s$				$\bar{Y}_c^s$	$\bar{Y}_c^m$		1		
$-\frac{1}{C}\bar{Y}_u^m$	$-\frac{1}{C}\bar{Y}_u^s$	$-\frac{1}{C}\bar{Y}_u^m$				$\bar{Y}_c^s$	$\bar{Y}_c^m$				
$-\frac{1}{C}\bar{Y}_u^s$	$-\frac{1}{C}\bar{Y}_u^m$	$-\frac{1}{C}\bar{Y}_u^s$				$\bar{Y}_c^s$	$\bar{Y}_c^m$				
			$-\frac{1}{d}\bar{Y}_u^s$	$-\frac{1}{d}\bar{Y}_u^m$	$-\frac{1}{d}\bar{Y}_u^s$	$\bar{Y}_D^s$	$\bar{Y}_D^m$	$\bar{Y}_D^s$	$\bar{Y}_D^m$	-1	
			$-\frac{1}{d}\bar{Y}_u^m$	$-\frac{1}{d}\bar{Y}_u^s$	$-\frac{1}{d}\bar{Y}_u^m$	$\bar{Y}_D^s$	$\bar{Y}_D^m$	$\bar{Y}_D^s$	$\bar{Y}_D^m$		
			$-\frac{1}{d}\bar{Y}_u^s$	$-\frac{1}{d}\bar{Y}_u^m$	$-\frac{1}{d}\bar{Y}_u^s$	$\bar{Y}_D^s$	$\bar{Y}_D^m$	$\bar{Y}_D^s$	$\bar{Y}_D^m$		

Ako zanemarimo poprečne grane imamo također sistem od 12 jednažbi s 18 nepoznanica prema relacijama 6-26a-d. Uvjeti povezivanja na mjestu prekida su:

$$\bar{I}_A^a = \bar{I}_B^a = \bar{I}_C^a = \bar{I}_D^a = \bar{I}^a \quad 6-38a$$

$$\bar{I}_A^b = \bar{I}_B^b = \bar{I}_C^b = \bar{I}_D^b = \bar{I}_A^c = \bar{I}_B^c = \bar{I}_C^c = \bar{I}_D^c \quad b$$

$$\bar{V}_C^a = \bar{V}_D^a = \bar{V}^a \quad c$$

Dobili smo sistem od 12 jednažbi s 12 nepoznanica. Proširena matrica koeficijenata ovog sistema glasi prema tablici 6-39.

Ako su zanemarene poprečne grane dalekovoda problem je rješiv u sistemu komponenata. Uvjete postavljamo na mjestu prekida

$$\bar{V}_{CD}^a = \bar{V}_C^a - \bar{V}_D^a = 0 \quad 6-40a$$

$$\bar{I}_C^b = \bar{I}_D^b = 0 \quad b$$

$$\bar{I}_C^c = \bar{I}_D^c = 0 \quad c$$

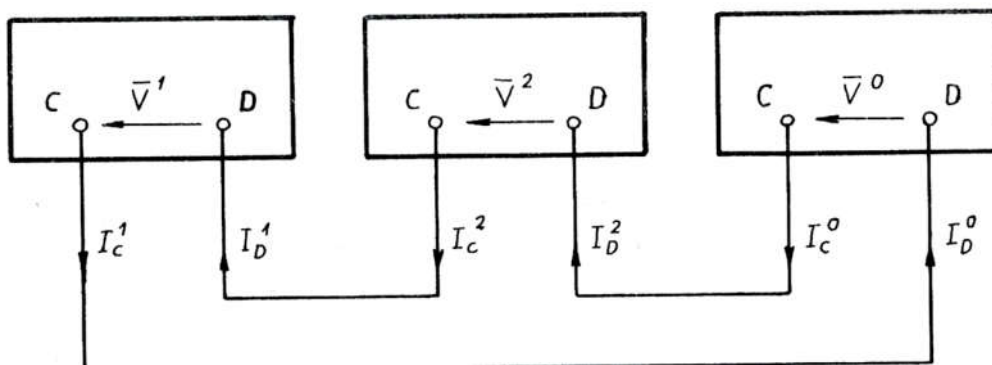
Ove uvjete izrazimo sa simetričnim komponentama i sredimo. Dobili smo uvjete povezivanja sistema komponenata na mjestu prekida.

$$\bar{V}_{CD}^1 + \bar{V}_{CD}^2 + \bar{V}_{CD}^0 = 0 \quad 6-41$$

$$\bar{I}_C^1 = \bar{I}_C^2 = \bar{I}_C^0 \quad 6-42a$$

$$\bar{I}_D^1 = \bar{I}_D^2 = \bar{I}_D^0 \quad b$$

Na slici 134 povezani su sistemi komponenata prema uvjetima 6-41 i 6-42.



Slika 134. - Povezivanje sistema simetričnih komponenata pri prekidu faza b i c

6.3.4 Ispitivanja na idealnoj mreži

Zamislamo idealnu mrežu u kojoj je

$$[\bar{Y}_{Ae}] = [\bar{Y}_{Be}] = [\bar{Y}_E] \quad 6-43$$

$$c = d = 0,5 \quad 6-44$$

pa je zato

$$[\bar{Y}_{A-}] = [\bar{Y}_{B-}] = [\bar{Y}_E] + [\bar{Y}_{A-B}] + 0,5[\bar{Y}_p] + 2[\bar{Y}_u] \quad 6-45a$$

$$[\bar{Y}_A] = [\bar{Y}_B] = [\bar{Y}_E] + [\bar{Y}_{A-B}] \quad b$$

$$[\bar{Y}_C] = [\bar{Y}_D] = 0,5[\bar{Y}_p] + 2[\bar{Y}_u] \quad c$$

Uvažavajući 6-43 do 6-45 relacije 6-26a-d prelaze u

$$[\bar{Y}_A] [\bar{V}_A] - [\bar{Y}_{A-B}] [\bar{V}_B] - 2[\bar{Y}_u] [\bar{V}_C] = [\bar{Y}_E] [\bar{E}_A] \quad 6-46a$$

$$-[\bar{I}_{A-B}] [\bar{V}_A] + [\bar{Y}_B] [\bar{V}_B] - 2[\bar{Y}_u] [\bar{V}_D] = [\bar{Y}_E] [\bar{E}_B] \quad b$$

$$- 2[\bar{Y}_u] [\bar{V}_A] + [\bar{Y}_C] [\bar{V}_C] + [\bar{I}_C] = [0] \quad c$$

$$- 2[\bar{Y}_u] [\bar{V}_B] + [\bar{Y}_D] [\bar{V}_D] - [\bar{I}_D] = [0] \quad d$$

Odbijmo jednadžbe 6-46b od 6-46a i jednadžbe 6-46d od 6-46c. Zatim uvažimo da je:

$$[\bar{V}_A] - [\bar{V}_B] = [\bar{V}_{AB}] \quad 6-47a$$

$$[\bar{E}_A] - [\bar{E}_B] = [\bar{E}_{AB}] \quad b$$

$$[\bar{V}_C] - [\bar{V}_D] = [\bar{V}_{CD}] \quad c$$

$$[\bar{I}_C] + [\bar{I}_D] = [\bar{I}_{CD}] \quad d$$

Dobili smo sistem od 6 jednadžbi s 9 nepoznanica

$$([\bar{Y}_E] + [\bar{Y}_{A-B}] + 0,5[\bar{Y}_p] + 2[\bar{Y}_u]) [\bar{V}_{AB}] - 2[\bar{Y}_u] [\bar{V}_{CD}] = [\bar{Y}_E] [\bar{E}_{AB}] \quad 6-48a$$

$$- 2[\bar{Y}_u] [\bar{V}_{AB}] + (0,5[\bar{Y}_p] + 2[\bar{Y}_u]) [\bar{V}_{CD}] + [\bar{I}_{CD}] = [0] \quad b$$

Uvjeti na mjestu prekida daju 3 jednadžbe, te tako sistem postaje rješiv.

U daljnjem tekstu označit ćemo:

$$[\bar{Y}_{AB}] = [\bar{Y}_E] + [\bar{Y}_{A-B}] + 0,5[\bar{Y}_p] + 2[\bar{Y}_u] \quad 6-49a$$

$$[\bar{Y}_{CD}] = 0,5[\bar{Y}_p] + 2[\bar{Y}_u] \quad b$$

pa relacije 6-48a-b ispisujemo lakše:

$$[\bar{Y}_{AB}] [\bar{V}_{AB}] - 2[\bar{Y}_u] [\bar{V}_{CD}] = [\bar{Y}_E] [\bar{E}_{AB}] \quad 6-50a$$

$$- 2[\bar{Y}_u] [\bar{V}_{AB}] + [\bar{Y}_{CD}] [\bar{V}_{CD}] + [\bar{I}_{CD}] = [0] \quad b$$

Iz jednadžbi 6-50 lako eliminiramo $[\bar{V}_{AB}]$. Tako dolazimo do sistema jednadžbi:

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{2} [\bar{Y}_{AB}] [\bar{Y}_u]^{-1} [\bar{Y}_{CD}] - 2[\bar{Y}_u] \right) [\bar{V}_{CD}] + \frac{1}{2} [\bar{Y}_{AB}] [\bar{Y}_u]^{-1} [\bar{I}_{CD}] &= \\ &= [\bar{Y}_E] [\bar{E}_{AB}] , \end{aligned} \quad 6-51$$

odnosno:

$$[\bar{Y}_{CD}] [\bar{V}_{CD}] - [\bar{Y}_{AB''}] [\bar{I}_{CD}] = [\bar{Y}_E] [\bar{E}_{AB}] , \quad 6-52$$

gdje je:

$$[\bar{Y}_{CD}] = \frac{1}{2} [\bar{Y}_{AB}] [\bar{Y}_u]^{-1} [\bar{Y}_{CD}] - 2[\bar{Y}_u] \quad 6-53a$$

$$[\bar{Y}_{AB''}] = \frac{1}{2} [\bar{Y}_{AB}] [\bar{Y}_u]^{-1} \quad b$$

Uvjeti na mjestu povezivanja daju 3 jednadžbe i sistem postaje rješiv.

U slijedećem tekstu radi;

$$\bar{E}_{AB}^a + \bar{E}_{AB}^b + \bar{E}_{AB}^c = 0, \quad 6-54$$

imamo da je:

$$[\bar{Y}_E^a] [\bar{E}_{AB}] = \bar{Y}_E \bar{E}_{AB}^a \quad 6-55a$$

$$[\bar{Y}_E^b] [\bar{E}_{AB}] = \bar{Y}_E \bar{E}_{AB}^b \quad b$$

$$[\bar{Y}_E^c] [\bar{E}_{AB}] = \bar{Y}_E \bar{E}_{AB}^c \quad c$$

gdje je:

$$\bar{Y}_E = \bar{Y}_S - \bar{Y}_m \quad 6-56$$

a) Prekid faze a

Uvjeti na mjestu prekida su:

$$\bar{I}_{CD}^a = 0 \quad 6-57a$$

$$\bar{V}_{CD}^b = \bar{V}_{CD}^c = 0 \quad b$$

Radi 6-57a-b relacije 6-50a-b prelaze u sistem jednađžbi čija proširena matrica koeficijenata glasi prema izrazu 6-58.

Nepoznanice su redom

$$\bar{V}_{AB}^a, \bar{V}_{AB}^b, \bar{V}_{AB}^c, \bar{V}_{CD}^a, \bar{I}_{CD}^b, \bar{I}_{CD}^c$$

Radi 6-57a-b relacije 6-52 prelaze u sistem jednađžbi čija je matrica koeficijenata prema izrazu 6-59.

Nepoznanice su, redom:

$$\bar{V}_{CD}^a, \bar{I}_{CD}^b, \bar{I}_{CD}^c$$

$\bar{Y}_{AB}^s$	$\bar{Y}_{AB}^m$	$\bar{Y}_{AB}^m$	$-2 \bar{Y}_{AB}^s$	$-2 \bar{Y}_{AB}^s$			$\bar{Y}_E \cdot \bar{E}_{AB}^a$
$\bar{Y}_{AB}^m$	$\bar{Y}_{AB}^s$	$\bar{Y}_{AB}^m$	$-2 \bar{Y}_{AB}^m$	$-2 \bar{Y}_{AB}^m$			$\bar{Y}_E \cdot \bar{E}_{AB}^b$
$\bar{Y}_{AB}^m$	$\bar{Y}_{AB}^s$	$\bar{Y}_{AB}^m$	$-2 \bar{Y}_{AB}^m$	$-2 \bar{Y}_{AB}^m$			$\bar{Y}_E \cdot \bar{E}_{AB}^c$
$-2 \bar{Y}_{AB}^s$	$-2 \bar{Y}_{AB}^m$	$-2 \bar{Y}_{AB}^m$	$\bar{Y}_{CD}^s$				
$-2 \bar{Y}_{AB}^m$	$-2 \bar{Y}_{AB}^s$	$-2 \bar{Y}_{AB}^s$	$\bar{Y}_{CD}^m$	1			
$-2 \bar{Y}_{AB}^m$	$-2 \bar{Y}_{AB}^m$	$-2 \bar{Y}_{AB}^s$	$\bar{Y}_{CD}^m$		1		

$\bar{Y}_{CD}^s$	$-\bar{Y}_{AB}^m //$	$-\bar{Y}_{AB}^m //$	$\bar{Y}_E \cdot \bar{E}_{AB}^a$
$\bar{Y}_{CD}^m$	$-\bar{Y}_{AB}^s //$	$-\bar{Y}_{AB}^m //$	$\bar{Y}_E \cdot \bar{E}_{AB}^b$
$\bar{Y}_{CD}^m$	$-\bar{Y}_{AB}^m //$	$-\bar{Y}_{AB}^s //$	$\bar{Y}_E \cdot \bar{E}_{AB}^c$

Iz matrica koeficijenata 6-58 i 6-59 možemo zaključiti da uzimanje u račun poprečne grane dalekovoda ne utječe mnogo na iznose nepoznanica.

Iz relacija 6-52, uz uvažavanje 6-54 možemo uz malo truda dobiti izraz za nultu komponentu struje:

$$\bar{I}_{AB}^0 = \frac{1}{3} \frac{(\bar{Y}_{CD}^s + 2 \bar{Y}_{CD}^m) \bar{Y}_E \bar{E}_{AB}^a}{\bar{Y}_{CD}^s (\bar{Y}_{AB}^s + \bar{Y}_{AB}^m) - \bar{Y}_{AB}^m (\bar{Y}_{CD}^s + 2 \bar{Y}_{CD}^m)} \quad 6-60$$

Analiza izraza 6-60 takodjer potvrđuje mali utjecaj uzimanja u obzir poprečnih grana na točnost računa.

b) Prekid faza b i c

Uvjeti na mjestu prekida jesu

$$\bar{I}_{CD}^b = \bar{I}_{CD}^c = 0 \quad 6-61a$$

$$\bar{V}_{CD}^a = 0 \quad b$$

Radi 6-61a-b relacije 6-50a-b prelaze u sistem jednadžbi čija proširena matrica koeficijenata glasi prema izrazu 6-62.

Nepoznanice su, redom:

$$\bar{V}_{AB}^a, \bar{V}_{AB}^b, \bar{V}_{AB}^c, \bar{V}_{CD}^b, \bar{V}_{CD}^c$$

Radi 6-61a-b relacije 6-52 prelaze u sistem jednadžbi čija je proširena matrica koeficijenata prema izrazu 6-63.

Nepoznanice su, redom:

$$\bar{I}_{CD}^a, \bar{V}_{CD}^b, \bar{V}_{CD}^c$$

$\bar{Y}_{AB}^S$	$\bar{Y}_{AB}^m$	$\bar{Y}_{AB}^m$	$-2 \bar{Y}_{u}^m$	$-2 \bar{Y}_{u}^m$	$-2 \bar{Y}_{u}^m$		$\bar{Y}_E \bar{E}_{AB}^a$
$\bar{Y}_{AB}^m$	$\bar{Y}_{AB}^S$	$\bar{Y}_{AB}^m$	$-2 \bar{Y}_{u}^S$	$-2 \bar{Y}_{u}^S$	$-2 \bar{Y}_{u}^m$		$\bar{Y}_E \bar{E}_{AB}^b$
$\bar{Y}_{AB}^m$	$\bar{Y}_{AB}^m$	$\bar{Y}_{AB}^S$	$-2 \bar{Y}_{u}^m$	$-2 \bar{Y}_{u}^m$	$-2 \bar{Y}_{u}^S$		$\bar{Y}_E \bar{E}_{AB}^c$
$-2 \bar{Y}_{u}^S$	$-2 \bar{Y}_{u}^m$	$-2 \bar{Y}_{u}^m$	$\bar{Y}_{CD}^m$	$\bar{Y}_{CD}^m$	$\bar{Y}_{CD}^m$	1	
$-2 \bar{Y}_{u}^m$	$-2 \bar{Y}_{u}^S$	$-2 \bar{Y}_{u}^m$	$\bar{Y}_{CD}^S$	$\bar{Y}_{CD}^S$	$\bar{Y}_{CD}^m$		
$-2 \bar{Y}_{u}^m$	$-2 \bar{Y}_{u}^m$	$-2 \bar{Y}_{u}^S$	$\bar{Y}_{CD}^m$	$\bar{Y}_{CD}^m$	$\bar{Y}_{CD}^S$		

$-\bar{Y}_{AB}^s //$	$\bar{Y}_{CD}^m$	$\bar{Y}_{CD}^m$	$\bar{Y}_E \cdot \bar{E}_{AB}^a$
$-\dot{\bar{Y}}_{AB}^m //$	$\bar{Y}_{CD}^s$	$\bar{Y}_{CD}^m$	$\bar{Y}_E \cdot \bar{E}_{AB}^b$
$- - \bar{Y}_{AB}^m //$	$\bar{Y}_{CD}^m$	$\bar{Y}_{CD}^s$	$\bar{Y}_E \cdot \bar{E}_{AB}^c$

Iz relacija 6-52 uz uvažavanje 6-54 možemo uz malo truda dobiti izraz za nultu komponentu struje

$$\bar{I}_{AB}^0 = \frac{1}{3} \frac{(\bar{Y}_{CD}^s + 2 \bar{Y}_{CD}^m) \bar{Y}_E \bar{E}_{AB}^a}{-\bar{Y}_{AB}^s (\bar{Y}_{CD}^s + 2 \bar{Y}_{CD}^m) + \bar{Y}_{CD}^m (\bar{Y}_{AB}^s + 2 \bar{Y}_{AB}^m)} \quad 6-64$$

Analiza izraza 6-64, također potvrđuje mali utjecaj uzimanja u obzir poprečnih grana na točnost računa.

Primjer 6.4 Zadana je mreža iz primjera 6.2. Podaci mreže su jednaki, osim podataka za generator. Ovdje se uzima $X_d = 115\%$, jer se radi o normalnom pogonu.

Proračun treba dati podatke o električnim prilikama na pogodjenom vođu u jednom odredjenom momentu, koji je definiran iznosom i kutem ems generatora u odnosu na napon krute mreže kao referentni. Na vođu A-B za $c = 0,3$ došlo je do prekida faze a.

U ovom primjeru je:

$$\bar{E} = 396,1/\underline{0,05}^0 = 395,6 + j 19,78 \text{ kV}$$

$$\bar{U}_M = 110/\underline{0}^0 = 112 + j 0 \text{ kV,}$$

odnosno u jediničnim vrijednostima:

$$\bar{e} = 0,989 + j 0,0495$$

$$\bar{u}_M = 0,9673 + j 0,0$$

$$x_G^1 = 0,77$$

Izračunajmo matricu bloka generator-transformator:

$$x_A^1 = 0,77 + 0,0667 = 0,8367$$

$$\begin{bmatrix} \bar{z}_{Ae}^{012} \end{bmatrix} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline j\ 0,0667 & & \\ \hline & j\ 0,8367 & \\ \hline & & j\ 0,2 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{y}_{Ae}^{012} \end{bmatrix} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -j\ 14,9925 & & \\ \hline & -j\ 1,1952 & \\ \hline & & -j\ 5,0 \\ \hline \end{array}$$

$$\bar{y}_{Ae}^s = \frac{1}{3} (-j\ 14,9925 - j\ 1,1952 - j\ 5,0) = -j\ 7,0626$$

$$\bar{y}^{m1} = \frac{1}{3} (-j\ 14,9925 - j\ a\ 1,1952 - j\ a^2\ 5,0) =$$

$$= -1,0983 - j\ 3,965$$

$$\bar{y}_{Ae}^{m2} = \frac{1}{3} (-j\ 14,9925 - j\ a^2\ 1,1952 - j\ a\ 5,0) =$$

$$= 1,0983 - j\ 3,965$$

$$\bar{y}_{Be}^s = 0,0 - j\ 16,6113$$

$$\bar{y}_{Be}^m = 0,0$$

$$\bar{e}_A^a = 0,989 + j\ 0,0495$$

$$\bar{e}_A^b = -0,4516 - j\ 0,8812$$

$$\bar{e}_A^c = -0,5374 + j\ 0,8317$$

$$\bar{e}_B^a = 0,9673 + j\ 0,0$$

$$\bar{e}_B^b = -0,4837 - j 0,8377$$

$$\bar{e}_B^c = -0,4837 + j 0,8377$$

$$[\bar{y}_{Ae}^a][\bar{e}_A] = 0,0592 - j 1,1821$$

$$[\bar{y}_{Ae}^b][\bar{e}_A] = -1,0533 + j 0,5398$$

$$[\bar{y}_{Ae}^c][\bar{e}_A] = 0,9941 + j 0,6423$$

$$[\bar{y}_{Be}^a][\bar{e}_B] = 0,0 - j 16,0681$$

$$[\bar{y}_{Be}^b][\bar{e}_B] = -13,9153 + j 8,0349$$

$$[\bar{y}_{Be}^c][\bar{e}_B] = 13,9153 + j 8,0349$$

Ispišimo proširenu matricu koeficijenata prema 6-30.
Dobijemo tablicu 6.3.

Rješenje jednačbi daje:

$$\bar{v}_A^a = 0,988 + j 0,0086$$

$$\bar{v}_A^b = -0,4879 - j 0,8596$$

$$\bar{v}_A^c = -0,5003 + j 0,8516$$

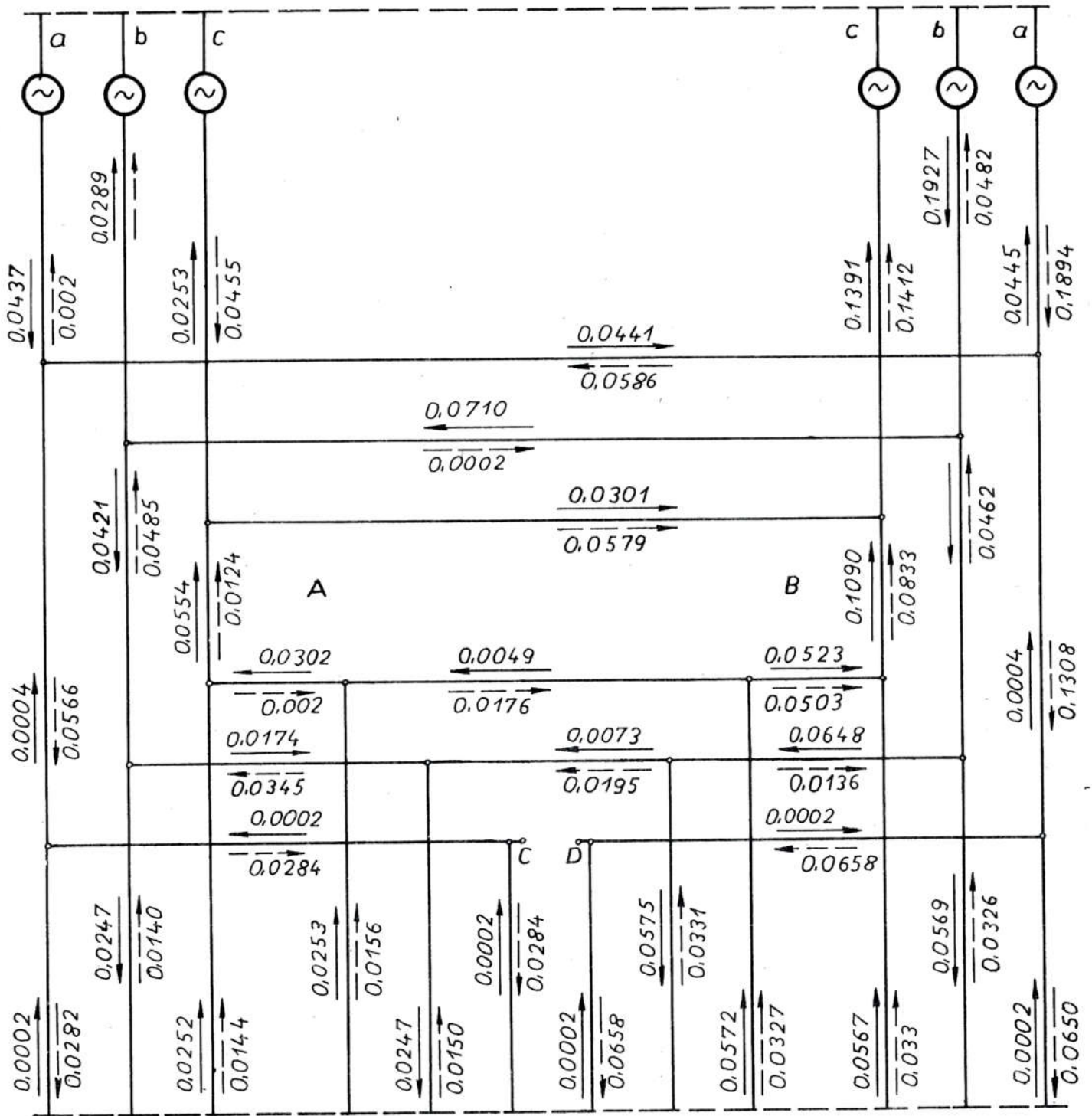
$$\bar{v}_B^a = 0,9787 + j 0,0027$$

$$\bar{v}_B^b = -0,4866 - j 0,8493$$

$$\bar{v}_B^c = -0,4922 + j 0,8461$$

Tablica 6.3

2,444 - 24,1731	- 0,7507 0,6526	1,4459 0,6526	- 0,7547 5,2879	- 0,7547 5,2879	- 0,7547 5,2879	- 0,1073 - 1,4265	- 1,6897 11,8387		- 0,2403 - 3,1937			0,0592 - 1,1821
1,4459 0,6526	2,4444 - 24,1613	- 0,1073 - 1,4265	- 0,7547 5,2879	- 0,7547 5,2879	- 0,1073 - 1,4265	- 0,1073 - 1,4265	- 0,2403 - 3,1937		- 0,2403 - 3,1937			- 1,0533 0,5398
- 0,7507 0,6526	1,4459 0,6526	2,4444 - 24,1631	- 0,1073 - 1,4265	- 0,1073 - 1,4265	- 0,7547 5,2879	- 0,7547 5,2879	- 0,2403 - 3,1937		- 0,2403 - 3,1937			0,9941 0,6423
- 0,7547 5,2879	- 0,1073 - 1,4265	- 0,1073 - 1,4265	1,4789 - 26,9119	0,2103 2,7892	0,2013 2,7892	- 0,7241 5,0737			- 0,103 - 1,3687			0,0 - 16,0681
- 0,1073 - 1,4265	- 0,7547 5,2879	- 0,1073 - 1,4265	0,2103 2,7892	1,4789 - 26,9119	0,2103 2,7892	- 0,103 - 1,3687			- 0,103 - 1,3687			- 13,9153 8,0349
- 0,1073 - 1,4265	- 0,1073 - 1,4265	- 0,7547 5,2879	0,2103 2,7892	0,2103 2,7892	1,4789 - 26,9119	- 0,103 - 1,3687			- 0,7241 5,0737			13,9153 8,0349
- 1,6897 11,8387	- 0,2403 - 3,1937	- 0,2403 - 3,1937				1,6897 - 11,8126			0,2403 3,1911			
- 0,2403 - 3,1937	- 1,6897 11,8387	- 0,2403 - 3,1937				0,2403 3,1911			0,2403 3,1911	1,0 0,0		
- 0,2403 - 3,1937	- 0,2403 - 3,1937	- 1,6897 11,8387				0,2403 3,1911			0,2403 3,1911	1,0 0,0		
			- 0,7241 5,0737	- 0,1030 - 1,3687	- 0,1030 - 1,3687	0,7242 - 5,0127			0,103 1,3627			
			- 0,1030 - 1,3687	- 0,7241 5,0737	- 0,1030 - 1,3687	0,103 1,3627			0,103 1,3627	- 1,0 0,0		
			- 0,103 - 1,3687	- 0,1030 - 1,3687	- 0,7241 5,0737	0,103 1,3627			0,103 1,3627	- 1,0 0,0		



Slika 135. - Raspodjela struja u trofaznoj ekvivalentnoj shemi mreže. Prekid faze a na dalekovodu A-B

$$\bar{v}_C^a = 0,9901 + j 0,0088$$

$$\bar{v}_D^a = 0,9885 + j 0,0007$$

$$\bar{v}^b = -0,4901 - j 0,8601$$

$$\bar{v}^c = -0,4997 + j 0,8539$$

$$\bar{i}^b = -0,0073 - j 0,0195$$

$$\bar{i}^c = -0,0049 + j 0,0176$$

Rezultati su unešeni u trofaznu ekvivalentnu shemu na slici 135.

Nulta komponenta struje na mjestu prekida iznosi

$$\bar{i}^0 = \frac{1}{3} (\bar{i}^b + \bar{i}^c) = -0,0041 - j 0,0006$$

Primjer 6.5 U primjeru 6.4 zanemarimo poprečne grane dalekovoda.

Ispišimo proširenu matricu koeficijenata prema 6-32.

Dobili smo tablicu 6.4.

Rješenje jednažbi daje:

$$\bar{v}_A^a = 0,9719 + j 0,0090$$

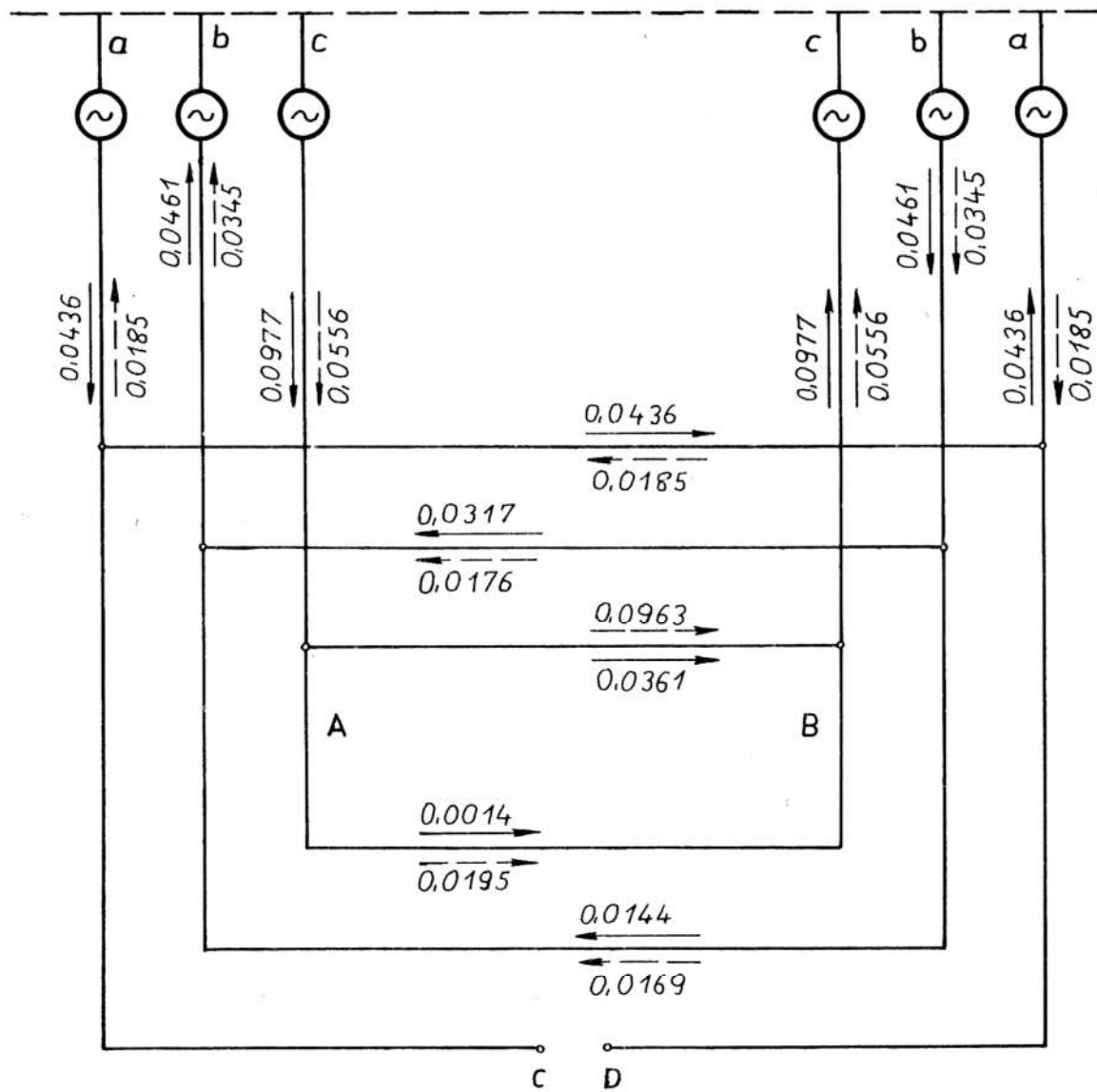
$$\bar{v}_A^b = -0,4793 - j 0,8452$$

$$\bar{v}_A^c = -0,4934 + j 0,8368$$

$$\bar{v}_B^a = 0,9684 + j 0,0026$$

$$\bar{v}_B^b = -0,4816 - j 0,8405$$

$$\bar{v}_B^c = -0,4871 + j 0,8373$$



Slika 136.- Raspodjela struja u trofaznoj ekvivalentnoj shemi
ako su zanemarene poprečne grane dalekovoda na
kojemu je prekid faze a

$$\bar{v}_C^a = 0,9722 + j 0,0093$$

$$\bar{v}_D^a = 0,9676 + j 0,0018$$

$$\bar{v}^b = -0,4800 - j 0,8438$$

$$\bar{v}^c = -0,4908 + j 0,8370$$

$$\bar{i}^b = -0,0144 - j 0,0169$$

$$\bar{i}^c = 0,0014 + j 0,0195$$

Rezultati su unešeni u trofaznu ekvivalentnu shemu na slici 136.

Nulta komponenta struje na mjestu prekida iznosi:

$$\bar{i}^0 = \frac{1}{3} (\bar{i}^b + \bar{i}^c) = -0,0043 + j 0,0009$$

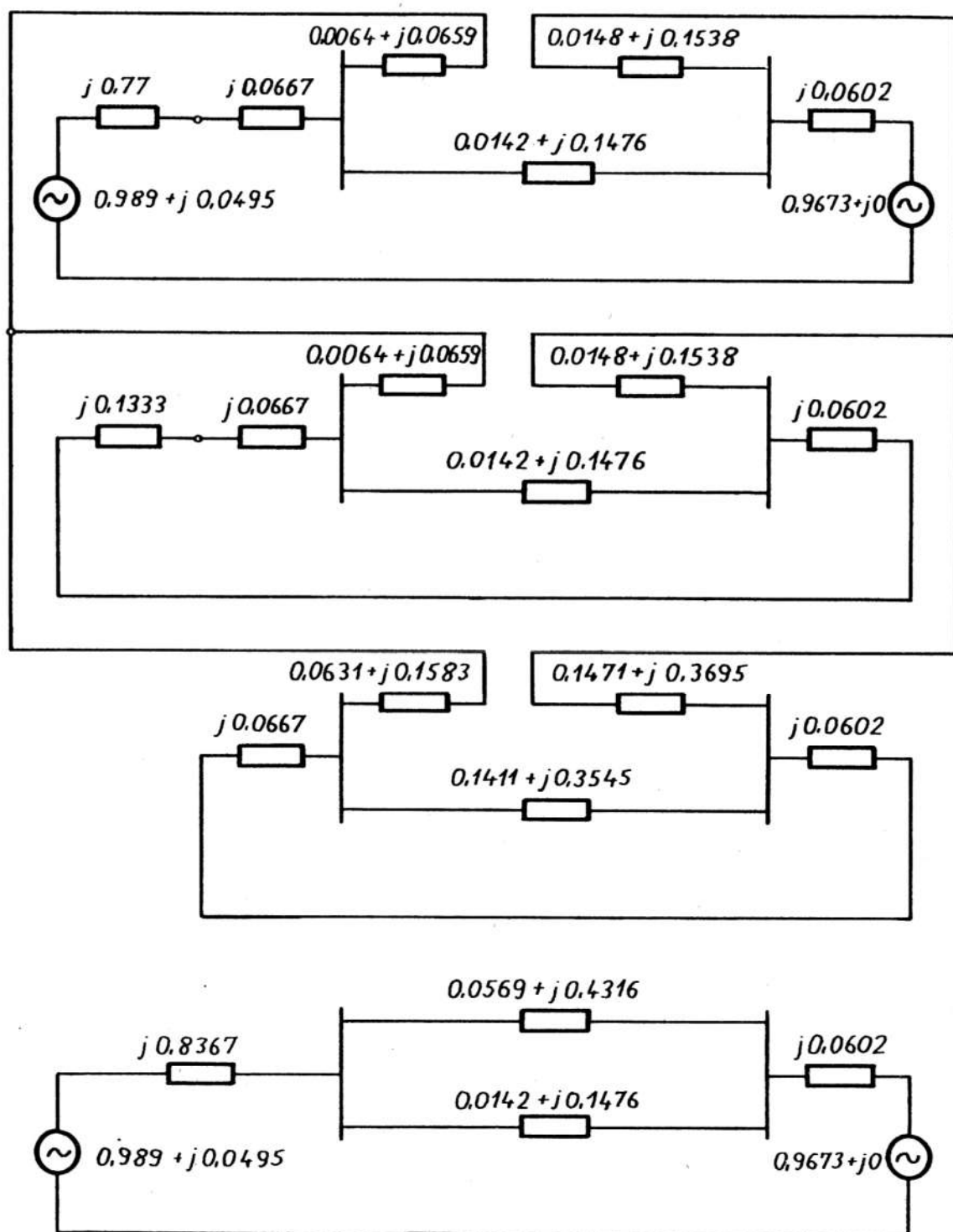
Primjer 6.6 Zadatak iz primjera 6.5 treba riješiti metodom koja koristi simetrične komponente.

Na slici 137a nacrtana je mreža komponenata. Mreže direktnog, inverznog i nultog sistema gledane iz A i B povezane su prema slici 133.

Na slici 137b nalazi se ista ekvivalentna shema u kojoj je prijenos dalekovodom u kvaru reduciran na jednu impedanciju, u ovom slučaju na impedanciju $0,0569 + j 0,4316$.

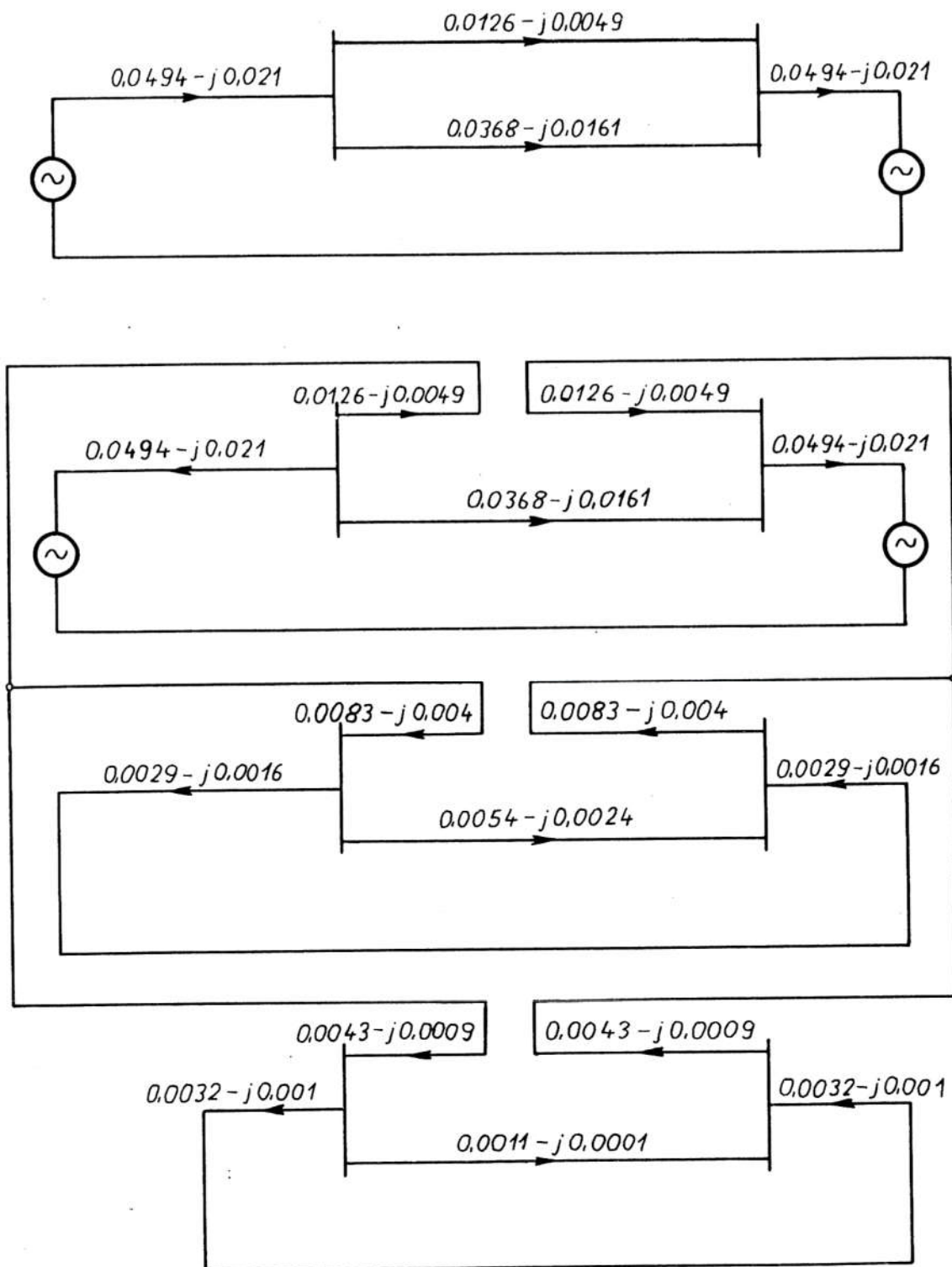
Izračunajmo električne prilike u mreži na slici 137b. Rezultati su upisani u shemi na slici 138a. Slijedi raspodjela struje u mreži na slici 138b.

Po poznatim formulama izračunajmo struje i napone faza originalne mreže. Možemo usporediti ove rezultate s rezultatima iz primjera 6.5.



Slika 137. - Ekvivalentna shema mreže ako je iskopčana faza a dalekovoda A-B

- a) mreže sistema komponenta povezane prema sl.133
- b) direktni sistem s uključenom impedancijom kvara



Slika 138.- Raspodjela struja u mreži sa sl.137

- a) direktni sistem s uključenom impedancijom kvara
- b) mreže sistema komponenta povezane prema sl.133.

U primjeru 6.5 nulta komponenta struje voda s prekidom iznosila je $\bar{i}^0 = -0,0043 + j 0,0009$, a isto toliko iznosi nulta komponenta struje u ovom primjeru, što se može očitati u nultom sistemu na sl.138b.

Struja faze a zdravog voda A-B u ovom primjeru iznosi

$$\begin{aligned}\bar{i}^a &= 0,0368 - j 0,0161 + 0,0054 - j 0,0024 + 0,0011 - j 0,0001 = \\ &= 0,0433 - j 0,0186 ,\end{aligned}$$

dok u primjeru 6.5 struja faze a iznosi:

$$\begin{aligned}\bar{i}^a &= 0,0434 - j 0,0185 \\ &\text{itd.}\end{aligned}$$

Rezultati u oba proračuna sa zanemarenim poprečnim granama potpuno su identični. Male razlike su rezultat nedovoljne točnosti računanja.

Primjer 6.7 Na vodu A-B, $c=0,3$, iz primjera 6.4 došlo je do prekida faza b i c. Potrebno je računati električne prilike.

Ispišimo proširenu matricu koeficijenata prema 6-37.

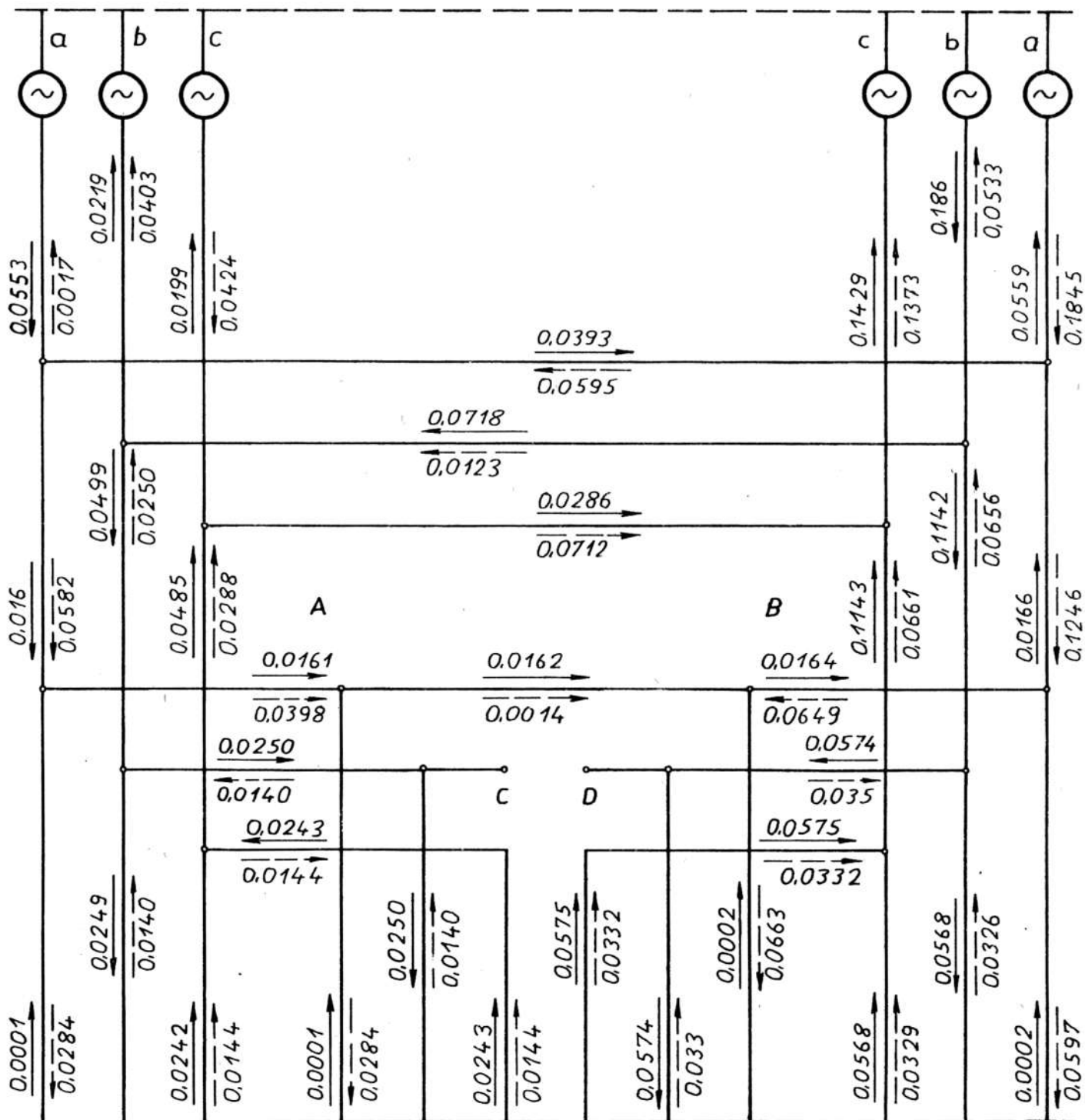
Dobijemo tablicu 6.5.

Rješenje jednadžbi daje:

$$\begin{aligned}\bar{v}_A^a &= 0,9880 + j 0,0079 \\ \bar{v}_A^b &= -0,4862 - j 0,8600 \\ \bar{v}_A^c &= -0,5018 + j 0,8512 \\ \bar{v}_B^a &= 0,9787 + j 0,0033 \\ \bar{v}_B^b &= -0,4869 - j 0,8489 \\ \bar{v}_B^c &= -0,4916 + j 0,8463\end{aligned}$$

Tablica 6.5

2,4444 - 24,1631	- 0,7507 0,6526	1,4459 0,6526	- 0,7547 5,2879	- 0,1073 - 1,4265	- 0,1073 - 1,4265	- 1,6897 11,8387	- 0,2403 - 3,1937	- 0,2403 - 3,1937			0,0592 - 1,1821
1,4459 0,6526	2,4444 - 24,1631	- 0,7507 0,6526	- 0,1073 - 1,4265	- 0,7547 5,2879	- 0,1073 - 1,4265	- 0,2403 - 3,1937	- 0,2403 - 3,1937	- 0,2403 - 3,1937			
- 0,7507 0,6526	1,44459 0,6526	2,4444 - 24,1631	- 0,1073 - 1,4265	- 0,1073 - 1,4265	- 0,7547 5,2879	- 0,2403 - 3,1937	- 1,6897 11,8387	- 0,2403 - 3,1937			0,9941 0,6423
- 0,7542 5,2879	- 0,1073 - 1,4265	- 0,1073 - 1,4265	1,4789 - 26,9119	0,2103 2,7892	0,2103 2,7892	- 0,7241 5,0737	- 0,1030 - 1,3687	- 0,1030 - 1,3687			0,0 - 16,0681
- 0,1073 - 1,4265	- 0,7542 5,2879	- 0,1073 - 1,4265	0,2103 2,7892	1,4789 - 26,9119	0,2103 2,7892	- 0,1030 - 1,3687	- 0,1030 - 1,3687	- 0,1030 - 1,3687			- 13,9153 8,0349
- 0,1073 - 1,4265	- 0,1073 - 1,4265	- 0,7542 5,2879	0,2103 2,7892	0,2103 2,7892	1,4789 - 26,9119	- 0,1030 - 1,3687	- 0,1030 - 1,3687	- 0,1030 - 1,3687			13,9153 8,0349
- 1,6897 11,8387	- 0,2403 - 3,1937	- 0,2403 - 3,1937				1,6897 - 11,8126	0,2403 3,1911	0,2403 3,1911	1,0 0,0		
- 0,2403 - 3,1937	- 1,6897 11,8387	- 0,2403 - 3,1937				0,2403 3,1911	1,6897 - 11,8126	0,2403 3,1911			
- 0,2403 - 3,1937	- 0,2403 - 3,1937	- 1,6897 11,8387				0,2403 3,1911	1,6897 - 11,8126	0,2403 3,1911			
			- 0,7241 5,0737	- 0,1030 - 1,3687	- 0,1030 - 1,3687	0,7242 - 5,0127		0,103 1,3627	- 1,0 0,0		
			- 0,1030 - 1,3687	- 0,7241 5,0737	- 0,1030 - 1,3687	0,103 1,3627		0,7242 - 5,0127			
			- 0,1030 - 1,3687	- 0,7241 5,0737	- 0,1030 - 1,3687	0,103 1,3627		0,103 1,3627			



Slika 139. - Raspodjela struja u trofaznoj ekvivalentnoj shemi mreže. Prekid faza b i c na dalekovodu A-B

$$\bar{v}^a = 0,9896 + j 0,0062$$

$$\bar{v}_C^b = -0,4876 - j 0,8621$$

$$\bar{v}_C^c = -0,5027 + j 0,8524$$

$$\bar{v}_D^b = -0,4922 - j 0,8560$$

$$\bar{v}_D^c = -0,4955 + j 0,8569$$

$$\bar{i}^a = 0,0162 + j 0,0014$$

Rezultati su unešeni u trofaznu ekvivalentnu shemu na sl.139.

Nulta komponenta struje na mjestu prekida iznosi

$$\bar{i}^0 = \frac{1}{3} \bar{i}^a = 0,0054 + j 0,0005$$

Primjer 6.8 Zanemarimo poprečne grane dalekovoda. Ispišimo proširenu matricu koeficijenata prema 6-39.

Dobit ćemo tablicu 6.6.

Rješenje jednažbi daje:

$$\bar{v}_A^a = 0,9717 + j 0,0083$$

$$\bar{v}_A^b = -0,4779 - j 0,8464$$

$$\bar{v}_A^c = -0,4941 + j 0,8373$$

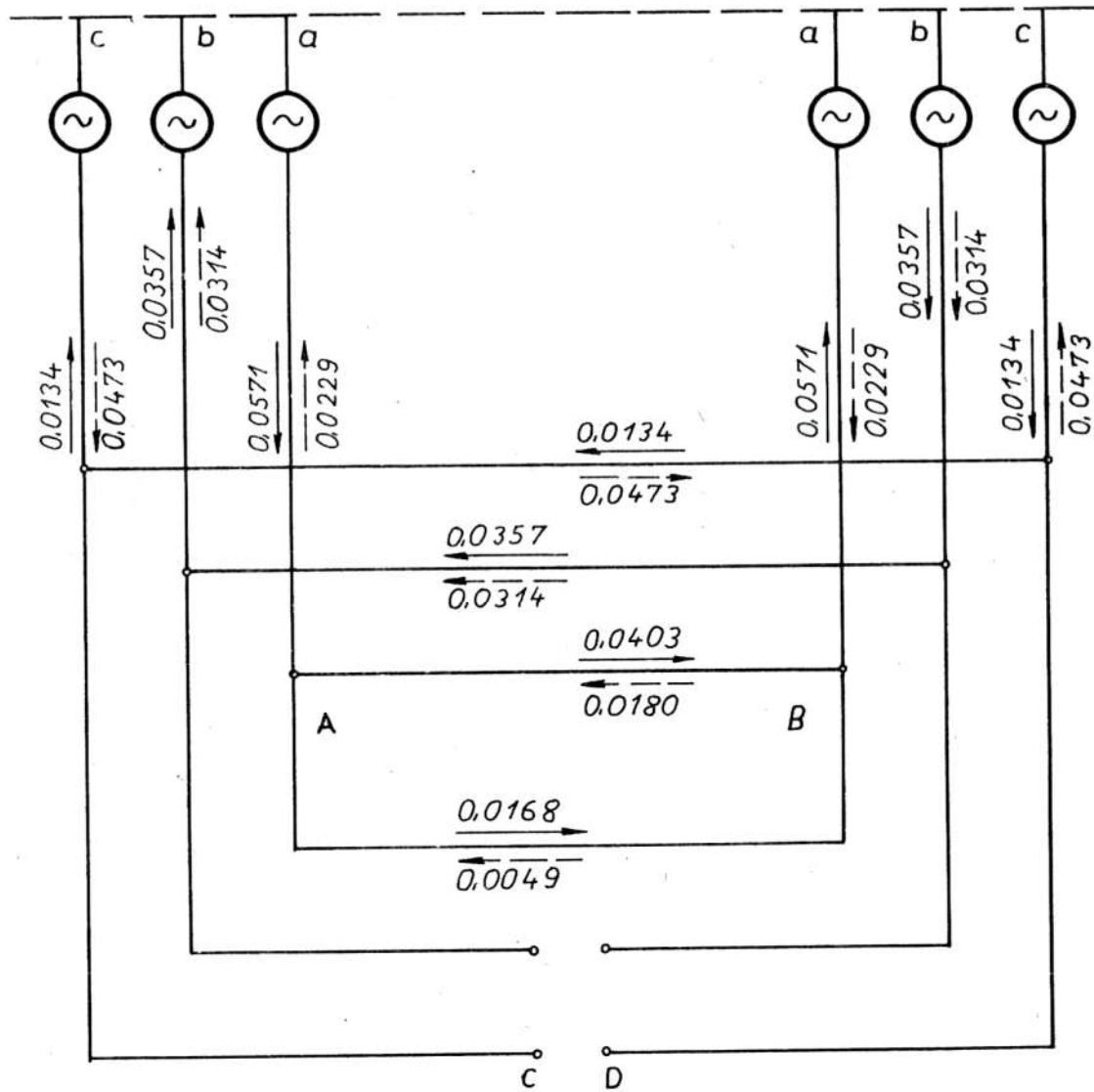
$$\bar{v}_B^a = 0,9687 + j 0,0033$$

$$\bar{v}_B^b = -0,4818 - j 0,8400$$

$$\bar{v}_B^c = -0,4867 + j 0,8375$$

Tablica 6.6

0,7547 -12,3505	-0,991 -2,5385	1,2056 -2,5385	-0,7547 5,2879	-0,1073 -1,4265	-0,1073 -1,4265	-0,1073 -1,4265	-0,1073 -1,4265	-0,1073 -1,4265	1,0 0,0	0,0592 -1,1621
1,2056 -1,5385	0,7547 -12,3505	-0,991 -2,5385	-0,1073 -1,4265	-0,7547 5,2879	-0,1073 -1,4265	-0,1073 -1,4265	-0,1073 -1,4265	-0,1073 -1,4265		-1,0533 0,5398
-0,991 -2,5385	1,2056 -2,5385	0,7547 -12,3505	-0,1073 -1,4265	-0,7547 -1,4265	-0,1073 -1,4265	-0,7547 5,2879	-0,1073 -1,4265	-0,7547 5,2879		0,9941 0,6423
-0,7547 5,2879	-0,1073 -1,4265	-0,1073 -1,4265	0,7547 -21,8992	0,1073 1,4265	0,1073 1,4265	0,1073 1,4265	0,1073 1,4265	0,1073 1,4265	-1,0 0,0	0,0 -16,0681
-0,1073 -1,4265	-0,7547 5,2879	-0,1073 -1,4265	0,1073 1,4265	0,7547 -21,8992	0,1073 1,4265	0,1073 1,4265	0,1073 1,4265	0,1073 1,4265		-13,9153 8,0349
-0,1073 -1,4265	-0,1073 -1,4265	-0,7547 5,2879	0,1073 1,4265	0,1073 1,4265	0,1073 1,4265	0,1073 1,4265	0,1073 1,4265	0,1073 1,4265		13,9153 8,0349
1,6897 -11,8387	0,2403 3,1937	0,2403 3,1937							-1,0 0,0	
0,2403 3,1937	1,6897 -11,8387	0,2403 3,1937								
0,2403 3,1937	0,2403 3,1937	1,6897 -11,8387								
			0,7241 -5,0737	0,1030 1,3687	0,1030 1,3687	0,1030 1,3687	0,1030 1,3687	0,1030 1,3687	1,0 0,0	
			0,1030 1,3687	0,7241 -5,0737	0,1030 1,3687	0,1030 1,3687	0,1030 1,3687	0,1030 1,3687		
			0,1030 1,3687	0,7241 -5,0737	0,1030 1,3687	0,1030 1,3687	0,1030 1,3687	0,1030 1,3687		



Slika 140.- Raspodjela struja u trofaznoj ekvivalentnoj shemi ako su zanemarene poprečne grane dalekovoda na kojemu je prekid faza b i c

$$\bar{v}^a = 0,9708 + j 0,0068$$

$$\bar{v}_C^b = -0,4784 - j 0,8468$$

$$\bar{v}_C^c = -0,4946 + j 0,8368$$

$$\bar{v}_D^b = -0,4807 - j 0,8390$$

$$\bar{v}_D^c = -0,4856 + j 0,8385$$

$$\bar{i}^a = 0,0168 - j 0,0049$$

Rezultati su uneseni u trofaznu ekvivalentnu shemu na sl.140.

Nulta komponenta struje na mjestu prekida iznosi

$$\bar{i}^0 = \frac{1}{3} \bar{i}^a = 0,0056 - j 0,0016$$

Primjer 6.9 Zadatak iz primjera 6.8 treba riješiti metodom simetričnih komponentata.

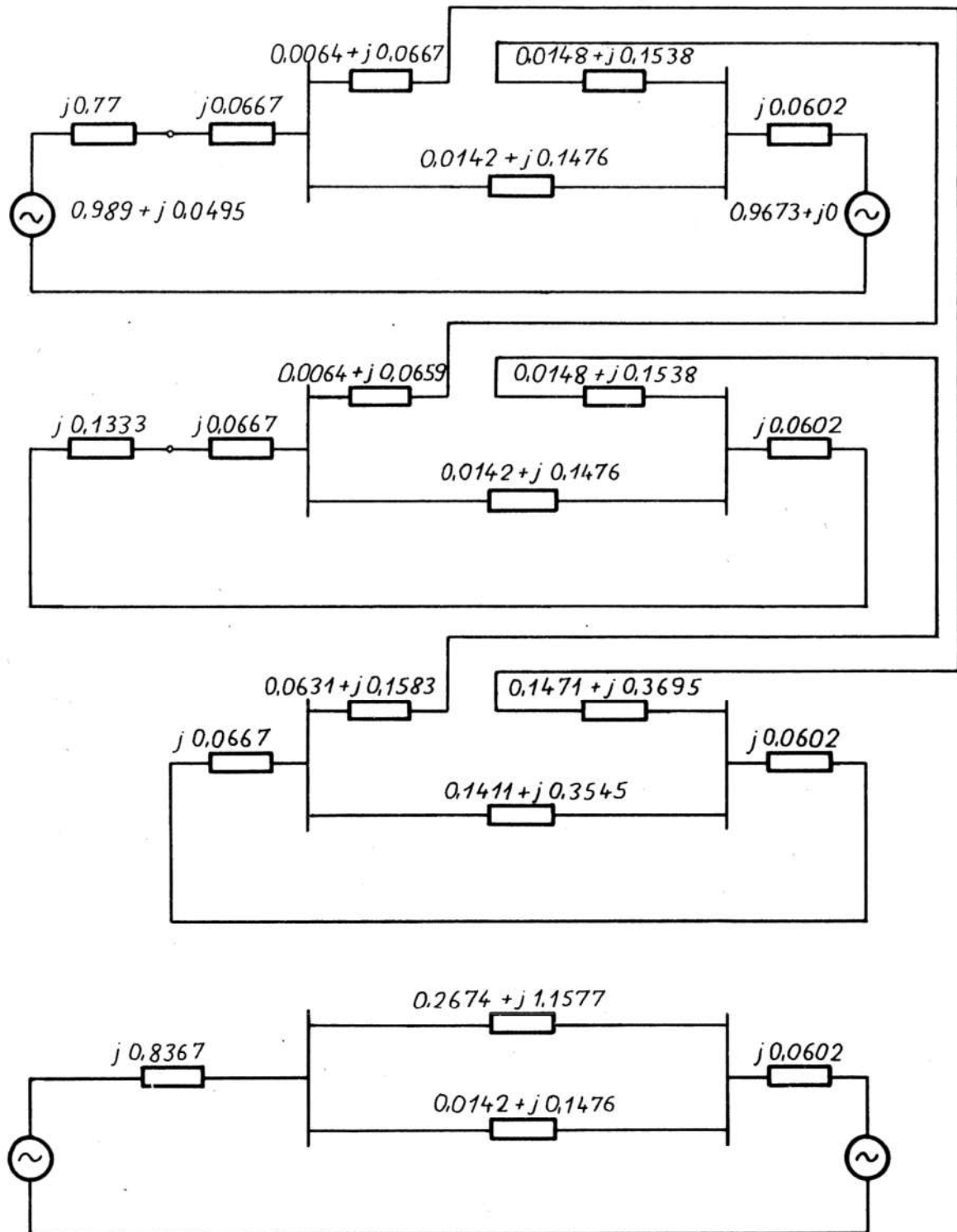
Sisteme komponentata direktnog, inverznog i nultog sistema mreže normalnog pogona povežimo prema slici 134. Dobili smo mrežu na slici 141a. Transfiguracijom inverznog i nultog sistema ova mreža se svela na mrežu sa slike 141b.

Izračunajmo struje i napone u mreži sa slike 141b, a zatim u mreži 141a. Rezultati su unešeni najprije u shemu mreže na slici 142a, a zatim u shemu mreže na sl.142b. Sada, kada imamo raspodjelu struja u sistemima komponentata, možemo računati struje originalnog sistema.

Usporedimo rezultate s rezultatima iz primjera 6.8.

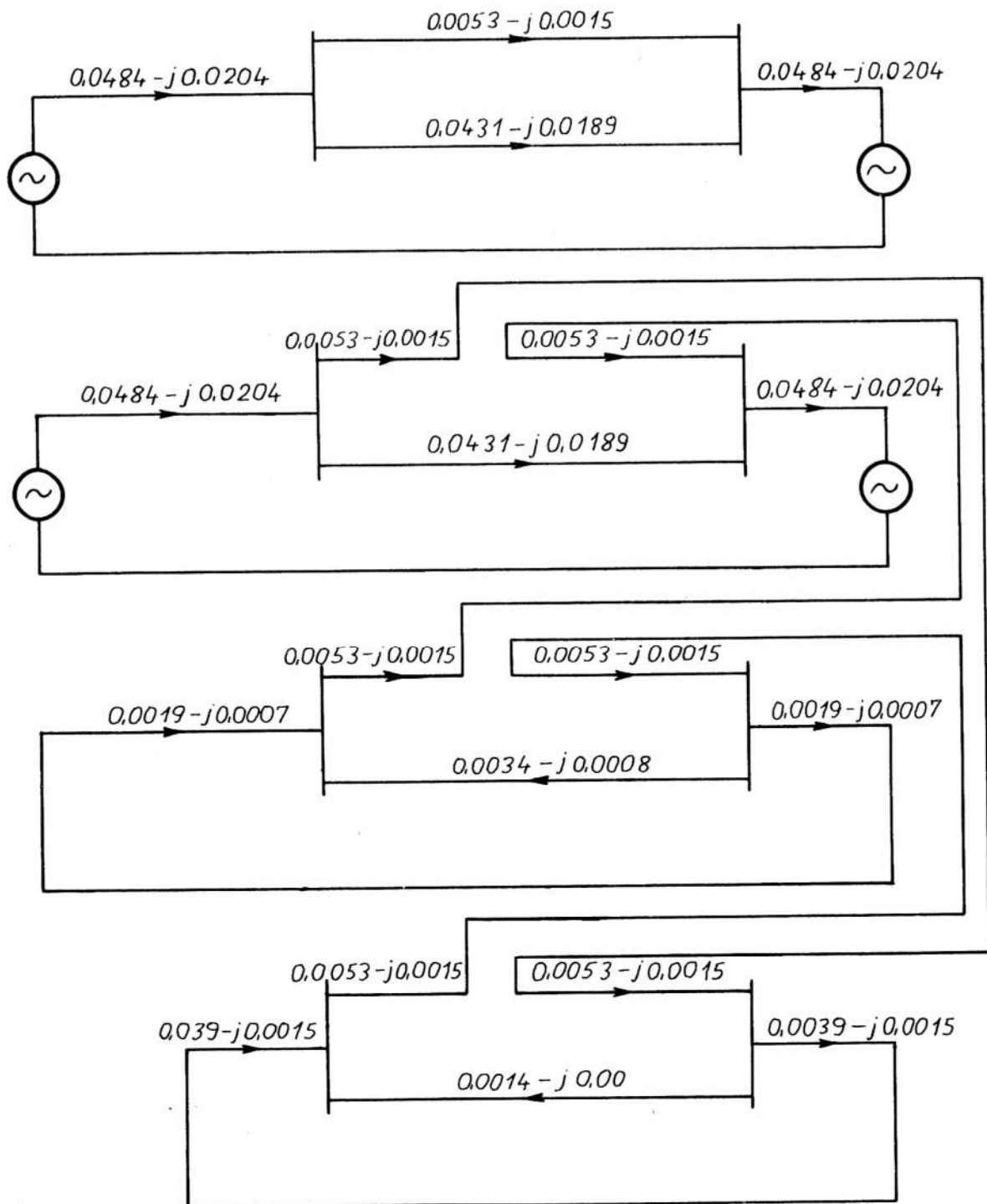
U primjeru 6.8, nulta komponenta struje voda s prekidom faza b i c, iznosi:

$$\bar{i}^0 = 0,0056 - j 0,0016$$



Slika 141. - Ekvivalentna shema mreže ako su iskopčane faze a i c dalekovoda A-B

- a) mreže sistema komponentata povezane prema sl.134
- b) direktni sistem s uključenom impedancijom kvara



Slika 142.- Raspodjela struja u mreži sa sl.141.

- a) direktni sistem s uključenom impedancijom kvara
- b) mreže sistema komponentata povezane prema sl.134

a u ovom primjeru

$$\bar{i}^0 = 0,0053 - j 0,0015$$

Struja faze a zdravog voda iz primjera 6.8 iznosi

$$\bar{i}^a = 0,0403 - j 0,0180,$$

a u ovom primjeru

$$\begin{aligned}\bar{i}^a &= 0,431 - j 0,0189 - 0,0034 + j 0,0008 - 0,0014 + j 0,000 = \\ &= 0,0397 - j 0,0181\end{aligned}$$

itd.

Ako uvažimo grešku računanja, možemo utvrditi da su rezultati identični.

6.3.5 Zaključak

Ovdje su za proračun prekida jedne, odnosno dviju faza dalekovoda, takodjer usporedjene tri metode i to: trofazna bez zanemarenja, trofazna sa zanemarenjem i metoda sa simetričnim komponentama.

Greške u proračunu su male, ako su zanemarene poprečne grane voda s prekidom. U prikazanom školskom primjeru kreće se greška na mjestu prekida za napone oko 2%, za nultu komponentu struje oko 5% i za struje zdravih faza oko 10%.

Slijedi zaključak da je točan proračun zanimljiv samo u posebnim slučajevima. Medjutim, pri izradbi programa treba voditi računa da su po opsegu računanja sve tri metode jednake. Zato ćemo ipak dati prednost metodi koja daje najbolje rezultate.

7. PARAMETRI DVOSTRUKOG DALEKOVODA

7.1 UVOD

Činjenica da u sistemu postoji velik broj dvostrukih dalekovoda zahtijeva da se u analizama dvostruki dalekovod uzima s više točnosti. Osim toga zanimljivo je ispitati pogonske slučajeve u kojima međusobni utjecaj vodova može dovesti u pitanje sigurnost osoblja.

Proračun ekvivalentne π -sheme dvostrukog dalekovoda kada su obje trojke u pogonu ne predstavlja problem i to je uspješno riješeno i onda kada se radi o vođu duljem od 200 km. Ovdje je prikazana π -shema jednostrukog i dvostrukog dalekovoda za slučajeve potpunog i nepotpunog prepleta. Treba napomenuti da se preplitanje vodova sve manje primjenjuje, te stoga nije potrebno previše opterećivati analize ovim problemom.

Nas u daljnjem tekstu, kao glavno, zanima π -shema jednostrukog voda koji nadomješta π -shemu dvostrukog voda, i to za niz slučajeva kao što su:

- obje trojke vezane paralelno,
- jedna trojka iskopčana i neuzemljena,
- jedna trojka iskopčana i uzemljena na oba kraja,
- jedna trojka iskopčana i uzemljena na jednom kraju,
- jedna trojka iskopčana i uzemljena na oba kraja, a prekid ove trojke negdje je na vođu.

U slučaju kada su obje trojke vezane paralelno, nema nikakve dileme kako dobiti parametre nadomjesne π -sheme. Dileme nastaju u ostalim slučajevima, pa π -shemu jednostrukog dalekovoda koja nadomješta π -shemu dvostrukog dalekovoda za slučajeve iskopčane jedne trojke treba pobliže definirati.

Ako je jedna trojka iskopčana (neka je to trojka voda II), na mrežu u A i B je priključena trojka voda I. Naponi i struje voda I su naponi i struje nadomjesne π -sheme koju tražimo. Za određeni slučaj parametri π -sheme voda I ovise o tretmanu is-

kopčane trojke, odnosno voda II.

U svim slučajevima pretpostavljamo da su nam poznate matrice π -sheme dvostrukog dalekovoda i iz ovih matrica računamo matrice π -sheme jednostrukog dalekovoda.

7.2 TROFAZNE π -HEME

7.2.1 Neprepleteni dvostruki vod

Ispisujemo matrice jediničnih konstanti vodiča. Matrice imaju onoliko redaka i stupaca koliko vod ima vodiča. Iz ovih matrica računamo matrice ekvivalentnih faznih vodiča. To su matrice dimenzije 6×6 . Preko ovih matrica ostvarena je veza između struja i napona kako slijedi:

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \bar{V}_I \\ \bar{V}_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{jI,I} & \bar{Z}_{jI,II} \\ \bar{Z}_{jII,I} & \bar{Z}_{jII,II} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{I}_I \\ \bar{I}_{II} \end{bmatrix} \quad 7-1a$$

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \bar{I}_I \\ \bar{I}_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{jI,I} & \bar{Y}_{jI,II} \\ \bar{Y}_{jII,I} & \bar{Y}_{jII,II} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{V}_I \\ \bar{V}_{II} \end{bmatrix} \quad b$$

Za vod kraći od 200 km računamo π -shemu dalekovoda iz:

$$[\bar{Z}_u] = \ell [\bar{Z}_j] \quad |\Omega| \quad 7-2a$$

$$[\bar{Y}_p] = \frac{\ell}{2} [\bar{Y}_j] \quad |S| \quad b$$

Na slici 143. prikazana je π -shema dvostrukog dalekovoda. Jednadžbe dvostrukog dalekovoda prema sl.143 glase:

$$[\bar{I}_{12I}] = [\bar{Y}_{uI,I}] [\Delta \bar{V}_I] + [\bar{Y}_{uI,II}] [\Delta \bar{V}_{II}] \quad 7-3a$$

$$[\bar{I}_{12II}] = [\bar{Y}_{uII,I}] [\Delta \bar{V}_I] + [\bar{Y}_{uII,II}] [\Delta \bar{V}_{II}] \quad b$$

$$[\Delta \bar{I}_{AI}] = [\bar{Y}_{pI,I}] [\bar{V}_{AI}] + [\bar{Y}_{pI,II}] [\bar{V}_{AII}] \quad c$$

$$[\Delta \bar{I}_{AII}] = [\bar{Y}_{pII,I}] [\bar{V}_{AI}] + [\bar{Y}_{pII,II}] [\bar{V}_{AII}] \quad d$$

$$[\Delta \bar{I}_{BI}] = [\bar{Y}_{pI,I}] [\bar{V}_{BI}] + [\bar{Y}_{pI,II}] [\bar{V}_{BII}] \quad e$$

$$[\Delta \bar{I}_{BII}] = [\bar{Y}_{pII,I}] [\bar{V}_{BI}] + [\bar{Y}_{pII,II}] [\bar{V}_{BII}] \quad f$$

$$[\bar{I}_{AI}] = [\bar{I}_{12I}] + [\Delta \bar{I}_{AI}] \quad g$$

$$[\bar{I}_{BI}] = [\bar{I}_{12I}] - [\Delta \bar{I}_{BI}] \quad h$$

$$[\bar{I}_{AII}] = [\bar{I}_{12II}] + [\Delta \bar{I}_{AII}] \quad i$$

$$[\bar{I}_{BII}] = [\bar{I}_{12II}] - [\Delta \bar{I}_{BII}] \quad j$$

Na slici 144. prikazana je ekvivalentna π -shema jednostrukog dalekovoda.

Jednadžbe jednostrukog dalekovoda sa sl.144. glase:

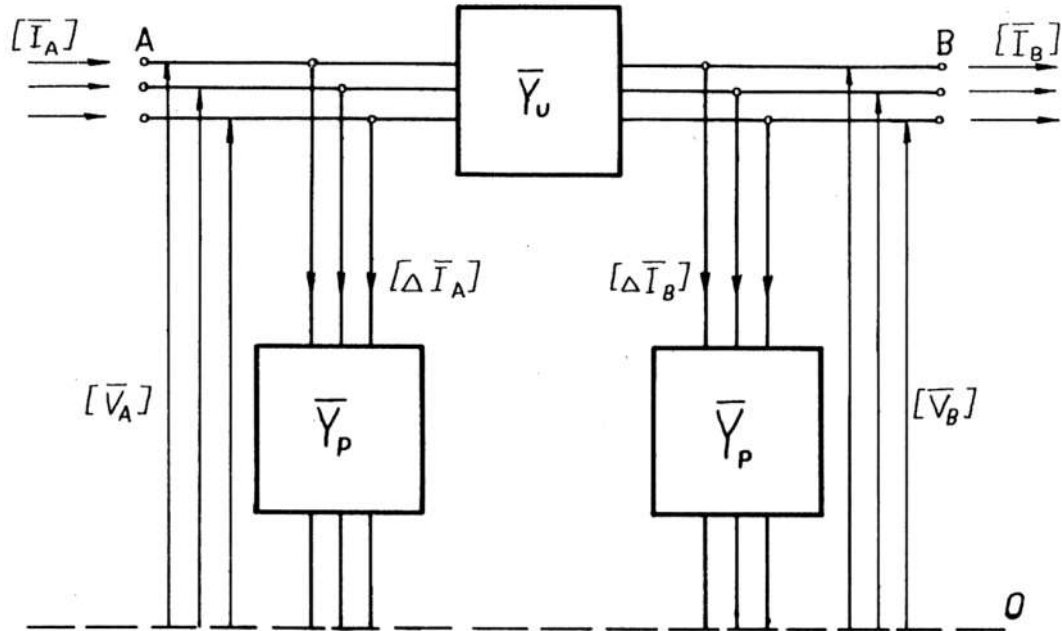
$$[\bar{I}_{12}] = [\bar{Y}_u] [\Delta \bar{V}] \quad 7-4a$$

$$[\Delta \bar{I}_A] = [\bar{Y}_p] [\bar{V}_A] \quad b$$

$$[\Delta \bar{I}_B] = [\bar{Y}_p] [\bar{V}_B] \quad b$$

$$[\bar{I}_A] = [\bar{I}_{12}] + [\Delta \bar{I}_A] \quad d$$

$$[\bar{I}_B] = [\bar{I}_{12}] - [\Delta \bar{I}_B] \quad e$$



Slika 144.- π -shema jednostrukog dalekovoda

Ako su oba voda dvostrukog dalekovoda priključena na iste sabirnice u A i u B, možemo dvostruki dalekovod prikazati π -shemom jednostrukog dalekovoda. Uvjeti povezivanja u A i B su:

$$[\Delta \bar{V}_I] = [\Delta \bar{V}_{II}] = [\Delta \bar{V}] \quad 7-5a$$

$$[\bar{V}_{AI}] = [\bar{V}_{AII}] = [\bar{V}_A] \quad b$$

$$[\bar{V}_{BI}] = [\bar{V}_{BII}] = [\bar{V}_B] \quad c$$

$$[\bar{I}_{AI}] + [\bar{I}_{AII}] = [\bar{I}_A] \quad d$$

$$[\bar{I}_{BI}] + [\bar{I}_{BII}] = [\bar{I}_B] \quad e$$

$$[\Delta \bar{I}_{AI}] + [\Delta \bar{I}_{II}] = [\Delta \bar{I}_A] \quad f$$

$$[\Delta \bar{I}_{BI}] + [\Delta \bar{I}_{BII}] = [\Delta \bar{I}_B] \quad g$$

iz čega slijedi dalje:

$$[\bar{I}_{12I}] + [\bar{I}_{12II}] = [\bar{I}_A] - [\Delta \bar{I}_A] = [\bar{I}_{12}] \quad 7-6a$$

$$[\bar{I}_{12I}] + [\bar{I}_{12II}] = [\bar{I}_B] + [\Delta \bar{I}_B] = [\bar{I}_{12}] \quad b$$

$$[\Delta \bar{I}_{AI}] = ([\bar{Y}_{pI,I}] + [\bar{Y}_{pI,II}]) [\bar{V}_A] \quad 7-7a$$

$$[\Delta \bar{I}_{AII}] = ([\bar{Y}_{pII,I}] + [\bar{Y}_{pII,II}]) [\bar{V}_A] \quad b$$

$$[\Delta \bar{I}_{BI}] = ([\bar{Y}_{pI,I}] + [\bar{Y}_{pI,II}]) [\bar{V}_B] \quad c$$

$$[\Delta \bar{I}_{BII}] = ([\bar{Y}_{pII,I}] + [\bar{Y}_{pII,II}]) [\bar{V}_B] \quad d$$

Zbrajanjem relacija 7-7a i 7-7b, odnosno 7-7c i 7-7d, te uvažavanjem 7-5f-g dobijemo da je:

$$[\Delta \bar{I}_A] = ([\bar{Y}_{pI,I}] + [\bar{Y}_{pI,II}] + [\bar{Y}_{pII,I}] + [\bar{Y}_{pII,II}]) [\bar{V}_A] \quad 7-8a$$

$$[\Delta \bar{I}_B] = ([\bar{Y}_{pI,I}] + [\bar{Y}_{pI,II}] + [\bar{Y}_{pII,I}] + [\bar{Y}_{pII,II}]) [\bar{V}_B], \quad b$$

te je prema tome:

$$[\bar{Y}_p] = [\bar{Y}_{pI,I}] + [\bar{Y}_{pI,II}] + [\bar{Y}_{pII,I}] + [\bar{Y}_{pII,II}] \quad 7-9$$

Pošto je dalje:

$$[\bar{I}_{12I}] = ([\bar{Y}_{uI,I}] + [\bar{Y}_{uI,II}]) [\Delta \bar{V}] \quad 7-10a$$

$$[\bar{I}_{12II}] = ([\bar{Y}_{uII,I}] + [\bar{Y}_{uII,II}]) [\Delta \bar{V}], \quad b$$

zbrajanjem jednađbi 7-10a i b slijedi

$$[\bar{I}_{12}] = ([\bar{Y}_{uI,I}] + [\bar{Y}_{uI,II}] + [\bar{Y}_{uII,I}] + [\bar{Y}_{uII,II}]) [\Delta \bar{V}] \quad 7-11$$

te je prema tome

$$[\bar{Y}_u] = [\bar{Y}_{uI,I}] + [\bar{Y}_{uI,II}] + [\bar{Y}_{uII,I}] + [\bar{Y}_{uII,II}] \quad 7-12$$

Ako se radi o dva jednaka paralelna voda, relacije 7-9 odnosno 7-12 prelaze u:

$$[\bar{Y}_p] = 2 ([\bar{Y}_{pI,I}] + [\bar{Y}_{pI,II}]) \quad 7-13$$

$$[\bar{Y}_u] = 2 ([\bar{Y}_{uI,I}] + [\bar{Y}_{uI,II}]) \quad 7-14$$

U ovim, a i u slijedećim razmatranjima, treba uvažiti da inverzija

$$[\bar{Z}] = [\bar{Y}]^{-1} \quad 7-15$$

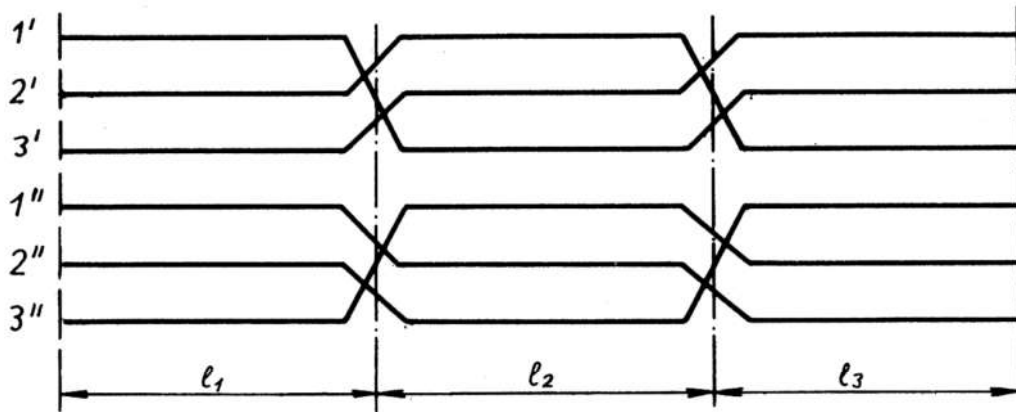
ne vrijedi za submatrice.

7.2.2 Djelomično prepleteni dvostruki dalekovod

Na slici 145 prikazan je djelomični preplet dvostrukog dalekovoda.

Možemo ispisati položaje faza kako je to učinjeno u tabeli:

	vod I			vod II		
	1'	2'	3'	1"	2"	3"
ℓ_1	a	b	c	c	b	a
ℓ_2	b	c	a	a	c	b
ℓ_3	c	a	b	b	a	c



Slika 145.- Djelomično prepleteni vod

Za svaku dionicu mogu se ispisati matrice uzdužnih impedancija i matrice poprečnih admitancija. Odnose između matrica dionica diktiraju međusobni položaji faza. Zato ćemo te odnose utvrditi kroz matrice geometrijskih odnosa vlastitih faza i faza vodova međusobno.

Dionica 1 :

		vod I			vod II		
		a	b	c	a	b	c
vod I	a	1' 1'	1' 2'	1' 3'	1' 3"	1' 2"	1' 1"
	b	2' 1'	2' 2'	2' 3'	2' 3"	2' 2'	2' 1"
	c	3' 1'	3' 2'	3' 3'	3' 3"	3' 2"	3' 1"
vod II	a	3" 1'	3" 2'	3" 3'	3" 3"	3" 2"	3" 1"
	b	2" 1'	2" 2'	2" 3'	2" 3"	2" 2"	2" 1"
	c	1" 1'	1" 2'	1" 3'	1" 3"	1" 2"	1" 1"

Dionica 2 :

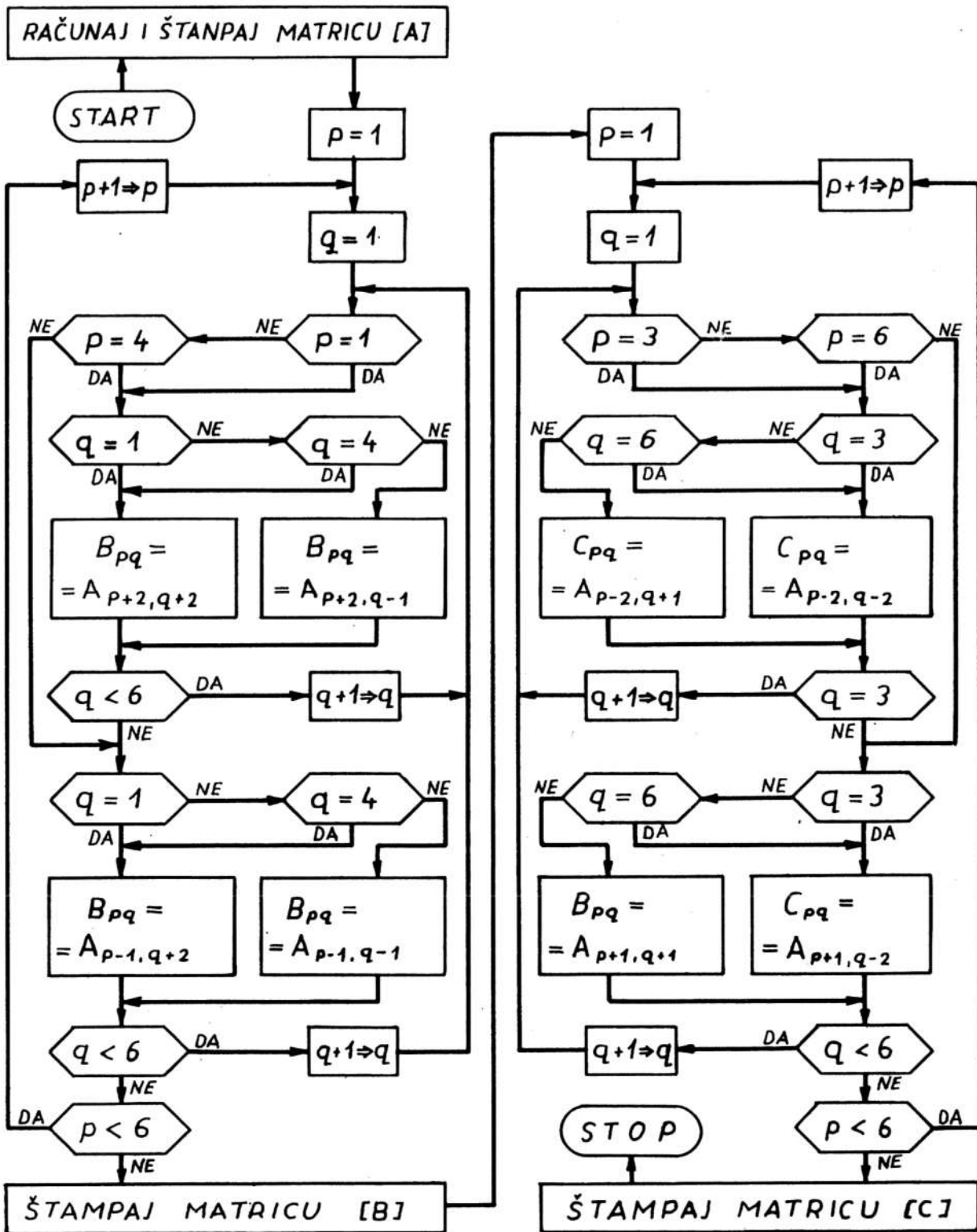
		vod I			vod II		
		a	b	c	a	b	c
vod I	a	3' 3'	3' 1'	3' 2'	3' 1"	3' 3"	3' 2"
	b	1' 3'	1' 1'	1' 2'	1' 1"	1' 3"	1' 2"
	c	2' 3'	2' 1'	2' 2'	2' 1"	2' 3"	2' 2"
vod II	a	1" 3'	1" 1'	1" 2'	1" 1"	1" 3"	1" 2"
	b	3" 3'	3" 1'	3" 2'	3" 1"	3" 3"	3" 2"
	c	2" 3'	2" 1'	2" 2'	2" 1"	2" 3"	2" 2"

Dionica 3 :

		vod I			vod II		
		a	b	c	a	b	c
vod I	a	2' 2'	2' 3'	2' 1'	2' 2"	2' 1"	2' 3"
	b	3' 2'	3' 3'	3' 1'	3' 2"	3' 1"	3' 3"
	c	1' 2'	1' 3'	1' 1'	1' 2"	1' 1"	1' 3"
vod II	a	2" 2'	2" 3'	2" 1'	2" 2"	2" 1"	2" 3"
	b	1" 2'	1" 3'	1" 1'	1" 2"	1" 1"	1" 3"
	c	3" 2'	3" 3'	3" 1'	3" 2"	3" 1"	3" 3"

Na slici 146. prikazan je dijagram toka za računanje matrica druge i treće dionice kod djelomičnog prepleta. Matrica [A] neka je poznata matrica dionice 1. Iz ove poznate matrice formiraju se matrica [B] dionice 2 i matrica [C] dionice 3. Fizikalno značenje matrica [C] i [B] odgovara fizikalnom značenju matrice [A].

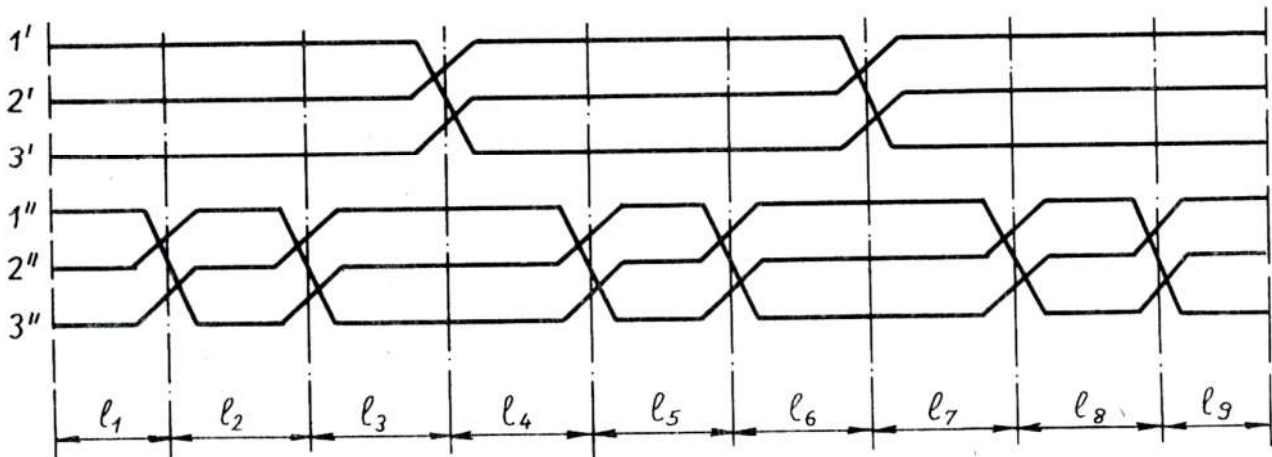
Sve su matrice simetrične, pa se to može koristiti pri izradi dijagrama toka, što ovdje nije uradjeno.



Slika 146.- Računanje matrica druge i treće dionice kod djelomičnog prepleta

7.2.3 Potpuno prepleteni dvostruki vod

Na slici 147. prikazan je preplet dvostrukog dalekovoda. Možemo ispisati položaje faza za 9 dionica, a iz ovih 9 matrica geometrijskih odnosa vlastitih faza i faza vodova međusobno, kako je to načinjeno u prethodnom slučaju.

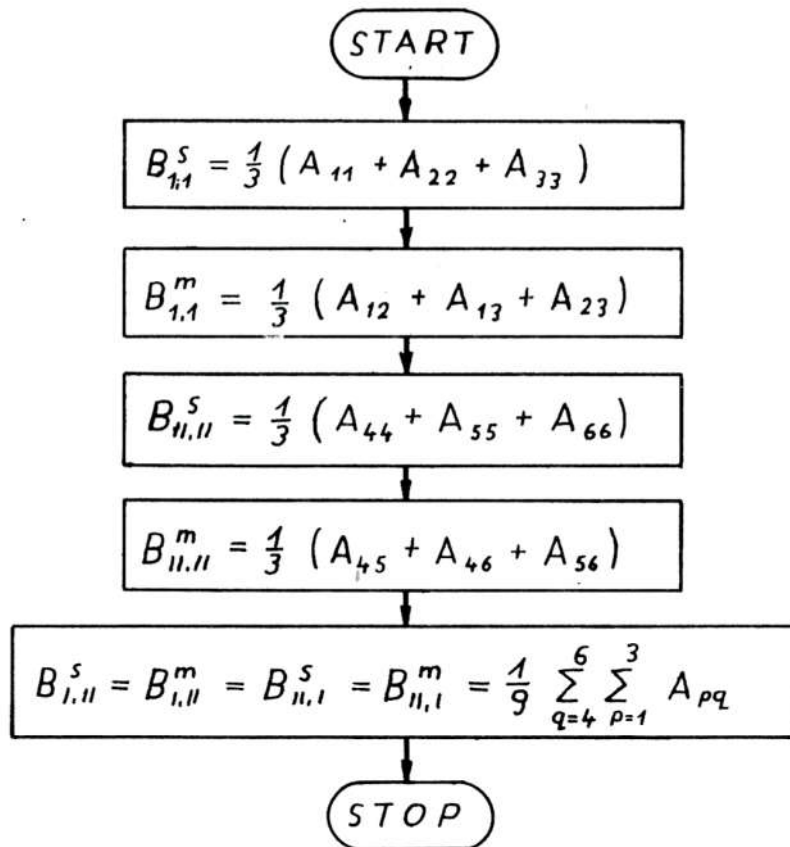


Slika 147. - Potpuno prepleteni vod

Dijagram toka na sl. 148. pokazuje računanje članova matrice $[B]$ iz matrice $[A]$. Matrica $[A]$ je poznata matrica dionice 1. Matrica $[B]$ je matrica koja ima isto fizikalno značenje kao matrica $[A]$, a odnosi se na cijeli vod.

Matrica $[B]$ je simetrična matrica. Ako vodovi nisu jednaki (što je teoretski slučaj), imamo tri grupe različitih članova matrice $[B]$. Jednaki su međusobno:

- a) dijagonalni članovi matrice $[B_{I,I}]$
- b) izvandijagonalni članovi matrice $[B_{I,I}]$
- c) dijagonalni članovi matrice $[B_{II,II}]$
- d) izvandijagonalni članovi matrice $[B_{II,II}]$
- e) članovi matrice $[B_{I,II}] = [B_{II,I}]$

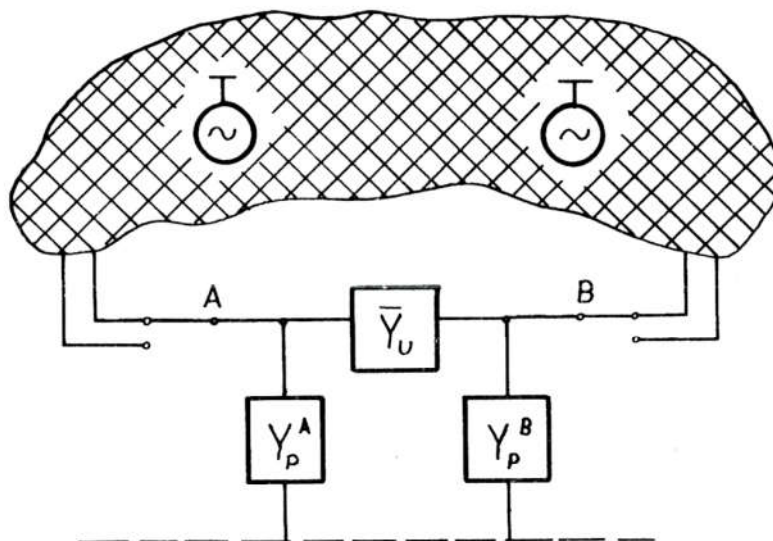


Slika 148, - Računanje matrice potpuno prepletenog
voda iz matrice prve dionice

7.3 ISKOPČANA JEDNA TROJKA DVOSTRUKOG DALEKOVODA

Kada je kod dvostrukog dalekovoda iskopčana jedna trojka, neka je to npr. vod II, samo je vod I vezan na mrežu. Zanima nas trofazna π -shema voda I s utjecajem iskopčanog voda II.

Na slici 149. prikazan je mreža s uključenim vodom I između A i B. Postojanje voda II, iako je isključen, utječe na matrice $[\bar{Y}_u]$ i $[\bar{Y}_p]$ voda I. Ovisno o tretmanu voda II, postojat će razlike između matrica $[\bar{Y}_p^A]$ i $[\bar{Y}_p^B]$ voda I.



Slika 149. - π -shema dvostrukog dalekovoda kada je jedna trojka iskopčana

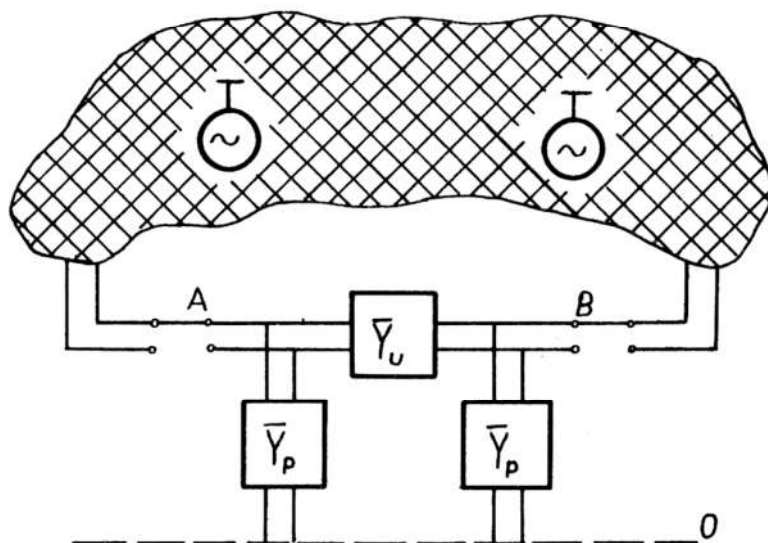
7.3.1 Iskopčana trojka neuzemljena

Uvjeti za ovaj pogonski slučaj (sl.150) su:

$$[\bar{I}_{AII}] = [\bar{I}_{BII}] = [0]$$

7-16

Uvažimo li 7-3d, f i j i 7-16 dobit ćemo da je:



Slika 150. - Iskopčana jedna trojka i neuzemljena

$$- [\bar{I}_{12II}] = [\bar{Y}_{pII,I}] [\bar{V}_{AI}] + [\bar{Y}_{pII,II}] [\bar{V}_{AII}] \quad 7-17a$$

$$[\bar{I}_{12II}] = [\bar{Y}_{pII,I}] [\bar{V}_{BI}] + [\bar{Y}_{pII,II}] [\bar{V}_{BII}] \quad b$$

Odbijmo relaciju 7-17b od 7-17a:

$$[\bar{I}_{12II}] = - \frac{1}{2} ([\bar{Y}_{pII,I}] [\Delta \bar{V}_I] + [\bar{Y}_{pII,II}] [\Delta \bar{V}_{II}]) \quad 7-18$$

Relaciju 7-18 izjednačimo s relacijom 7-3b:

$$[\bar{Y}_{uII,I}] [\Delta \bar{V}_I] + [\bar{Y}_{uII,II}] [\bar{V}_{II}] = - \frac{1}{2} [\bar{Y}_{pII,I}] [\Delta \bar{V}_I] - \frac{1}{2} [\bar{Y}_{pII,II}] [\Delta \bar{V}_{II}]$$

$$[\Delta \bar{V}_{II}] = -(2[\bar{Y}_{uII,II}] + [\bar{Y}_{pII,II}])^{-1} \cdot (2[\bar{Y}_{uII,I}] + [\bar{Y}_{pII,I}]) [\Delta \bar{V}_I] \quad 7-19$$

Izraz za $[\Delta \bar{V}_{II}]$ uvrstimo u 7-3a i sredimo:

$$[\bar{I}_{12I}] = \{ [\bar{Y}_{uI,I}] - [\bar{Y}_{uI,II}] (2[\bar{Y}_{uII,II}] + [\bar{Y}_{pII,II}])^{-1} (2[\bar{Y}_{uII,I}] + [\bar{Y}_{pII,I}]) \} [\Delta \bar{V}_I] \quad 7-20$$

te je prema tome

$$[\bar{Y}_u] = [\bar{Y}_{uI,I}] - [\bar{Y}_{uI,II}] (2[\bar{Y}_{uII,II}] + [\bar{Y}_{pII,II}])^{-1} \cdot (2[\bar{Y}_{uII,I}] + [\bar{Y}_{pII,I}]) \quad 7-21a$$

ili

$$[\bar{Y}_u] = [\bar{Y}_{uI,I}] - [\bar{Y}_{uI,II}] [C]^{-1} [D] \quad b$$

Sada odbijmo relaciju 7-3e od 7-3c:

$$[\Delta \bar{I}_{AI}] - [\Delta \bar{I}_{BI}] = [\bar{Y}_{pI,I}] [\Delta \bar{V}_I] + [\bar{Y}_{pI,II}] [\Delta \bar{V}_{II}] \quad 7-22$$

i uvrstimo u 7-22 izraz 7-19 za $[\Delta \bar{V}_{II}]$ što sredjeno daje

$$\begin{aligned} [\Delta \bar{I}_{AI}] - [\Delta \bar{I}_{BI}] &= [\Delta \bar{Y}_{pI,I}] - [\bar{Y}_{pI,II}] (2[\bar{Y}_{uII,II}] + [\bar{Y}_{pII,II}])^{-1} (2[\bar{Y}_{uII,I}] + [\bar{Y}_{pII,I}]) [\Delta \bar{V}_I] = \\ &= [\bar{Y}_p] [\bar{V}_{AI}] - [\bar{Y}_p] [\bar{V}_{BI}] \end{aligned} \quad 7-23$$

Iz izraza 7-23 slijedi

$$[\Delta \bar{I}_{AI}] = [\bar{Y}_p] [\bar{V}_{AI}] \quad 7-24a$$

$$[\Delta \bar{I}_{BI}] = [\bar{Y}_p] [\bar{V}_{BI}] \quad b$$

te je stoga

$$[Y_p^A] = [Y_p^B] = [\bar{Y}_p] = [\bar{Y}_{pI,I}] - [\bar{Y}_{pI,II}] (2[\bar{Y}_{uII,II}] + [\bar{Y}_{pII,II}])^{-1} (2[\bar{Y}_{u,II,I}] + [\bar{Y}_{pII,I}]) \quad 7-25a$$

ili

$$[Y_p^A] = [Y_p^B] = [\bar{Y}_p] = [\bar{Y}_{pI,I}] - [\bar{Y}_{pI,II}] [C]^{-1} [D] \quad b$$

Relacije 7-21 i 7-25 su upravo tražene matrice trofazne π -sheme voda I kada je vod II iskopčan i neuzemljen.

Nakon izvršenog proračuna s trofaznom π -shemom voda I s uključenim utjecajem voda II prelazimo na računanje električnih veličina voda II.

Iz relacija 7-3c,f, 7-24 i 7-25 slijedi

$$\begin{aligned} [\bar{V}_{AII}] &= [\bar{Y}_{pI,II}]^{-1} ([\Delta \bar{I}_{AI}] - [\bar{Y}_{pI,I}] [\bar{V}_{AI}]) = \\ &= [\bar{Y}_{pI,II}]^{-1} ([\bar{Y}_p] [\bar{V}_{AI}] - [\bar{Y}_{pI,I}] [\bar{V}_{AI}]) = -[C]^{-1} [D] [\bar{V}_{AI}] \quad 7-26 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [\bar{V}_{BII}] &= [\bar{Y}_{pI,II}]^{-1} ([\Delta \bar{I}_{BI}] - [\bar{Y}_{pI,I}] [\bar{V}_{BI}]) = \\ &= [\bar{Y}_{pI,II}]^{-1} ([\bar{Y}_p] [\bar{V}_{BI}] - [\bar{Y}_{pI,I}] [\bar{V}_{BI}]) = -[C]^{-1} [D] [\bar{V}_{BI}] \quad 7-27 \end{aligned}$$

U izrazima 7-21b, 7-24b, 7-26 i 7-27 znači

$$[C] = 2 [\bar{Y}_{uII,II}] + [\bar{Y}_{pII,II}] \quad 7-28$$

$$[D] = 2 [\bar{Y}_{uII,I}] + [\bar{Y}_{pII,I}] \quad 7-29$$

7.3.2 Iskopčana trojka uzemljena na oba kraja

Uvjeti za ovaj pogonski slučaj (sl.151) jesu

$$[\bar{V}_{AII}] = [\bar{V}_{BII}] = [0] \quad 7-30a$$

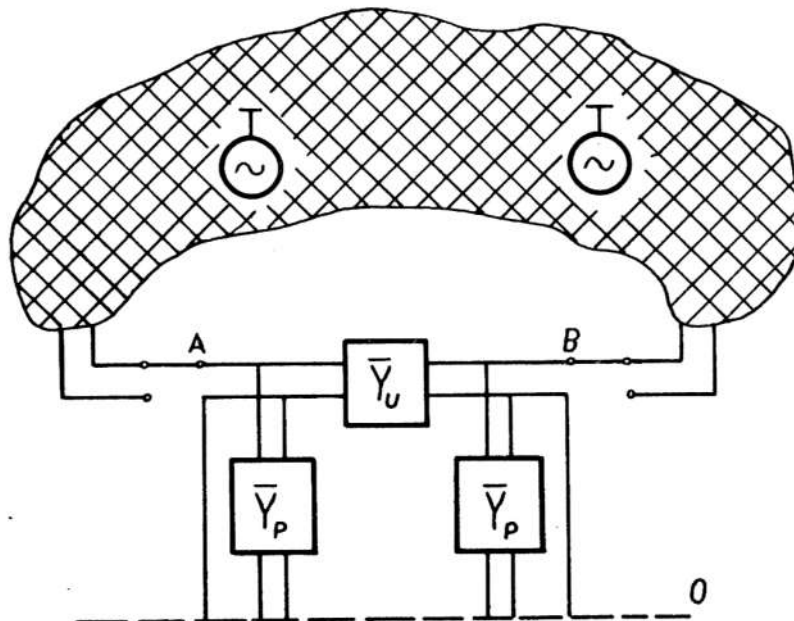
$$[\Delta \bar{V}_{II}] = [0] \quad b$$

što uvršteno u relacije 7-3a, c i e daje odmah

$$[\bar{I}_{12I}] = [\bar{Y}_{uI,I}] [\Delta \bar{V}_I] \quad 7-31a$$

$$[\Delta \bar{I}_{AI}] = [\bar{Y}_{pI,I}] [\bar{V}_{AI}] \quad b$$

$$[\Delta \bar{I}_{BI}] = [\bar{Y}_{pI,I}] [\bar{V}_{BI}] \quad c$$



Slika 151. - Iskopčana jedna trojka i uzemljena na oba kraja

Stoga je:

$$[\bar{Y}_u] = [\bar{Y}_{uI,I}] \quad 7-32a$$

$$[\bar{Y}_p^A] = [\bar{Y}_p^B] = [\bar{Y}_p] = [\bar{Y}_{pI,I}] \quad b$$

Relacije 7-32 su upravo tražene matrice trofazne π -sheme voda I kada je vod II iskopčan i uzemljen na oba kraja.

Nakon izvršenog proračuna s trofaznom π -shemom voda I s uključenim utjecajem voda II prelazimo na računanje električnih veličina voda II.

Kada se uzme u obzir 7-30ab i relacije 7-3bdf daje:

$$[\bar{I}_{12II}] = [\bar{Y}_{uII,I}] [\Delta \bar{V}_I] = [\bar{Y}_{uII,I}] [\bar{Y}_{uI,I}]^{-1} [\bar{I}_{12I}] \quad 7-33a$$

$$[\Delta \bar{I}_{AII}] = [\bar{Y}_{pII,I}] [\bar{V}_{AI}] \quad b$$

$$[\Delta \bar{I}_{BII}] = [\bar{Y}_{pII,I}] [\bar{V}_{BI}] \quad c$$

Iz relacija 7-33abc možemo izračunati struju koja teče kroz uzemljenje voda II na krajevima A i B:

$$\begin{aligned} [\bar{I}_{AII}] &= [\bar{Y}_{uII,I}] [\Delta \bar{V}_I] + [\bar{Y}_{pII,I}] [\bar{V}_{AI}] = \\ &= ([\bar{Y}_{uII,I}] + [\bar{Y}_{pII,I}]) [\bar{V}_{AI}] - [\bar{Y}_{uII,I}] [\bar{V}_{BI}] \end{aligned} \quad 7-34a$$

$$\begin{aligned} [\bar{I}_{BII}] &= [\bar{Y}_{uII,I}] [\Delta \bar{V}_I] + [\bar{Y}_{pII,I}] [\bar{V}_{BI}] = \\ &= [\bar{Y}_{uII,I}] [\bar{V}_{AI}] - ([\bar{Y}_{uII,I}] + [\bar{Y}_{pII,I}]) [\bar{V}_{BI}], \end{aligned} \quad b$$

ili:

$$[\bar{I}_{AII}] = [B] [\bar{V}_{AI}] - [\bar{Y}_{uII,I}] [\bar{V}_{BI}] \quad 7-35a$$

$$[\bar{I}_{BII}] = [\bar{Y}_{uII,I}] [\bar{V}_{AI}] - [B] [\bar{V}_{BI}] \quad 7-35b$$

U relacijama 7-35ab znači

$$[B] = [\bar{Y}_{uII,I}] + [\bar{Y}_{pII,I}] \quad 7-36$$

7.3.3 Iskopčana trojka uzemljena u B ili u A

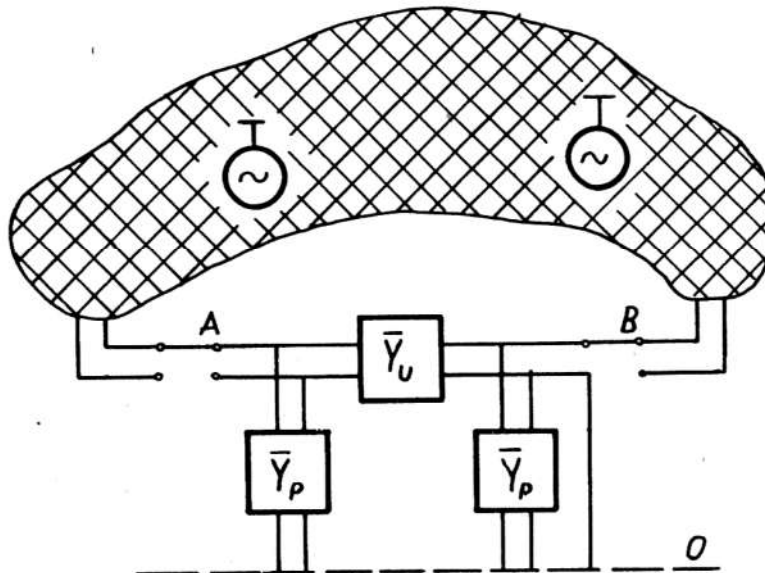
Kada je iskopčana trojka uzemljena u B vrijedi (sl.152)

$$[\bar{V}_{BII}] = [0] \quad 7-37a$$

$$[\bar{I}_{AII}] = [0] \quad b$$

Relacije 7-37ab uvrštene u 7-3e i u 7-3i daju

$$[\Delta \bar{I}_{BI}] = [\bar{Y}_{pI,I}] [\bar{V}_{BI}] , \quad 7-38$$



Slika 152.- Iskopčana jedna trojka i uzemljena na kraju B

iz čega slijedi odmah:

$$[\bar{Y}_{pB}] = [\bar{Y}_{pI,I}] \quad 7-39$$

$$[\bar{I}_{12II}] = -[\Delta \bar{I}_{AII}] \quad 7-40$$

Uvrstimo izraz 7-40 u 7-3d, izjednačimo s 7-3b i uvažimo da je za ovaj pogonski slučaj:

$$[\Delta \bar{V}_{II}] = [\bar{V}_{AII}] - [\bar{V}_{BII}] = [\bar{V}_{AII}] \quad 7-41$$

Slijedi:

$$\begin{aligned} [\Delta \bar{V}_{II}] = & - ([\bar{Y}_{uII,II}] + [\bar{Y}_{pII,II}])^{-1} [\bar{Y}_{uII,I}] [\Delta \bar{V}_I] - \\ & - ([\bar{Y}_{uII,II}] + [\bar{Y}_{pII,II}])^{-1} [\bar{Y}_{pII,I}] [\bar{V}_{AI}] \end{aligned} \quad 7-42a$$

ili:

$$[\bar{V}_{AII}] = -[A]^{-1} ([\bar{Y}_{uII,I}] [\Delta \bar{V}_I] - [\bar{Y}_{pII,I}] [\bar{V}_{AI}]) \quad b$$

Izraz 7-42 uvrstimo u 7-3a i sredimo:

$$\begin{aligned} [\bar{I}_{12I}] = & \{ [\bar{Y}_{uI,I}] - [\bar{Y}_{uI,II}] ([\bar{Y}_{uII,II}] + [\bar{Y}_{pII,II}])^{-1} \cdot \\ & \cdot [\bar{Y}_{uII,I}] \} [\Delta \bar{V}_I] - [\bar{Y}_{uI,II}] ([\bar{Y}_{uII,II}] + \\ & + [\bar{Y}_{pII,II}])^{-1} [\bar{Y}_{pII,I}] [\bar{V}_{AI}] \end{aligned} \quad 7-43$$

Izraz 7-42 uvrstimo u 7-3c i sredimo:

$$\begin{aligned} [\Delta \bar{I}_{AI}] = & \{ [\bar{Y}_{pI,I}] - [\bar{Y}_{pI,II}] ([\bar{Y}_{uII,II}] + [\bar{Y}_{pII,II}])^{-1} \cdot \\ & \cdot [\bar{Y}_{pII,I}] \} [\bar{V}_{AI}] - [\bar{Y}_{pI,II}] ([\bar{Y}_{uII,II}] + \\ & + [\bar{Y}_{pII,II}])^{-1} [\bar{Y}_{uII,I}] [\Delta \bar{V}_I] \end{aligned} \quad 7-44$$

Relacije 7-38, 7-43 i 7-44 ne omogućavaju da se formira π -shema za ovaj slučaj. Zato ćemo zbrojiti izraze 7-43 i 7-44. Dobili smo:

$$\begin{aligned} [\bar{I}_{AI}] = & \{ [\bar{Y}_{uI,I}] - ([\bar{Y}_{uI,II}] + [\bar{Y}_{pI,II}]) ([\bar{Y}_{uII,II}] + \\ & + [\bar{Y}_{pII,II}])^{-1} [\bar{Y}_{uII,I}] \{ [\Delta \bar{V}_I] + ([\bar{Y}_{pI,I}] - \\ & - ([\bar{Y}_{pI,II}] + [\bar{Y}_{uI,II}]) ([\bar{Y}_{uII,II}] + \\ & + [\bar{Y}_{pII,II}])^{-1} [\bar{Y}_{pII,I}]) \} [\bar{V}_{AI}] \end{aligned} \quad 7-45$$

Vidimo da je u 7-45 prvi sumand funkcija $[\Delta \bar{V}_I]$, a drugi sumand funkcija $[\bar{V}_{AI}]$, pa možemo prihvatiti da je:

$$\begin{aligned} [\bar{Y}_u] = & [\bar{Y}_{uI,I}] - ([\bar{Y}_{uI,II}] + [\bar{Y}_{pI,II}]) ([\bar{Y}_{uII,II}] + \\ & + [\bar{Y}_{pII,II}])^{-1} [\bar{Y}_{uII,I}] \end{aligned} \quad 7-46$$

$$\begin{aligned} [\bar{Y}_{pA}] = & [\bar{Y}_{pI,I}] - ([\bar{Y}_{pI,II}] + [\bar{Y}_{uI,II}]) ([\bar{Y}_{uII,II}] + \\ & + [\bar{Y}_{pII,II}])^{-1} [\bar{Y}_{pII,I}], \end{aligned} \quad 7-47$$

ili:

$$[\bar{Y}_u] = [\bar{Y}_{uI,I}] - [B][A]^{-1} [\bar{Y}_{uII,I}] \quad 7-48$$

$$[\bar{Y}_{pA}] = [\bar{Y}_{pI,I}] - [B][A]^{-1} [\bar{Y}_{pII,I}] \quad 7-49$$

U relacijama 7-48 i 7-49 znači:

$$[A] = [\bar{Y}_{uII,II}] + [\bar{Y}_{pII,II}] \quad 7-50$$

Izrazi 7-46 i 7-47 uz izraz 7-39 daju kompletne parametre π -sheme za ovaj slučaj. S ovom π -shemom ulazimo u proračun mreže. Rezultati proračuna jesu električne veličine u čvorovima A i B za vod I i to $[\bar{V}_{AI}]$, $[\bar{V}_{BI}]$, $[\bar{I}_{AI}]$, $[\bar{I}_{BI}]$. Ove veličine koristimo za proračun električnih veličina na iskopčanom vodu prema relacijama 7-38 do 7-44.

Izraz za struju kroz uzemljenje voda II u B dobit ćemo ako struji $[\bar{I}_{12II}]$ odbijemo struju $[\Delta \bar{I}_{BII}]$.

Radi 7-41 relacija 7-3b prelazi u:

$$[\bar{I}_{12II}] = [\bar{Y}_{uII,I}] [\Delta \bar{V}_I] + [\bar{Y}_{uII,II}] [\bar{V}_{AII}], \quad 7-51$$

a relacija 7-3f prelazi u

$$[\Delta \bar{I}_{BII}] = [\bar{Y}_{pII,I}] [\bar{V}_{BI}] \quad 7-52$$

Odbijmo relaciju 7-52 od relacije 7-51 i uvažimo izraz 7-42. Nakon sredjivanja dobit ćemo

$$\begin{aligned} [\bar{I}_{BII}] &= ([\bar{Y}_{uII,I}] + [\bar{Y}_{uII,II}] [A]^{-1} [F]) [\bar{V}_{AI}] - \\ &- ([B] + [\bar{Y}_{uII,II}] [A]^{-1} [\bar{Y}_{uII,I}]) [\bar{V}_{BI}] \end{aligned} \quad 7-53$$

U izrazu 7-53 značenje matrice $[F]$ je slijedeće:

$$[F] = [\bar{Y}_{uII,I}] - [\bar{Y}_{pII,I}] \quad 7-54$$

Kada je iskopčana trojka uzemljena u A, vrijedi analogno

$$[\bar{V}_{AII}] = [0] \quad 7-55a$$

$$[\bar{I}_{BII}] = [0] \quad b$$

Relacije 7-55ab uvrštene u 7-3e i 7-3j daju

$$[\bar{Y}_{pA}] = [\bar{Y}_{pI,I}] \quad 7-57$$

$$[\bar{I}_{12II}] = [\Delta \bar{I}_{BII}] \quad 7-58$$

Uvrstimo izraz 7-58 u 7-3f, izjednačimo s 7-3b i uvažimo da je za ovaj pogonski slučaj

$$[\Delta \bar{V}_{II}] = [\bar{V}_{AII}] - [\bar{V}_{BII}] = -[\bar{V}_{BII}] \quad 7-59$$

pa je napon voda II u B

$$[\bar{V}_{BII}] = [A]^{-1} [\bar{Y}_{uII,I}] [\Delta \bar{V}_I] - [A]^{-1} [\bar{Y}_{pII,I}] [\bar{V}_{BI}] \quad 7-60$$

Struja u uzdužnoj grani voda I je:

$$\begin{aligned} [\bar{I}_{12I}] &= ([\bar{Y}_{uI,I}] - [\bar{Y}_{uI,II}] [A]^{-1} [\bar{Y}_{uII,I}]) [\Delta \bar{V}_I] + \\ &+ [\bar{Y}_{uI,II}] [A]^{-1} [\bar{Y}_{pII,I}] [\bar{V}_{BI}], \end{aligned} \quad 7-61$$

i struja u poprečnoj grani u B voda I

$$\begin{aligned} [\Delta \bar{I}_{BI}] &= ([\bar{Y}_{pI,I}] - [\bar{Y}_{pI,II}] [A]^{-1} [\bar{Y}_{pII,I}]) [\bar{V}_{BI}] + \\ &+ [\bar{Y}_{pI,II}] [A]^{-1} [\bar{Y}_{uII,I}] [\Delta \bar{V}_I] \end{aligned} \quad 7-62$$

Razlika ovih struja daje:

$$\begin{aligned} [\bar{I}_{BI}] &= [\bar{I}_{12I}] - [\Delta \bar{I}_{BI}] = ([\bar{Y}_{uI,I}] - \\ &- [B] [A]^{-1} [\bar{Y}_{uII,I}]) [\bar{V}_I] - ([\bar{Y}_{pI,I}] - [B] [A]^{-1} [\bar{Y}_{pII,I}]) [\bar{V}_{BI}] \end{aligned} \quad 7-63$$

što navodi na zaključak da je

$$[\bar{Y}_u] = [\bar{Y}_{uI,I}] - [B][A]^{-1}[\bar{Y}_{uII,I}] \quad 7-64$$

$$[\bar{Y}_{pB}] = [\bar{Y}_{pI,I}] - [B][A]^{-1}[\bar{Y}_{pII,I}] \quad 7-65$$

Relacije 7-57, 7-64 i 7-65 daju parametre π -sheme voda I kada je vod II iskopčan i uzemljen u A.

Usporedba relacije 7-57, 7-64 i 7-65 s relacijama 7-39, 7-46 i 7-47 pokazuje da smo u oba slučaja za jednostruki nadomjesni vod dobili istu uzdužnu matricu π -sheme i iste poprečne matrice π -sheme kako uz uzemljenu stranu voda tako i uz neuzemljenu stranu voda. Ovakav je rezultat bilo za očekivati.

Izraz za struju kroz uzemljenje voda II u A dobijemo, ako struji $[\bar{I}_{12II}]$ zbrojimo struju $[\Delta \bar{I}_{AII}]$.

Radi 7-59 relacija 7-36 prelazi u

$$[\bar{I}_{12II}] = [\bar{Y}_{uII,I}][\Delta \bar{V}_I] - [\bar{Y}_{uII,II}][\bar{V}_{BII}] \quad 7-66$$

a relacija 7-3d prelazi u

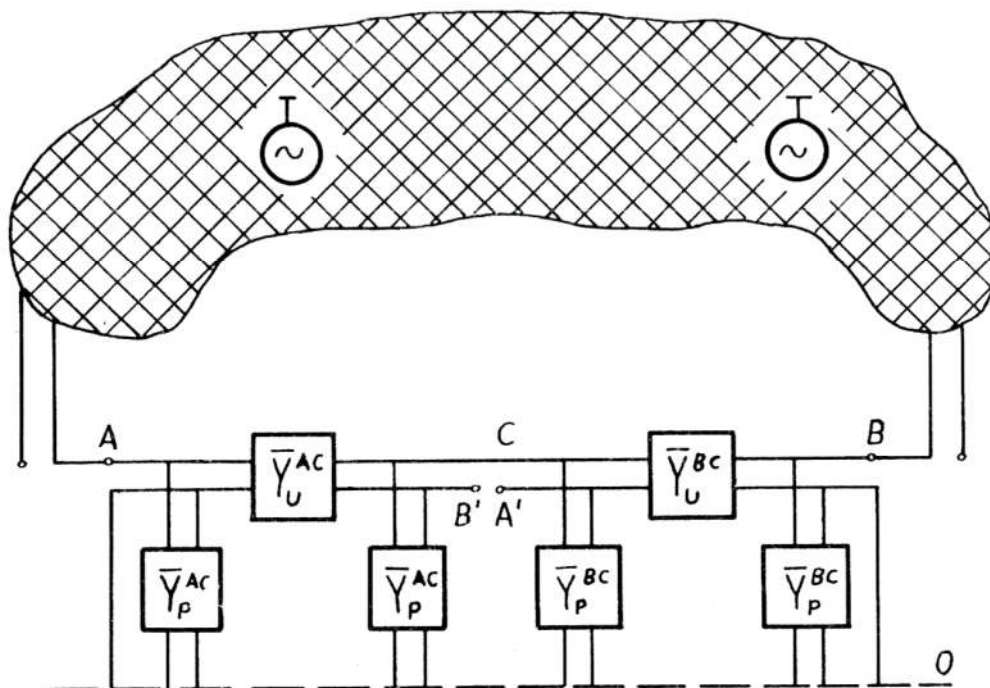
$$[\Delta \bar{I}_{AII}] = [\bar{Y}_{pII,I}][\bar{V}_{AI}] \quad 7-67$$

Zbrojimo relaciju 7-66 sa 7-67 i uvažimo izraz 7-60. Nakon sredjivanja dobit ćemo:

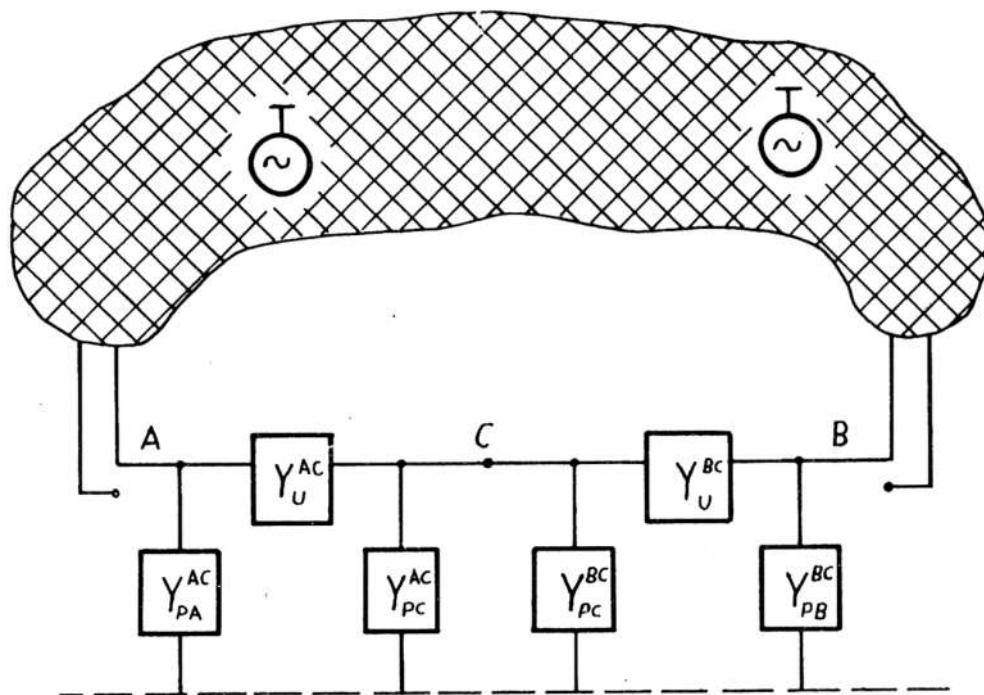
$$\begin{aligned} [\bar{I}_{AII}] &= ([B] - [\bar{Y}_{uII,II}][A]^{-1}[\bar{Y}_{uII,I}])[\bar{V}_{AI}] + \\ &+ ([\bar{Y}_{uII,II}][A]^{-1}[B] - [\bar{Y}_{uII,I}])[\bar{V}_{BI}] \end{aligned} \quad 7-68$$

7.3.4 Iskopčana trojka uzemljena na krajevima, a prekinuta negdje između A i B u čvoru C

Ovaj pogonski slučaj prikazan je na slici 153. Pojavljuju se dvije π -sheme. Parametri π -sheme na strani A računaju se prema formulama 7-39, 7-46 i 7-47 pri čemu treba uvažiti da je duljina dionice od A do C. Parametri π -sheme na strani B računaju se prema formulama 7-57, 7-64 i 7-65 pri čemu treba uvažiti da je duljina dionice od B do C. Shema mreže s dvije π -sheme jednogstrukog voda A-B prikazana je na slici 154.



Slika 153.- Iskopčana trojka uzemljena u A i B, a prekinuta u C



Slika 154 - Nadomjesne π -sheme dvostrukog dalekovoda kada je jedna trojka iskopčana, uzemljena na krajevima i prekinuta negdje na vođu

Primijenimo izraze 7-57, 7-64 i 7-65, te izraze 7-39, 7-46 i 7-47 na trofazne π -sheme voda sa slike 154. Dobit ćemo relacije

$$[\bar{Y}_u^{AC}] = [\bar{Y}_{uI,I}^{AC}] - [B^{AC}][A^{AC}]^{-1}[\bar{Y}_{uII,I}^{AC}] \quad 7-69$$

$$[\bar{Y}_{pA}^{AC}] = [\bar{Y}_{pI,I}^{AC}] \quad 7-70$$

$$[\bar{I}_{pC}^{AC}] = [\bar{Y}_{pI,I}^{AC}] - [B^{AC}][A^{AC}]^{-1}[\bar{Y}_{pII,I}^{AC}] \quad 7-71$$

u kojima je

$$[B^{AC}] = [\bar{Y}_{uII,I}^{AC}] + [\bar{Y}_{pII,I}^{AC}] \quad 7-72$$

$$[A^{AC}] = [\bar{Y}_{uII,II}^{AC}] + [\bar{Y}_{pII,II}^{AC}] \quad 7-73$$

i analogno

$$[\bar{Y}_u^{BC}] = [\bar{Y}_{uI,I}^{BC}] - [B^{BC}] [A^{BC}]^{-1} [\bar{Y}_{uII,I}^{BC}] \quad 7-74$$

$$[\bar{Y}_{pB}^{BC}] = [\bar{Y}_{pI,I}^{BC}] \quad 7-75$$

$$[\bar{Y}_{pC}^{BC}] = [\bar{Y}_{pI,I}^{BC}] - [B^{BC}] [A^{BC}]^{-1} [\bar{Y}_{pII,I}^{BC}] \quad 7-76$$

u kojima je

$$[B^{BC}] = [\bar{Y}_{uII,I}^{BC}] + [\bar{Y}_{pII,I}^{BC}] \quad 7-77$$

$$[A^{BC}] = [\bar{Y}_{uII,II}^{BC}] + [\bar{Y}_{pII,II}^{BC}] \quad 7-78$$

Nakon proračuna mreže i time proračuna električnih veličina voda I prelazimo na računanje električnih veličina voda II od kojih je najzanimljivija razlika napona između A' i B'.

Relacije 7-42 i 7-60 mogu se napisati ovako:

$$[\bar{V}_{AII}] = -[A]^{-1} ([F] [\bar{V}_{AI}] - [\bar{Y}_{uII,I}] [\bar{V}_{BI}]) \quad 7-79$$

$$[\bar{V}_{BII}] = -[A]^{-1} ([B] [\bar{V}_{BI}] - [\bar{Y}_{uII,I}] [\bar{V}_{AI}]) \quad 7-80$$

i analogno u A' i B' :

$$[\bar{V}'_{AII}] = -[A^{BC}]^{-1} ([F^{BC}] [\bar{V}'_{AI}] - [\bar{Y}^{BC}_{uII,I}] [\bar{V}_{BI}]) \quad 7-81$$

$$[\bar{V}'_{BII}] = -[A^{AC}]^{-1} ([B^{AC}] [\bar{V}'_{BI}] - [\bar{Y}^{AC}_{uII,I}] [\bar{V}_{AI}]) \quad 7-82$$

Radi $[\bar{V}'_{AI}] = [\bar{V}'_{BI}] = [\bar{V}_{CI}]$ gornje relacije prelaze u

$$\begin{aligned} [\bar{V}'_{AII}] &= -[A^{BC}]^{-1} ([F^{BC}] [\bar{V}_{CI}] - [\bar{Y}^{BC}_{uII,I}] [\bar{V}_{BI}]) = \\ &= [A^{BC}]^{-1} ([\bar{Y}^{BC}_{uII,I}] [\bar{V}_{BI}] - [F^{BC}] [\bar{V}_{CI}]) \end{aligned} \quad 7-83$$

$$\begin{aligned} [\bar{V}'_{BII}] &= -[A^{AC}]^{-1} ([B^{AC}] [\bar{V}_{CI}] - [\bar{Y}^{AC}_{uII,I}] [\bar{V}_{AI}]) = \\ &= [A^{AC}]^{-1} ([\bar{Y}^{AC}_{uII,I}] [\bar{V}_{AI}] - [B^{AC}] [\bar{V}_{CI}]) \end{aligned} \quad 7-84$$

Razlika napona na vođu II u C iznosi

$$[\Delta \bar{V}_{CII}] = [\bar{V}_{BII}] - [\bar{V}'_{AII}] \quad 7-85$$

Teoretski je za razmatranje jednostavan slučaj kada je prekid iskopčane i uzemljene trojke točno na sredini voda. Tada je naime

$$[A^{BC}] = [A^{AC}] = [A'] = 2[\bar{Y}_{uII,II}] + \frac{1}{2}[\bar{Y}_{pII,II}] \quad 7-86$$

$$[F^{BC}] = [F^{AC}] = [F'] = 2[\bar{Y}_{uII,I}] - \frac{1}{2}[\bar{Y}_{pII,I}] \quad 7-87$$

$$[B^{BC}] = [B^{AC}] = [B'] = 2[\bar{Y}_{uII,I}] + \frac{1}{2}[\bar{Y}_{pII,I}] \quad 7-88$$

$$[\bar{Y}^{BC}_{uII,I}] = [\bar{Y}^{AC}_{uII,I}] = 2[\bar{Y}_{uII,I}] \quad 7-89$$

Sada razlika napona na vodu u C iznosi

$$\begin{aligned} [\Delta \bar{V}_{CII}] &= [A']^{-1} (2[\bar{Y}_{uII,I}] [\bar{V}_{AI}] - [B'] [\bar{V}_{CI}] - \\ &\quad - 2[\bar{Y}_{uII,I}] [\bar{V}_{BI}] + [F'] [\bar{V}_{CI}]) = \\ &= [A']^{-1} (2[\bar{Y}_{uII,I}] [\Delta \bar{V}_I] - [\bar{Y}_{pII,I}] [\bar{V}_{CI}]) \quad 7-90 \end{aligned}$$

Primjer 7.1 Zadane su matrice $[\bar{Y}_u]$ i $[\bar{Y}_p]$ 2x220 kV neprepletenog dalekovoda dužine 100 km. Vidi matrice 6x6 na strani 394 i strani 395.

Treba izračunati matrice parametara π -shema jednostrukog nadomjesnog voda za slučajeve:

- a) paralelno ukopčani vodovi I i II,
- b) jedna trojka iskopčana i neuzemljena,
- c) jedna trojka iskopčana i uzemljena na oba kraja,
- d) jedna trojka iskopčana i uzemljena u B

$[\bar{Y}_u] =$		2x220kV		100 km	$\times 10^{-6} S $	
3674,565	-893,615	-272,968	-470,810	-176,799	-106,183	1891,771
-18343,650	4066,875	2418,611	3226,854	2182,840	2182,840	2196,760
-893,615	3672,901	-1024,341	-176,799	-177,567	-259,150	
4066,875	-18701,905	4219,415	2182,840	2001,720	2196,760	
-272,968	-1024,341	3405,271	-106,183	-259,150	-635,592	
2418,611	4219,415	-18140,550	1891,771	2196,760	3149,284	
-470,810	-176,799	-106,183	3674,565	-893,615	-272,968	
3226,854	2182,840	1891,771	-18343,650	4066,875	2418,611	
-176,799	-177,567	-259,150	-893,615	3672,901	-1024,341	
2182,840	2001,720	2196,760	4066,875	-18701,905	4219,415	
-106,183	-259,150	-635,592	-272,968	-1024,341	3405,271	
1891,771	2196,760	3149,284	2418,611	4219,415	-18140,550	

$[\vec{Y}_p] =$	2x220 kV	100 km	$\times 10^{-6} S $
0,008 128,100	0,000 -22,460	0,000 -16,002	0,002 -5,828
0,000 -22,460	0,006 130,810	0,002 -8,962	0,002 -7,328
0,000 -9,912	0,000 -21,328	0,002 -5,828	0,002 -11,376
0,000 -16,002	0,002 -8,962	0,008 128,100	0,000 -9,112
0,002 -8,962	0,002 -7,642	0,000 -22,460	0,000 -21,328
0,002 -5,828	0,002 -7,328	0,000 -9,912	0,006 131,626

$$[A] = [\bar{Y}_{uII,II}] + [\bar{Y}_{pII,II}] =$$

$\times 10^{-6}$

=

3674,573 -18215,55	-893,615 4044,415	-272,968 2409,499
-893,615 4044,415	3672,907 -18571,095	-1024,341 4198,087
-272,968 2409,499	-1024,341 4198,087	3405,277 -18008,924

$$[A]^{-1} =$$

11,6468 57,5648	2,7397 15,2042	2,5575 11,0949
2,7397 15,2042	11,1636 58,8248	2,4118 15,9674
2,5575 11,0945	2,4118 15,9674	10,9538 58,8394

$$[c] = 2[\bar{Y}_{uII,II}] + [\bar{Y}_{pII,II}] =$$

$\times 10^{-6}$

$$=$$

7349,138 -36559,2	-1787,23 8111,29	-545,936 4828,11
-1787,23 8111,29	7345,808 -37273,0	-2048,682 8417,502
-545,936 4828,11	-2048,682 8417,502	6810,548 -36150,074

$$[c]^{-1} =$$

5,7819 28,6838	1,3569 7,5678	1,2658 5,5188
1,3569 7,5678	5,5414 29,3088	1,1931 7,9450
1,2658 5,5188	1,1931 7,9450	5,4356 29,3122

$$[B] = [\bar{Y}_{uII,I}] + [\bar{Y}_{pII,I}] =$$

$\times 10^{-6}$

-470,810 3210,052	-176,797 2173,078	-106,181 1885,913
-176,797 2173,078	-177,565 1994,078	-259,148 2189,932
-106,181 1885,913	-259,148 2189,432	-635,590 3137,908

$$[F] = [\bar{Y}_{uII,I}] - [\bar{Y}_{pII,I}] =$$

$\times 10^{-6}$

-470,810 3242,856	-176,801 2191,802	-106,181 1897,599
-176,801 2191,802	-177,569 2009,362	-259,152 2204,088
-106,181 1897,599	-259,152 2204,088	-635,594 3160,66

$$[D] = 2[\bar{Y}_{uII,I}] + [\bar{Y}_{pII,I}] =$$

$\times 10^{-6}$

$$=$$

-941,620 6437,706	-353,596 4356,718	-212,364 3777,714
-353,596 4356,718	-355,132 3995,798	-518,298 4386,192
-212,364 3777,714	-518,298 4386,192	-1271,182 6287,192

Računajmo dalje:

$$[C]^{-1} [D] =$$

$$=$$

0,2447 -0,0171	0,2099 -0,0137	0,1836 -0,0197
0,2099 -0,0137	0,1880 -0,0161	0,1924 -0,0142
0,1836 -0,0197	0,1924 -0,0142	0,2478 -0,0016

$$[\bar{Y}_{uII,I}][C]^{-1}[D] =$$

$\times 10^{-6}$

-470,810 3226,854	-176,799 2182,840	-106,183 1891,771
-176,799 2182,840	-177,567 2001,720	-259,150 2196,760
-106,183 1891,771	-259,150 2196,760	-635,592 3149,284

=

x

5,7819 28,6838	1,3569 7,5678	1,2658 5,5188
1,3569 7,5678	5,5414 29,3088	1,1913 7,9450
1,2658 5,5188	1,1931 7,9450	5,4356 29,3122

x

$\times 10^{-6}$

-941,620 6437,706	-353,596 4356,718	-212,364 3777,714
-353,596 4356,718	-355,132 3995,798	-518,298 4386,192
-212,364 3777,714	-518,298 4386,192	-1271,182 6287,192

x

=

$\times 10^{-6}$

39,856 -1608,470	11,230 -1369,304	63,001 -1521,932
11,298 -1369,025	6,423 -1198,133	69,069 -1366,197
62,963 -1521,353	68,993 -1365,967	168,860 -1591,302

$$[\bar{y}_{pII,I}][c]^{-1}[p] =$$

$\times 10^{-6}$		
0,000	0,002	0,002
-16,002	-8,962	-5,828
0,002	0,002	0,002
-8,962	-7,642	-7,328
0,002	0,002	0,002
-5,828	-7,328	-11,376

=

x

x		
5,7819	1,3569	1,2658
28,6838	7,5678	5,5188
1,3569	5,5414	1,1913
7,5678	29,3088	7,9450
1,2658	1,1931	5,4356
5,5188	7,9450	29,3122

$\times 10^{-6}$

x

-914,620	-353,596	-212,364
6437,706	4356,718	3777,714
-353,596	-355,132	-518,298
4356,718	3995,798	4386,192
-212,364	-518,298	-1271,182
3777,714	4386,192	6287,192

=

$\times 10^{-6}$

0,550	0,553	0,398
6,867	5,703	6,219
0,435	0,409	0,255
5,143	4,451	5,045
0,455	0,397	0,200
5,053	4,581	5,419

$$[B][A]^{-1}[\bar{Y}_{uII,I}] =$$

$\times 10^{-6}$

-470,810	-176,797	-106,181
3210,052	2173,078	1885,913
-176,797	-177,565	-259,148
2173,078	1994,078	2189,432
-106,181	-259,148	-635,590
1885,913	2189,432	3137,908

=

x

11,6468	2,7397	2,5575
57,5648	15,2042	11,0949
2,7397	11,1636	2,4118
15,2042	58,8248	15,9674
2,5575	2,4118	10,9538
11,0949	15,9674	58,8394

x

$\times 10^{-6}$

-470,810	-176,799	-106,183
3226,854	2182,840	1891,771
-176,799	-177,567	-259,150
2182,840	2001,720	2196,760
-106,183	-259,150	-635,592
1891,771	2196,760	3149,284

x

=

$\times 10^{-6}$

39,041	10,562	62,262
-1611,198	-1371,472	-1524,250
10,426	5,730	68,352
-1372,141	-1200,684	-1368,986
62,295	68,479	168,404
-1525,737	-1369,522	-1595,277

$$[B][A]^{-1}[\bar{Y}_{PII,I}] =$$

$\times 10^{-6}$

-470,810	-176,797	-106,181
3210,052	2173,078	1885,913
-176,797	-177,565	-239,148
2173,078	1994,078	2189,432
-106,181	-259,148	-635,590
1885,913	2189,432	3137,908

=

x

11,6468	2,7397	2,5575
57,5648	15,2042	11,0949
2,7397	11,1636	2,4118
15,2042	58,8248	15,9674
2,5575	2,4118	10,9538
11,0949	15,9794	58,8394

x

$\times 10^{-6}$

0,000	0,002	0,002
-16,002	-8,962	-5,828
0,002	0,002	0,002
-8,962	-7,642	-7,328
0,002	0,002	0,002
-5,828	-7,328	-11,376

x

=

$\times 10^{-6}$

0,554	0,438	0,458
6,878	5,151	5,063
0,558	0,412	0,401
5,714	4,468	4,591
0,403	0,259	0,203
6,234	5,058	5,432

a) Paralelno ukopčani vodovi I i II

Koristimo relacije 7-14 i 7-13 u kojima je

$$[\bar{Y}_u] = 2([\bar{Y}_{uI,I}] + [\bar{Y}_{uI,II}])$$

$$[\bar{Y}_p] = 2([\bar{Y}_{pI,I}] + [\bar{Y}_{pI,II}])$$

$$[\bar{Y}_u] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline \begin{array}{c} 6407,509 \\ -30233,593 \end{array} & \begin{array}{c} -2140,827 \\ 12499,430 \end{array} & \begin{array}{c} -758,300 \\ 8620,764 \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} -2140,827 \\ 12499,430 \end{array} & \begin{array}{c} 6990,668 \\ -33400,370 \end{array} & \begin{array}{c} -2566,981 \\ 12832,350 \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} -758,300 \\ 8620,764 \end{array} & \begin{array}{c} -2566,981 \\ 12832,350 \end{array} & \begin{array}{c} 5539,357 \\ -29982,533 \end{array} \\ \hline \end{array} \times 10^{-6} |S|$$

$$[\bar{Y}_p] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline \begin{array}{c} 0,016 \\ 224,196 \end{array} & \begin{array}{c} 0,004 \\ -62,844 \end{array} & \begin{array}{c} 0,004 \\ -29,880 \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} 0,004 \\ -62,844 \end{array} & \begin{array}{c} 0,016 \\ 246,336 \end{array} & \begin{array}{c} 0,004 \\ -57,312 \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} 0,004 \\ -29,880 \end{array} & \begin{array}{c} 0,004 \\ -57,312 \end{array} & \begin{array}{c} 0,016 \\ 240,500 \end{array} \\ \hline \end{array} \times 10^{-6} |S|$$

b) Jedna trojka iskopčana i neuzemljena

Koristimo relacije 7-21b i 7-25b u kojima je

$$[\bar{Y}_u] = [\bar{Y}_{uI,I}] - [\bar{Y}_{uI,II}][C]^{-1}[D]$$

$$[\bar{Y}_p] = [\bar{Y}_{pI,I}] - [\bar{Y}_{pI,II}][C]^{-1}[D]$$

$$[\bar{Y}_u] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline \begin{array}{c} 3634,709 \\ -16974,625 \end{array} & \begin{array}{c} -904,845 \\ 5436,179 \end{array} & \begin{array}{c} -335,969 \\ 3940,543 \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} -904,913 \\ 5435,9 \end{array} & \begin{array}{c} 3666,478 \\ -17503,772 \end{array} & \begin{array}{c} -1093,41 \\ 5585,612 \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} -335,931 \\ 3939,964 \end{array} & \begin{array}{c} -1093,334 \\ 5585,382 \end{array} & \begin{array}{c} 3236,411 \\ -16549,248 \end{array} \\ \hline \end{array} \times 10^{-6} |S|$$

$$[\bar{Y}_p] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline \begin{array}{c} -0,542 \\ 121,233 \end{array} & \begin{array}{c} -0,553 \\ -28,163 \end{array} & \begin{array}{c} -0,398 \\ -15,331 \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} -0,435 \\ -27,603 \end{array} & \begin{array}{c} -0,403 \\ 126,359 \end{array} & \begin{array}{c} -0,255 \\ -26,373 \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} -0,455 \\ -14,965 \end{array} & \begin{array}{c} -0,397 \\ -25,909 \end{array} & \begin{array}{c} -0,194 \\ 126,207 \end{array} \\ \hline \end{array} \times 10^{-6} |S|$$

c) Jedna trojka iskopčana i uzemljena na oba kraja

Koristimo relacije 7-32a i 7-32b koje glase

$$[\bar{Y}_u] = [\bar{Y}_{uI,I}]$$

$$[\bar{Y}_p] = [\bar{Y}_{pI,I}]$$

$$[\bar{Y}_u] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline & & \times 10^{-6} |S| \\ \hline 3674,565 & -893,615 & -272,968 \\ -18343,650 & 4066,875 & 24181,611 \\ \hline -893,615 & 3672,901 & -1024,341 \\ 4066,875 & -18701,905 & 4219,415 \\ \hline -272,968 & -1024,341 & -106,183 \\ 2418,611 & 4219,415 & 1891,771 \\ \hline \end{array}$$

$$[\bar{Y}_p] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline & & \times 10^{-6} |S| \\ \hline 0,008 & 0,000 & 0,000 \\ 128,100 & -22,460 & -9,112 \\ \hline 0,000 & 0,006 & 0,000 \\ -22,460 & 130,810 & -21,328 \\ \hline 0,000 & 0,000 & 0,006 \\ -9,912 & -21,328 & 131,626 \\ \hline \end{array}$$

d) Jedna trojka iskopčana i uzemljena u B

Koristimo relacije 7-39, 7-46 i 7-47 koje glase

$$[\bar{Y}_{pB}] = [\bar{Y}_{pI,I}]$$

$$[\bar{Y}_u] = [\bar{Y}_{uI,I}] - [B][A]^{-1}[\bar{Y}_{uII,I}]$$

$$[\bar{Y}_{pA}] = [\bar{Y}_{pI,I}] - [B][A]^{-1}[\bar{Y}_{pII,I}]$$

$$[\bar{Y}_u] = \begin{matrix} & & \times 10^{-6} |S| \\ \begin{bmatrix} 3635,524 \\ -16732,452 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -904,177 \\ 5438,347 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -335,23 \\ 3942,861 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -904,041 \\ 5439,016 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 3667,171 \\ 17501,221 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1092,693 \\ 5588,401 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -335,263 \\ 3944,346 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1092,82 \\ 5588,937 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 3236,867 \\ -16545,273 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$[\bar{Y}_{pA}] = \begin{matrix} & & \times 10^{-6} |S| \\ \begin{bmatrix} -0,546 \\ 121,222 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -0,438 \\ -27,611 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -0,458 \\ -14,175 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -0,558 \\ -28,174 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -0,406 \\ 126,342 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -0,401 \\ -25,919 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -0,403 \\ -16,146 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -0,259 \\ -26,386 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -0,197 \\ 126,194 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$[\bar{Y}_{pB}] = \begin{matrix} & & \times 10^{-6} |S| \\ \begin{bmatrix} 0,008 \\ 128,100 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0,000 \\ -22,460 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0,000 \\ -9,112 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0,000 \\ -22,460 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0,006 \\ 130,810 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0,000 \\ -21,328 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0,000 \\ -9,112 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0,000 \\ -21,328 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0,006 \\ 131,626 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$= [\bar{Y}_{p1,1}] =$

Primjer 7.2 Vod II iz primjera 7.1 je iskopčan i neuzemljen. Proračun tokova snaga i napona u mreži dao je slijedeće napone voda I

$$\bar{U}_{AI} = 223,78 + j 20,00 \text{ |kV|}$$

$$\bar{U}_{BI} = 220,00 + j 0,00 \text{ |kV|}$$

Izračunaj napone voda II iz relacija 7-26 i 7-27.

$$[\bar{V}_{AII}] = -[C]^{-1}[D][\bar{V}_{BI}] =$$

$$= \begin{bmatrix} \bar{V}_{AII}^a \\ \bar{V}_{AII}^b \\ \bar{V}_{AII}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2447 & 0,2099 & 0,1836 \\ -0,0171 & -0,0137 & -0,0197 \\ 0,2099 & 0,1880 & 0,1924 \\ -0,0137 & -0,0161 & -0,0142 \\ 0,1836 & 0,1934 & 0,2478 \\ -0,0197 & -0,0142 & -0,0016 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 129,35 \\ 11,56 \\ -54,66 \\ 117,80 \\ -74,69 \\ 111,44 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8,86 \\ -1,43 \\ -9,52 \\ 1,89 \\ -6,54 \\ 6,2 \end{bmatrix}$$

$$[\bar{V}_{BII}] = -[C]^{-1}[D][\bar{V}_{BI}] =$$

$$= \begin{bmatrix} \bar{V}_{BII}^a \\ \bar{V}_{BII}^b \\ \bar{V}_{BII}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2447 & 0,2099 & 0,1836 \\ -0,0171 & -0,0137 & -0,0197 \\ 0,2099 & 0,1880 & 0,1924 \\ -0,0137 & -0,0161 & -0,0142 \\ 0,1836 & 0,1924 & 0,2478 \\ -0,0197 & -0,0142 & -0,0016 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 127,17 \\ 0,0 \\ -63,58 \\ -110,13 \\ -63,58 \\ 110,13 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6,67 \\ -2,95 \\ 2,29 \\ 0,67 \\ -6,03 \\ 4,60 \end{bmatrix}$$

Primjer 7.3 Vod II iz primjera 7.1 je iskopčan i uzemljen na oba kraja. Proračun tokova snaga i napona u mreži dao je slijedeće napone voda I:

$$\bar{U}_{AI} = 223,78 + j 20,0 \quad |kV|$$

$$\bar{U}_{BI} = 220,0 + j 0,0 \quad |kV|$$

Izračunaj struje u A i B voda II.

Računamo struje voda II iz relacija 7-35a i 7-35b

$$[\bar{I}_{AII}] = [B][\bar{V}_{AI}] - [\bar{Y}_{uII,I}][\bar{V}_{BI}]$$

$$[\bar{I}_{BII}] = [\bar{Y}_{uII,I}][\bar{V}_{AI}] - [B][\bar{V}_{BI}]$$

Izračunajmo:

$$[B][\bar{V}_{AI}] =$$

$$= \begin{array}{|c|c|c|} \hline -470,81 & -176,80 & -106,18 \\ \hline 3210,05 & 2173,08 & 1885,91 \\ \hline -176,80 & -177,57 & -259,15 \\ \hline 2173,08 & 1994,08 & 2189,43 \\ \hline -106,18 & -259,15 & -635,59 \\ \hline 1885,91 & 2189,43 & 3137,91 \\ \hline \end{array} \times 10^{-16} \quad \times \quad \begin{array}{|c|} \hline 129,35 \\ \hline 11,56 \\ \hline -54,66 \\ \hline -117,80 \\ \hline -74,69 \\ \hline 111,44 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline -0,0346 \\ \hline 0,1591 \\ \hline 0,0280 \\ \hline -0,0014 \\ \hline -0,0657 \\ \hline -0,1516 \\ \hline \end{array}$$

$$[\bar{Y}_{uII,I}] [\bar{V}_{BI}] =$$

$$= \begin{bmatrix} -470,81 & -176,80 & -106,18 \\ 3226,85 & 2182,84 & 1891,77 \\ -176,80 & -177,57 & -259,15 \\ 2182,84 & 2001,72 & 2196,76 \\ -106,18 & -259,15 & -635,59 \\ 1891,77 & 2196,76 & 3149,28 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 127,17 \\ 0,0 \\ -63,58 \\ -110,13 \\ -63,58 \\ 110,13 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0098 \\ 0,1591 \\ -0,0162 \\ 0,0016 \\ -0,0613 \\ -0,1408 \end{bmatrix}$$

$$[\bar{Y}_{uII,I}] [\bar{V}_{AI}] =$$

$$= \begin{bmatrix} -470,81 & -176,80 & -106,18 \\ 3226,85 & 2182,84 & 1891,77 \\ -176,80 & -177,57 & -259,15 \\ 2182,84 & 2001,72 & 2196,76 \\ -106,18 & -259,15 & -635,59 \\ 1891,77 & 2196,76 & 3149,28 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 129,35 \\ 11,56 \\ -54,66 \\ -117,80 \\ -74,69 \\ 111,44 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0345 \\ 0,1603 \\ -0,0280 \\ -0,0012 \\ -0,0661 \\ -0,1521 \end{bmatrix}$$

$$[B] [\bar{V}_{BI}] =$$

$$= \begin{bmatrix} -470,81 & -176,80 & -106,18 \\ 3210,05 & 2173,08 & 1885,91 \\ -176,80 & -177,57 & -259,15 \\ 2173,08 & 1994,08 & 2189,43 \\ -106,18 & -259,15 & -635,59 \\ 1885,91 & 2189,43 & 3137,91 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 127,17 \\ 0,0 \\ -63,58 \\ -110,13 \\ -63,58 \\ 110,13 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0102 \\ 0,1579 \\ -0,0162 \\ 0,0008 \\ -0,0611 \\ -0,1404 \end{bmatrix}$$

Sada je

$$[\bar{I}_{AII}] = \begin{bmatrix} -0,0346 \\ 0,1591 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0,0098 \\ 0,1591 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0248 \\ 0,0000 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0,0280 \\ -0,0014 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0,0162 \\ 0,0016 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0118 \\ -0,0030 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -0,0657 \\ -0,1516 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0,0613 \\ -0,1408 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0044 \\ -0,0108 \end{bmatrix}$$

$$[\bar{I}_{BII}] = \begin{bmatrix} -0,0345 \\ 0,1603 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0,0102 \\ 0,1579 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0243 \\ 0,0024 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -0,0280 \\ -0,0012 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0,0162 \\ 0,0008 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0118 \\ -0,0020 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -0,0661 \\ -0,1521 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0,0611 \\ -0,1404 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0050 \\ -0,0117 \end{bmatrix}$$

Pažnja!

Prema definiciji na slici 143 pozitivna je struja

$[\bar{I}_{AII}]$ = struja koja ulazi u čvor A

$[\bar{I}_{BII}]$ = struja koja izlazi iz čvora B

te u tom smislu treba dati tumačenje smjeru struje u gornjim rezultatima.

Primjer 7.4 Vod II iz primjera 7.1 je iskopčan i uzemljen na jednom kraju. Račun tokova snaga i napona dao je slijedeće rezultate:

$$\bar{U}_A = 223,78 - j 20 \text{ |kV|}$$

$$\bar{U}_B = 220,0 + j 0,0 \text{ |kV|}$$

Potrebno je izračunati napon na neuzemljenom kraju za slučaj da je vod II

a) uzemljen u B

b) uzemljen u A

a) Koristimo relaciju 7-42b:

$$[\bar{V}_{AII}] = -[A]^{-1} ([F][\bar{V}_{AI}] - [\bar{V}_{uII,I}][\bar{V}_{BI}])$$

$$[F][\bar{V}_{AI}] =$$

$$= \begin{array}{|c|c|c|} \hline -470,81 & -176,80 & -106,18 \\ \hline 3242,86 & 2191,80 & 1897,60 \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|} \hline 129,35 \\ \hline 11,56 \\ \hline -54,66 \\ \hline -117,80 \\ \hline -74,69 \\ \hline 111,44 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline -0,0340 \\ \hline 0,1615 \\ \hline -0,0280 \\ \hline -0,0009 \\ \hline -0,0666 \\ \hline -0,1526 \\ \hline \end{array}$$

$$[F][\bar{v}_{AI}] - [\bar{y}_{uII,I}][\bar{v}_{BI}] =$$

$$= \begin{bmatrix} -0,0340 \\ 0,1615 \\ -0,0280 \\ -0,0009 \\ -0,0666 \\ -0,1526 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0,0098 \\ 0,1591 \\ -0,0162 \\ 0,0016 \\ -0,0613 \\ -0,1408 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0242 \\ 0,0024 \\ -0,0118 \\ -0,0025 \\ -0,0053 \\ -0,0118 \end{bmatrix}$$

$$[\bar{v}_{AII}] =$$

$$= - \begin{bmatrix} 11,647 & 2,74 & 2,558 \\ 57,565 & 15,204 & 11,095 \\ 2,74 & 11,164 & 2,412 \\ 15,204 & 58,825 & 15,967 \\ 2,558 & 2,412 & 10,954 \\ 11,095 & 15,967 & 58,839 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -0,0242 \\ 0,0024 \\ -0,0118 \\ -0,0025 \\ -0,0053 \\ -0,0118 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2977 \\ 1,6431 \\ -0,1020 \\ 1,2032 \\ -0,5590 \\ 0,9159 \end{bmatrix}$$

b) Koristimo relaciju 7-60

$$[\bar{v}_{BII}] = -[A]^{-1} ([B][\bar{v}_{BI}] - [\bar{y}_{uII,I}][\bar{v}_{AI}])$$

$$[B][\bar{v}_{BI}] - [\bar{y}_{uII,I}][\bar{v}_{AI}] =$$

$$= \begin{bmatrix} -0,0102 \\ 0,1579 \\ -0,0162 \\ 0,0008 \\ -0,0611 \\ -0,1404 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0,0345 \\ 0,1603 \\ -0,0280 \\ -0,0012 \\ -0,0661 \\ -0,1521 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0243 \\ -0,0024 \\ 0,0118 \\ 0,0020 \\ 0,0050 \\ 0,0117 \end{bmatrix}$$

$$[\bar{v}_{BII}] =$$

$$= - \begin{bmatrix} 11,647 & 2,74 & 2,558 \\ 57,565 & 15,204 & 11,095 \\ 2,74 & 11,164 & 2,412 \\ 15,204 & 58,825 & 15,967 \\ 2,558 & 2,412 & 10,954 \\ 11,095 & 15,967 & 58,839 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,0243 \\ -0,0024 \\ 0,0118 \\ 0,0020 \\ 0,0050 \\ 0,0117 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,3102 \\ -1,6357 \\ 0,0494 \\ -1,1866 \\ 0,5487 \\ -0,8798 \end{bmatrix}$$

7.4 ZAKLJUČAK

Kao što se moglo i očekivati, ovisno o tretmanu iskopčane trojke mijenjaju se parametri voda u pogonu. Ove promjene su male i nemaju bitnog utjecaja na proračun mreže kao ni na proračun električnih veličina na krajevima ukopčane trojke.

Tretman iskopčane trojke zanimljiv je za samu iskopčanu trojku. Izvedeno teoretsko razmatranje polazi od π -sheme dvostrukog voda i daje uvid u električne prilike na krajevima π -sheme. Svakom analiziranju prilika uzduž voda traži prijelaz na lanac četveropola. Od promatrana četiri karakteristična slučaja naročito praktično značenje, npr. za rad u blizini napona, ima pogonski slučaj kada je iskopčana trojka uzemljena na oba kraja i prekinuta negdje uzduž voda.

Za prilike na iskopčanoj trojci odlučujuća su tri faktora:

1. napon na vodu I, tj. trojci u pogonu,
2. opterećenje voda I, tj. trojke u pogonu,
3. preplet voda I i voda II .

Izvedeni primjeri 7.2, 7.3 i 7.4 daju uvid u prilike na krajevima iskopčane trojke neprepletenog dvostrukog 220 kV voda dužine 100 km.

U primjeru 7.2, u kojem je iskopčana trojka neuzemljena, napon na krajevima ove trojke iznosi, kako za koju fazu i preko 7% napona trojke u pogonu.

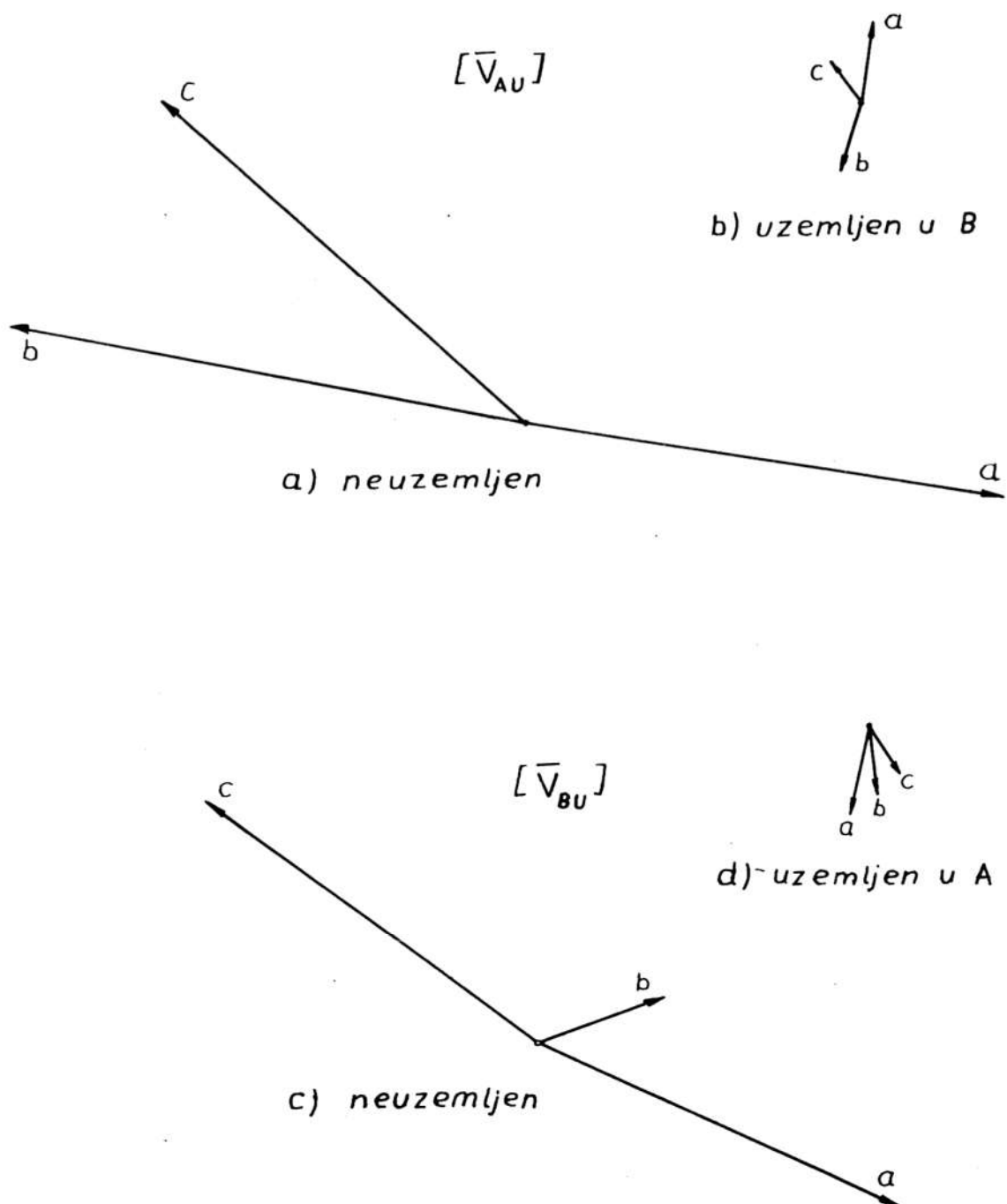
U primjeru 7.3 struja iskopčane i uzemljene trojke na oba kraja iznosi do 5% struje opterećenja trojke u pogonu.

U primjeru 7.4 napon na neuzemljenom kraju iskopčane trojke kreće se do 1,3% napona trojke u pogonu.

U ovim primjerima lako je uočiti utjecaj prepleta promatranog dvostrukog dalekovoda. Naponi i struje iskopčane trojke jednaki su nuli u svim slučajevima kada su ispunjena dva uvjeta:

1. naponi trojke u pogonu simetrični,
2. na dvostrukom dalekovodu izveden potpuni preplet.

Na slici 155 prikazani su vektorski dijagrami napona iz primjera 7.2 i 7.4.



Slika 155.- Naponi u A i B pema rezultatima iz primjera 7.2 i 7.4

8. ZAŠTITA

8.1 ZADAĆA ZAŠTITE

Zaštita elemenata elektroenergetskog sistema predstavlja zaseban podsistem, čija je zadaća da maksimalno umanja posljedice neželjenih pojava. Te neželjene pojave su kratki spoj, zemljospoj, nedopušteni porast napona i preopterećenje. Posljedice tih pojava mogu biti mehaničko i toplinsko razaranje elemenata mreže, ugrožavanje života i zdravlja, te prekid isporuke električne energije potrošačima. Od posebnog je interesa zaštita od posljedica kratkog spoja.

Zaštitu možemo s punim pravom nazvati podsistemom, jer su pojedini zaštitni uređaji udešeni (programirani) tako da njihov rad dovodi do međusobne suradnje i u slučajevima kada ti uređaji nisu međusobno posebno povezani. Kada pojedini uređaji nisu međusobno posebno povezani posebnim signalnim vezama, njihova povezanost se ipak ostvaruje, i to putem primarne mreže, te vremenskim uskladjivanjem rada pojedinih uređaja.

U "Električne mreže II", poglavlje 3.1., gdje su opisane posljedice kratkog spoja, već je utvrđeno, da se kvarovi odnosno kratki spojevi u mreži mogu svesti na najmanju mjeru, ali se ne mogu potpuno izbjeći. Nadalje je utvrđeno, da su posljedice kratkog spoja to manje, što se brže kratki spoj eliminira. Eliminacija kratkog spoja moguća je jedino prekidanjem struje koja napaja mjesto kvara. Uređaj kojim se struja kratkog spoja može prekinuti je učinska sklopka. Prema tome, eliminacija kratkog spoja je moguća samo isključivanjem elementa mreže koji je u kvaru, i to tako što zaštitni uređaj utvrdi postojanje kratkog spoja i dađe nalog učinskoj sklopci da prekine strujni krug. Pojedini zaštitni uređaji i podsistem zaštite u cjelini moraju zadovoljavati osnovne uvjete, koji će ovdje ukratko biti opisani.

Brzina rada zaštite treba biti što veća, kako bi što prije došlo do eliminacije kratkog spoja i da bi tako posljedice bile što manje.

Selektivnost rada zaštite ostvarena je onda, ako dodje do isključenja samo onog elementa mreže (dalekovoda, transformatora,...), koji je u kvaru, tj. ako ne dodje do nepotrebnog isključivanja ispravnih elemenata mreže. Tako će se prekid dobave električne energije odraziti na najmanji dio potrošača, a u slučaju zamkaste mreže i mreže s dovoljno rezerve uopće neće doći do prekida dobave.

Zaštita kao podsistem mora imati rezervu za slučaj da prvi "nadležni" uređaj zaštite iz bilo kojeg razloga zataji. Veći dio zaštitnih uređaja po svom principu rada predstavlja rezervu susjednom takovom uređaju. Rezerva se katkad postiže i ugradjivanjem dodatnih, rezervnih zaštitnih uređaja, koji mogu biti jednostavniji ili jednako kvalitetni kao osnovni uređaji. Djelovanje rezervne zaštite je razmjerno rjeđa pojava, pa se u tim slučajevima obično odstupa od zahtjeva besprijekorne selektivnosti i maksimalne brzine.

Pojedini uređaji moraju imati odgovarajuću osjetljivost, tj. moraju reagirati upravo pri pojavi struje, napona ili drugog kriterija, na koji su udešeni.

Kada se govori o osjetljivosti treba spomenuti i povratni faktor releja, čije je značenje najbolje objasniti primjerom. Ako nadstrujni relej zatvori kontakt kod 6,5 A pri rastućoj struji, npr. sve do 7,5 A, kod ponovnog opadanja struje relej neće otpustiti kontakt kod 6,5 A, već redovito kod niže struje, npr. 5,8 A. Za takav relej se može reći da ima povratni faktor:

$$F_p = \frac{5,8}{6,5} = 0,892 \quad 8-1$$

Ako takav relej nešto štiti neće se uređaj moći ponovo uključiti, makar je struja opala npr. na 6 A, što je manje od granične struje 6,5 A, ali je više od 5,8 A kod koje relej otpušta kontakt. Povratni faktor je neizbježiv kod mehaničkih releja, a kod elektroničkih releja se može po volji regulirati, uključujući vrijednost 1, ako je to potrebno.

Pojedini zaštitni uređjaji i podsistem u cjelini moraju imati visoku pouzdanost. To znači da uređjaji ne smiju biti izloženi kvarovima. Pouzdanost zaštite ovisi, međjutim, i o nizu vanjskih faktora, a to su: pouzdanost mjernih transformatora, pouzdanost sekundarnih strujnih krugova, pouzdanost napajanja pomoćnim naponima i konačno pouzdanost samog prekidača kojemu zaštita daje nalog za isključenje.

Mada je to već uočljivo iz dosadašnjeg izlaganja, treba istaknuti, da zaštitni uređjaji djeluju automatski, bez učešća čovjeka. Čovjek po mogućnosti koncentracije i brzini refleksa ne bi ni približno mogao udovoljiti zahtjevima koji se postavljaju na zaštitu.

Na izbor zaštite utječu:

- ranija iskustva stečena na osnovi statistike i analize kvarova i smetnji,
- nazivni napon mreže,
- oblik mreže,
- tretman zvjezdišta mreže,
- karakteristike i značaj elementa mreže (npr. dužina voda),
- očekivane struje i naponi pri kratkom spoju,
- očekivana nenormalna pogonska stanja.

Pri osnivanju podsistema zaštite i izbora pojedinih uređjaja treba imati u vidu i perspektivni razvoj mreže.

Ulaganje u zaštitu vezano je uz ekonomsku računicu. Potrebno je voditi računa ne samo o vrijednosti uništenog materijala i uređjaja uslijed kvara i o troškovima popravka, nego i o štetama kod potrošača zbog neisporučene energije. Troškovi neisporučene energije su vrlo različiti za razne potrošače u raznim zemljama. Mnogi računaju da je stvarni gubitak za društvo 40, 50, pa i više puta veći od cijene proizvodnje u elektroenergetskom sistemu. Važno je, nadalje, otkloniti opasnost za ljude i ostala živa bića.

Ovdje ćemo reći nešto i o podjeli zaštitnih uređjaja.

Najjednostavniji zaštitni uređaj je rastalni osigurač koji, smješten u primarni strujni krug, prekida struju kada ona prekorači nazivnu vrijednost osigurača. Primjena rastalnih osigurača ograničena je na niske i srednje napone, na male pogonske struje (što viši napon, manja struja) i razmjerno male struje kratkog spoja, koje je osigurač u stanju uspješno prekinuti.

U slučajevima kada zaštitni uređaj djeluje na učinsku sklopku, možemo razlikovati:

- ako veličina primarnog strujnog kruga (npr. struja) neposredno djeluje na rad zaštitnog uređaja, uređaj je primarni,
- ako primarna veličina (npr. struja) posebno djeluje na zaštitni uređaj putem mjernog transformatora, uređaj je sekundarni,
- ako zaštitni uređaj vlastitom proizvedenom mehaničkom silom izaziva okidanje mehanizma sklopke, uređaj je okidač,
- ako zaštitni uređaj djeluje na mehanizam sklopke posredstvom pomoćnog strujnog kruga i pomoćnog napona, uređaj je relej.

U složenim elektroenergetskim sistemima zaštitni uređaji su sekundarni releji. Okidači i primarna zaštita primjenjuje se samo u manje razgranatim distributivnim mrežama.

Po načinu izvedbe dijelimo zaštitu na elektromehaničku i elektroničku. Elektronička zaštita pruža veću brzinu djelovanja, veću prilagodljivost zahtjevima, manje dimenzije i lakši popravak. Elektronička zaštita je mehanički otpornija (udarci, vibracije), ali mora biti dodatno zaštićena od prodora prenapona nastalih indukcijom u elektroenergetskom postrojenju. Elektronička zaštita postepeno istiskuje elektromehaničku zaštitu.

Prema vrsti štićenog elementa mreže razlikujemo zaštitu:

- generatora,
- transformatora,
- motora,

- sabirnica,
- mreže niskog napona,
- mreže srednjeg napona,
- mreže visokog napona,
- mreže vrlo visokog napona,
- sistema kao cjeline.

Umjesto o zaštiti mreža bilo bi korektnije govoriti o zaštiti vodova, no pošto zaštita vodova više nego zaštita ostalih elemenata mreže sudjeluje u zaštiti shvaćenoj kao podsistem elektroenergetskog sistema, odlučili smo se u ovoj podjeli koristiti pojam "zaštita mreže".

U ovom kratkom izlaganju o zaštiti zadržat ćemo se samo za našiti mreža srednjih, visokih i vrlo visokih napona. Nešto o zaštiti niskonaponskih mreža rečeno je u prvom dijelu (Električne mreže I).

Zaštita generatora, transformatora, motora i sabirnica obradjena je u literaturi o električnim postrojenjima i u specijalističkoj literaturi.

Prema načinu šticeanja u visokonaponskoj mreži dominiraju zaštite:

- nadstrujna,
- distantna,
- usporedbena,
- ostale.

Podjela je prema mjernom članu, koji je odgovoran za isključenje.

Distantna zaštita je najrasprostranjenija zaštita u mrežama visokog i vrlo visokog napona. Područje nadstrujne zaštite su mreže napona do 15 najviše 20 kV. Usporedbena zaštita dopunjuje ili zamjenjuje distantnu zaštitu u specijalnim slučajevima i kod specijalnih zahtjeva.

8.2 NADSTRUJNA ZAŠTITA

Pri pojavi kratkog spoja struje redovito narastu iznad struja u normalnom pogonu. Zato se kod najjednostavnijih zaštitnih uređaja uzima struja kao kriterij za davanje naloga za automatsko isključenje pogodjenog dijela mreže. Takva zaštita je osjetljiva na pojavu struje veće od normalne, pa se zato naziva nadstrujna zaštita.

8.2.1 Obična nadstrujna zaštita

Najjednostavniji oblik nadstrujne zaštite je rastalni osigurač. Primjena osigurača je radi male rasklopne moći ograničena na niskonaponske mreže, a kod viših napona (do nekih 50 kV) na zaštitu potrošača skromne snage.

Struja kratkog spoja kroz relej neće biti uvijek jednaka. Osim o mjestu kratkog spoja ona će ovisiti i o broju generatora, koji momentalno napajaju mrežu. Prema tome moramo nadstrujni relej udesiti na neku struju veću od normalne, da ne bi nepotrebno iskopčao, ali manju od minimalne struje kratkog spoja koja se očekuje.

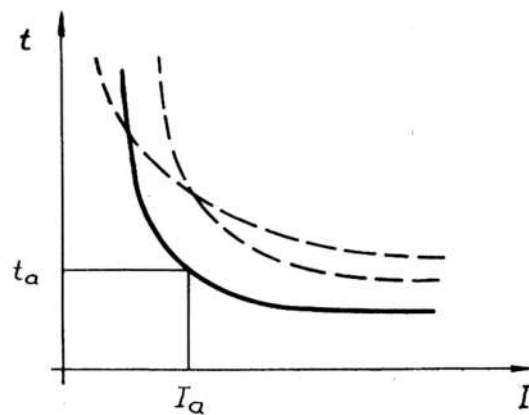
Medjutim, djelovanje releja jedino po kriteriju struje dovelo bi do njihovog neselektivnog rada. Pri pojavi kratkog spoja negdje u mreži iskopčale bi sve sklopke kroz čije releje prolazi struja veća od struje za koju su releji udešeni.

Da bi se postigla selektivnost uvodi se još jedan kriterij, a to je vrijeme. Nadstrujnom releju dodaje se vremenski član, koji izvršenje naloga odgadja za određeno, unaprijed udešeno vrijeme. Ako je to vrijeme ovisno o jakosti struje, imamo vremenski zavisni nadstrujni relej.

Rastalni osigurač je također vremenski zavisan: kod manjih jakosti struja izgarat će sporije, a kod jakih veoma brzo. Kvalitetni rastalni osigurač je kod veoma jakih struja toliko brz da prekida strujni krug prije nego je udarna struja kratkog spoja dos-

tigla svoj maksimum. Prema tome, rastalni osigurač je jedino zaštitno sredstvo i od mehaničkog djelovanja udarne struje kratkog spoja.

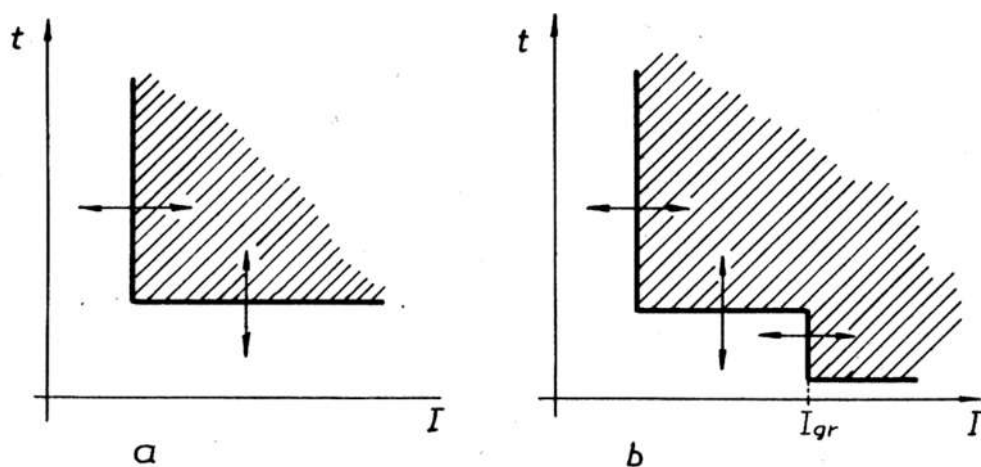
Na slici 156 nalazi se karakteristika vremenski zavisne nadstrujne zaštite. Crtkane krivulje su karakteristike kod nekog drugog udešenja iste zaštite. Karakteristika pokazuje da će pri pojavi neke struje I_a relej dati nalog za iskapčanje nakon isteka vremena t_a . Ovi releji su izbačeni iz upotrebe.



Slika 156, - Karakteristika vremenski zavisnog nadstrujnog releja

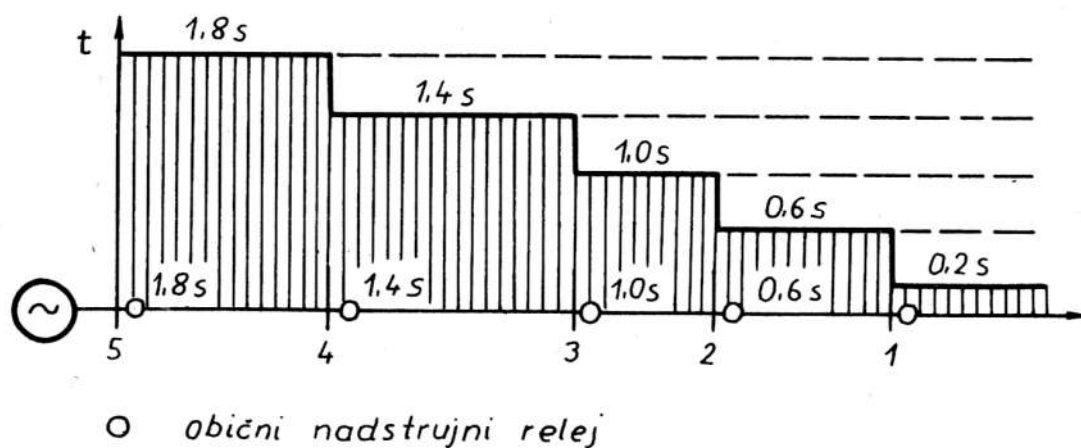
Bolji je vremenski nezavisni nadstrujni relej. Na slici 157a pokazana je karakteristika ove zaštite. Strelice pokazuju mogućnost podešavanja posebno struje i posebno vremena.

Neki releji imaju još i tzv. momentalno isklapanje postignuto dodatnim nadstrujnim relejem bez vremenskog člana (sl.157b). Ako struja kroz relej premaši neku struju I_{gr} , relej djeluje u vremenu uvjetovanom jedino tromešću mehaničkih dijelova releja i sklopke. Cilj je ove dodatne mogućnosti da se u vrlo kratkom vremenu eliminiraju snažni kratki spojevi, ali često na uštrb selektivnosti. Zato treba biti oprezan i umjeren u primjeni ovih tzv. momentalnih članova nadstrujne zaštite.



Slika 157. - Karakteristika vremenski nezavisnog nadstrujnog releja bez (a) i s momentalnim članom (b)

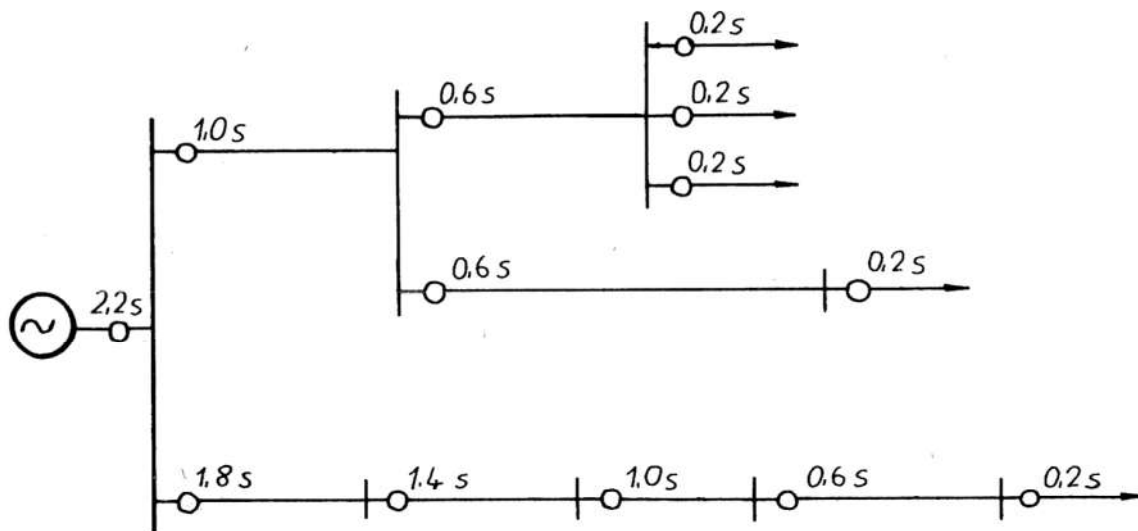
Kod jednostrano napajanih mreža možemo nadstrujnom zaštitom postići potpunu selektivnost stupnjevanjem vremena. Na slici 158 prikazano je šticeenje radijalnog voda.



Slika 158. - Stupnjevanje vremena vremenski nezavisnog nadstrujnog releja

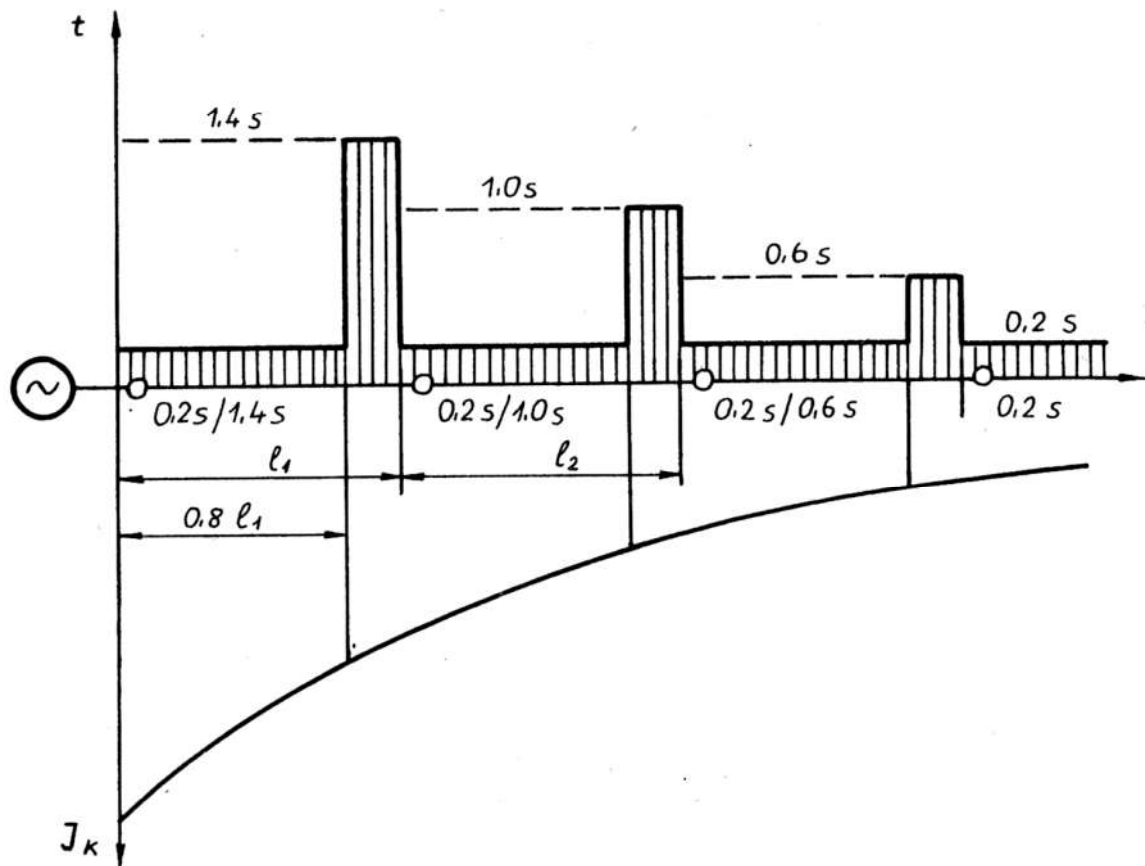
Kod kratkog spoja na vođu 2-3 djelovat će relej 3. Releji 4 i 5 bit će pobudjeni strujom kratkog spoja, ali će relej 3 iskopčati prije ostalih. Kod kratkog spoja na vođu 4-5 kvar će biti eliminiran nakon relativno dugog vremena od 1,8s. Vremenske stupnjeve kraće od 0,4 s nema smisla uzimati radi tolerancija vremenskih releja. To je jedna od mana nadstrujne zaštite.

Na slici 159. prikazano je vremensko stupnjevanje nadstrujne zaštite u radijalnoj mreži.



Slika 159. - Stupnjevanje nadstrujne zaštite u radijalnoj mreži

U većem dijelu radijalne mreže, npr. 80%, možemo postići iskapčanje u najmanjem mogućem vremenu, ako za svaku sklopku upotrijebimo dva nadstrujna i dva vremenska releja. Selektivnost se postiže tako da se jedan od nadstrujnih releja (brzi nadstrujni relej) udesi prema struji kratkog spoja. Ovdje se koristi činjenica da veličina struje ovisi o mjestu kratkog spoja. Drugi niz releja udesi se kao na slici 159.



Slika 160. - Stupnjevanje pomoću dvostruke obične nadstrujne zaštite

Na slici 160. prikazano je šticeenje mreže dvostrukom nadstrujnom zaštitom. Uvjet za uspješnu primjenu ovog sistema je razmjerno stalna struja kratkog spoja.

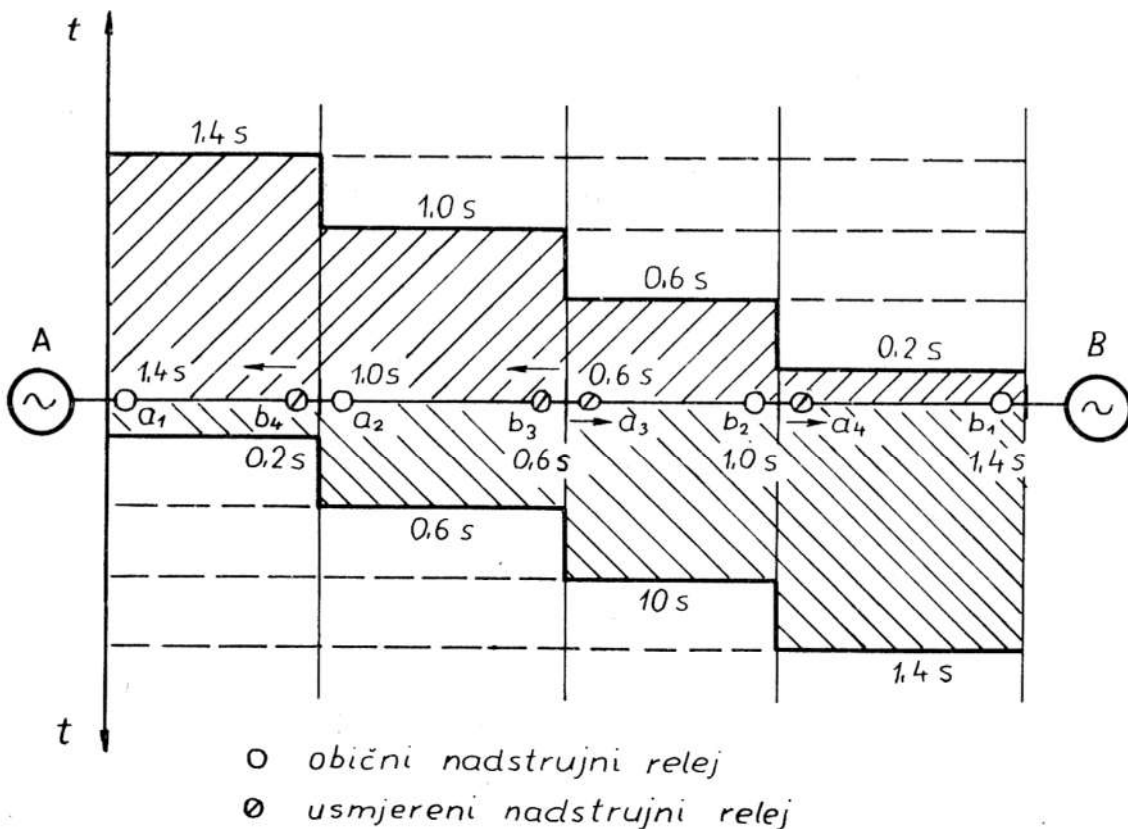
Samo nadstrujnim relejima nemoguće je ostvariti selektivnu zaštitu u mreži koja se napaja s dvije strane. Isto to vrijedi i za mrežu napajanu s jedne strane, a koja ima paralelne vodove.

8.2.2 Usmjerena nadstrujna zaštita

Usmjerena nadstrujna zaštita dobije se tako što se normalnoj vremenski nezavisnoj nadstrujnoj zaštiti doda još i usmjereni član.

Ovaj dodatak, koji obično radi na vatmetarskom principu, pros-
ljedjuje nalog za iskapčanje, kojeg daje nadstrujni član, samo
onda ako je kratki spoj nastao u određenom smjeru u odnosu na
relej.

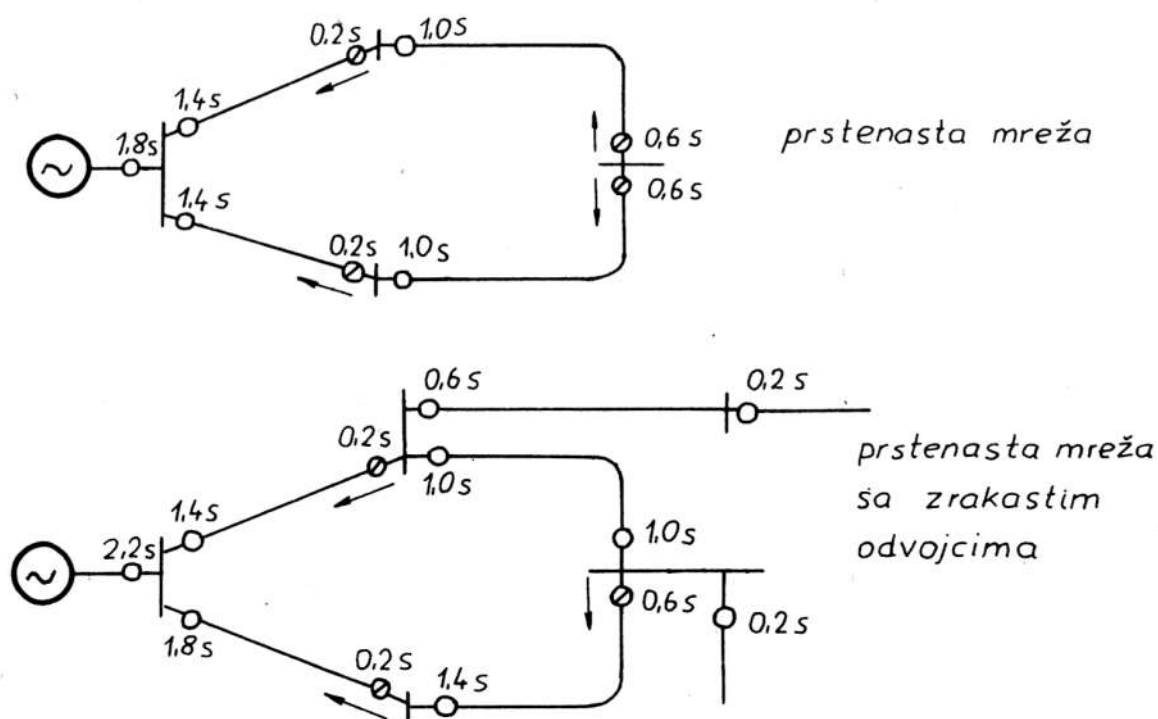
Na slici 161 prikazano je šticeenje usmjerenom nadstrujnom zaštitom
voda koji se napaja s dvije strane.



Slika 161. - Šticeenje dvostrano napajanog voda usmjerenom nad-
strujnom zaštitom

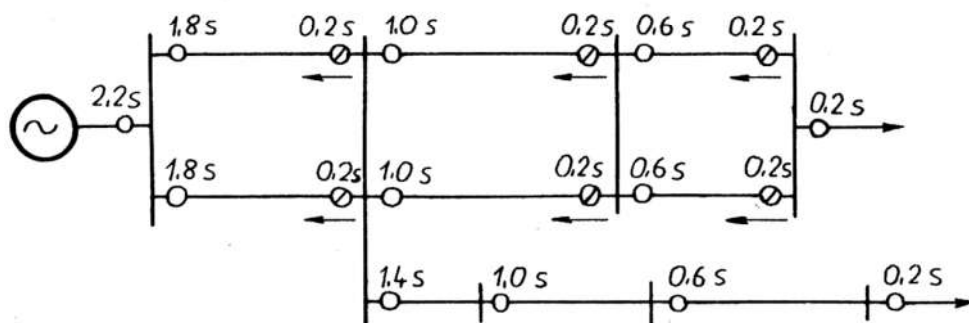
U slučaju kratkog spoja na bilo kojoj dionici, mora biti iskopča-
na jedino ta dionica. Stupnjevanje vremena provodi se kao kod o-
bične nadstrujne zaštite. Kod toga se promatra niz releja $a_1 \dots a_n$
kao da su napajani samo sa strane A Niz releja $b_1 \dots b_n$ promatra
se kao da su napajani samo sa strane B. Nadstrujni relej s us-

mjerenim članom postaviti će se tamo, gdje bi obični nadstrujni relej iskopčao dionicu na kojoj nije kratki spoj. Releji smije iskopčati samo kada je smjer struje kratkog spoja od sabirница prema mjestu kratkog spoja, a ne smije iskopčati ako je smjer struje kratkog spoja prema sabirnicama. Na slici 162. prikazano je šticeenje prstenaste mreže običnim i usmjerenim nadstrujnim relejima.



Slika 162.- Šticeenje prstenaste mreže nadstrujnom zaštitom

Usmjerenom nadstrujnom zaštitom možemo štiti dvostruki vod napajan s jedne strane, što je prikazano na slici 163. Koristi se činjenica da kratki spoj ne izaziva struje dalje od mjesta kratkog spoja, gledano od izvora napajanja.

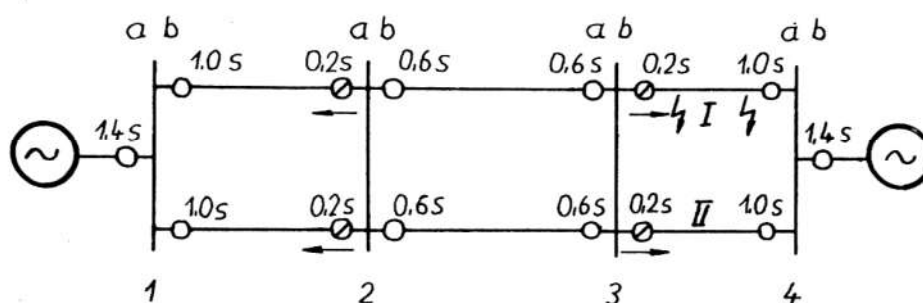


Slika 163.- Štićenje nadstrujnom zaštitom dvostrukog voda, napajanog s jedne strane

Usmjereni nadstrujni releji su skuplji od običnih nadstrujnih releja. Osim toga, oni zahtijevaju i naponske mjerne transformatore. Zbog toga se primjenjuju samo tamo gdje je to neophodno.

Usmjerena nadstrujna zaštita ima isti nedostatak kao i obična nadstrujna zaštita: stupnjevanjem se dolazi do veoma dugih vremena iskapčanja, pa su vrlo izražene negativne posljedice kratkog spoja.

S usmjerenom nadstrujnom zaštitom ne može se zaštititi dvostruki vod napajan s dvije strane. Takav pokušaj prikazan je na slici 164.



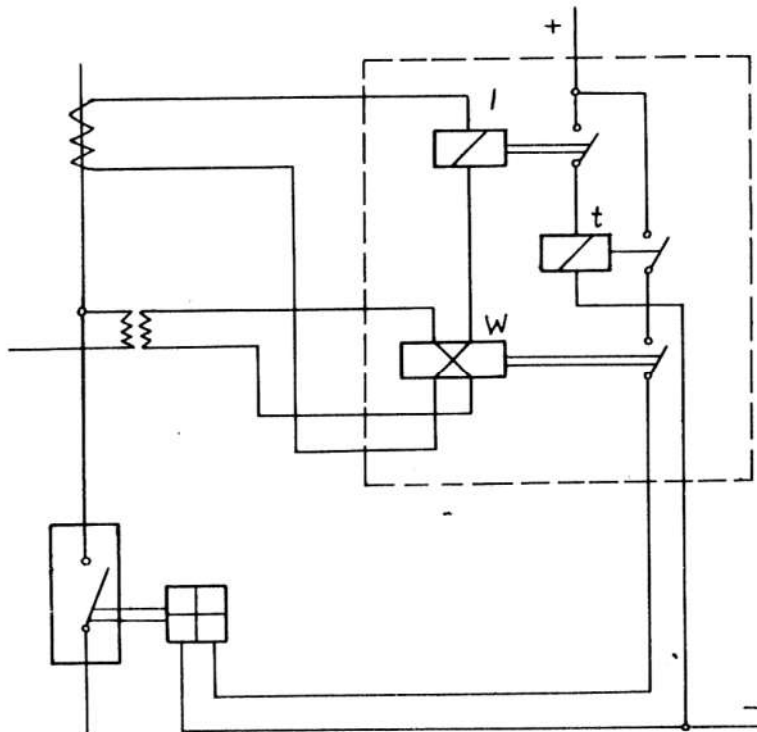
Slika 164 - Dvostrano napajani dvostruki vod; neselektivnost usmjerene nadstrujne zaštite

Pretpostavimo kratki spoj na dionici 3-4, vod I. Nije svejedno gdje se nalazi kratki spoj na tomvodu. Ako je kratki spoj u blizini sabirnica 3, smjer struje u vod II bit će od 4 prema 3, a ako je kratki spoj u blizini sabirnica 4, smjer struje u vod II bit će od 3 prema 4. Stoga nije moguće odrediti djelovanje usmjerelog releja. Selektivnost postaje još problematičnija, ako uzmemo u obzir da su izvori vjerojatno različite snage i da se ta razlika u snazi mijenja sezonski.

Prema tome, primjena usmjerene nadstrujne zaštite je ograničena na mreže jednostavne konfiguracije. U svim slučajevima daljnji releji služe kao rezervareleju koji bi morao prvi djelovati.

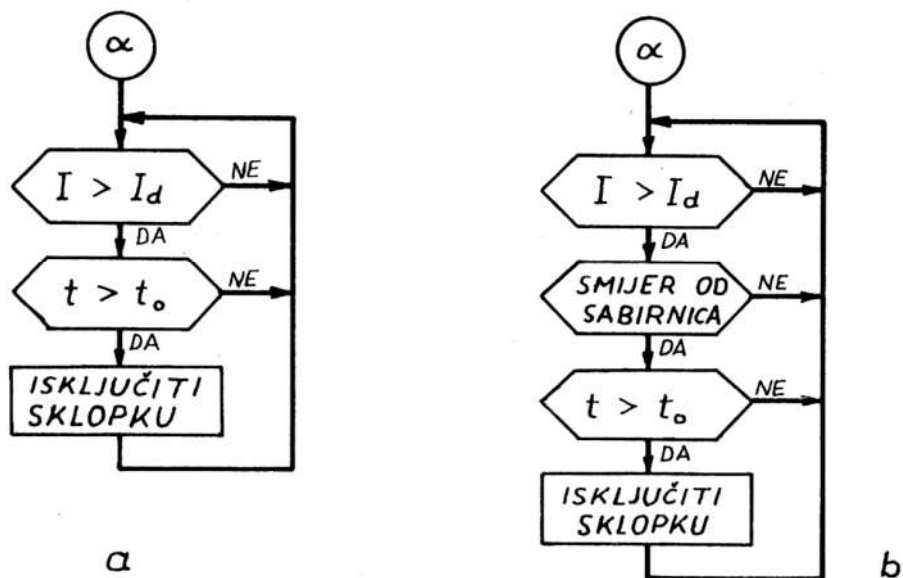
Nadstrujna usmjerena zaštita ne udovoljava zahtjevima brzine, selektivnosti, a često i osjetljivosti, koji se postavljaju u mrežama visokog napona.

Osnovna shema nadstrujnog usmjerelog releja prikazana je na slici 165. Ako izbacimo usmjereni član, dobit ćemo obični nadstrujni relej.



Slika 165.- Osnovna shema usmjerelog nadstrujnog releja

Na slici 166. nalaze se dijagrami toka djelovanja običnog i usmjerenog nadstrujnog releja. Prva petlja je petlja stalne spremnosti, u kojoj se stalno uspoređuje veličina struje.



Slika 166.- Dijagram toka djelovanja običnog nadstrujnog releja (a) i usmjerenog nadstrujnog releja (b)

8.3 DISTANTNA ZAŠTITA

8.3.1 Princip djelovanja

Distantna zaštita predstavlja najraširenije sredstvo zaštite u mrežama visokog i vrlo visokog napona. Distantna zaštita u granicama mogućnosti (s obzirom na neke neuhvatljive veličine) udovoljava zahtjevima brzine, selektivnosti, osjetljivosti i rezerve. Distantni relej mjeri napon i struju na mjestu gdje je ugrađen. Iz omjera:

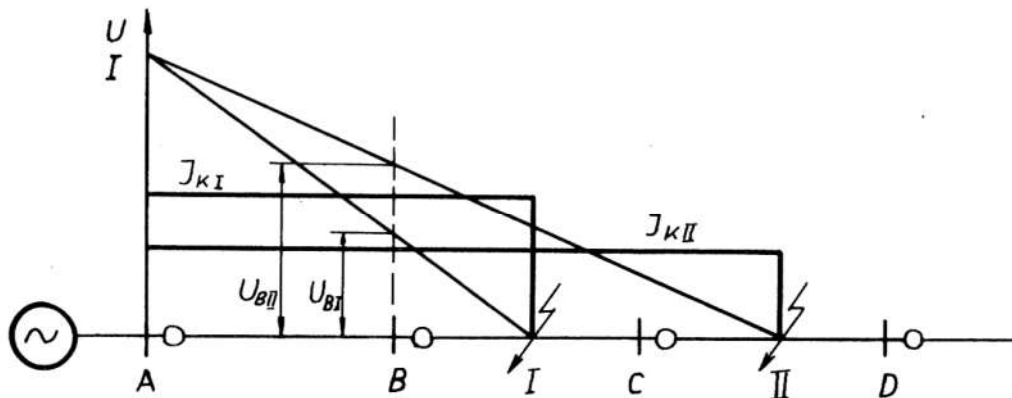
$$\frac{U}{I} = Z :: l :: t$$

utvrđuje udaljenost kratkog spoja. Izmjerena veličina (distanca) utječe na vrijeme zatezanja okidanja releja. Bliže kvarove (manji izmjereni Z) isključit će brzo, a udaljene kvarove (veliko izmjereno Z) isključit će kasnije. Na taj način daje se vremena relejima koji su bliži mjestu kratkog spoja da isključe ranije. Time je postignuta selektivnost.

Distantni relej sastavljen je od slijedećih elemenata:

- za mjerenje veličine Z ,
- za mjerenje smjera,
- za zatezanje vremena.

Princip rada distantne zaštite vidimo na slici 167.



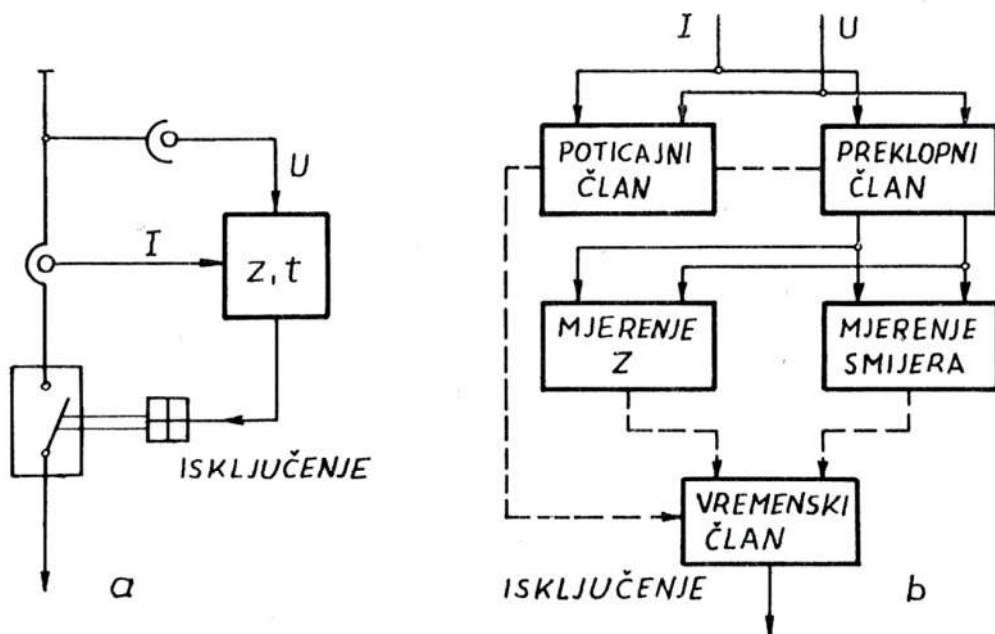
Slika 167.- Princip rada distantne zaštite

Vidimo da je:

$$U_{BI} < U_{BII} \quad I_{BI} > I_{BII} \quad Z_{BI} < Z_{BII} \quad 8-3$$

Relej u B mjerit će u slučaju kratkog spoja na mjestu I veću struju i manji napon nego u slučaju kratkog spoja na mjestu II. Stoga će za kratki spoj na mjestu I biti nadležan relej B, a za slučaj kratkog spoja na mjestu II relej u C.

Generalna shema distantnog releja nacrtana je na slici 168a, a blok shema na slici 168b.

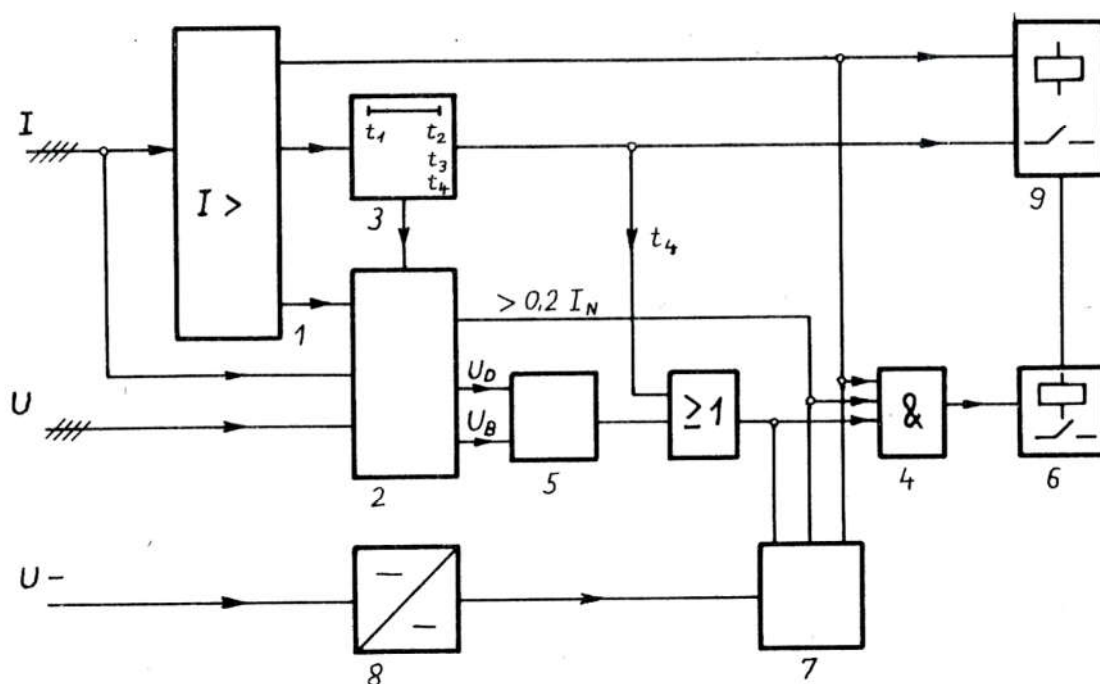


Slika 168. - Distantni relej

Poticajni član pobudjuje preklopne releje i vremenski član. Preklopni releji prosljeđuju napon mjernim članovima ovisno o fazi kojom teče struja kratkog spoja. Ako su ispunjeni svi uvjeti (mjerenje Z i mjerenje smjera), mjerni članovi daju preko vremenskog člana, nakon isteka udešenog vremena, nalog za isključenje i to uz uvjet da u tom trenutku još uvijek postoji pobuda.

Na slici 169. prikazana je blok shema jednog jednostavnog statičkog (elektroničkog) distantnog releja. Pri nastanku kratkog spoja pro-radi jedan ili više nadstrujnih releja i određuju u logičnom sklopu 2 izbor odgovarajućih mjernih veličina. Istovremeno se pokreću vremenski stupnjevani releji 3 i otvara AND-ulaz 4. Razlika napona U_D i referentni napon U_B , koji su izvedeni iz odabranih mjernih vrijednosti, dolaze do komparatora faza 5. Ako se greška nalazi unutar udešene udaljenosti, komparator faza daje impuls koji pobudjuje relej za isključivanje 6. Vidi se da se AND-ulazu 4, osim pobude i mjerenja, dovodi još i kriterij izveden iz struje u mjernom krugu. Do isključivanja dolazi samo ako je struja najmanje $0,2 I_N$. Ova AND - sprega vrlo mnogo sprečava pogrešna isklju-

čivanja do kojih bi moglo doći uslijed neispravnih komponenata. Trajni nadzor triju kriterija (7) blokira relej u slučaju defekata u releju i daje signal defektnog stanja. Do ove blokade dolazi i kod ispada pomoćnog istosmjernog napona, koji dolazi iz pretvarača 8. Ovaj pretvarač napaja elektroničke uređaje releja i ujedno ih potpuno galvanski odvaja od akumulatorske baterije.



Slika 169.- Blok shema jednog elektroničkog releja

Ako udaljena greška nije eliminirana od strane bližih releja do isteka graničnog vremena t_4 , dolazi do isključenja bez obzira na rezultat mjerenja udaljenosti.

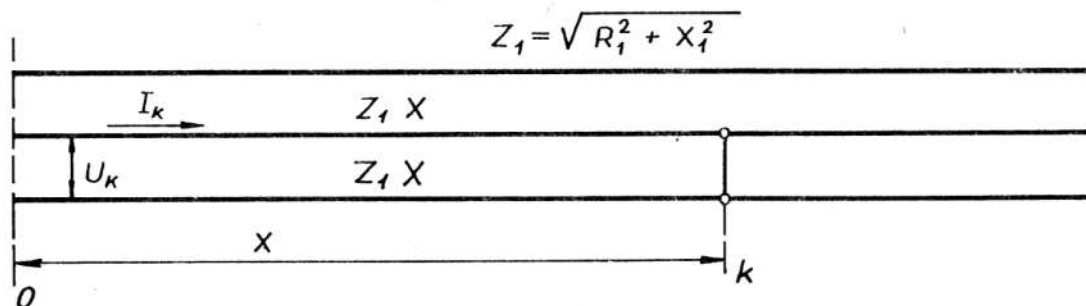
Preko odvojnih releja 9 mogu se koristiti signali o vrsti kvara, vremenskog stupnja i isključenju za potrebe kronološke registracije događaja i dojave centru daljinskog upravljanja.

8.3.2 Mjerni i usmjereni član distantnog releja

Distantni relej na temelju električnih veličina, struje i napona, utvrđuje udaljenost greške gledane sa svojeg položaja, točnije rečeno od mjesta ugradnje strujnih i naponskih mjernih transformatora. Položaj promatranog distantnog releja u mreži označit ćemo s o . Na temelju izmjerene udaljenosti relej će donijeti odluku o tome hoće li odnosna sklopka biti isključena ili ne, a ako će biti isključena, kroz koliko vremena zatezanja će to biti izvršeno.

U stvari, mjerni član distantnog releja ne mjeri udaljenost mjesta greške (kratkog spoja) već samo da li je greška bliže ili dalje od neke unaprijed utvrđene fiksne udaljenosti. Ovo je važno za daljnja razmatranja. Na udaljenost greške distantni relej zaključuje preko otpora zamke, ne ulazeći za sada detaljno u pitanje o kakvom se otporu radi.

Kao jednostavan primjer mjerenja otpora zamke može se navesti dvopolni kratki spoj i impedancija zamke (slika 170).



Slika 170.- Utvrđjivanje udaljenosti kvara s pomoću struje i napona

$$U_K = I_K \cdot 2 Z_1 X$$

$$\frac{U_K}{I_K} = 2 Z_1 X = K X \quad 8-4$$

K je konstanta koja obuhvaća sve konstante i u gornjem izrazu može imati različite vrijednosti.

Iz omjera U/I možemo, dakle, zaključiti o udaljenosti greške. Taj je omjer ujedno identičan impedanciji.

Osim iz omjera $U/I = Z$ može se o udaljenosti kvara zaključiti i iz drugih otpornih veličina, pa ćemo uvdje dati njihov pregled. Sa ϕ_K ćemo označiti fazni kut između struje kratkog spoja i napona kratkog spoja:

$$\text{Impedancija, prividni otpor} \quad \frac{U}{I} = Z \quad 8-5$$

$$\text{Rezistancija, djelatni otpor} \quad \frac{U \cos \phi}{I} = Z \cos \phi = R \quad 8-6$$

$$\text{Reaktancija, reaktivni otpor} \quad \frac{U \sin \phi}{I} = Z \sin \phi = X \quad 8-7$$

$$\text{Konduktancija, djelatna vodljivost} \quad \frac{I \cos \phi}{U} = \frac{1}{Z} \cos \phi = G \quad 8-8$$

$$\text{Susceptancija, reaktivna vodljivost} \quad \frac{I \sin \phi}{U} = \frac{1}{Z} \sin \phi = B \quad 8-9$$

Mogu se razmatrati još i recipročne vrijednosti nabrojenih omjera, od kojih za neke nemamo definiranog naziva:

$$\text{Admitancija, prividna vodljivost} \quad \frac{I}{U} = \frac{1}{Z} = Y \quad 8-10$$

$$\frac{I}{U \cos \phi} = \frac{1}{R} \quad 8-11$$

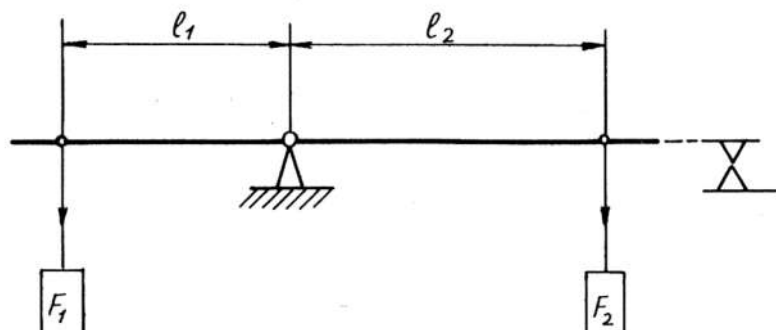
$$\frac{I}{U \sin \phi} = \frac{1}{X} \quad 8-12$$

$$\frac{U}{I \cos \phi} = \frac{1}{G} \quad 8-13$$

$$\frac{U}{I \sin \phi} = \frac{1}{B} \quad 8-14$$

Omjer 8-10 je recipročan omjeru 8-5, i tako redom dalje do 8-14, odnosno do 8-9.

Jednostavni uredjaj s pomoću kojega se može zaključivati na temelju omjera je polužna vaga (sl.171).



Slika 171, - Polužna vaga kao mjerni član distantnog releja

Tereti F_1 i F_2 će biti u ravnoteži, ako je suma momenata jednaka nuli, tj. ako je:

$$F_1 l_1 = F_2 l_2 \quad 8-15$$

odakle izlazi:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1} = K \quad 8-16$$

ali isto tako izlazi:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{l_1}{l_2} = K' \quad 8-17$$

Ova konstatacija je vrlo važna, jer ako konstruiramo uređaj, odnosno mjerilo omjera, koji je valjan za omjer 8-16, ovaj će uređaj biti jednako valjan kao mjerilo recipročne vrijednosti tog omjera. Time smo, za sada, deset omjera definiranih izrazima 8-5 do 8-14 sveli na polovicu.

Preostaje jedino da na uređaju postignemo da nam tereti F_1 i F_2 na vagi budu proporcionalni brojnicima, odnosno nazivnicima naših električki definiranih omjera.

Pridodamo li modelu vage još i kontakt označen na sl.171, dobit ćemo u vidu "da" ili "ne" odgovor na pitanje, u kojem je smislu poremećena ravnoteža vage, što u našem slučaju znači odgovor na pitanje, da li je kvar na udaljenosti većoj ili manjoj od udaljenosti udešene na releju.

Zadatak je da se pobliže definira stanje ravnoteže. S jedne strane tog stanja imamo područje "isključiti", a s druge strane "ne isključiti".

Vagu za omjere 8-5 i 8-10 konstruirat ćemo tako da postignemo proporcionalnosti:

$$F_1 :: U \quad 8-18$$

$$F_2 :: I$$

Takav mjerni član nazivamo impedantnim, odnosno admitantnim.

Vagu za omjere 8-6 i 8-11 konstruirat ćemo uz prethodnu transformaciju

$$\frac{U \cos \phi}{I} = \frac{U I \cos \phi}{I^2} = \frac{P}{I^2}, \quad 8-19$$

pa sile na vagi trebaju biti proporcionalne:

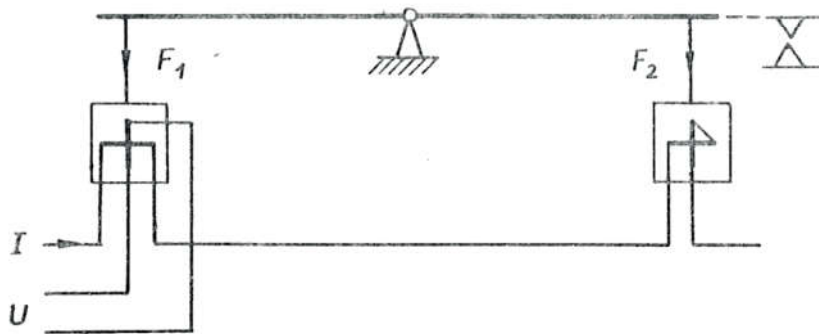
$$F_1 :: P \quad 8-20$$

$$F_2 :: I^2$$

Takav mjerni član je rezistantni, a sile na krakovima vage otvaraju se odgovarajućim vatmetarskim sistemom (sl.172).

Za omjere 8-7 i 8-12 vršimo transformaciju:

$$\frac{U \sin \phi}{I} = \frac{U I \sin \phi}{I^2} = \frac{Q}{I^2} \quad 8-21$$



Slika 172. - Rezistentni mjerni član

Takav mjerni član je reaktantni, a sile na krakovima vage su proporcionalne:

$$F_1 \propto Q \quad 8-22$$

$$F_2 \propto I^2$$

Za omjere 8-8 i 8-13 vršimo transformaciju

$$\frac{U I \cos \phi}{I U} = \frac{U I \cos \phi}{U^2} = \frac{P}{U^2} \quad 8-23$$

Takav mjerni član je konduktantni, a sile na krakovima vage su proporcionalne:

$$F_1 \propto P \quad 8-24$$

$$F_2 \propto U^2$$

Za omjere 8-9 i 8-14 vršimo transformaciju:

$$\frac{I \sin \phi}{U} = \frac{U I \sin \phi}{U^2} = \frac{Q}{U^2} \quad 8-25$$

Takav mjerni član je susceptantni, a sile na krakovima vage su proporcionalne:

$$F_1 \propto Q$$

8-26

$$F_2 \propto U^2$$

Prije daljnjeg razmatranja poći ćemo od slijedećih postavki:

- a) Kao sredstvo promatranja i prikazivanja odabiremo kompleksnu ravninu s koordinatama r, j , koje će nam biti istovjetne s R, X . Nema zapreke da se po potrebi poslužimo i polarnim koordinatama Z/ϕ . Vidjeli smo, naime, da su omjeri 8-16 i 8-17 ravnopravni, pa nam to omogućuje da sve slučajeve svedemo na promatranje veličina dimenzije Ω , što mnogo doprinosi preglednosti razmatranja. Ostvarenje toga cilja izvedeno je pod c).

Distanтни relej postavljamo u ishodište koordinatnog sustava.

- b) Možemo, nadalje, postaviti pet uvjeta ravnoteže za omjere 8-5 do 8-14, pošto su recipročni omjeri ravnopravni. Omjere svedimo na oblik 8-16 i transformirajmo kako slijedi, uz uvjet da konstantu K shvatimo sasvim općenito:

$$\text{Impedantni} \quad Z = K \quad 8-27$$

$$\text{Rezistantni} \quad Z \cos \phi = K \rightarrow Z = \frac{K}{\cos \phi} \quad 8-28$$

$$\text{Reaktantni} \quad Z \sin \phi = K \rightarrow Z = \frac{K}{\sin \phi} \quad 8-29$$

$$\text{Konduktantni} \quad \frac{1}{Z} \cos \phi = K \rightarrow Z = K \cos \phi \quad 8-30$$

$$\text{Susceptantni} \quad \frac{1}{Z} \sin \phi = K \rightarrow Z = K \sin \phi \quad 8-31$$

- c) Pošto smo kutu ϕ dodijelili značenje faznog kuta između struje i napona (u našem slučaju struje i napona kratkog spoja), radi općeg razmatranja uvodimo još i opći kut ψ u slučaju kada se u izrazu pojavljuje ϕ .

Tako će uvjet ravnoteže 8-28 poprimiti oblik:

$$Z = K \frac{1}{\cos(\phi + \psi)} \quad 8-32$$

a uvjet 8-29 poprimiti će oblik

$$Z = K \frac{1}{\sin(\phi + \psi)} \quad 8-33$$

Pošto kut ψ može imati proizvoljnu vrijednost, pa prema tome može biti i pravi kut, možemo koristiti činjenicu da je

$$|\sin(\phi - 90^\circ)| = |\cos \phi|$$

pa uvjete ravnoteže 8-32 i 8-33 možemo obuhvatiti zajedničkim uvjetom B:

$$B \dots Z = K \frac{1}{\cos(\phi + \psi)} \quad 8-34$$

Da bi izlaganje bilo preglednije, releje koji počivaju na ovom uvjetu, nazvat ćemo tipom B.

Uvjete ravnoteže 8-30 i 8-31 možemo svesti na zajednički uvjet C:

$$C \dots Z = K \cos(\phi - \psi) \quad 8-35$$

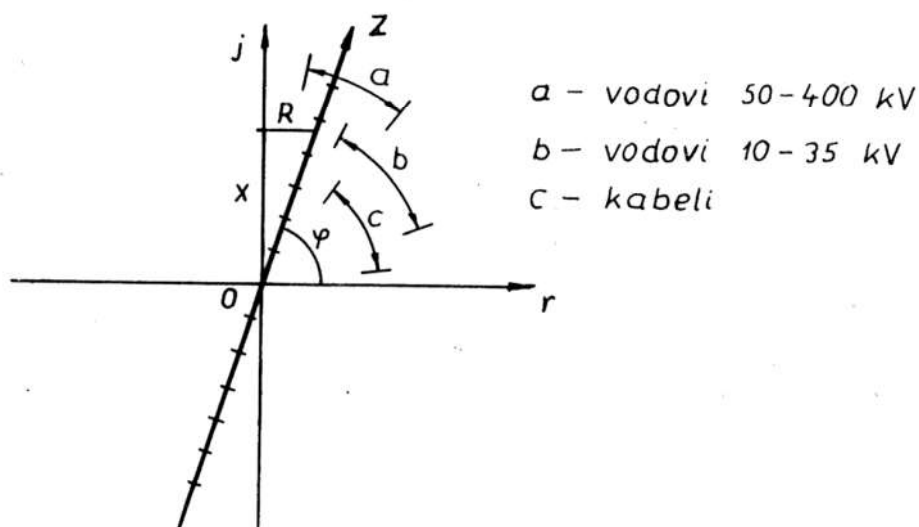
koji ćemo nazvati tipom C, i konačno, radi potpunosti, ponovo navodimo netransformirani uvjet A (8-27):

$$A \dots Z = K \quad 8-36$$

koji ćemo nazvati tipom A.

Kompleksnu impedanciju zamke kratkog spoja $\bar{Z} = Z/\phi$ dobivamo omjerom struje $I/0$ i napona U/ϕ , što znači da smo struju stavili u realnu os.

Na sl.173 prikazan je pravac impedancije $\bar{Z}$ u kompleksnoj ravnini. Pošto je impedancija proporcionalna dužini voda, odnosno udaljenosti mjesta kvara, pravac impedancije možemo baždariti i u kilome-



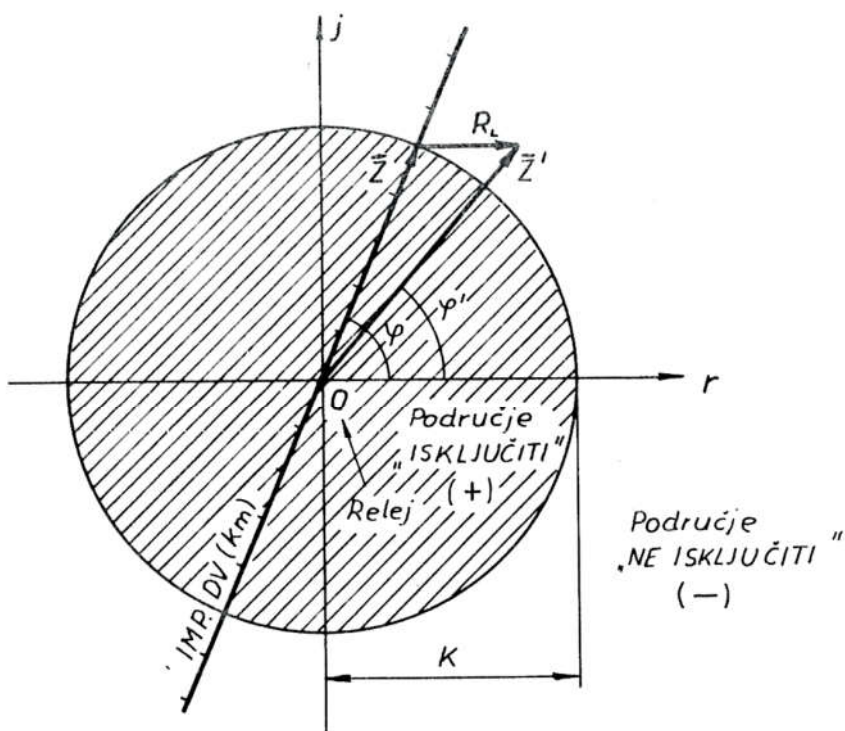
Slika 173.- Pravac impedancije voda u kompleksnoj ravnini

trima (ljestvica na $\bar{Z}$, sl.173). Na istoj slici naznačeni su i intervali kuteva ϕ , unutar kojih se mogu očekivati pravci $\bar{Z}$ za pojedine tipove vodova.

Za pojedine vrste mjernih članova (A,B,C) možemo u kompleksnoj ravnini prikazati karakteristiku, odnosno pozicioni dijagram. Za relej tipa A (izraz 8-36) karakteristika je kružnica polumjera K sa središtem u ishodištu (sl.174). U točkama kružnice zadovoljen je uvjet ravnoteže. Unutar kružnice ravnoteža je poremećena u smislu "isključiti" (+), a izvan kružnice u smislu "ne isključiti" (-).

Prvo što se na slici 174 može uočiti jest da će do isključenja doći kod svih $Z < K$, bez obzira da li se Z nalazi u I ili III kvadrantu. Impedantni relej nema, dakle, usmjerenog djelovanja, pa usmjereni član treba dodatno ugraditi, ako želimo da relej isključuje samo kvarove koji se nalaze u jednom smjeru.

Druga bitna stvar, s kojom ćemo se i kasnije susretati, je činjenica da se impedancija kvara nalazi na pravcu Z samo ako je prijelazni otpor na mjestu kratkog spoja jednak nuli. Većina kratkih spojeva ostvaruje se preko električnog luka, koji ima



Slika 174.- Karakteristika impedantnog releja

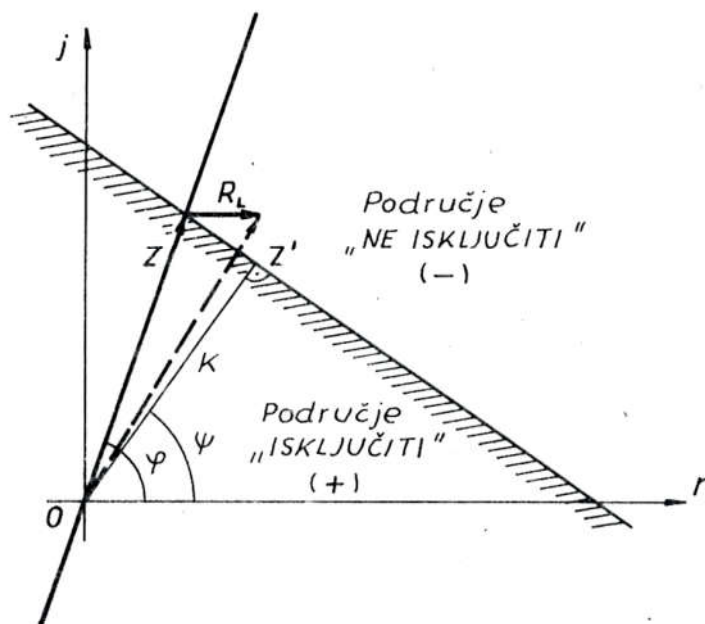
djelatni otpor R_L . Taj otpor se pribraja impedanciji $\bar{Z}$ (sl.174), pa relej mjeri $\bar{Z}'$ umjesto $\bar{Z}$. Vidimo, da bi kratki spoj po udaljenosti kvara trebao isključiti, ali zbog povećane impedancije uslijed luka ($Z' > Z$) neće doći do isključenja. Dobar dio nastojanja na kreiranju dobrog distantnog releja posvećeno je kompenzaciji utjecaja otpora električnog luka. Relativni utjecaj otpora luka raste kod kratkih vodova.

Prema nekim izvorima otpor električnog luka može se izračunati po izrazu:

$$R_L = \frac{28\,700}{I^{1,4}} \ell \quad |\Omega| \quad 8-37$$

(ℓ = dužina luka u m)

U uvjetu za ravnotežu 8-34, iz kojega izvodimo relej tipa B, prepoznamo jednadžbu pravca u polarnim koordinatama. Karakteristika releja tog tipa biti će dakle pravac (sl.175). Sve točke tog



Slika 175.- Karakteristika mjernog člana tipa B

pravca predstavljat će stanje ravnoteže, s jedne strane pravca ravnoteža je poremećena u smislu "isključiti", a s druge strane u smislu "ne isključiti". U pogledu otpora električnog luka vrijedi isto razmatranje kao i kod impedantnog releja tipa A.

Uz opći slučaj prikazan na sl.175, prikazat ćemo još slučaj za $\psi = 0$, što daje rezistanтни relej ($R = K$). Njegova karakteristika je prikazana na slici 176.

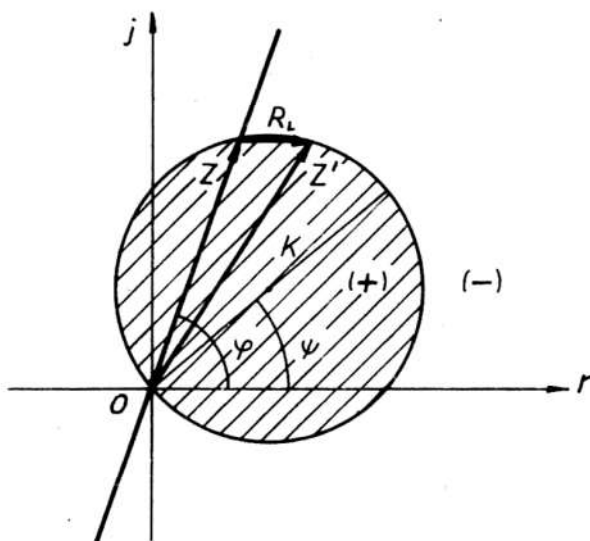
Prikazat ćemo još i drugi posebni slučaj, koji nastaje ako stavimo $\psi = 90^\circ$, a svodi se na uvjet ravnoteže $X = K$. To je reaktantni relej, a karakteristika mu je prikazana na slici 177. Uočljivo je da je struja ravnoteže neporemećena, bez obzira da li je prisutan električni luk ili ne.

mogućih napona i struja koje se javljaju u normalnom pogonu. Točke koje se nalaze bliže ishodištu odgovaraju slučajevima većeg opterećenja.

Vidi se da se dio područja normalnog pogona podudara s područjem isključivanja reaktantnog releja. To je dakle, okolnost, o kojoj pri kreiranju releja treba voditi računa. Spomenimo još da se u složenoj mreži područje normalnog pogona pojavljuje i kao zrcalna slika u odnosu na os j .

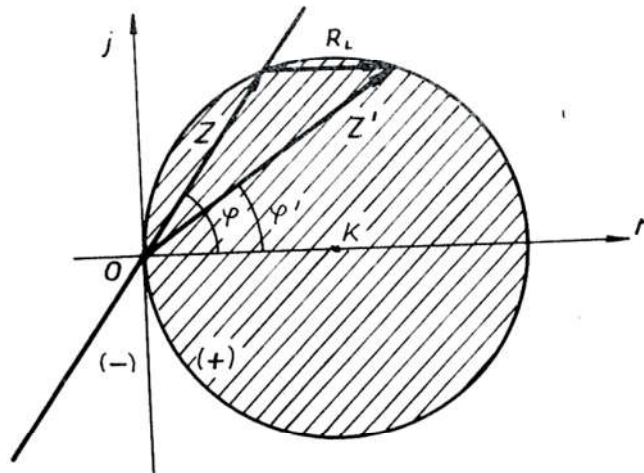
Takodjer, vidi se da ni releji tipa B nemaju usmjerenog djelovanja.

Na slici 178. prikazan je opći slučaj karakteristike releja tipa C. Uvjet ravnoteže prema izrazu 8-35 je ujedno izraz za kružnicu koja prolazi kroz ishodište. Ovaj tip releja često se primjenjuje jer sadrži u sebi usmjereno djelovanje, a utjecaj otpora električnog luka je u velikoj mjeri kompenziran.

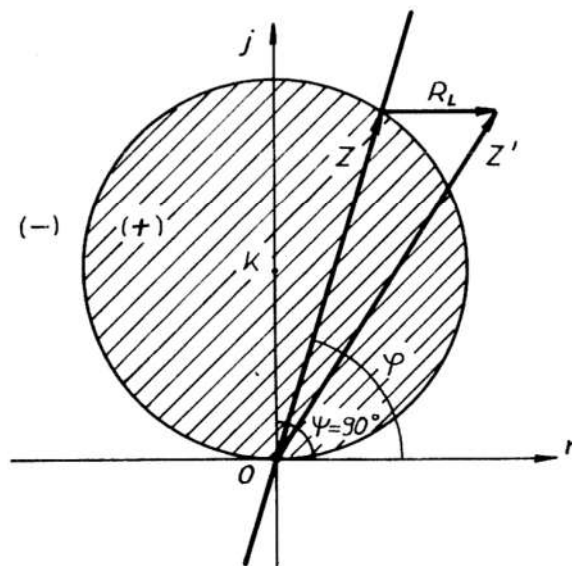


Slika 178. - Opća karakteristika releja tipa C

Kao poseban slučaj ovog tipa releja imamo konduktantni relej, koji nastaje kad odaberemo $\psi = 0$ (sl. 179). Ovaj relej često se primjenjuje u mrežama srednjeg napona i kabelskim mrežama, u kojima je ϕ između 45° i 60° .



Slika 179. - Karakteristika konduktantnog releja



Slika 180. - Karakteristika susceptantnog releja

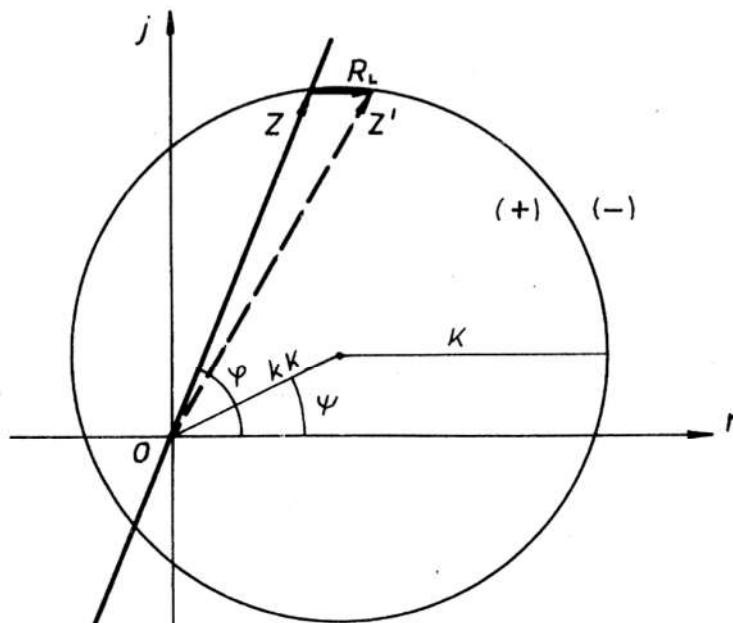
Susceptantni relej (sl.180), koji se dobiva uz $\psi = 90^\circ$, nije prikladan za primjenu, zbog izraženog utjecaja otpora luka.

Osim uvjeta ravnoteže za tipove A, B i C, možemo postaviti i druge uvjete, ako ih izvedbom releja možemo ostvariti. Tako, npr. uvjet ravnoteže:

$$Z = K [k \cos (\phi - \psi) \pm \sqrt{1 - k^2 \sin^2 (\phi - \psi)}] \quad 0 \leq k \leq 1 \quad 8-38$$

daje kružnicu tipa A, ali sa središtem pomaknutim iz ishodišta za $k \cdot K$ (K jednako polumjeru kružnice).

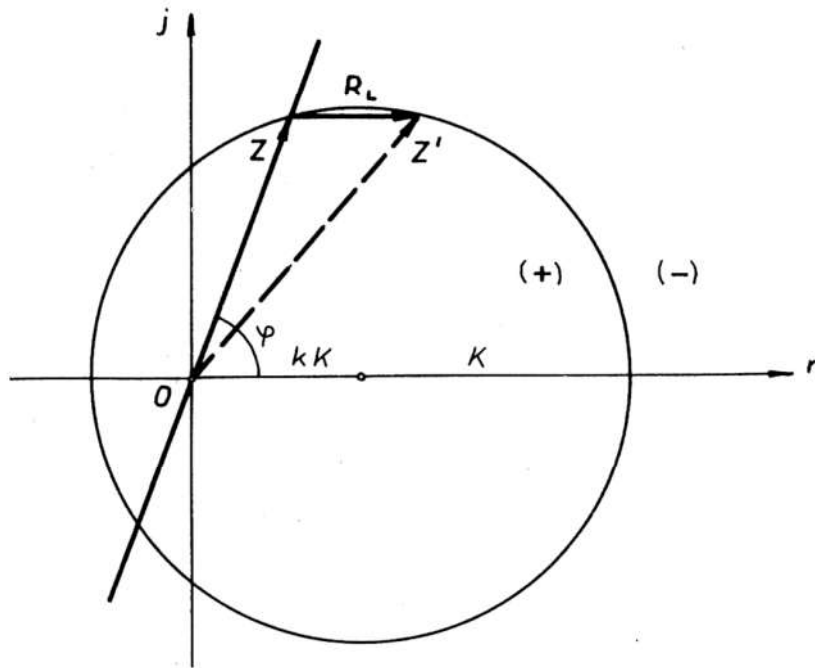
Opći slučaj prikazan je na slici 181. Ako u izrazu 8-38 stavimo da je $k=0$, dobivamo uvjet 8-36. Ako u istom izrazu stavimo $k=1$, dobivamo uvjet 8-34, pri čemu moramo uzeti da u 8-36 K ima značajne polumjera, a u 8-35 promjera.



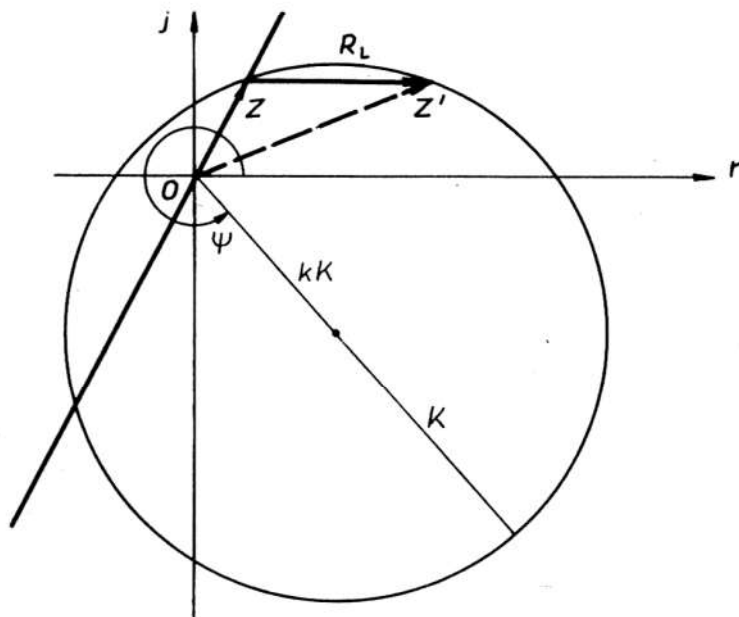
Slika 181. - Općenito pomaknuta impedantna kružnica

Praktično je zanimljiv pomak središta impedantnog kruga u smjeru realne osi, dakle uz $\psi = 0$ u 8-38 (sl.182). Pri tom se može postići znatna neosjetljivost na otpor električnog luka.

Za kratke vodove (relativno veliki R_L) je zanimljiva impedantna kružnica pomaknuta u smjeru četvrtog kvadranta ($270^\circ < \psi < 360^\circ$), slika 183.

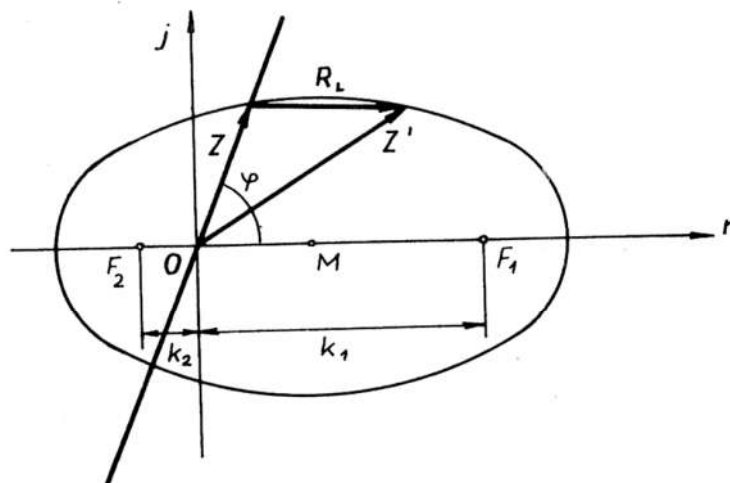


Slika 182.- Impedantni krug pomaknut u smjeru realne osi



Slika 183.- Impedantna kružnica pomaknuta u smjeru IV kvadranta

Iz niza mjernih članova distantnih releja spomenimo još karakteristiku u obliku elipse (sl.184), također pogodnu za kratke vodove.



Slika 184 - Eliptička karakteristika mjernog člana

Vidjeli smo da releji općeg tipa A (uvjet 8-38) pružaju u nekim varijantama interesantne mogućnosti, ali im nedostaje usmjereno djelovanje. Takvim relejima treba dakle dograditi usmjereni član (sl.185b) pri čemu je uvjet za isključenje određen ne samo udaljenošću kvara, već i smjerom u kojem se kvar nalazi. To je po pravilu prvi kvadrant kompleksne ravnine.

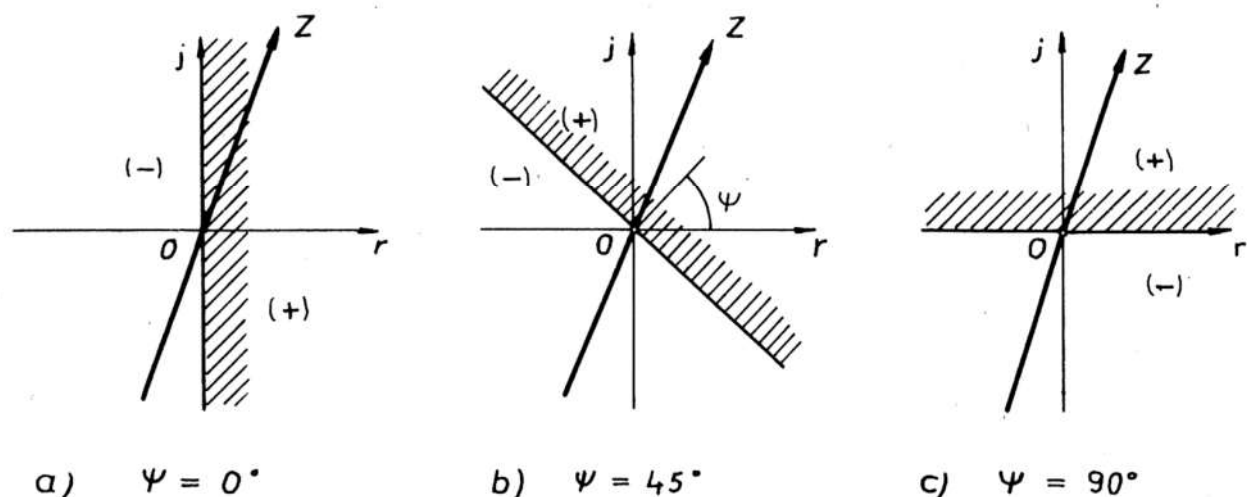
Kao usmjereni član možemo koristiti vatmetrički relej, kojemu će zakretni moment biti u lijevo ili u desno, ovisno o smjeru toka snage, a u nultom položaju (položaju ravnoteže) će biti kad ne teče nikakva snaga, tj. kad je (u općem slučaju):

$$S = U I \cos (\phi - \psi) = 0 \quad 8-39$$

Uvjet ostaje ispravan i nakon diobe s I^2 :

$$\frac{U}{I} \cos (\phi - \psi) = Z \cos (\phi - \psi) = 0 \quad 8-40$$

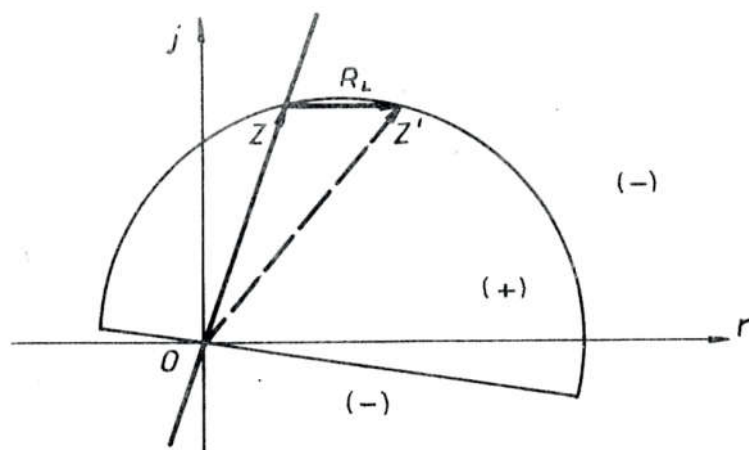
U ovom uvjetu prepoznamo uvjet ravnoteže za mjerne članove tipa B (izraz 8-34) s tim što smo ga prethodno transformirali i potom stavili da je $K = 0$.



Slika 185.- Karakteristike usmjerenog člana za razne ψ

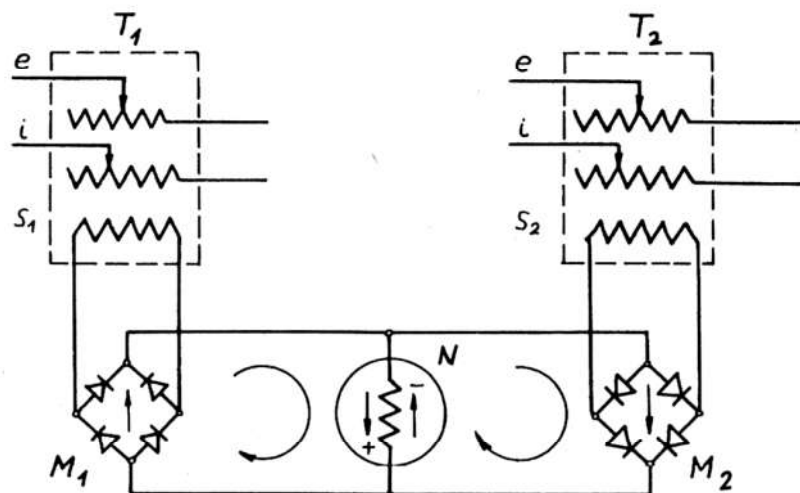
Prema tome, svaki u tom smislu preuredjeni mjerni član tipa B s pravocrtnom karakteristikom može vršiti ulogu usmjerenog člana uz izbor pogodnog ψ . Slika 185. prikazuje karakteristike usmjerenog člana za razne ψ , a slika 186, kao primjer, zajedničku karakteristiku mjernog člana sa slike 182. i usmjerenog člana uz $\psi = 80^\circ$.

Još ćemo opisati jednu učestalu izvedbu mjernog, odnosno usmjerenog sistema. Na slici 187, prikazan je također sistem u univerzalnom obliku. Umjesto polužne vage sa slike 171, kao sredstva za detektiranje odstupanja od stanja ravnoteže, upotrijebljen je osjetljivi polarizirani istosmjerni nul-instrument N, kroz koji teče diferencija dvaju struja koje dolaze iz ispravljačkih mostova M1 i M2. Ako je ta diferencija jednaka nuli, nul-instrument će biti



Slika 186.- Rezultirajuća karakteristika mjernog i usmjernog člana

u neutralnom položaju i to stanje odgovara stanju ravnoteže. Ako postoji razlika u korist lijeve strane, relej zatvara kontakt "+" (isključiti), a ako pak postoji razlika u korist desne strane, relej zatvara kontakt "-" (ne isključiti). Ispravljački mostovi M1 i M2 ispravljaju izmjeničnu struju koja dolazi iz sekundarnih namotaja s_1 i s_2 strujnih transformatora T1 i T2. Ti strujni transformatori imaju po dva primarna namotaja "e" i "i". Namotajima "i" možemo privesti izmjeničnu struju "i", koja je proporcionalna primarnoj struji voda. Namotajima "e" možemo privesti struju "e", koja je proporcionalna primarnom (visokom) naponu voda. Proporcionalnost se odnosi na iznos uz isti fazni kut kao originalna veličina. Napon "u" pretvara se u njemu proporcionalnu struju tako da se sekundarni napon "u" naponskog transformatora narine na pogodan otpornik otpora R (na slici nije prikazan), kroz koji će proteći naponu "u" proporcionalna struja "e". U transformatorima T1 i T2 nastaje vektorska suma s_1 odnosno s_2 , a ispravljanjem u M1 i M2 dobivaju se apsolutne vrijednosti tih vektorskih suma.



Slika 187. - Univerzalni sklop mjernog člana

Koristeći odcjepena primarnim namotajima "e" i "i" mogu veličine u sumama s_1 i s_2 sudjelovati u umanjenom iznosu "ke" odnosno "ki" ($k < 1$).

Nadalje, dogovorno ćemo uzeti da se naponu proporcionalna struja "e" pojavljuje s faznim pomakom ϕ prema prvobitnoj struji "i", kako smo to uzimali i u prethodnim razmatranjima. Prema tome, prvobitna struja "i" ima u kompleksnoj ravnini fazni kut nula. Umjetnim zahvatom, propuštajući prvobitnu struju "i" kroz R-L-C sklopove (filtre), možemo joj proizvoljno mijenjati fazni kut. Taj dodatni kut nazvat ćemo ψ i on je identičan s kutem ψ u prethodnim razmatranjima. Univerzalni mjerni član sa sl. 187 možemo dakle izborom faktora k (na četiri mjesta) i kuta ψ prilagoditi postavljenim zahtjevima.

Ako na primarnoj strani od T_1 priključimo "i" s faktorom $k=1$, a na primarnoj "e" također s faktorom $k=1$, imat ćemo impedantni mjerni član (tip A) prema uvjetu ravnoteže 8-36.

U drugom slučaju ćemo pustiti da kroz primarne strane transformatora T_1 i T_2 teku struje prema tablici 8.1.

Tablica 8.1

namotaj	T1	T2
"e"	0	$- e/\phi$
"i"	i/ψ	$k i/\psi$

Na istosmjernoj strani će ravnoteža biti postignuta (nul-instrument u neutralnom položaju), ako je ostvaren uvjet:

$$|i/\psi| = |- e/\phi + k i/\psi| \quad 8-41$$

Uvrštenjem $\bar{e} = \bar{z} \bar{i}$ i diobom zajedničkim faktorom dobivamo:

$$1 = |\bar{z} - k|, \quad 8-42$$

a kvadriranjem dalje izlazi

$$1 = z^2 - 2 z k \cos(\phi - \psi) + k^2 \quad 8-43$$

Rješenje po z glasi:

$$z = K \cos(\phi - \psi) \pm \sqrt{1 - k^2 \sin^2(\phi - \psi)}, \quad 8-44$$

i dalje preračunavanjem na stranu visokog napona:

$$Z = K Z = K[k \cos(\phi - \psi) \pm \sqrt{1 - k^2 \sin^2(\phi - \psi)}] \quad 8-45$$

Izraz 8-45 identičan je s izrazom 8-38, koji je dao uvjet ravnoteže za univerzalni impedantni relej (sl.181, 182, i 183).

Napajanjem mjernog sklopa na slici 187. prema tablici 8.1, možemo dakle ostvariti univerzalnu impedantnu karakteristiku pogodnim odabiranjem k i ψ .

Napajamo li namotaje "e" i "i" transformatora T1 i T2, prema tablici 8.2.

Tablica 8.2

namotaj	T1	T2
"e"	$k \frac{e}{\phi}$	$- \frac{e}{\phi}$
"i"	$\frac{i}{\psi}$	$\frac{i}{\psi}$

dobivamo sličnim izvodom uvjet ravnoteže

$$K z = Z = \frac{2 K'}{1 - k} \cos(\phi - \psi), \quad 8-46$$

odnosno, uz $\frac{2 K'}{1 - k} = K \quad 8-47$

$$Z = K \cos(\phi - \psi), \quad 8-48$$

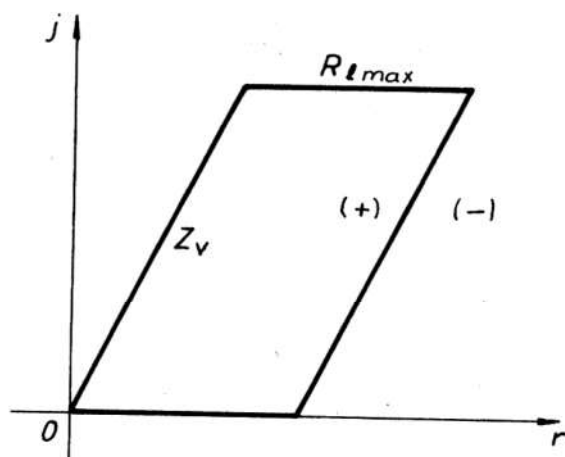
koji odgovara uvjetu ravnoteže releja tipa C (izraz 8-35, slike 178, 179 i 180). Tako smo ostvarili mjerne članove tih releja.

Iz izraza 8-47 vidimo da K raste ako k teži ka jedinici, što ujedno znači da raste promjer kružnice. Za $k=1$ kružnica prelazi u pravac kroz ishodište, što znači da smo, uz pogodni izbor kuta ψ , ostvarili i usmjerni član (sl.185).

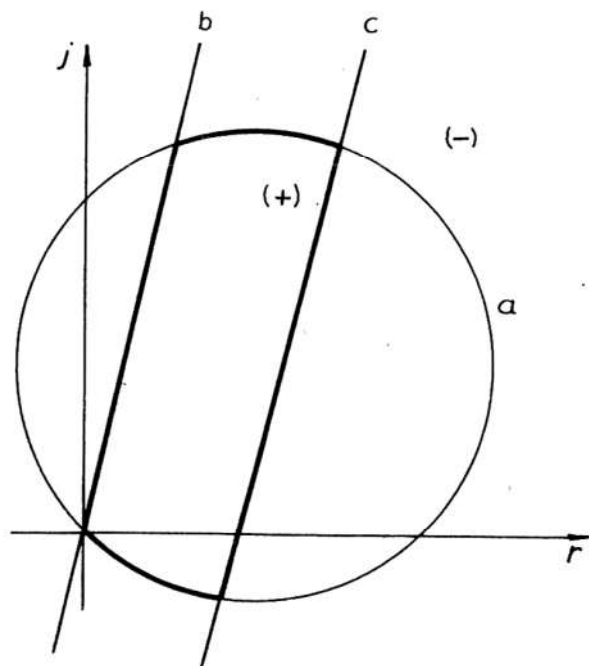
Time broj kombinacija nije iscrpljen.

Na temelju prethodnih izlaganja se može zaključiti da postoje neograničene teoretske mogućnosti kreiranja kružnih ili eliptičkih karakteristika i po potrebi, kao njihova dopuna, linearnih karakteristika mjernih članova distantnog releja. Međutim, svaka odonih kombinacija u okviru izloženih mogućnosti ima i po neku manu, pa se nameće pitanje, da li je moguće konstruirati distantni relej, koji bi imao idealnu karakteristiku s gledišta zahtjeva mreže i koji bi se mogao prilagođavati svim zahtjevima.

Polazeći od konstatacije da se nekoj varijabilnoj "impedanciji kvara" $\bar{Z}$, koja ovisi o udaljenosti kvara, mora dodavati neki djelatni prijelazni otpor (električni luk, otpor uzemljivača stupa na mjestu kratkog spoja), promjenljiv od vrijednosti nula ("metalni kratki spoj") do neke maksimalne vrijednosti, a uzevši u obzir još i zahtjev usmjerenog djelovanja uređaja, nije teško doći do definicije idealne karakteristike distantnog releja u sustavu $r-j$. Takva je karakteristika prikazana na sl.188. Idealnu ili približno idealnu karakteristiku mjernog člana moguće je u principu izvesti ugradnjom većeg broja mjernih članova u distantni relej (sl.189), i to pretežno članova tipa B koji imaju pravocrtnu ka-



Slika 188.- Idealna karakteristika distantnog releja

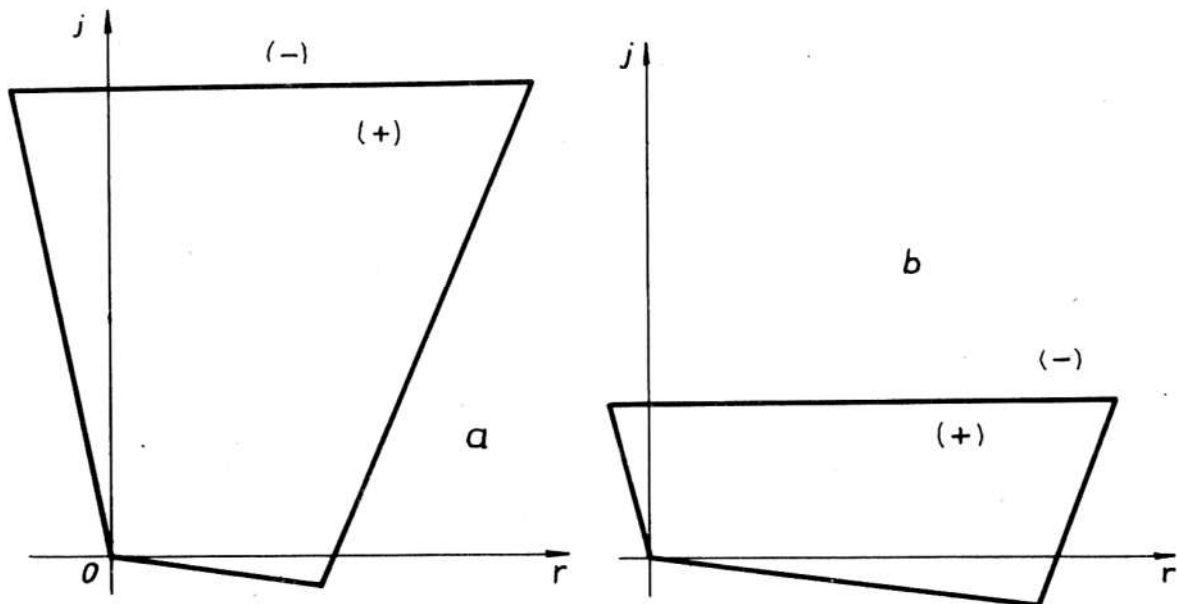


Slika 189.- Kvazi idealna karakteristika postignuta kombiniranjem karakteristika a, b i c

rakteristiku. Takvo rješenje, međjutim, poskupljuje uređaj i donosi teško rješive tehničke probleme, kao što je npr. usklađivanje vlastitih vremena pojedinih mjernih članova. Takvim se izvedbama ne bi mogla postići ekstremno kratka vremena ispravnog reagiranja.

Zamjenom elektromehaničkih mjernih sistema i elektromagnetskih releja elektroničkim sklopovima, koristeći njihove praktički neograničene mogućnosti, proizvedeni su u zadnjoj deceniji elektronički distantni releji, o kojima je već bilo govora (sl.186). Ulogu mjernog člana preuzima komparator faza, kojim se u jednom sklopu može kreirati karakteristika proizvoljnog oblika tako što mu se dovode više od dva kriterija. Dva od tih kriterija su uvijek mjerne veličine direktno ovisne o struji i naponu kratkog spoja (analogno sklopu na sl.187), a ostali kriteriji, po pravilu simulirane veličine. Već dovodjenjem ukupno triju kriterija komparatoru faza mogu se postići karakteristike nalik na idealnu.

Na sl.190. prikazana je uobičajena karakteristika suvremenog elektroničkog distantnog releja, i to za dugi i kratki vod.



Slika 190. - Karakteristika elektroničkog distantnog releja za kratki (b) i dugi vod (a)

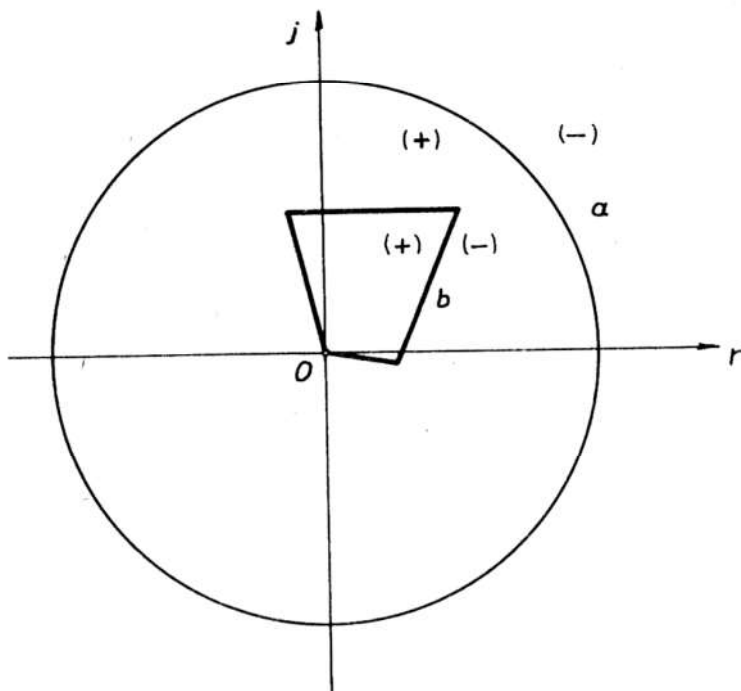
Može se uočiti da će se karakteristika koja je prema desno (u smjeru pozitivnog r) ograničena pravocrtnom linijom, teže preklopiti sa zonom normalnog pogona (sl.177), nego karakteristika koja je u tom smjeru ograničena kružnim odsječkom, pa eventualna visoka i opterećenja ili preopterećenja voda neće dovesti do pogrešnog isključenja.

8.3.3 Poticajni član distantnog releja

Po principu rada distantnog releja poticajni (pobudni) član prvi reagira kod pojave smetnje u mreži (sl.168). Pošto je, međjutim, kod velikog broja distantnih releja poticajni član izveden kao podimpedantni, što znači da mu je princip rada isti ili barem analogan radu mjernog člana, opravdano je način djelovanja poticajnog člana izložiti nakon što je objašnjen način djelovanja mjernog člana.

Pobudni član kod jednostavnijih releja reagira samo na struju. On dakle daje poticaj samo ako struja prekorači dopuštenu, unaprijed udešenu vrijednost. U mrežama s gusto smještenim izvorima ovo zadovoljava. Međjutim, u razno doba dana i u razno doba godine mogu neki izvori biti stavljeni na duže vrijeme izvan pogona. U tim djelovima mreže mogu tada struje kratkog spoja biti istog reda veličine kao nominalne struje, pa i manje od nominalnih. Prekostrujna pobuda u tom slučaju neće reagirati. Zato distantni releji često moraju umjesto prekostrujne imati tzv. podimpedantnu pobudu.

Poticajni član mora pokrenuti sve ostale dijelove distantnog releja čim se pojavi poremećaj u mreži. Podimpedantni poticajni član ne mora imati usmjereno djelovanje (Tu funkciju ima usmjereni član po potrebi pridodan mjernom članu). Stoga se podimpedantni poticajni član često izvodi kao mjerni član s impedantnom karakteristikom (tip A, sl.174). Promjer kružne karakteristike mora biti barem toliko velik da karakteristika mjernog člana i kod svoje najveće varijante (vidi kasnije poglavlje 8.3.4) cijela bude unutar karakteristike poticajnog člana (sl.191).



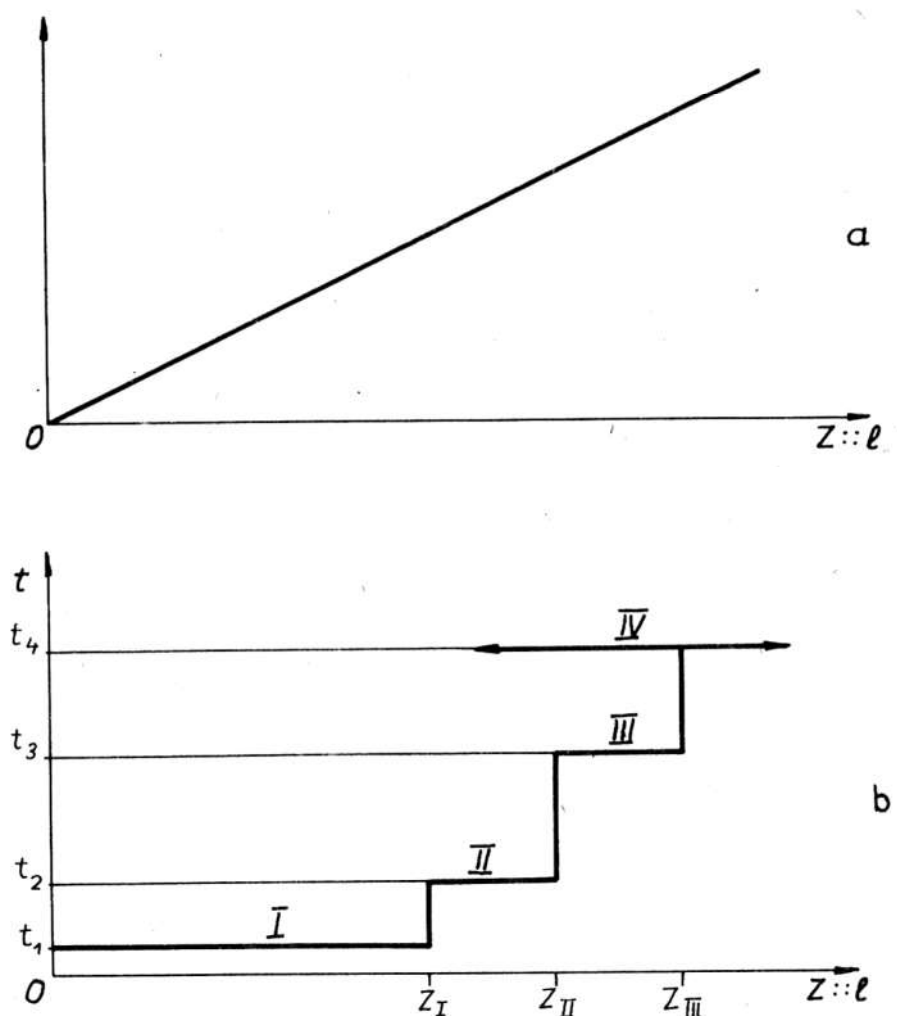
Slika 191. - Podimpedantna karakteristika poticajnog člana (a) u odnosu na karakteristiku mjernog člana (b)

8.3.4 Vremenska karakteristika distantnog releja

U izrazu 8-2 navedeno je da je vrijeme t , u kojem će distantni relej isključiti kvar, proporcionalno izmjerenoj udaljenosti kvara (sl.192a). U praksi se međutim, umjesto linearno rastuće karakteristike primjenjuje stupnjevita vremenska karakteristika, koja se u svakom svom dijelu može prilagoditi zahtjevima mjesta ugradnje releja (sl.192b). Lako se može uočiti da stupnjevita karakteristika daje znatno niža prosječna vremena isključenja.

S IV označeni stupanj distantnog releja, koji dovodi do isključenja u najdužem vremenu t_4 , označen je strelicama kao "neusmjeren", tj. u tom stupnju će relej isključiti vod bez obzira na smjer kvara u odnosu na položaj releja, uz uvjet da je mjerna impedancija kvara manja od Z_3 i da u vremenskom razmaku od nastanka kvara (prorade poticajnog člana) do t_4 , kvar nije eliminiran na drugi način. "Neusmjereni stupanj" je, prema tome, krajnja rezerva zaštite mreže.

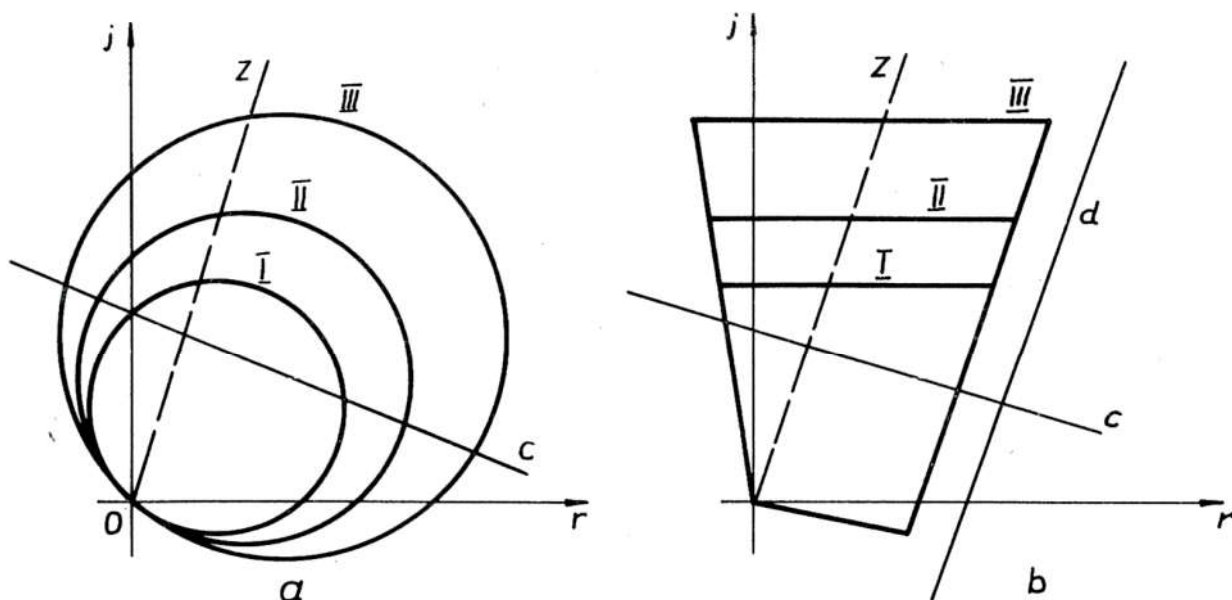
Najkraće je vrijeme prvog stupnja t_1 . Ono ovisi o kvaliteti dis-



Slika 192.- Linearno rastuća (a) i stepenasta (b) vremenska karakteristika distantnog releja

tantnog releja i najčešće se ne produžuje vremenskim članom, već se prepušta vlastitom vremenu releja. To vrijeme je kod suvremenih releja približno jednako jednoj poluperiodi, tj. 0,1 s, pa i manje. Stvarno vrijeme isključenja kvara ovisi, međutim, još i o vlastitom vremenu isključenja prekidača, koje se pribraja vremenu releja.

Mjerenje raznih Z (npr. Z_I, Z_{II} i Z_{III} prema vremenskoj karakteristici na sl.192b) postiže se uvišestručenjem karakteristike

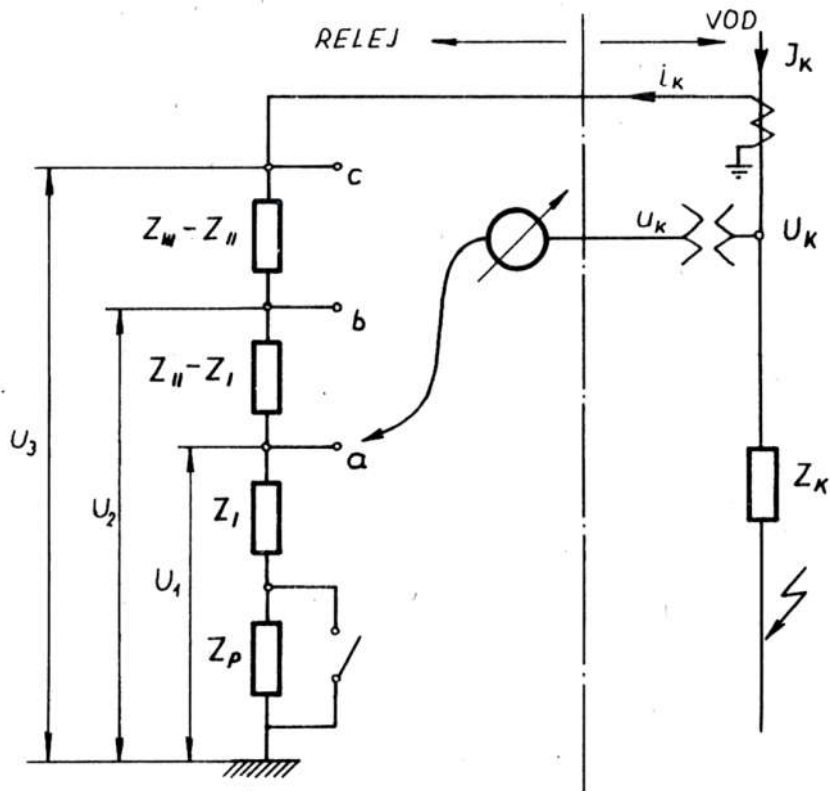


Slika 193. - Stupnjevanje mjernog člana u skladu sa stupnjevanjem vremena

mjernog člana. Na sl.193.prikazan je primjer za karakteristiku prema sl.178. (193a) i prema sl.19a (193b). U vremenskom intervalu $0 - t_1$ mjerni član ima karakteristiku I, u intervalu $t_1 - t_2$ karakteristiku II, a u intervalu $t_2 - t_3$ karakteristiku III. Izmjena, odnosno prilagodjenje karakteristika, postiže se izmjenom kriterija odnosno parametara, dovedenih mjernom članu. Svi parametri su unaprijed podešeni, a prijelazom redom s jedne karakteristike na drugu upravlja vremenski član.

Uz sl.193. treba napomenuti da karakteristika impedantnog poticajnog člana, prema sl.191, mora potpuno obuhvatiti karakteristiku III mjernog člana. Značenje linija c, odnosno d, bit će objašnjeno u poglavlju 8.3.5.

Na sl.194.prikazan je, sasvim grubo, princip stupnjevanja karakteristike mjernog člana distantnog releja. Struju i_K proporcionalnu primarnoj struji kratkog spoja I_K vodimo na model voda. Na



Slika 194.- Princip stupnjevanja karakteristike mjernog člana distantnog releja

mjestu gdje je ugrađen relej teći će manja struja i vladat će viši napon što je kvar udaljeniji, tj. što je Z_K veće.

Na model voda dovodi se struja kratkog spoja preko strujnog transformatora. Struja stvara pad napona i kroz otpornike, i to tim veći što je struja veća. Ovaj se pad napona instrumentom uspoređuje s naponom transformiranim preko naponskog transformatora. Nalog za isključenje dat će se ovako:

$u_K < u_1$	isključenje u I stupnju
$u_1 < u_K < u_2$	isključenje u II stupnju
$u_2 < u_K < u_3$	isključenje u III stupnju

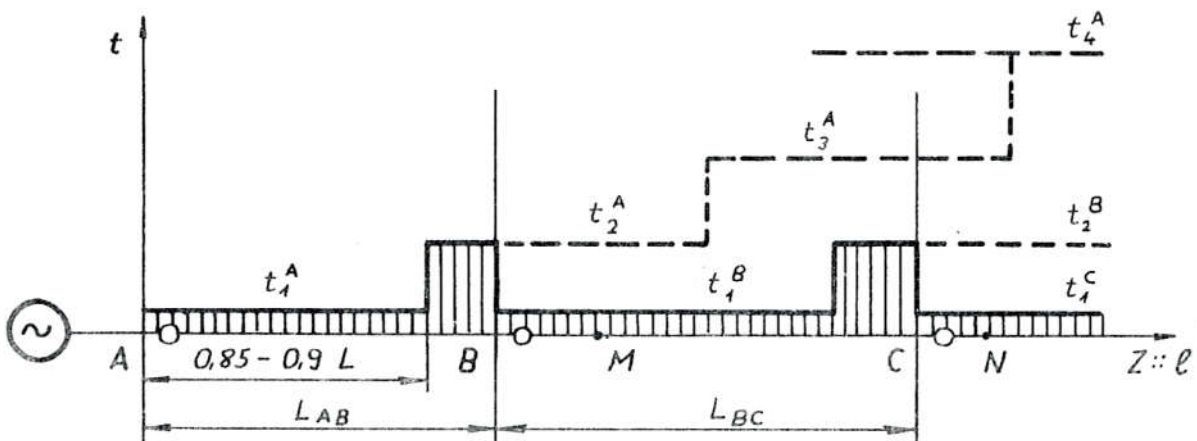
Preklopka je u momentu prorade poticajnog člana (početak kratkog

spoja) na I stupnju (ocjep a na sl.194). Ako uvjet za isključenje u I stupnju ne odgovara, preklopka se nakon isteka vremena t_1 prebacuje na II stupanj (ocjep b). Ako uvjet za isključenje u II stupnju ne odgovara, preklopka se nakon isteka vremena t_2 prebacuje na III stupanj (ocjep c).

Impedancija Z_p na modelu sa sl.194, koja se može premostiti preklopkom, služi za produžavanje doseg I stupnja. Uz aktivnu Z_p (preklopka otvorena) bit će doseg I stupnja povećan, tj. relej će već u vremenu t_1 isključiti kvar koji je na određenoj većoj udaljenosti od one definirane karakteristikom I na sl.193. O tome će biti više riječi u poglavlju 8.3.7.

Svrha je objašnjene vremenske karakteristike distantnog releja da uz odgovarajuće stupnjevanje karakteristike mjernog člana osigura "suradnju" susjednih, pa i udaljenijih distantnih releja i time postigne rezervu, koja je jedan od zahtjeva postavljen zaštititi kao podsistemu.

Osnovni principi udešavanja distantnih releja prikazani su na primjeru radijalnog (jednostrano napajanog) voda sa čvorovima A, B i C (sl.195). U kratkom vremenu t_1 isključit će se oko 85% kvarova, jer doseg I stupnja ne može biti udešen na 100% dužine



Slika 195.- Plan udešavanja distantne zaštite radijalnog voda s više usputnih postrojenja

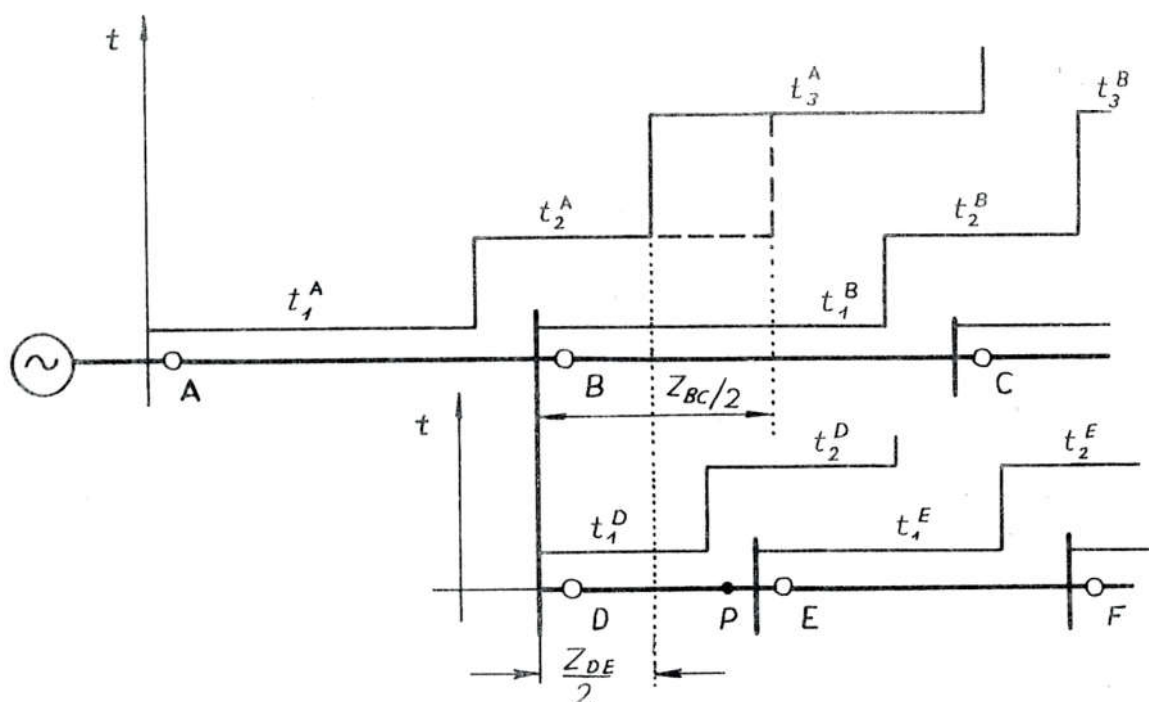
voda radi mjernih tolerancija mjernog člana, koje su više uvjetovane sa strane mreže, a manje svojstvima same zaštite.

Oko 15% kvarova će biti isključeno u II stupnju, kojemu je vrijeme zatezanja $t_2 > t_1$, da bi se postigla dovoljna vremenska rezolucija, tj. da bi se omogućilo releju u B da pri kvaru u M isključi prije nego to učini relej u A.

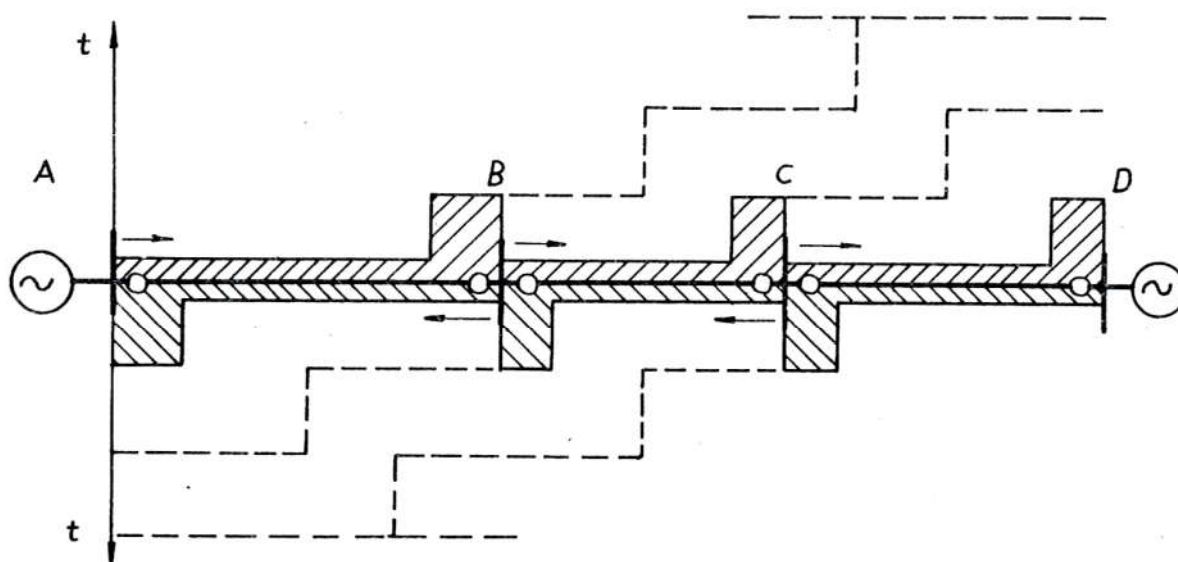
Visoki stupanj rezerve u zaštiti mreže što ga pruža distantna zaštita može se ilustrirati za slučaj kratkog spoja u N (sl.195). Taj kratki spoj će isključiti relej u C u vremenu t_1^C , a ako taj relej ili pripadni prekidač zataji, isključit će relej u B u vremenu t_2^B . Ako i u B zataji relej ili prekidač, još uvijek ostaje relej u A sa svojim vremenom t_3^A .

Doseg II stupnja releja u A (sl.195) udešava se po pravilu približno do polovine voda B-C, odnosno na impedanciju $Z_{AB} + Z_{BC}/2$. Doseg III stupnja će ovisiti o konfiguraciji mreže. Naime, već kod grananja radijalnog odvoda sa sl.195, npr. u čvoru B, nije više moguće na relej u A primijeniti pravilo po kome se doseg njegovog II stupnja treba udesiti do 50% dužine voda B-C, već se taj doseg mora udesiti na 50% dužine kraćeg voda, u ovom slučaju voda D-E (sl.196). Ako bi doseg II stupnja releja A bio $Z_{ab} + Z_{NC}/2$ (crtkano na sl.196), kvar u P na vođu D-E mogao bi neselektivno isključiti relej A umjesto nadležnog releja D. Ovaj jednostavni slučaj je, međjutim, rješiv i različitim vremenskim zatezanjima drugih stupnjeva releja A i D, tako da bude $t_2^A > t_2^D$, ali će se radi toga morati, radi postizavanja dovoljne vremenske rezolucije, $t_3^A - t_2^A$ povećati i t_3^A .

Osnovna primjena distantne zaštite je u složenim zamkastim mrežama, gdje dolaze do izražaja sve njezine mogućnosti u pogledu brzine, selektivnosti i rezerve. Plan udešavanja distantne zaštite na dvostrano napajanom vođu prikazan je na sl.197. Radi preglednosti, vremenske karakteristike releja usmjerenih s lijeva na desno prikazane su iznad osi koja simbolizira vođu, a karakteristike releja usmjerenih s desna na lijevo prikazane su ispod te osi.



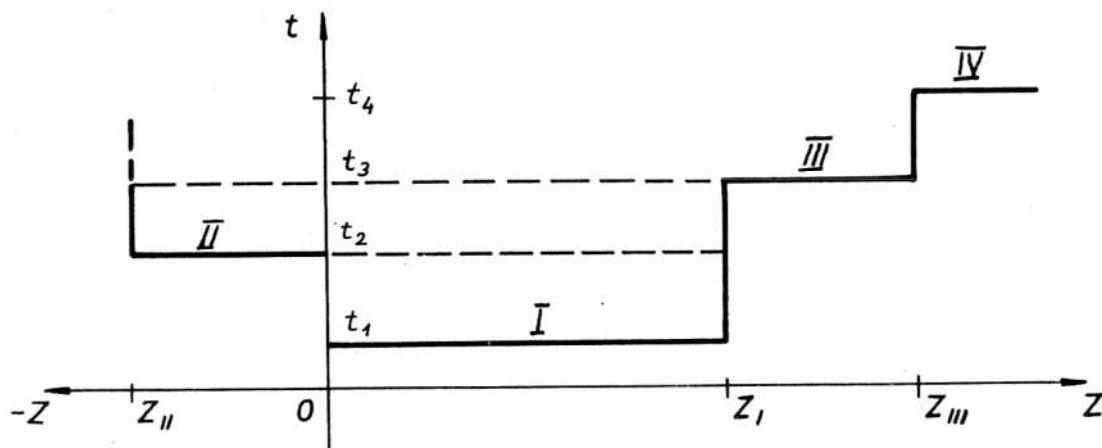
Slika 196. - Plan udešavanja distantne zaštite radijalnog voda s grananjem



Slika 197. - Plan udešavanja distantne zaštite na dvostrano napajanom vodu s usputnim postrojenjima

Vremenska karakteristika distantnog releja s tri doseg i četiri vremenska stupnja (pri čemu četvrti stupanj može biti usmjeren ili neusmjeren), kako je prikazana na sl.192b, može se smatrati standardnom. Mjesto ugradnje distantnog releja ne zahtijeva, međjutim, uvijek korištenje svih danih mogućnosti. Da bi se bez bitnog povećanja cijene povećala univerzalnost takvih releja i omogućilo korištenje svih njihovih mogućnosti, i u tim slučajevima kod nekih izvedbi postoji mogućnost da se barem jedan stupanj koristi u smjeru "negativnog" Z , dakle za isključenje kvarova u povratnom smjeru. Ta mogućnost se može koristiti za zaštitu sabirnica postrojenja u kojem je takav relej postavljen ili za dopunsku zaštitu transformatora priključenih na te sabirnice. Pri tom se pretpostavlja da se kratki spoj na sabirnicama odnosno u transformatoru barem dijelom napaja putem voda u kojem je relej postavljen. Vremenska karakteristika distantnog releja kojem je II stupanj usmjeren u suprotnom smjeru prikazana je na sl.198.

Vremenska razlika između jednog i slijedećeg višeg vremenskog stupnja ovisi s jedne strane o kvaliteti distantnog releja odnosno o točnosti njegovog vremenskog člana, a s druge strane o



Slika 198.- Vremenska karakteristika distantnog releja s II stupnjem obratno usmjerenim

potrebama koje diktira plan udešenja (plan stupnjevanja) zaštite mreže. U praksi ta razlika nije manja od 0,2 s niti veća od 0,5 s . Pri tom je vrijeme prvog stupnja po pravilu uvijek što je moguće kraće.

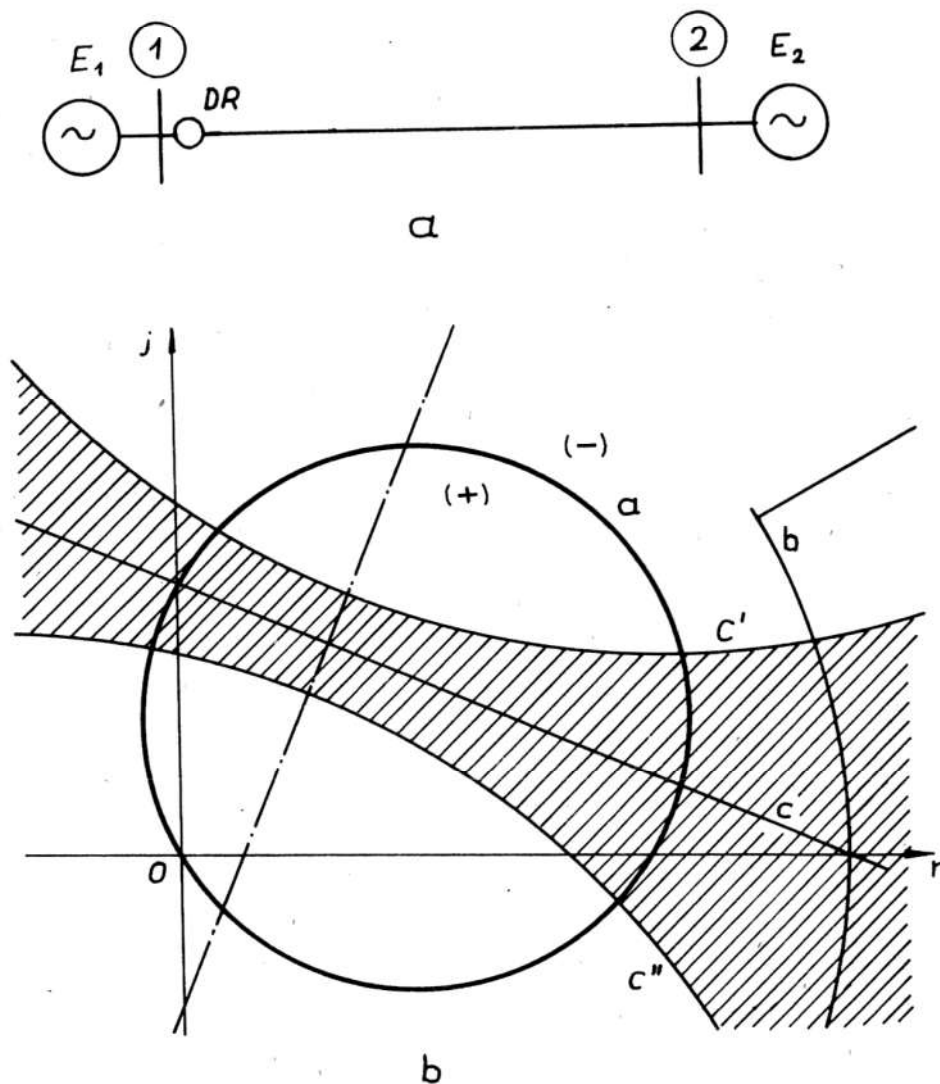
8.3.5 Protunjihajni zapor

Pri njihanju rotora generatora oko nazivnog broja okretaja kao posljedica težih poremećaja u mreži (vidi poglavlje o dinamičkoj stabilnosti), mogu se u vodovima pojaviti takvi naponi i struje iz kojih će mjerni član pogrešno zaključiti da se radi o kratkom spoju. Drugim riječima, mjerena impedancija $\bar{Z}$ može se naći unutar (u području "+") karakteristike mjernog člana, pa će doći do neželjenog ili neselektivnog isključenja voda u trenutku kada je njegova prisutnost u mreži možda presudna za očuvanje dinamičke stabilnosti mreže. O ocjeni uzroka i posljedica takvih isključenja od strane distantnog releja, a koja nisu uzrokovana kratkim spojem, ovisi hoće li biti poželjno spriječiti takva kriva isključenja, ili ne. Ako se takva isključenja žele spriječiti, može se distantnom releju dodati protunjihajni zapor, koji će na temelju prethodnih zbivanja moći zaključiti da li je mjerena niska impedancija rezultat kratkog spoja, ili njihanja generatora.

Prije nego izložimo funkcioniranje protunjihajnog zapora, prikazat ćemo (sl.199) u ravnini $r-j$ zonu, u kojoj se može naći vektor $\bar{Z}$ radi njihanja rotora generatora, kako ga gleda distantni relej DR na sl.199a.

Na sl.199a je krajnje pojednostavnjeno prikazan ekvivalent mreže u kojoj se nalazi vod 1-2, štićen u 1 distantnim relejem DR. E_1 i E_2 su ekvivalentne elektromotorne sile s jedne i druge strane voda, koje djeluju preko nekih ekvivalentnih reaktancija. Ako dodje do međusobnog (dinamičkog) periodičnog njihanja rotora prikazanih generatora, teći će vodom 1-2 odgovarajuća struja izazvana razlikom između E_1 i E_2 . Ta razlika može biti i po iznosu i po fazi. Iscrtkano područje na sl.199b je područje u ko-

jem se može naći vrh vektora $\bar{Z}$ kako ga mjeri mjerni član distan-
tnog releja DR. Linija c odgovara slučaju da je $E_2/E_1 = 1$, krivu-
lja c' odgovara slučaju da je $E_2/E_1 < 1$, a krivulja c'' slučaju da
je $E_2/E_1 > 1$. Na istoj slici još je prikazana karakteristika mjer-
nog člana poput onog sa sl.178 (kružnica a) i granica zone nor-
malnog opterećenja poznate još sa sl.177 (krivulja b). Uočava se
da se kod njihanja generatora vrh vektora $\bar{Z}$ može naći unutar zo-
ne "isključiti", tj. mjerni član registrira pojavu kao kratki
spoj.



Slika 199.- Moguća geometrijska mjesta vrha vektora Z kod nji-
hanja generatora, kako ga mjeri distantni relej DR
(a) smješten u 0 (b)

Protunjihajni zapor treba, dakle, da ustanovi da li je neki niski mjerni $\bar{Z}$ unutar područja isključivanja radne karakteristike mjernog člana posljedica postojanja kratkog spoja, ili je posljedica njihanja generatora. To se razlučivanje može egzaktno postići koristeći činjenicu da je pojava kratkog spoja trenutno, a njihanje generatora sporo periodično zbivanje (frekvencija njihanja 1 Hz i manje). Kod njihanja će se, dakle vektor prividne impedancije kvara uvijek sporo približavati području isključenja mjernog člana i isto tako sporo prolaziti kroz to područje. Dodatno se koristi činjenica da struje i naponi kod njihanja uvijek tvore simetrični trofazni sistem.

Na slikama 193a i b prikazana je linija c objašnjena s pomoću sl.199. Pri pojavi njihanja vrh vektora $\bar{Z}$ će relativno sporo slijediti liniju c s desna na lijevo. Tako će na sl.193a linija c u stanovitim vremenskim razmacima najprije sjeći karakteristiku III mjernog člana, zatim karakteristiku II i još kasnije karakteristiku I. U ovoj je varijanti protunjihajni zapor konstruiran kao logički vremenski ovisni sklop, koji će iz toka zbivanja, uzevši u obzir redoslijed i vremenske razmake, zaključiti da se radi o njihanju, a ne o kratkom spoju. Protunjihajni zapor će blokirati davanje naloga za isključenje, makar se vrh vektora $\bar{Z}$ nalazi unutar radne karakteristike mjernog člana.

Drugo rješenje protunjihajnog zapora temelji se na istom principu, ali se pridodaje još jedan mjerni član, koji može biti pravocrtan (karakteristika d na sl.193b). Ovdje linija c siječe najprije karakteristiku dodatnog mjernog člana d, a iza toga karakteristiku osnovnog mjernog člana. Dodatni mjerni član protunjihajnog zapora može imati i kružnu karakteristiku odgovarajućeg promjera, npr. sličnu karakteristici poticajnog člana (sl.191).

8.3.6 Preklopni član

Ako uzmemo sve vrste kratkog spoja u mreži s kruto uzemljenim zvjezdištem, te za svaku vrstu kratkog spoja moguće kombinacije po fazama, dolazimo do deset različitih slučajeva mogućih kvarova:

<u>Vrst kratkog spoja:</u>	<u>Pogodjene faze:</u>		
- Tropolni kratki spoj	RST		
- Dvopolni kratki spoj	RS	ST	RT
- Dvopolni kratki spoj sa zemljom	RSZ	STZ	RTZ
- Jednopolni kratki spoj	RZ	SZ	TZ

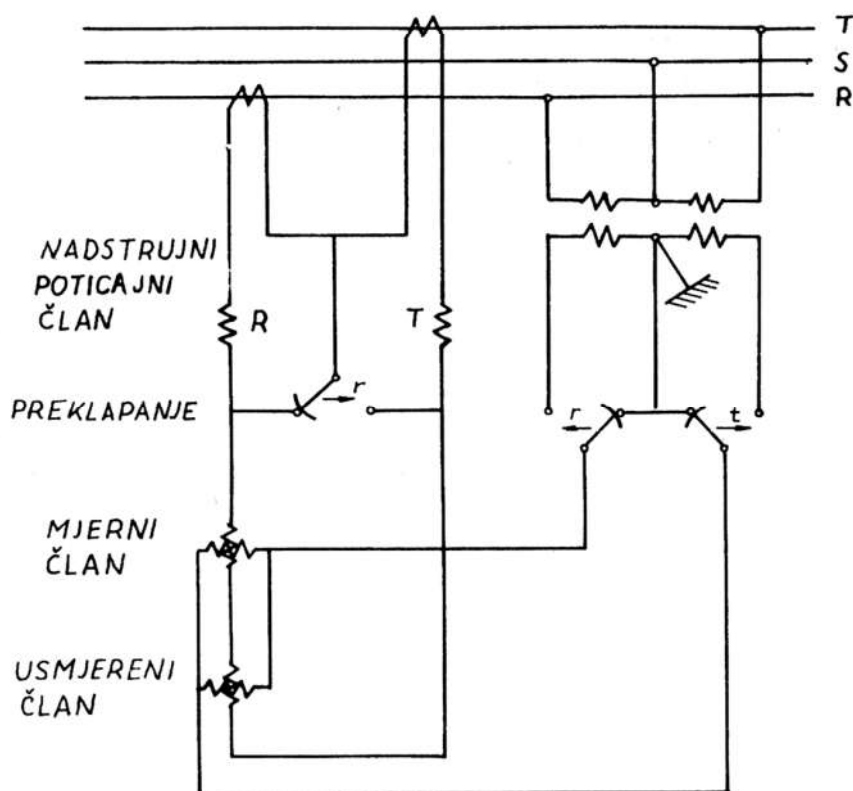
U svakom od tih deset slučajeva mjernom i usmjernom članu distantnog releja treba dovesti takvu kombinaciju napona i struje, na temelju koje će se moći ispravno izmjeriti smjer i udaljenost kvara. Izbor i prosljeđivanje prikladne kombinacije struje i napona zadatak je preklopnog člana.

Poznate su izvedbe distantnih releja s tri mjerna člana, za svaku fazu po jedan, eventualno dodatno s još jednim članom za kvarove u kojima sudjeluje i zemlja. Prevladavaju, međjutim, izvedbe s jednim kvalitetno izvedenim mjernim članom kojemu se, ovisno o slučaju kvara, dovode odgovarajuće mjerne veličine.

Pogledajmo kako radi jedan relej u mreži s izoliranim zvjezdištem ili u mreži s uzemljenim zvjezdištem preko petersenke. Releji treba djelovati na tropolni i dvopolni kratki spoj.

Prema shemi na slici 200 djelovat će:

Vrst KS	RS	RT	ST	RST
Pot. čl.	R	RT	T	RT
Preklop.	r	rt	t	rt
Mjeri struju	R	R	T	R
Mjeri napon	RS	RT	ST	RT



Slika 200.- Principelna shema preklapanja kod distantnog releja za izoliranu mrežu

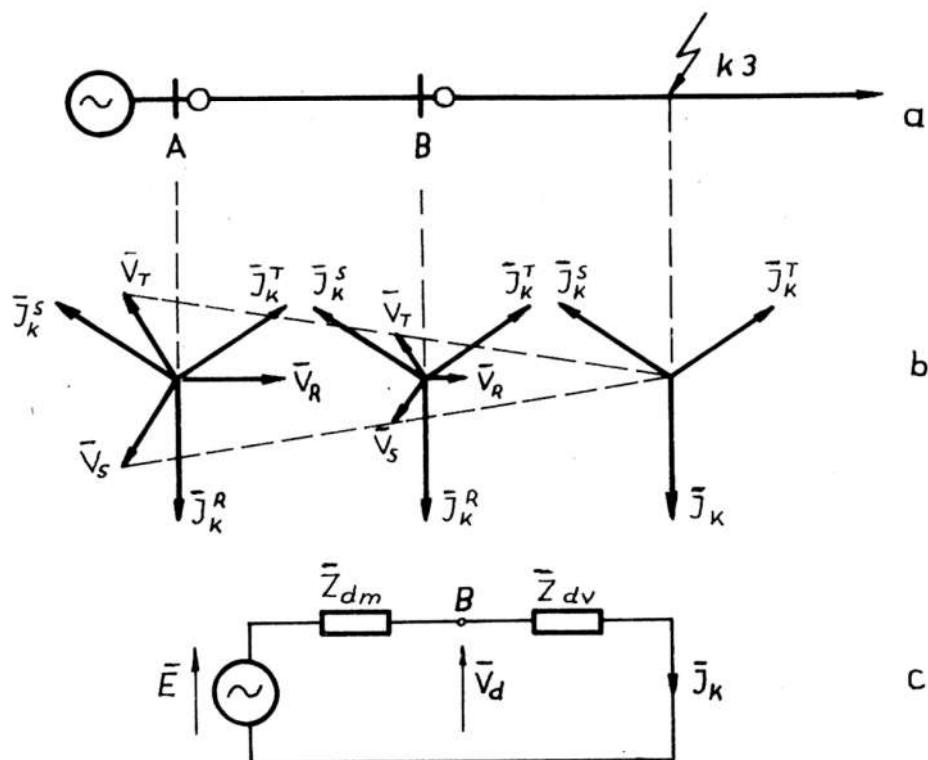
U slijedećem razmatranju ćemo prikazati što će mjerni član zaključiti na temelju dovedene mu struje i napona u dva tipična kvara, tj. kod trolnog i dvopolnog kratkog spoja.

Neka je na mjestu K nastao trolni kratki spoj (slika 201a). Izračunajmo impedanciju koju mjeri relej na mjestu B.

Prema ekvivalentnoj shemi na slici 201c možemo postaviti:

$$\bar{I}_R = \bar{I}_K = \bar{I}_d = \frac{\bar{E}}{Z_d} = \frac{\bar{E}}{Z_{dm} + Z_{dv}}$$

$$\bar{U}_{RT} = \bar{V}_T - \bar{V}_R = a\bar{V}_d - \bar{V}_d = (a-1) \bar{V}_d$$



Slika 201. - Struje i naponi na mjestu priključka releja kod trolejnog kratkog spoja na vodu

$$\bar{V}_d = \bar{I}_d \bar{Z}_{dv}$$

$$\bar{Z}_k = \frac{\bar{U}_{RT}}{\bar{I}_R} = \frac{(a-1) \bar{V}_d}{\bar{I}_d} = (a-1) \bar{Z}_{dv} = \sqrt{3} \bar{Z}_{dv} e^{j150^\circ}$$

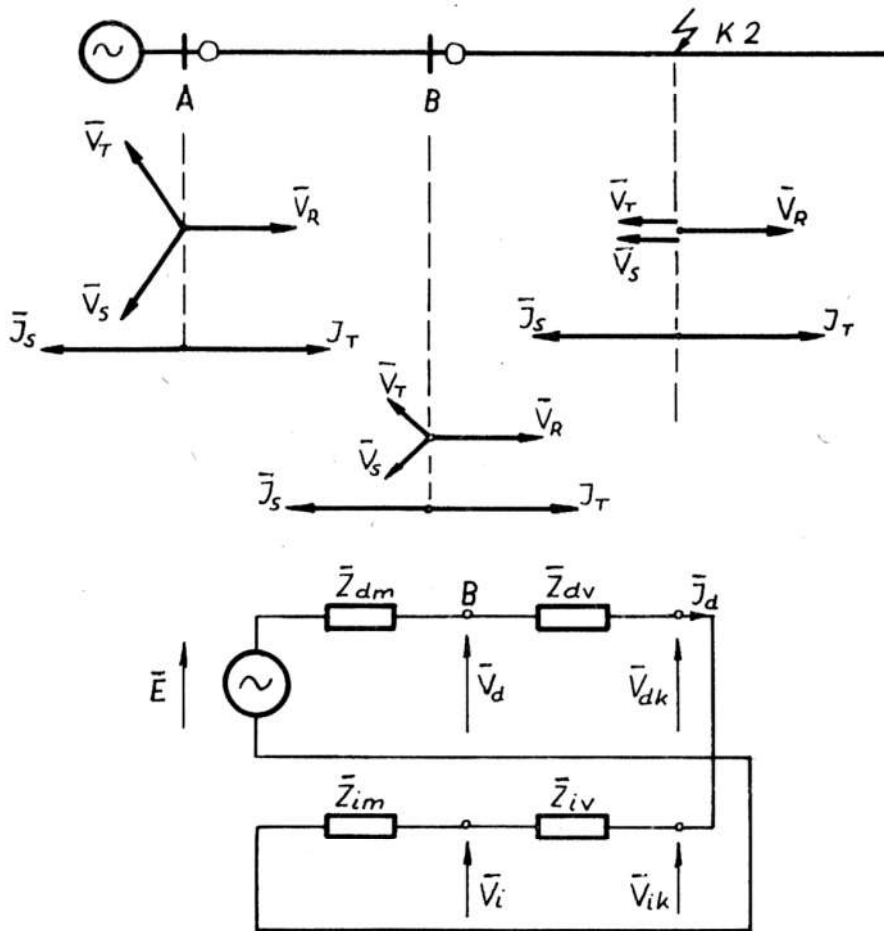
$$|\bar{Z}_k| = \sqrt{3} |\bar{Z}_{dv}|$$

8-49

Neka je na mjestu K nastao dvopolni kratki spoj (slika 202a). Izračunajmo impedanciju koju mjeri relej na mjestu B.

Prema ekvivalentnoj shemi na slici 202c možemo postaviti:

$$\bar{I}_d = -\bar{I}_i = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_i}$$



Slika 202.- Struje i naponi na mjestu priključka releja kod dvopolnog kratkog spoja na vodu

$$\bar{I}_T = a \bar{I}_d + a^2 \bar{I}_i = (a - a^2) \bar{I}_d$$

$$\bar{V}_d = \bar{E} - \bar{I}_d \bar{Z}_d + \bar{I}_d \bar{Z}_{dv}$$

$$\bar{V}_i = - \bar{I}_i \bar{Z}_i + \bar{I}_i \bar{Z}_{iv} = \bar{I}_d \bar{Z}_i - \bar{I}_d \bar{Z}_{dv}$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_{ST} &= \bar{V}_S - \bar{V}_T = a^2 \bar{V}_d + a \bar{V}_i - a \bar{V}_d - a^2 \bar{V}_i = \\ &= (a^2 - a) \bar{V}_d - (a^2 - a) \bar{V}_i = (a^2 - a) (\bar{V}_d - \bar{V}_i) \end{aligned}$$

Uvrštenjem izraza za $\bar{V}_d$ i $\bar{V}_i$ i uvažavanjem da je $\bar{E} = \bar{I}_d (\bar{Z}_d + \bar{Z}_i)$ te da je $\bar{Z}_d = \bar{Z}_{dm} + \bar{Z}_{dv}$, a $\bar{Z}_i = \bar{Z}_{im} + \bar{Z}_{iv} = \bar{Z}_{im} + \bar{Z}_{dv}$ ili jednostavno promatranjem petlje u ekvivalentnoj shemi dobit ćemo:

$$\bar{V}_d - \bar{I}_d \bar{Z}_{dv} - \bar{I}_i \bar{Z}_{iv} - \bar{V}_i = 0$$

$$\bar{V}_d - \bar{V}_i = \bar{I}_d (\bar{Z}_{dv} + \bar{Z}_{iv}) = 2 \bar{I}_d \bar{Z}_{dv}$$

$$\bar{U}_{ST} = (a^2 - a) 2 \bar{I}_d \bar{Z}_{dv}$$

$$\bar{Z}_k = \frac{\bar{U}_{ST}}{\bar{I}_T} = \frac{(a^2 - a) 2 \bar{I}_d \bar{Z}_{dv}}{(a - a^2) \bar{I}_d} = - 2 \bar{Z}_{dv}$$

$$|\bar{Z}_k| = 2 |\bar{Z}_{dv}| \quad 8-50$$

Za isto mjesto kratkog spoja relej će mjeriti manju udaljenost kod tropolnog nego kod dvopolnog kratkog spoja:

$$Z_{K3} = 0,865 Z_{K2} \quad 8-51$$

Osjetljivost ovog releja nije zadovoljavajuća.

Uz složeniju izvedbu poticajnog i preklopnog člana od člana prikazanog na sl.200, moguće je postići da relej uvaži i kompenzira razliku u mjerenoj impedanciji dobijenu po izrazu 8-51.

8.3.7 Automatsko ponovno uključivanje

Zahvaljujući prikladnoj konstrukciji zašitnog pribora nadzemnih vodova visokog napona ("Električne mreže I, 1.2.1. i 1.2.4") visoki postotak preskoka i pojava električnog luka neće izazvati trajna oštećenja, pa će vod u nekih 80% i više slučajeva nakon isključenja od strane zaštite opet biti spreman za pogon. To znači da će se u velikom broju slučajeva vod nakon obostranog

isključenja radi kratkog spoja opet moći uspješno uključiti. Ovo ponovno uključenje voda nakon ispada vrši se obično automatski (automatsko ponovno uključivanje, APU). Vremenski razmak tokom kojeg je vod isključen zove se beznaponska pauza.

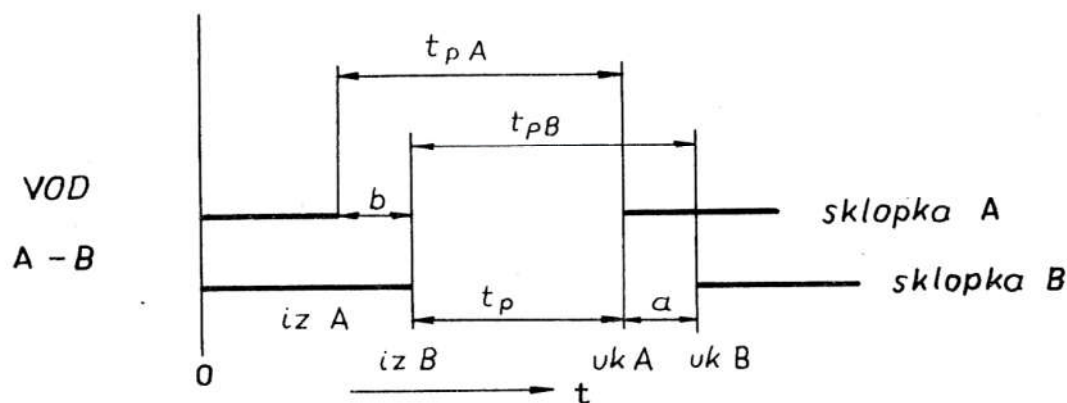
Ako je kvar trajnog karaktera, distantna zaštita ponovno djeluje i iskapča vod, ali ovog puta definitivno. Iznimno, katkada se primjenjuje i dvokratno, pa čak i trokratno automatsko ponovno uključivanje (mreže srednjih napona).

Jasno je da vod mora biti istovremeno iskopčan s obje strane, da bi se beznaponska pauza na obje strane voda vremenski poklapala. U protivnom automatika ne može raditi uspješno.

Trajanje beznaponske pauze, u načelu, ne mora biti duže nego što je nužno za dejonizaciju zraka na mjestu gdje je postojao električni luk. To vrijeme iznosi cca 0,3 s. Međutim, automatika je redovito udešena na nešto duže vrijeme zbog razlika koje su neizbježne radi ne baš istodobnog obostranog iskapčanja. Ove razlike se zbrajaju na štetu beznaponske pauze, kako je to vidljivo iz slike 203, tako da je stvarno trajanje beznaponske pauze t_p :

$$t_{pA} > t_p > t_{pB}$$

8-52



Slika 203.- Stvarno trajanje beznaponske pauze

Stvarno trajanje beznaponske pauze (t_p na sl.203) podesit će se prema prilikama u mreži. Mreža s mnogo zamki i paralelnih vodova omogućuje primjenu dužih beznaponskih pauza, jer je stabilnost mreže manje ugrožena. Duža beznaponska pauza garantira pouzdaniju dejonizaciju zraka na mjestu pojave električnog luka.

APU s beznaponskom pauzom od 0,5 do 3 s smatra se brzim. Ako beznaponska pauza traje više od 3 s do nekoliko minuta govorimo o sporom APU. Ako je beznaponska pauza ispod 0,5 s govorimo o ultrabrzom APU.

U slučajevima kada bi makar samo kratkotrajno isključivanje voda ugrozilo stabilnost sistema može se primijeniti jednopolno APU. Većina kratkih spojeva na visokonaponskim vodovima su jednopolni, pa je dovoljno isključiti i nakon beznaponske pauze ponovo uključiti samo tu "pogodjenu" fazu. U tom slučaju sklopke moraju imati mogućnost pojedinačnog rada svakog pola posebno.

U sistemima koji rade na granici stabilnosti, na kritičnim se vodovima može primijeniti samo jenopolno APU, dok se trolpolni i jednopolni kvarovi isključuju definitivno. Dvopolno APU se ne primjenjuje.

Ako kod trolpolnog APU postoji sumnja da je tokom beznaponske pauze došlo do odviše velikog razmimoilaženja faznih kuteva makar kratkotrajno odvojenih sistema, može se u sklopu APU dodatno predvidjeti mogućnost automatske provjere sinhronizma. Tada će nakon isteka beznaponske pauze samo na jednoj strani prakidač automatski uključiti, a na drugoj strani će prekidač automatski uključiti tek nakon što na temelju usporedbe napona utvrdi da su zadovoljeni kriteriji sinhronizma.

Pri jednopolnom APU beznaponska pauza može i mora biti nešto duža, jer:

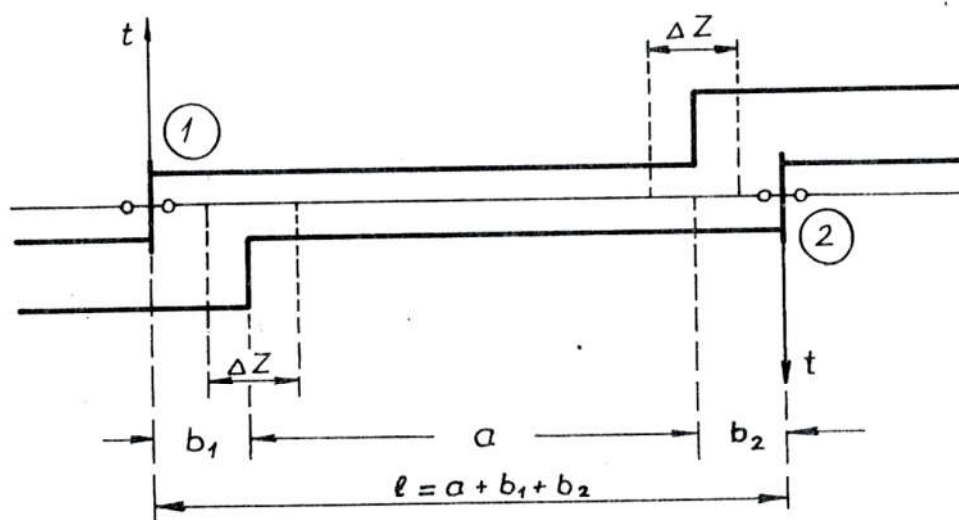
- dvije faze koje ostaju u pogonu garantiraju postojanje neke veze (ujedno sinhronizacije sile) medju sistemima,
- gašenje električnog luka na isključenoj fazi je otežano zbog indukcije napona sa faza koje su ostale u pogonu.

Primjenom APU postiže se da se najmanje 50% kratkih spojeva na vodovima visokog napona automatski odstrani u vrlo kratkom vremenu, tako da se oni praktički i ne zapažaju i ne remete normalan pogon. Povećanjem mehaničke sigurnosti vodova povećava se i broj prolaznih u odnosu na trajne kvarove. Ako su i druge pretpostavke ispunjene, pogotovu u pogledu kvalitete i dobre podešenosti zaštite i automatike, broj uspješnih APU se može povećati i znatno iznad 50% od ukupnog broja kratkih spojeva na vodovima.

Da bi APU bilo uspješno, od strane distantne zaštite mora biti osigurano istovremeno isključivanje voda na obje strane, i to u prvom stupnju. Ako do isključenja dodje u nekom višem vremenskom stupnju, APU se blokira i isključenje je definitivno. Iz toga slijedi zahtjev da se svi kratki spojevi na vodovima obostrano isključuju u I stupnju, dakle u najkraćem mogućem vremenu.

8.3.8 Štićenje cijele mreže distantnom zaštitom u I stupnju

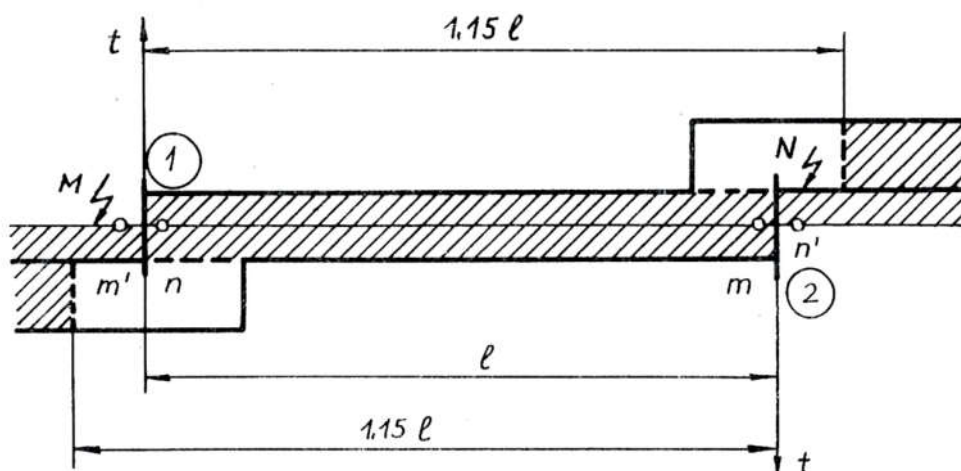
Kod prirodnog vremenskog stupnjevanja distantne zaštite uz poštivanje zahtjeva selektivnosti i rezerve (sl.197), kratki spojevi u blizini stanice će s udaljene strane biti isključeni u II stupnju. To je još jednom prikazano na slici 204 za vod 1-2, koji je dvostrano napajan, odnosno koji je dio zamke. ΔZ je neizbježiva netočnost mjerenja impedancije do mjesta kvara od strane distantnog releja. Iz toga slijedi da će u vremenu t_1 , odnosno u I stupnju biti eliminirani samo kratki spojevi na dionici a voda 1-2, dok će kvarovi na dionicama b_1 i b_2 biti s bliže strane isključeni u I, a s udaljene strane u II stupnju. To znači da će najviše 80%, a često samo 70% ili 60% kratkih spojeva biti obostrano isključeno u I stupnju (a na sl.204), a ostatak od 20 - 40% kratkih spojeva tek u znatno dužem (po trajanju) II stupnju ($b_1 + b_2$ na sl.204). Prema poglavlju 8.3.7 dodatno slijedi da će APU moći biti uspješno samo kod kratkih spojeva na dionici a.



Slika 204.- Dionice isključenja kvara na vodu 1-2
u I i II stupnju

U principu postoje dva načina da se osigura isključivanje svih kratkih spojeva od strane distantne zaštite u I stupnju, dakle u najkraćem mogućem vremenu.

Jedan je način produženje doseg I stupnja (produženi I stupanj). Distantni releji se udese tako, da u stanju pripravnosti imaju doseg I stupnja koji zahvaća oko 115% dužine voda 1-2. Time se dobiva u usporedbi sa sl.204 karakteristika na sl.205, i to ona koja je djelomično crtkana i još dodatno označena šrafiranjem. Tehnički se to postiže aktiviranjem otpornika r_p na sl.194. Na taj način će svaki kratki spoj bilo gdje na vodu 1-2 biti obostrano isključen u I stupnju, ali isto tako je 50% vjerojatno da će i kratki spoj u M (sl.205) umjesto od nadležnog releja m' biti isključen u I stupnju od releja m , što znači neselektivno. Analogno tome, kratki spoj u N može biti isključen od releja n umjesto od releja n' . Može se reći da se produženjem doseg I stupnja postiže idealna brzina rada distantne zaštite, ali na štetu selektivnosti. Ova manjkavost se može kompenzirati uvođenjem APU, pa ako i dodje do nekog neselektivnog isključenja prekidača, on će vrlo vjerojatno biti ubrzo automatski ponovno uključen. Ovu koncepciju

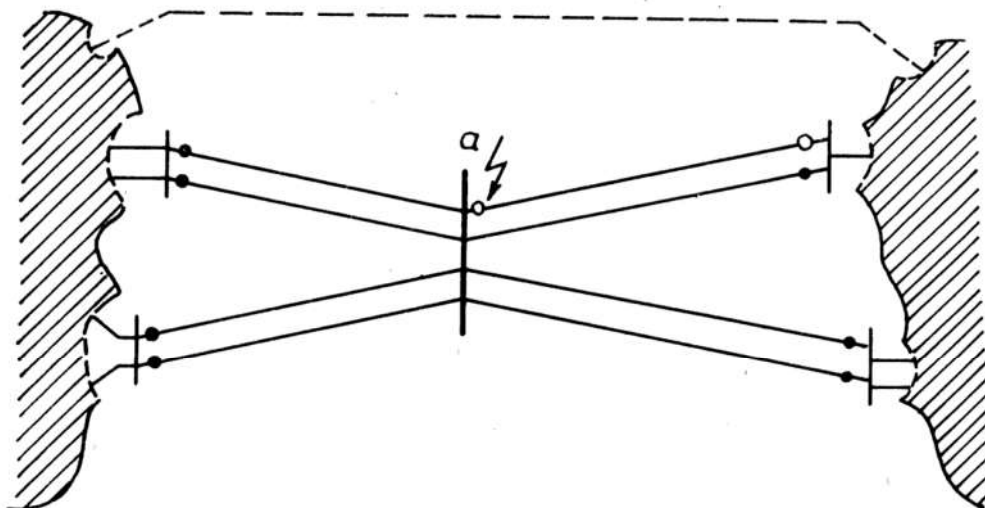


Slika 205.- Produženje I stupnja distantnog releja

podržava još i činjenica, da se nakon isključenja u I stupnju relej sam automatski podesi na normalno stupnjevanje prema slici 204 (premosti se otpornik r_p na sl.194) odnosno prema puno izvučenoj karakteristici na sl.205. Na taj način će trajni kvar na vođu nakon neuspješnog pokušaja APU biti definitivno selektivno isključen, jer pri drugoj proradi releja doseg I stupnja više nije produžen.

Može se izvesti zaključak da je, s jedne strane, za uspješnu primjenu APU neophodno postići isključenje svih kvarova (po mjestu nastanka) u I stupnju, s druge strane, ali ako je to postignuto produženjem I stupnja, neophodna je primjena APU radi kompenzacije stanovitog broja neselektivnih isključenja.

Kod određene konfiguracije mreže primjena principa produženog I stupnja izazvat će neselektivno isključivanje prevelikog broja prekidača u većem broju slučajeva nego je to moguće tolerirati. Takav slučaj je ilustriran na sl.206. Prikazani vodovi povezuju dva sistema, koji mogu, a ne moraju, biti povezani i na drugi način (crtkana veza na sl.206). Kružićima su prikazani samo oni distantni releji, koji sudjeluju u pretpostavljenom



Slika 206.- Prikaz nepovoljnog slučaja rada distantne zaštite s produženim I stupnjem

slučaju kratkog spoja. Kratki spoj na označenom mjestu treba biti isključen od strane releja prikazanih kružićima. Kvar na tom mjestu se, međutim, nalazi u dosegu I stupnja svih releja označenih punim kružnicama, pa je 50% vjerojatno da će oni isključiti prije nešto što će isključiti nadležni prekidač u a. U takvim slučajevima je postizanje šticećenja cijele mreže u I stupnju metodom produžavanja dosega I stupnja loše rješenje.

U takvim slučajevima se šticećenje cijele mreže distantnom zaštitom u I stupnju može postići uz prirodno stupnjevanje prema sl.197. i 204, ali dodatno još i povezivanjem krajnjih polja istog voda nekom telekomunikacijskom vezom (TT kabelom, UKV vezom ili VF vezom po samom vodu). Dodje li do kratkog spoja na dionici voda koja je s obadvije strane u dosegu I stupnja, isključivanje će uslijediti na normalan način u I stupnju obostrano. Ako kratki spoj nastane na dionici b_1 (sl.204), nadležni relej u čvoru I će isključiti u I, a suprotni relej u čvoru 2 u II stupnju. Releji u čvoru 1 će, međutim, osim naloga

za isključenje lokalnog prekidača taj nalog putem telekomunikacijske veze proslijediti još i prekidaču na suprotnom kraju voda (čvor 2), pa će i taj prekidač isključiti u I stupnju, makar bi od strane lokalnog releja nalog za isključenje dobio tek u II stupnju.

Ovaj princip ima svoje varijante. Upravo je opisana varijanta u kojoj jedan relej u slučaju kvara koji je u doseg njegovog I stupnja, neposredno djeluje na oba prekidača koji štite vod. U drugoj varijanti prenešeni impuls jednog releja ne izaziva isključenje udaljenog prekidača, već samo produženje I stupnja udaljenog distantnog releja, koji onda i sa svoje strane isključuje taj kvar u I stupnju.

8.3.9 Kritične točke distantne zaštite

Prema do sada izloženom u poglavlju 8.3 može se zaključiti, da se primjenom distantnih releja može ostvariti pouzdan, selektivan i osjetljiv sistem zaštite, koji uz to ima visoki stupanj rezerve. Da bi se to zaista postiglo, postavljaju se mnogi zahtjevi, kako na same releje, tako i na dodatne uređaje. Neka od karakterističnih ponašanja distantnih releja su spomenuta tokom izlaganja, kao i prilagodjenje rada releja postavljenim zahtjevima. Ovdje će, uz već navedena pitanja, biti iznesena još neka, na koja treba obratiti pažnju.

Već se govorilo o mjerenju udaljenosti kvara na temelju mjerenja impedancije zamke pri raznim vrstima kratkog spoja, i u vezi s tim utjecaj otpora električnog luka na izmjerenu udaljenost, kao i mogućnost da bliska greška bude simulirana njihovim rotacijama generatora. Tome treba dodati još i mogućnost pogrešnog rezultata mjerenja uslijed prijelazne pojave u trenutku nastanka kratkog spoja (prividno povećanje dosega).

Takodjer, govorilo se i o šticeanju cijele mreže u najkraćem vremenu, odnosno u I stupnju. Distantni relej mora imati mogućnost produženja dosega I stupnja, mogućnost predaje signala putem te-

lekomunikacijskog kanala i mogućnost rada s APU. Ove su funkcije katkada ugrađene u sam relej, a katkada se ostvaruju dodatnim uređajima. Modularna izvedba elektroničkih releja naročito je pogodna za prilagođavanje posebnim zahtjevima.

Spomenuta je mogućnost nekih releja da u nekim stupnjevima reagiraju u povratnom smjeru i time dopunjavaju ili zamjenjuju druge vrste zaštite.

Posebno je pitanje tzv., graničnih slučajeva rada releja, koji mogu imati izvor u samoj mreži za određene vrste kvarova na određenim mjestima ili pak u konstrukciji releja. Može se od strane mreže pojaviti slučaj kada su pobudne struje ili pobudni naponi premali da bi pokrenuli relej. Slučaj malih struja rješava se primjenom podimpendantne pobude, što zadovoljava u većini slučajeva. Pomanjkanje uzbudnog usmjerenog i mjernog napona pojaviti će se u slučajevima trolejnog "metalnog" (direktnog, galvanskog, bez pojave el. luka) kratkog spoja u neposrednoj blizini postrojenja (nehotično uključivanje trolejnog zemljospojnika). Neovisno o radu mreže kvar može biti simuliran nestankom sekundarnog mjernog napona uslijed ispada ili isključenja automata za zaštitu naponskih transformatora, a katkada relej neće reagirati na postojanje kvara radi neke specifičnosti u konstrukciji (npr. ručno uključivanje prekidača na postojeći kratki spoj nakon što je vod duže vremena bio izvan pogona). Za sve te slučajeve treba ispitati kako se relej ponaša, odnosno ako neke slučajeve relej ne može uredno savladati treba ispitati koliki je pogonski rizik uslijed toga.

Karakteristike mjernih transformatora su bitan činitelj za ispravan rad distantne zaštite. Važno je da se primarne veličine vjereno prenesu na sekundarnu stranu bez izobličenja i dodatnih oscilacija (kapacitivni naponski transformatori). Kod strujnih transformatora može biti kritičan i prijenosni omjer, jer on direktno utječe na gornju i donju granicu dosega za koje je relej podesiv u raznim stupnjevima.

Do poteškoća u radu releja može doći kod kratkih vodova ako relej nije predviđen za takovo područje primjene, zatim kod dugih

dvostrukih vodova zbog utjecaja medjuinduktiviteta medju trofaznim sistemima. Dodatne probleme donosi zaštita vodova s ugradjenim serijskim kondenzatorima, poprečnim prigušnicama i T-odvojcima.

Kod izrade plana stupnjevanja distantne zaštite za cijelu mrežu ili jedan njen dio može doći do poteškoća ako su pojedini vodovi u zamci vrlo različite dužine, te ako su pojedine dionice paralelni ili dvostruki vodovi.

Ponašanje i reagiranje distantnih releja kod kvarova u mreži obično daje vrijedne podatke koji se naknadno koriste za analizu pogonskih događaja. Radi toga relej treba imati signalizaciju rada što većeg broja njegovih organa posebno, i to ne samo optičku signalizaciju, već i električku, radi mogućnosti unošenja tih signala u informacijski podsistem registracije, prijenosa i obrade podataka. Relej treba biti spreman za normalno funkcioniranje, bez obzira jesu li signali prethodnog kvara poništeni (kvitirani, resetirani) ili ne.

Naročito značajni vodovi (takvim se smatraju svi vodovi u SFRJ napona 380 kV) često se opremaju s po dva distantna releja po odvodu, radi dodatne rezerve. U tim slučajevima razumno je odabrati releje različitih tipova i time nešto različitih svojstava, tako da bi se kompenzirale neminovne manjkavosti pojedinih tipova.

Distantni releji, kao i zaštitni uređaji uopće, spadaju u red uređaja koji su popravilu neaktivni, ali u trajnom stanju pripravnosti, da bi pri pojavi poremećaja brzo i ispravno reagirali. Moguće je da tokom dužeg trajanja stanja pripravnosti kod njih dođe do promjene svojstava, pa i do kvarova (oksidacija kontakata, kondenzacija vlage, proboj izolacije, starenje materijala ...). Stoga je neophodno periodično svestrano provjeravanje funkcionalnosti i ispravnosti prikladnim testiranjem s pomoću uređaja za ispitivanje i mjerenje. Kod prvog provjeravanja rada zaštite u novim postrojenjima ili nakon bitnih promjena u konfiguraciji mrež obavljaju se i ispitivanja "na živo", tj. uz namjerno izazivanje stvarnih kratkih spojeva na vodovima. Na taj način se ispituje cijeli podsistem zaštite, uključujući i mjerne uređaje, uređja-

je napajanja, te prekidače i njihove pomoćne uređaje.

8.4 USPOREDBENA ZAŠTITA

Težnja da se svi kvarovi u elektroenergetskom sistemu eliminiraju selektivno i u najkraćem mogućem vremenu, dovela je do razvoja i drugih tipova zaštite, koji se primjenjuju kao dopuna distantnoj zaštiti ili umjesto distantne zaštite, naročito u slučajevima kada iz raznih specifičnih razloga prednosti distantne zaštite ne mogu doći do izražaja ili je njena primjena nemoguća.

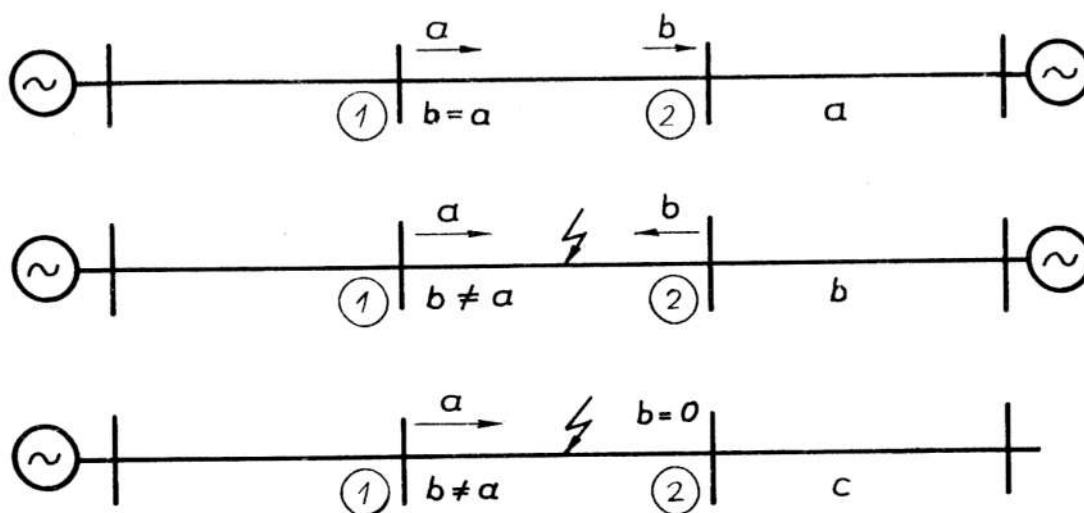
Usporedbene zaštite predstavljaju tip zaštite koji može počivati na raznim principima rada, ali zajedničko im je svojstvo da odluku o djelovanju donose na temelju uspoređivanja nekog kriterija, koji može biti analogna veličina (struja, snaga) ili digitalna veličina (smjer). Daljnja je karakteristika svih tipova usporedbene zaštite, što ne pružaju rezervu. To znači da će reagirati na kvarove u strogo ograničenom području štice, a neće reagirati na kvarove izvan tog područja ma koliko dugo kvar trajao. Ta mana usporedbene zaštite se mora kompenzirati dodatnom rezervnom zaštitom.

U ovom se poglavlju obrađuje usporedbena zaštita vodova. Neki tipovi usporedbene zaštite se mogu primijeniti na vodove bilo koje dužine, ali je područje primjene ograničeno na zaštitu kratkih vodova. Kod dugih vodova dolaze do izražaja sve prednosti distantne zaštite, pa se u tim slučajevima rijetko odustaje od njene primjene. Orijentaciono, usporedbena zaštita koja radi na temelju usporedbe analognih veličina (takva zaštita se može nazvati diferencijalnom kao podvrst usporedbene) koristi se za zaštitu vodova do 10 km, a zaštita koja uspoređuje digitalne veličine primjenjuje se za zaštitu vodova do 25 km.

Usporedbena zaštita može biti uzdužna i poprečna. Dominantni značaj za zaštitu vodova ima uzdužna usporedbena zaštita.

8.4.1 Uzdužna usporedbena zaštita

Osnovni princip rada usporedbene zaštite prikazan je na slici 207. Na vod 1-2 se uspoređuju veličine a (u čvoru 1 na vod prema 2) i b (u čvoru 2 na vod prema 1). Uspoređivane veličine a i b mogu biti analogne (npr. struje po iznosu i kutu) ili digitalne (po pravilu smjer struje, koji može biti od sabirnica prema vod = da ili od voda prema sabirnicama = ne). Na sl.207a vod 1-2 je dvostrano napajan i nalazi se u normalnom pogonu. Gledano iz 1 prema 2, iz 1 ulazi u vod veličina a , a u 2 iz voda izlazi veličina b približno jednaka veličini a . Ne dolazi do isključenja voda.



Slika 207. - Osnovni princip djelovanja usporedbene zaštite

Na slici 207b je na vod 1-2 došlo do kratkog spoja. Vod je dvostrano napajan. Sada je rezultat uspoređivanja različit, pa dolazi do isključivanja.

Slučaj na sl.207c je sličan prethodnom, ali vod je jednostrano napajan. Uspoređivanje a s b dovodi do isključivanja.

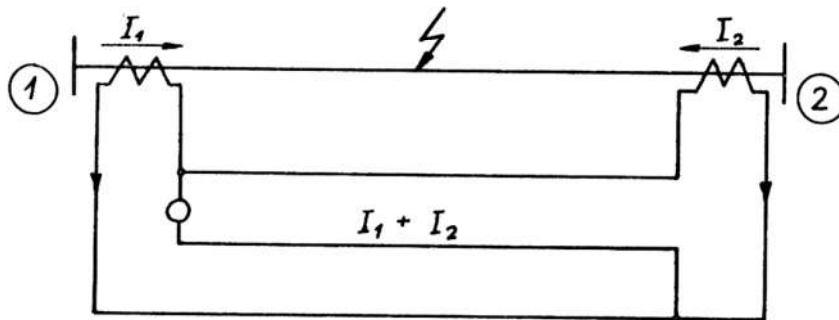
Uspoređjivanje veličina a i b osim kod najjednostavnijih izvedbi nije trajan proces. U normalnom pogonu (sl.207a) ne vrši se uspoređjivanje, releji su u stanju mirovanja. Stoga slično distantnim relejima u relejima usporedbene zaštite obično postoji poticajni član, koji aktivira funkcije releja tek kad nastupi poremećaj u mreži. Poticaj može biti nadstrujni, podnaponski ili podimpedantni.

Još valja napomenuti, da ni pri normalnom pogonu (sl.207a) veličine a i b , ako su analogne neće biti međjusobno potpuno jednake, zbog djelovanja poprečnih grana voda, odnosno zbog električkih parametara voda. Uvažavanje ove normalne razlike, kao i kratkotrajnih razlika prilikom sklopnih operacija, postiže se tzv. stabilizacijom usporedbene zaštite.

Iz izlaganja u vezi sa sl.207. može se uočiti još jedna važna činjenica, a to je da se kriteriji a i b formiraju na dva udaljena mjesta. Da bi se oni međjusobno uspoređjivali, treba da se na neki prikladan način prenesu na jedno mjesto, tj. kriterij a do čvora 2 i kriterij b do čvora 1. Takav prijenosni put poznat je već kao dopuna distantnoj zaštiti. Ovdje je distantna zaštita mogla selektivno djelovati u skladu s planom stupnjevanja i pri kvaru prijenosnog puta. Kod usporedbene zaštite je prijenosni put bitan za njezin ispravan rad, pa releje usporedbene zaštite i sistem za prijenos informacija na daljinu treba smatrati nedjeljivom cjelinom.

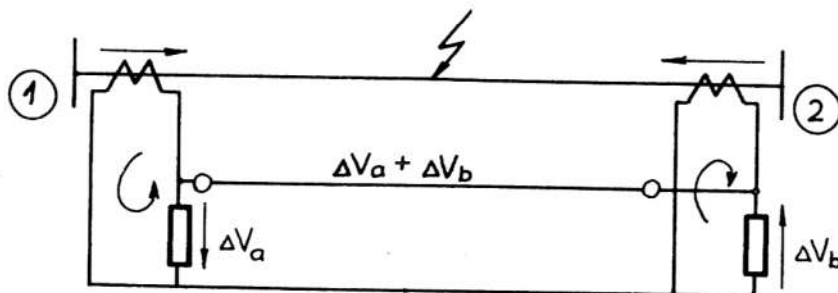
Najjednostavnija usporedbena zaštita radi na principu usporedbe struja koje ulaze u vod i iz njega izlaze (sl.208). Ovaj princip zaštite zahtijeva trožilni komunikacijski kabel, kroz koji teče sekundarna struja strujnih transformatora, čemu mora biti prilagođen presjek tog kabela.

Ako je vod ispravan, kroz strujne transformatore struja u 1 ima smjer od sabirnica, a u 2 prema sabirnicama ili obratno. Kroz releje ne teče nikakva struja. U slučaju kratkog spoja na vodu kroz treću žilu komunikacijskog kabela poteče razlika (diferencija - diferencijalna zaštita) struja, koja je u tom slučaju jednaka zbroju apsolutnih vrijednosti struja I_1 i I_2 . Ta struja protjecanjem kroz releje u 1 i 2 izaziva isključivanje odgovarajućih prekidača.



Slika 208.- Princip rada uzdužne usporedbene zaštite po kriteriju razlike struja

Uzdužna diferencijalna zaštita s otporima zahtijeva manji presjek komunikacijskog kabela. Pojednostavljena jednofazna principijelna shema ove zaštite prikazana je na slici 209. Sekundarne

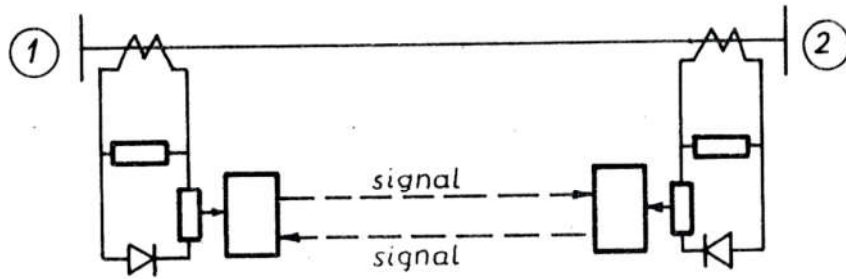


Slika 209.- Uzdužna diferencijalna zaštita s otporima

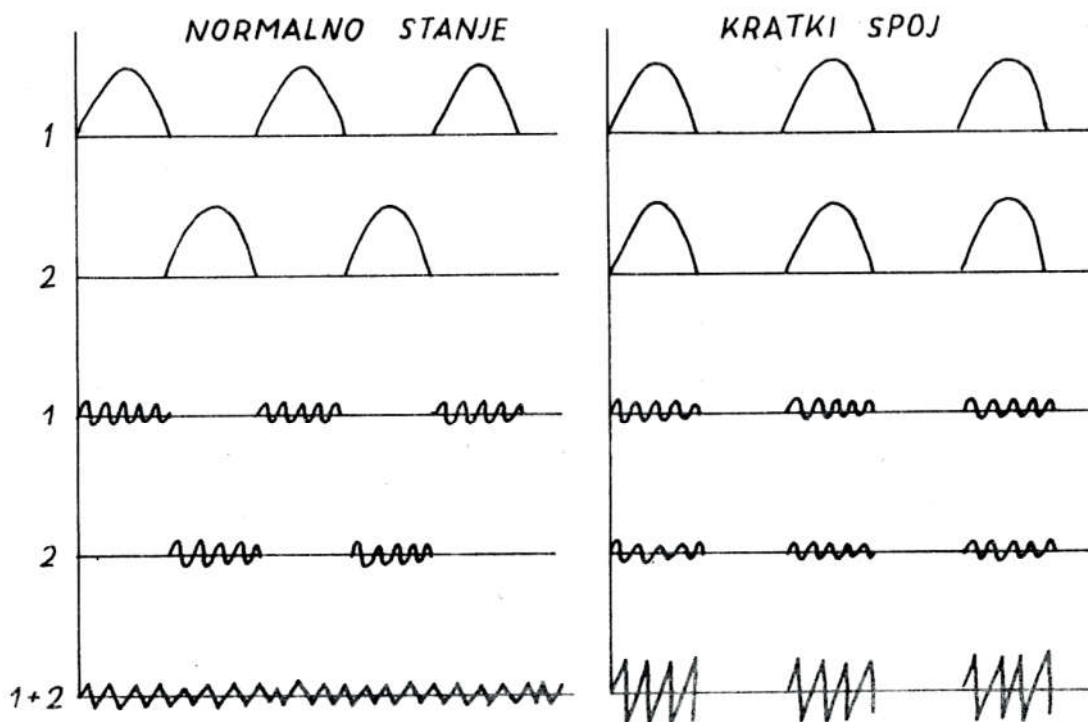
struje strujnih transformatora zatvaraju se lokalno, a uspoređuju se samo padovi napona nastali na otpornicima u krugu struje.

Jedna vrst usporedbene zaštite koristi usporedbu faza struje na oba kraja voda. Pad napona na otporniku sekundarnog kruga strujnih transformatora se poluvalno ispravlja. Tako dobijeni

impulsi se pretvaraju u pravokutne impulse i njima se modulira visokofrekventni signal. Signal generiran na jednoj strani upućuje se i drugoj strani, pa se na svakoj strani voda oba signala zbrajaju (sl.210). Pri pojavi kratkog spoja dolazi do inver-



Slika 210.- Uzdužna usporedbena zaštita s usporedbom faze



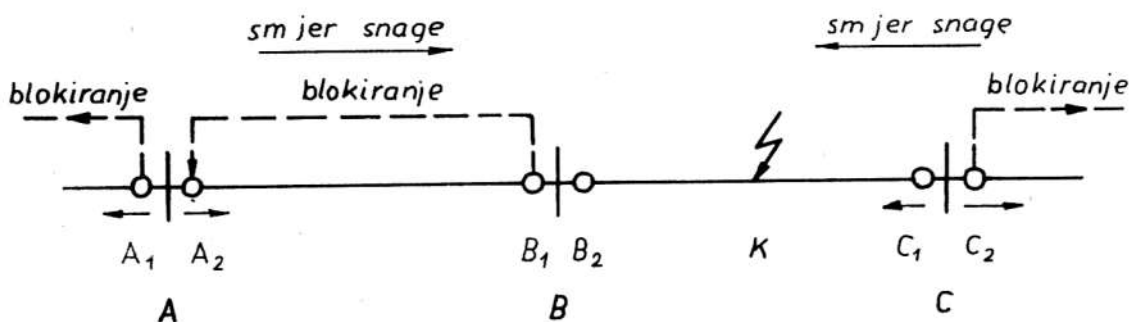
Slika 211.- Kriteriji zaštite sa sl.210

zije jednog od signala za 180° , a time i do bitne razlike u izgledu njihovog zbroja. Ta promjena je kriterij za isključivanje prekidača (sl.211).

Mnoge uzdužne usporedbene zaštite rade na principu usporedjivanja smjera toka snage na oba kraja voda. Opisat ćemo dvije varijante zaštite koja radi na tom principu.

Prva varijanta koristi signal za blokiranje, pa se može nazvati bloking - sistem. Na svakom kraju svih vodova nalazi se usmjereni relej sa dva vremenska stupnja: poticajnim i izvršnim. Izvršni djeluje (zatvara kontakt) nešto iza poticajnog. Poticajni stupanj dat će izvršnom stupnju nalog za isključenje prekidača samo ako je u mreži kvar, a smjer snage je pri tom od sabirnica prema vodu. Izvršni član će taj nalog proslijediti prekidaču, ako sa suprotne strane voda nije došao nalog za blokiranje.

Pretpostavimo kratki spoj na vodu B - C. Usmjereni releji B_2 i C_1 isključit će pripadne sklopke na nalog izvršnog stupnja, jer ništa ne sprečava to isključenje. Na vodu A - B relej A_2 isključio bi pripadnu sklopku neselektivno. Da se ovo ne dogodi, poticajni stupanj releja B_1 (koji nije uzbudjen, jer ne odgovara smjer) upućuje signal za blokiranje releju A_2 . Signal za blokiranje mora releju A_2 stići prije nego isteče vrijeme njegova izvršnog stupnja. Upravo radi toga su i nužna dva vremenska stupnja (sl.212).

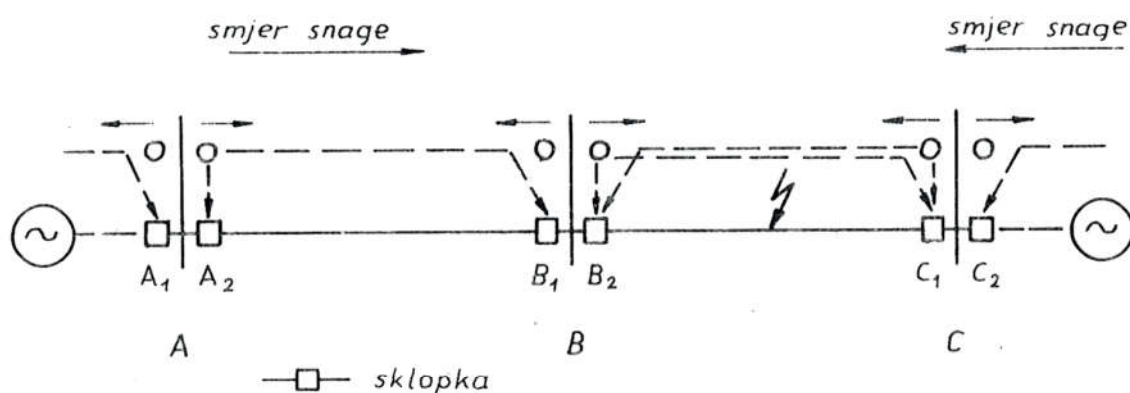


Slika 212.- Bloking sistem

Mane ovog sistema su:

- zbog dva vremenska stupnja gubi se na brzini rada zaštite,
- ako zataji veza, dolazi do nepotrebnog isključivanja,
- nema rezerve, što je mana svih usporedbenih zaštita,
- opterećenje svih veza pri pojavi kratkog spoja.

Druga varijanta usporedbene zaštite s usmjerenim relejima prikazana je na slici 213. To je tzv. sistem sa dva signala.



Slika 213.- Sistem sa dva signala

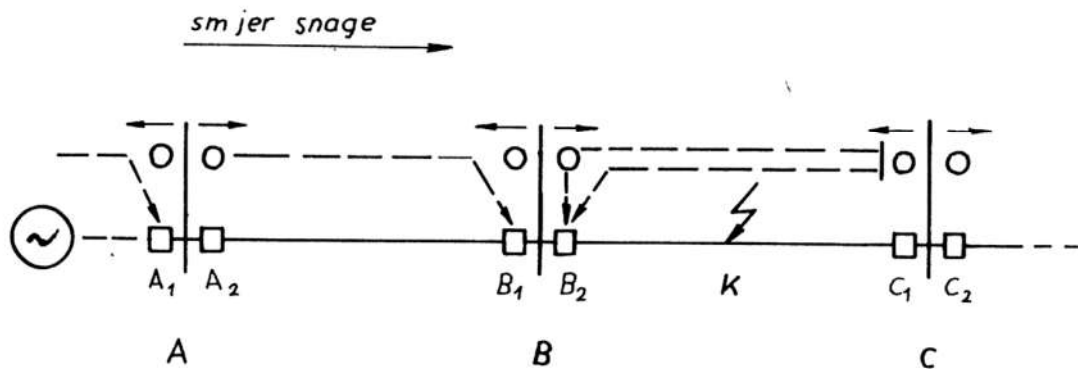
Kada u slučaju kratkog spoja relej utvrdi smjer kvara od sabirnice prema vođu, relej daje jedan "iz" signal vlastitoj sklopki i jedan "iz" signal preko veze susjednoj sklopki istog dalekovoda. Sklopka će ispasti samo ako dobije istovremeno dva signala. To je slučaj na vođu B - C, na kojem je upravo došlo do kratkog spoja. Ostale sklopke dobit će samo po jedan "iz" signal, bilo od vlastitog, bilo od susjednog releja, a to nije dovoljno da bi došlo do isključenja.

U usporedbi s bloking-sistemom ovaj sistem ima prednost, jer ne traži dva vremenska stupnja, pa djeluje brže. Mane ovog sistema su:

- ako zataji veza uopće ne dolazi do isključenja;

- ako je vod radijalan (momentalno stanje u mreži) sklopka neće isključiti, jer sa suprotnog kraja neće dobiti drugi signal.

Ova druga mana se otklanja uređajem za refleksiju signala (slika 214).



Slika 214 - Reflektiranje signala u sistemu sa sl.49

Releji A₁, A₂, B₁ i B₂ ponašaju se kao u prethodnom slučaju. Pošto se sa strane stanice C kratki spoj u K ne napaja, relej se neće uopće pobuditi, dakle niti u zapornom, niti u "iz" smjeru. Prema tome relej C₁ neće moći proslijediti drugi impuls sklopki B₂, koji je neophodan da bi sklopka B₂ ispala. Posebni uređaj uz C₁ vraća impuls releja B₂ u slučaju da C₁ ostaje neuzbudjen, dakle u neku ruku reflektira signal releja B₂, kako bi sklopka B₂ mogla selektivno isključiti.

Kod ove skupine zaštite, koju nazivamo usporedba smjera napreže se telekomunikaciona mreža. Ovo se može izbjeći korištenjem blok-signal distantne zaštite.

Kada distantna zaštita ustanovi da je kvar vrlo daleko, prosljeđuje blok-signal telekomunikacijskim uređajima i sklopkama i time blokira zaštitu s usporedbom smjera. Ovaj zahvat nešto produžuje rad zaštitnog sistema.

Usporedbena zaštita djeluje brzo i selektivno, ali ne pruža nikakovu rezervu kod kvarova na drugim vodovima, ako njihova zaštita zataji. Radi toga se uz usporedbenu zaštitu uvijek mora predvidjeti rezervna zaštita. Ako se odstupa od zahtjeva selektivnosti u rijetkim slučajevima zatajivanja osnovne zaštite, rezervna zaštita može biti nadstrujna. Ako je selektivno isključivanje neophodno (važni vodovi), rezervna zaštita je distantna. Rezervna (dopunska) zaštita mora svakako reagirati i na kvarove na sabirnicama postrojenja.

Ako se sumnja u pouzdanost distantne zaštite kao osnovne u slučajevima jednopolnih kratkih spojeva (velika dužina električnog luka, visoki otpori uzemljenja stupova, vodovi bez zaštitnog užeta), može se kao dopuna distantnoj zaštiti dodati usporedbena zaštita, koja uspoređuje smjer trostruke nulte komponente struje na oba kraja voda. Pošto je nulta komponenta struje u normalnom pogonu praktički jednaka nuli, ova zaštita može imati visoku osjetljivost.

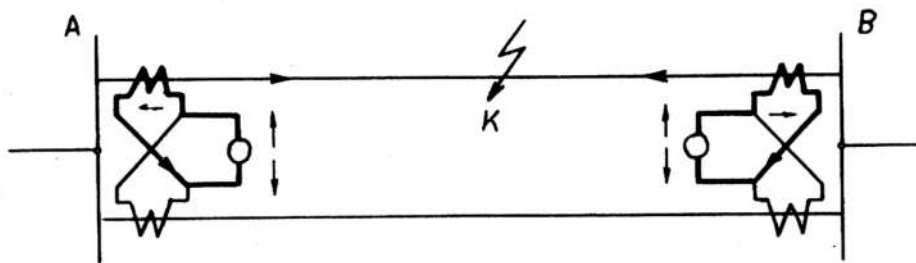
Zahtjevi za telekomunikacijske kanale, koji sudjeluju u sistemu zaštite jesu:

- moraju biti pouzdani bilo da su izvedbeni u vidu fizičkih, VF ili UKV linija, pogotovo u momentu kratkog spoja kada upravo vrše svoju funkciju,
- fizičke linije moraju biti neosjetljive na utjecaje struje kratkog spoja u visokonaponskom vođu,
- pošto su za vrijeme trajanja kratkog spoja naponske prilike u mreži poremećene, moraju eventualni VF i UKV uređaji koji sudjeluju u sistemu zaštite, imati nezavisni sistem napajanja (akumulatorska baterija). Opći je zahtjev za takve telekomunikacijske kanale da moraju biti izvanredno pouzdani u radu, što povećava njihovu cijenu. Kod VF veza potrebno je dvofazno napajanje, pošto informacija treba ići preko mjesa kratkog spoja na vođu.

8.4.2 Poprečna diferencijalna zaštita

Poprečna diferencijalna zaštita upotrebljava se za šticeenje paralelnih kabela i nadzemnih vodova. Prednost je ove zaštite što nisu potrebni pomoćni telekomunikacijski vodovi. Ako od vodova šticeenih poprečnom diferencijalnom zaštitom ostane u pogonu samo jedan (ostali u remontu ili kvaru), ni on nije zaštićen.

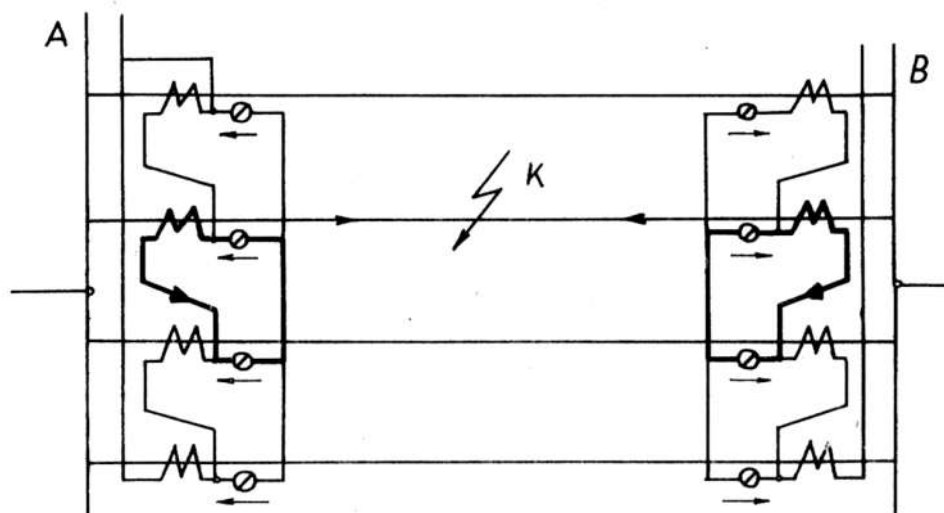
Na sl.215 prikazano je šticeenje poprečnom diferencijalnom zaštitom kod dva paralelna voda. To je tzv. zaštita u osmici.



Slika 215 - Zaštita u osmici

Ako nastane kratki spoj na jednom vodu, poremetit će se ravnoteža strujnih transformatora, pa će struja teći kroz releje. Ovisno o smjeru te struje, doći će do izbacivanja voda na kojem je kratki spoj.

Kod više paralelnih vodova upotrebljava se zaštita u poligonu. Releji su osjetljivi na struju i smjer. Kad nema kvara struja se zatvara kroz poligon, a kad je kvar na nekom vodu, struja se zatvara kroz releje i ovisno o smjeru iskapča vod u kvaru (sl.216).



Slika 216.- Zaštita u poligonu

8.5 LOKACIJA I ELIMINACIJA ZEMLJOSPOJA

Pojava zemljospoja je moguća u mrežama kojima je zvjezdište izolirano (izolirane mreže). Prilike u mreži za vrijeme trajanja zemljospoja su opisane u poglavlju 3.2. "Električne mreže II".

Zaštita od zemljospoja, koja u kratkom vremenu isključuje element mreže gdje je nastao spoj jedne faze sa zemljom, ne primjenjuje se. Struje zemljospoja su uvijek znatno manje od struja opterećenja, a u gašenoj mreži na mjestu zemljospoja teče samo neznatna struja ostatka. Zbog toga je kriterij na temelju kojeg bi djelovala neka selektivna zaštita, nedovoljno pouzdan.

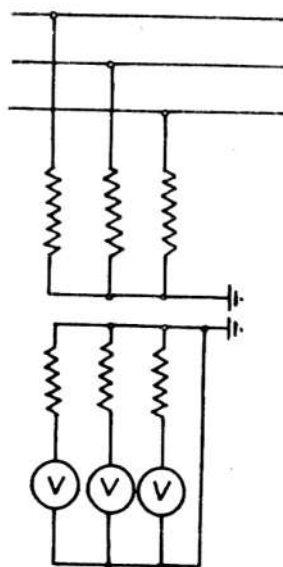
Umjesto automatske zaštite, pri pojavi trajnog zemljospoja u izoliranoj ili gašenoj mreži se većinom pristupa određivanju lokacije zemljospoja i tek nakon toga ručnom isključivanju pogodjenog elementa mreže, najčešće dalekovoda.

U načelu, pogon mreže u stanju trajnog zemljospoja može trajati neodređeno vrijeme. Ipak, mnogi razlozi nalažu da se pogodjeni

element mreže što prije isključi. Povišeni napon u dvije zdrave faze dodatno napreže izolaciju, pa postoji povećana vjerojatnost proboja na tim fazama, što dovodi do pojave dvostrukog zemljospoja. Nadalje, nije poznato stanje na samom mjestu zemljospoja. Na tom mjestu može postojati opasnost po život, a ako je zemljospoj putem električkog luka, stvaraju se opasni unutarnji prenaponi.

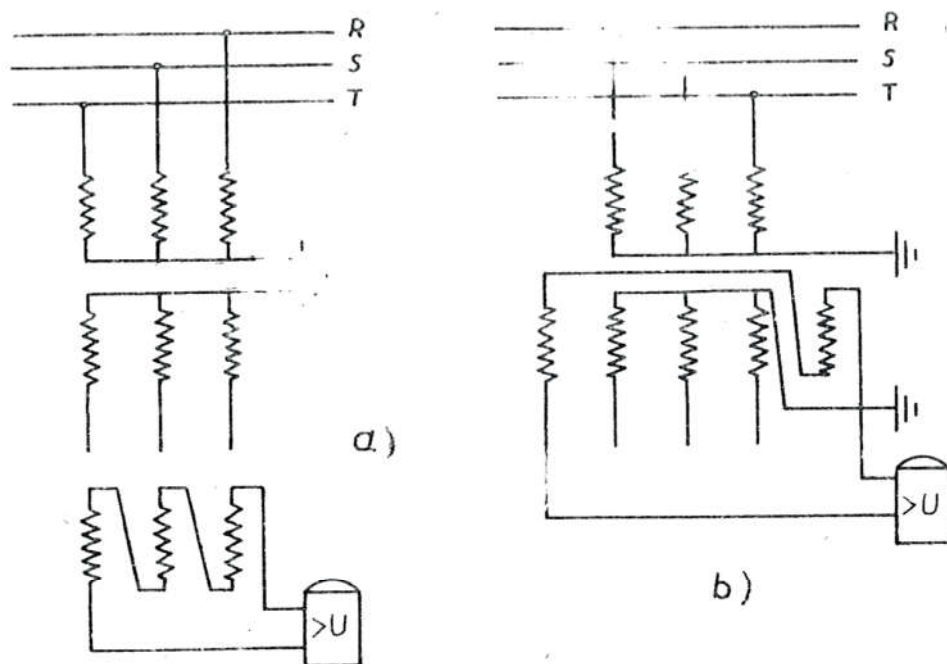
Spontano gašenje električkog luka zemljospoja u izoliranim mrežama može se očekivati samo u manje rasprostranjenim mrežama, u kojima ukupna struja zemljospoja galvanski povezane mreže ne premašuje nekih 10 A. U uredno vodjenoj gašenoj mreži (trajna ispravna podešenost petersenovog svitka) spontano će se ugasiti svaki zemljospoj koji se ostvaruje preko električnog luka, a ne putem galvanske veze (dodir grane, pad vodiča na zemlju ili slično).

Postojanje zemljospoja u mreži može se ustanoviti na razne načine. Dovoljno je da se spoj uoči na jednom, bilo kojem mjestu u mreži. Najprimitivnije pokazivanje postojanja zemljospoja je s pomoću tri voltmetra, koji pokazuju fazne napone u sve tri faze (sl.217). U normalnom stanju sva tri voltmetra će pokazivati jednake, i to fazne napone.



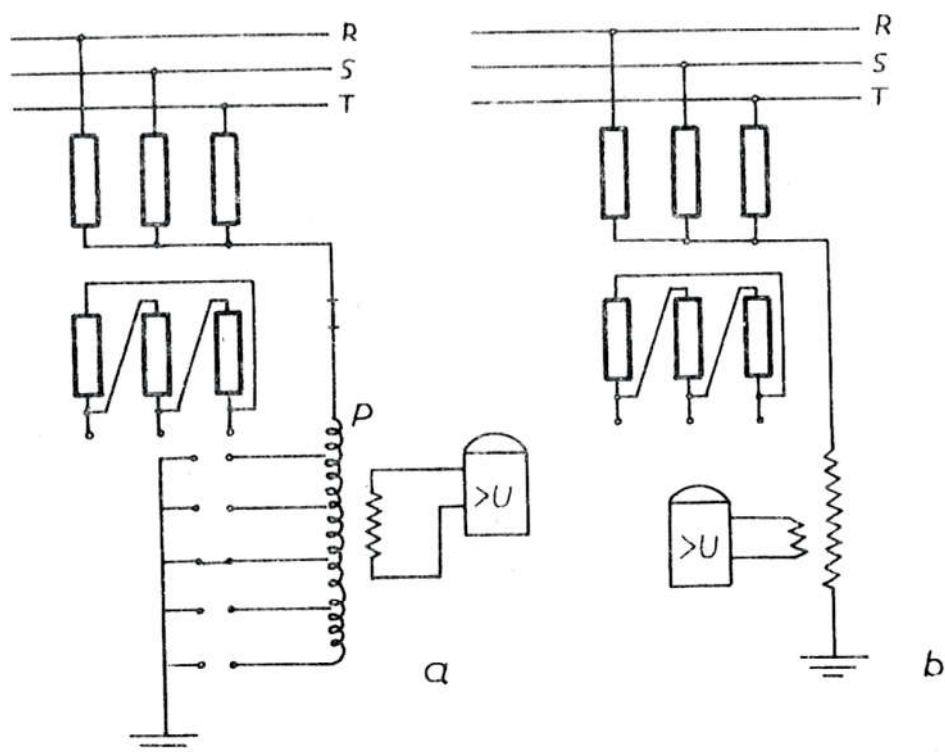
Slika 217. - Priključak tri voltmetra za ustanovljenje zemljospoja

Pri pojavi zemljospoja napon na jednom voltmetru će pasti na nulu, a na ostala dva će narasti na vrijednost linijskog napona. Da bi se ovako pokazana pojava zemljospoja odmah uočila potrebno je trajno promatrati instrumente, što je neprovedivo. Radi toga se redovito uvodi akustička i optička signalizacija zemljospoja putem zemljospojnog releja, koji je zapravo nadnaponski relej. Na sl.218. prikazan je uobičajeni priključak tog releja na naponske mjerne transformatore. Na slici 218a relej je priključen na tri jednofazna mjerna transformatora od kojih svaki ima i treći namotaj, a sva tri analogna namotaja su spojeni u otvoreni trokut. Na slici 218b relej je priključen na trofazni naponski mjerni transformator s 5 stupova u jezgri. Naponi namotaja 1. i 5. stupa se zbrajaju i dovode releju.



Slika 218. - Priključak zemljospojnog releja
 a) na otvoreni trokut trećeg namotaja
 b) na namotaje četvrtog i petog stupa

Na slici 219a koristi se napon dodatnog mjernog namotaja na jezgri petersenovog svitka, a na slici 219b napon s mjernog naponskog transformatora priključenog na zvjezdište učinskog transformatora.



Slika 219 - Priklučak zemljospojnog releja
a) na mjerni namotaj petersenovog svitka
b) na zvjezdište učinskog transformatora

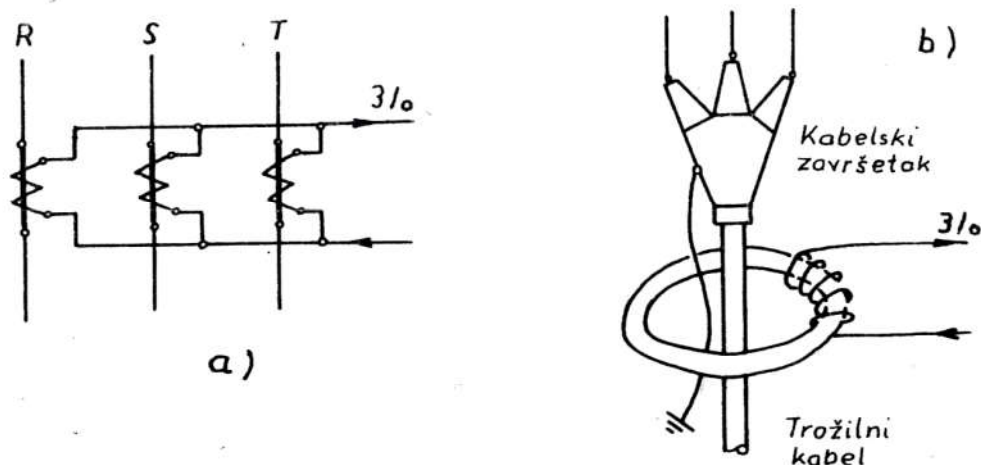
U sva četiri slučaja su prijenosni odnosi odabrani tako što se releju u normalnom stanju ne privodi nikakav napon, a kod zemljospoja napon od 100 V. Zemljospojni relej se podešava tako da proradjuje kod nešto nižeg napona od 100 V, ali ne proradjuje pri naponima koji se mogu pojaviti kod kvara na uredjajima (npr. izgaranje osigurača u mjernom krugu).

Ako mreža ne raspolaže još nekim drugim uredjajima nakon dojava zemljospoja pristupa se traženju mjesta zemljospoja. Pri tom se koristi spoznaja da se pomak zvjezdišta rasprostire u cijelom

galvanski povezanom dijelu mreže. Ako se mreža galvanski odvoji u dva približno jednaka dijela, zemljospoj će se i dalje registri-
rati samo u onom dijelu koji sadrži neispravan vod. Daljnom dio-
bom dolazi se do defektnog elementa i on se isključi sve do ukla-
njanja uzorka trajnog zemljospoja, odnosno do popravka.

Prilikom traženja mjesta zemljospoja treba maksimalno izbjegavati
isključivanje potrošača, što će biti moguće ako barem u nekim pos-
trojenjima postoje dvostruke sabirnice i spojna polja, te ako je
mreža zamkasta ili postoje paralelni vodovi. Redoslijed, odnosno
način traženja treba da o tome vodi računa. Osim toga traženje
treba usmjeriti na one vodove gdje je veća vjerojatnost pojave
zemljospoja (duži vodovi, stariji vodovi, vodovi na kojima se i ra-
nije javljao isti kvar).

Mjesto zemljospoja može se utvrditi na temelju pokazivanja releja
rasporedjenih u mreži u tolikom broju i na tolikim mjestima da
se može jednoznačno zaključiti na kojemvodu je zemljospoj. U tu
svrhu se koriste vatmetarski sistemi, kojima se osim nultog napo-
na iz prethodnih slučajeva dovodi još i nulta komponenta struje
izazvana zemljospojem. Nulta komponenta struje se može mjeriti na
dva načina, koji su prikazani na slici 220.



Slika 220. - Mjerenje nulte komponente struje
zemljospoja a) nadzemnog voda
b) kabela

Na slici 220a prikazano je mjerenje nulte komponente struje s pomoću paralelno spojenih sekundarnih strana strujnih transformatora smještenih u svakoj fazi voda. Na slici 220b prikazan je obuhvatni strujni transformator, koji se može primijeniti kod trožilnih kabela ili snopa od tri jednožilna kabela koji tvore trofazni vod. Sekundarni namotaj je ovijen oko prstenaste lamelirane željezne jezgre, koja obuhvaća sve tri žile voda. Da bi se zaista mjerila samo nulta komponenta struje u faznim vodičima, a ne i struje u metalnim ovojima kabela, mora i uzemni vod kabela biti proveden kroz prsten jezgre, što je prikazano na slici.

L I T E R A T U R A

Poglavlje 1

A.Kaminski: Stabilität des elektrischen Verbundbetriebes VEB Verlag Technik, Berlin 1959. Prenos i distribucija električne energije, Gradjevinska knjiga, Beograd 1964. (tzv. "Priručnik Westinghouse").

G.W.Stagg, A.H.El-Abaid: Computer methods in power system analysis, McGraw-Hill 1968.

M.Ožegović: Programi za odredjivanje dinamičke stabilnosti u mreži s većim brojem generatora, magistarski rad, Zagreb 1970.

S.Despotović: Osnovi analize elektroenergetskih sistema ZJE, Beograd 1962.

M.Ožegović: Ekvivalentiranje djelovanja mreže u računu dinamičke stabilnosti, Energija 1-2/1970.

M.Ožegović: Program "Dinamička stabilnost mreže-DINST" za električno računalo IBM 1130, CIGRE, Dubrovnik, 1970.

Poglavlje 2

G.W.Stagg, A.H.El-Abiad: Computer methods in power system analysis, McGraw-Hill 1968

Poglavlje 3

H.Edelmann: Berechnung elektrischer Verbundnetze, Springer - Verlag, Berlin 1963.

M.Ožegović, S.Fuštar: Usporedba metoda za redukciju mreže, JNK CIGRE, referat, Sarajevo 1979.

M.Ožegović: Redukcija mreže na proizvoljan broj čvorova pomoću matrice vlastitih i međusobnih admitancija čvora, Automatika No. 1/1969.

Poglavlje 4

G.W.Stagg, A.H.El-Abiad: Computer methods in power system analysis, McGraw-Hill 1968.

M. i K.Ožegović: Električne mreže I, skripta, Sveučilište u Splitu 1977.

B.Stefanini, S.Babić, M.Urbiha-Feuerbach: Matrične metode u analizi električnih mreža, Školska knjiga, Zagreb 1975.

M.Ožegović: Računanje matrice $[\bar{Z}]$ metodom korak po korak kod velikog broja čvorova, Elektrotehnika br. 1/81, Zagreb 1981.

M.Ožegović: Računanje matrice $[\bar{Z}]$ inverzijom matrice $[\bar{Y}]$ kod velikog broja čvorova, Elektrotehnika br. 5/81, Zagreb 1981.

Poglavlje 5

M.Ožegović: Raspodjela trostruke nulte komponente struje kroz zemlju, dozemnu užad i uzemljenja, Energija br 5-6/80. Zagreb

M.Ožegović: Ispitivanje utjecaja dozernog užeta i uzemljenja stupova na raspodjelu trostruke nulte komponente struje, CIGRE, Beograd, 1981.

H.Koettwitz, H.Pundt: Berechnung elektrischer Energieversorgungsnetze, Band I, Mathematische Grundlagen und Netzparameter, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1968.

Poglavlje 6

M.Ožegović: Računanje struje i napona kod prekida jedne ili dviju faza jednostrukog dalekovoda, Elektroprivreda, Beograd br. 7-8/81.

M.Ožegović: Računanje struje i napona kod iskopčane jedne faze jednostrukog dalekovoda, Elektroprivreda, Beograd br. 11/12 1980.

Poglavlje 7

M.Ožegović: Prilike na dvostrukom dalekovodu kada je jedna trojka iskopčana, Elektroprivreda br. 9-10/81, Beograd.

Poglavlje 8

H.Požar: Visokonaponska rasklopna postrojenja, Tehnička knjiga, Zagreb 1967.

H.Golubović: Izabrana poglavlja relejne zaštite, Skripta, Beograd 1978.

ASEA - ISKRA: Distantna zaštita RAZLOG (priručnik za korisnika)

Schutztechnik (zbornik članaka raznih autora), Brown Boveri Mitteilungen, Band 65, Juni 1978.

F.Geise, G.Bergman: Schneller netzschutz mit Nachrishten-Kanälen, ETZ B, 18.Jhrg. (1966), Heft 24.

B.Stefanini: Prijenos električne energije I, Skripta, Zagreb 1963.