



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



Projekat iz predmeta:

Primena računara u elektroenergetici

TEMA RADA

PRORAČUN TOKOVA SNAGA
ALGORITMOM SUMIRANJA STRUJA

IME I PREZIME:

Srđan Radujko

Br. indeksa:

EE35/2016

Novi Sad, avgust 2020. godine

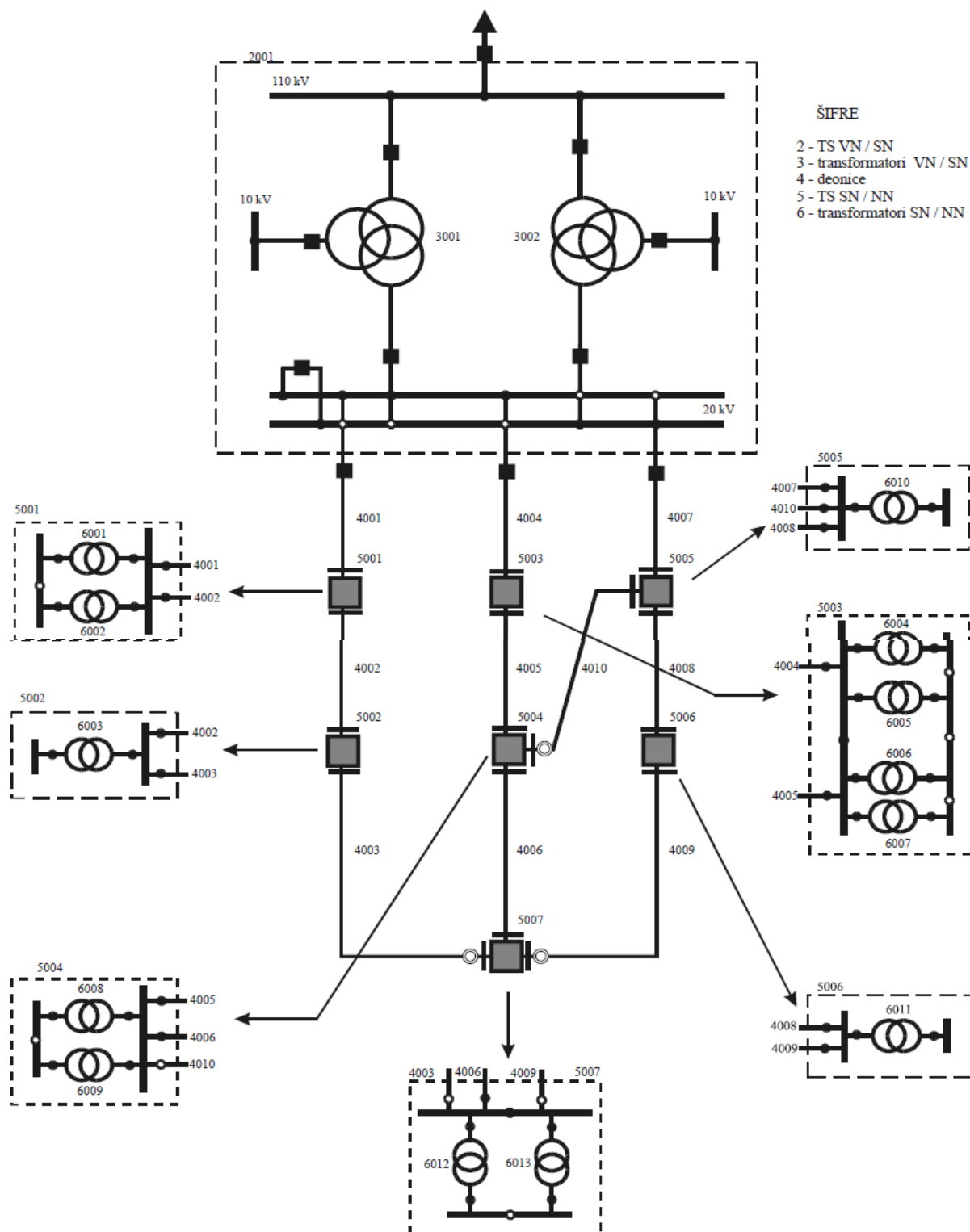
SADRŽAJ

Projektni zadatak.....	3
Elektroenergetski sistem.....	5
Trofazni vodovi.....	6
Osnovni podaci za vodove.....	7
Ekvivalentna šema voda – π - šema.....	9
Normalizacija.....	10
Proračun tokova snaga.....	12
Metodologija za tokove snaga.....	12
Algoritam sumiranja struja.....	14
Formiranje strukture mreže i numeracija čvorova.....	14
Sumiranje admitansi.....	17
Proračun injektiranih struja.....	17
Proračun struja po granama.....	18
Proračun napona u čvorovima.....	18
Ispitivanje uslova konvergencije.....	19
Prilog.....	20

PROJEKTNI ZADATAK

Razmatra se jedan deo elektroenergetskog sistema (EES) beskonačne snage. Režim je simetričan, direktnog redosleda. Sve je uravnoteženo.

Poznati su svi parametri elemenata sistema potrebnih za proračun algoritmom sumiranja struja. Ovi parametri se nalaze u ulaznim datotekama.



Slika 1- Razmatrana distributivna mreža

Parametri vodova u domenu simetričnih komponenti su jednaki za sve vodove i oni iznose:

- Redni:
 - $Z_d = (0.320 + j0.6015) \frac{\Omega}{\text{mile}}$
 - $Z_i = (0.320 + j0.6015) \frac{\Omega}{\text{mile}}$
 - $Z_i = (0.592 + j2.2986) \frac{\Omega}{\text{mile}}$
- Otočni:
 - $Y_{o1d} = Y_{o2d} = Y_{o1i} = Y_{o2i} = Y_{o10} = Y_{o20} = Y_o = 0.5 * j127.83 * 10^{-3} \frac{\mu S}{\text{mile}}$

Vodovi su modelovani π – šemom.

Potrebno je napisati program u programskom jeziku Fortran koji obezbeđuje:

- Učitavanje podataka o razmatranom sistemu iz ulaznih datoteka
- Izračunavanje parametara ekvivalentnih šema vodova
- Normalizaciju ekvivalentne šeme sistema
- Proračun tokova snaga algoritmom sumiranja struja gde se vrši računanje:
 - Injektiranih struja u čvorovima
 - Sumiranih struja u granama
 - Napona u čvorovima
- Izvršenje iteracija do ispunjenja zadatih uslova
- Ispis konačnih vrednosti u izlaznu datoteku

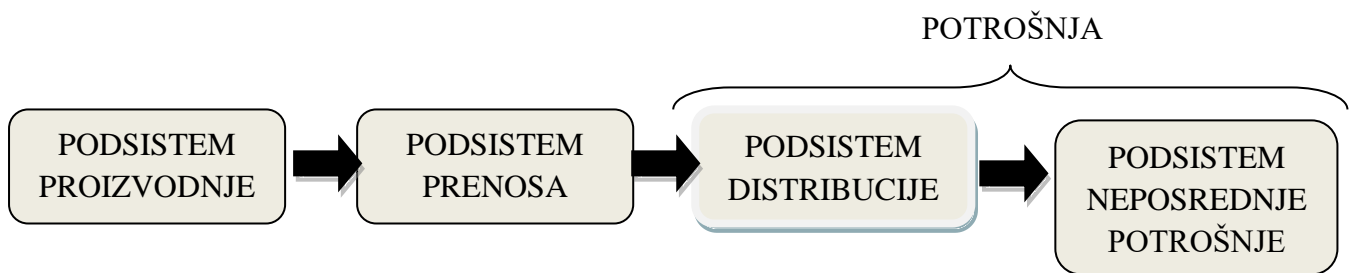
U okviru projekta je priložena teorijska osnova na kojoj se problem bazira.

ELEKTROENERGETSKI SISTEM

Elektroenergetski sistem (EES) obuhvata proizvodnju, prenos i distribuciju električne energije. Električna energija se proizvodi u elektranama, odakle se prenosi i distribuira do krajnjih potrošača.

Struktura elektroenergetskih sistema, s osnovnim elementima po podsystemima, prikazana je na slici 1. Za nju važi:

- Podsystem proizvodnje čine elektrane, koje se na podsystem prenosa priključuju preko generatorskih sabirnica.
- Podsystem prenosa čini (upetljana) prenosna mreža, koja se priključuje na generatorske sabirnice, do potrošačkih sabirnica.
- Podsystem distribucije čini distributivna mreža, koja se priključuje na potrošačke sabirnice i povezuje podsystem prenosa sa podsystemom neposredne potrošnje.
- Podsystem neposredne potrošnje čine individualni potrošači svih distributivnih mreža razmatranog elektroenergetskog sistema.



Slika 2 – Šematski prikaz strukture elektroenergetskih sistema

Pošto je razmatrani problem zadatka smešten u (radijalnu) distributivnu mrežu, podsystemu distribucije će biti posvećeno najviše pažnje.

Postoje četiri elementa naizmeničnih, trofaznih EES koji su od suštinskog značaja za proračune u elektroenergetskom sistemu. To su:

1. Generatori
2. Transformatori
3. Vodovi
4. Potrošači

Naredna razmatranja podrazumevaju sledeće:

- Elektroenergetski sistem, odnosno svaki njegov trofazni element je konstruisan kao uravnotežen,
- EES je u simetričnom režimu.

Na osnovu prethodnog sledi:

- Svaki trofazni element može se tretirati pofazno, odnosno “rastaviti” na tri nezavisna monofazna elementa (predstavnik) i predstaviti jedinstvenom pogonskom ekvivalentnom šemom koja se prikazuje pomoću pogonskih parametara.
- Pošto je reč o simetričnom režimu EES, odnosno svakog od njegovih elemenata, znači da nema povratne struje, za koju bi bio potreban neutralni provodnik n, te se on izostavlja.

TROFAZNI VODOVI

Vodvi su elementi EES namenjeni prenosu i distribuciji (“raspodeli”) napona i električne energije.

Postoje dve vrste vodova: nadzemni (vazdušni) i kablovski (kablovi). Nadzemni su često jeftiniji i češće se koriste, dok se kablovski često postavljaju u zemlju, zbog čega su skuplji, ali i bezbedniji. O njihovim daljim sličnostima i razlikama neće biti reči pošto nisu od suštinskog značaja za temu koja se obrađuje u ovom projektu.

Osnovni podaci za vodove

Osnovni podaci za vodove su nominalni napon, struja i snaga, uz još i pogonske parametre voda (rezistansu, reaktansu, konduktansu i susceptansu) kao i dužinu voda.

Dalje slede objašnjenja navedenih podataka voda:

- Nominalni linijski napon - V_n (odnosno fazni napon - $U_n = V_n / \sqrt{3}$) napon je kojem vod, u predviđenom veku trajanja, može trajno biti izložen, a da se pri tom električki ne ošteti, odnosno napon za koji je vod konstruisan. On je u direktnom odnosu s nivoom izolacije voda.
- Nominalna (termički dopuštena) struja voda - I_n je fazna struja kojoj vod, u predviđenom veku trajanja, može biti trajno izložen, a da se pri tome termički ne ošteti, odnosno struja za koju je vod konstruisan. Ona direktno korespondira s količinom bakra ili aluminijuma provodnika.
- Nominalna trofazna snaga voda - S_n je proizvod nominalnog napona i nominalne struje voda:

$$S_n = 3 * U_n * I_n = \sqrt{3} * V_n * I_n$$

Obzirom da je ona direktni proizvod prve dve veličine, podatak o nominalnoj snazi je suvišan i obično se izostavlja.

Osnovni pogonski parametri voda obično se daju kao podužni:

- Podužna rezistansa: $r = \frac{R}{l} \left[\frac{\Omega}{\text{jedinica dužine}} \right]$
- Podužna reaktansa: $x = \frac{\omega L}{l} \left[\frac{\Omega}{\text{jedinica dužine}} \right]$
- Podužna susceptansa: $b = \frac{G}{l} \left[\frac{\mu S}{\text{jedinica dužine}} \right]$
- Podužna konduktansa: $g = \frac{\omega C}{l} \left[\frac{\mu S}{\text{jedinica dužine}} \right]$

Ovi pogonski parametri mogu se opisati sa četiri pogonska *makro efekta voda*:

1. *Redna otpornost R* – Ovaj makro efekat dolazi do izražaja samo kada postoji struja kroz fazne provodnike voda. Toj struji se suprotstavlja otpornost provodnika R . Ta otpornost je srazmerna sa odnosom dužine voda (provodnika) l i površine poprečnog preseka provodnika S :

$$R: \frac{l}{S}$$

Otpornosti golih provodnika i kablova su približno iste vrednosti, što je posledica činjenice da se za prenos iste snage istim naponom zahteva ista struja. Ta ista struja zahteva istu količinu bakra ili aluminijuma. Zbog otežanog hlađenja, poluprečnik faznog provodnika kabla treba da bude nešto veći od poluprečnika odgovarajućeg voda golih provodnika. Zbog toga je redna otpornost kabla nešto manja od redne otpornosti voda golih provodnika, za istu snagu i napon (struju).

2. *Redna induktivnost L* – Ovaj makro efekat dolazi do izražaja samo kada postoji naizmenična (načelno promenljiva) struja kroz fazne provodnike voda. Ona se javlja zbog toga što se svakoj konturi koju čini par faznih provodnika ili par faznih provodnika i zemlja (tj. neutralni provodnik n), mogu pridružiti odgovarajuće sopstvene induktivnosti, kao i odgovarajuće međusobne induktivnosti sa ostalim konturama trofaznog voda. Strujama kroz te konture suprotstavljaju se elektromotorne sile indukovane usled promene flukseva izazvanih tim strujama. Induktivnost L je srazmerna logaritmu odnosa međusobnog rastojanja provodnika d , koji čine konturu i poluprečnika provodnika r :

$$L: \ln \frac{d}{r}$$

Induktivnost kabla je mnogo manja od inuktivnosti golih provodnika iz prostog razloga što je rastojanje između provodnika kod kablova d mnogo manje nego kod vodova golih provodnika.

3. *Otočna provodnost G* – Ovaj makro efekat dolazi do izražaja samo kada su fazni provodnici pod naponom. On se, pre svega, javlja usled nesavršenosti izolatora. Preko njihove, uglavnom zaprljane površine, odvede se struje sa faznih provodnika i u zemlju. To je *efekat puzajućih struja*. Pored toga, na površini golih provodnika vodova postoji još jedan otočni efekat, a to je *efekat korone*. On se javlja na svakom naelektrisanom telu ako je električno polje koje to telo izaziva u njegovoj okolini veće od dielektrične čvrstine okolnog medijuma (u ovom slučaju vazduha). Efekat korone se ne može izbeći na vodovima golih provodnika vrlo visokih napona (naponski nivoi od 220 kV i 400 kV...). On je, s obzirom na to da su provodnici vodova *použeni*, povećan u odnosu na situaciju “glatkih” provodnika.

Otočnu provodnost G je teško analitički iskazati pošto varira od zaprljanosti izolatora, vremenskih prilika (korona je na vlažnom vremenu izraženije) itd. U svakom slučaju, oba efekta su izraženija što je potencijal (napon) provodnika veći.

Otočna provodnost kablova se razlikuje od one kod golih provodnika, jer su rezultat različitih efekata. Provodnost kod kabla čini gubitak energije u dielektriku koji je definisan tangensom ugla gubitaka $\tan \delta$, pošto dva provodnika ili provodnik i zemlja nisu idealni kondenzatori. Kod kablova nema efekta puzajućih struja, a obično nema ni efekta korone, osim u slučajevima kada se desi da izolacija kabla “probije”.

4. *Otočna kapacitivnost C* – Ovaj makro efekat dolazi do izražaja samo kada su fazni provodnici pod naizmeničnim (promenljivim) naponom. On se javlja zbog toga što se svaki provodnik karakteriše nekom kapacitivnošću, tj. zato što se svaki par faznih provodnika i svaki par fazni provodnik – zemlja (neutralni provodnik) predstavljaju dve “ploče kondenzatora”. Tako se u vodu, njegovim stavljanjem u pogon, uspostavljaju otočne – kapacitivne struje kroz dielektrik (vazduh), od provodnika ka provodniku i od provodnika ka zemlji. Kapacitivnost C je obrnuto srazmerna logaritmu odnosa između međusobnog rastojanja provodnika d i njihovog poluprečnika r :

$$C: \left(\ln \frac{d}{r} \right)^{-1}$$

Zbog srazmere kapacitivnosti i recipročne vrednosti logaritma odnosa međusobnog rastojanja i poluprečnika provodnika, kod kablova, kapacitivnost je obično mnogo veća od kapacitivnosti golih provodnika, a to je posledica činjenice da je, kao što je već navedeno, rastojanje provodnika d kod kablova mnogo manje nego kod vodova golih provodnika.

Kvantitativni pokazatelji sva četiri makro efekta trofaznog uravnoteženog voda mogu se odrediti na osnovu dva eksperimenta – *eksperimenta kratkog spoja* i *eksperimenta praznog voda*, ali o njima neće biti više reči pošto izlaze iz okvira obrađivane teme.

Ekvivalentna šema voda – π - šema

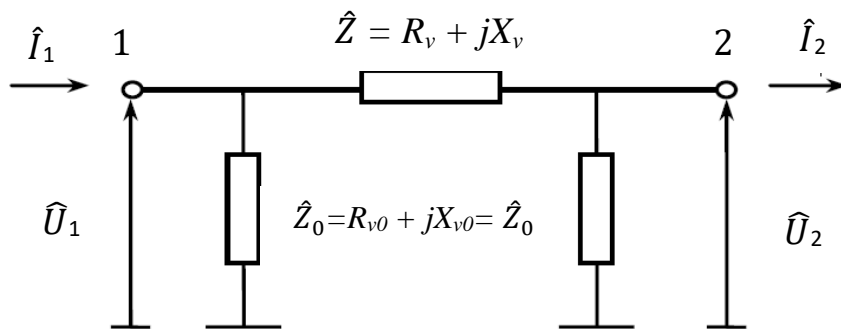
Radi analize električnih pojava u vodovima javlja se potreba za prikazivanjem vodova zamenskim-ekvivalentnim šemama. Ove šeme su crteži fiktivnih električnih kola sastavljenih od osnovnih elektrotehničkih elemenata: otpornika, prigušnica i kondenzatora. Takva kola imaju oblik četvorokrajnika, tj. imaju svoj ulaz i izlaz, početak i kraj. Parametri elemenata su takvi da su električne veličine (naponi, struje, snage) na ulazu i izlazu ekvivalentne (jednake po vrednosti) električnim veličinama na početku i kraju posmatranog voda i to kako po intenzitetu tako i po faznim stavovima. Ekvivalentne šeme se mogu smatrati pomoćnim sredstvom koje nam omogućuje da relativno lako, posmatrajući njene elemente, napišemo matematičke relacije koje čine matematički model voda, umesto da ih pamtimo.

Trofazni uravnotežen vod (i uopšte trofazni uravnotežen element), u simetričnom režimu "raspreže" po fazama a , b i c , odnosno predstavlja se sa tri ekvivalentne monofazne šeme. Nakon raspoređivanja, za tri monofazne šeme (šeme faza a , b i c) važe sledeće osobine:

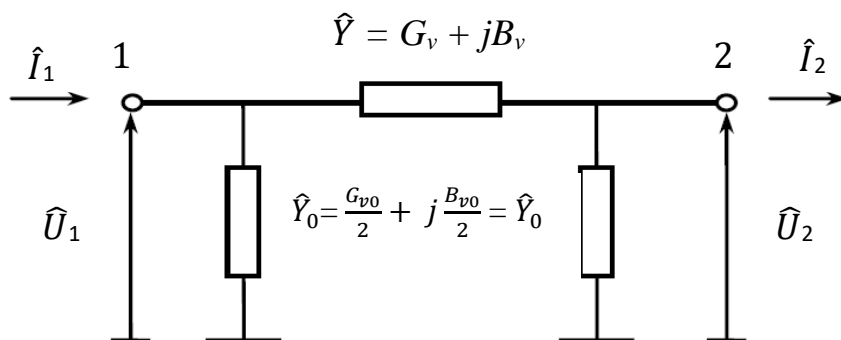
- redni parametri imaju međusobno jednake vrednosti;
- otočni parametri imaju međusobno jednake vrednosti;
- između šema nema galvanskih i/ili elektromagnetskih sprega, odnosno sve šeme su u potpunosti raspregnute (međusobni parametri imaju nulte ili zanemarivo male vrednosti).

Uzimajući u obzir prethodno opisane kvantitativne pokazatelje, tj. pogonske makro efekte tretirane diskretno, pogonsko kolo trofaznog voda može se predstaviti u nekoliko varijanti. Međutim, najčešće korišćen način prikaza pogonskog kola je upravo π – šema koja se može prikazati kao *impedantna varijanta* i *admitantna varijanta*.

Kako se u praksi najčešće raspolaže sledećim podacima o vodu: $R_v(R)$, $X_v(\omega L)$, $G_{v0}(G)$ i $B_{v0}(\omega C)$ na osnovu njih nije teško rekonstruisati impedantnu (slika 3.) i admitantnu (slika 4.) varijantu pogonskog kola trofaznog voda.

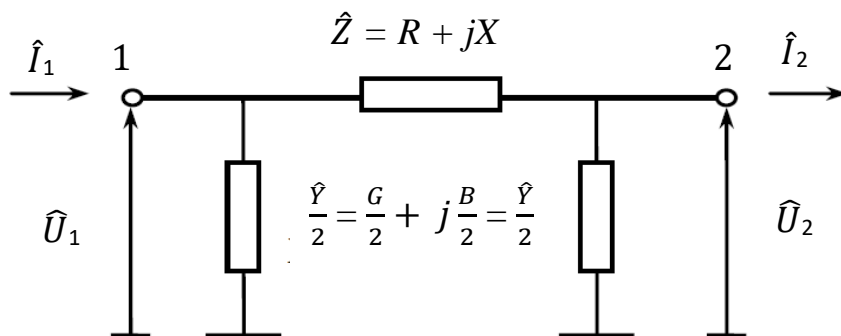


Slika 3. – Impedantna varijanta π -šeme



Slika 4. – Admitantna varijanta π -šeme

Ipak, najčešće primenjivana varijanta je kombinacija prethodne dve pomenute – *impedantno-admitantna varijanta* (slika 5.).



Slika 5. – Impedantno-admitantna varijanta π -šeme

Redni parametri R i X čine rednu impedansu voda $\hat{Z} = R + jX$, a otočni parametri G i B čine dve jednake otočne admitanse voda $\frac{1}{2}\hat{Y} = \frac{1}{2}G + j\frac{1}{2}B$.

NORMALIZACIJA

Sistem relativnih jedinica se zasniva na baznim vrednostima za sve veličine i parametre u sistemu. Osnovne bazne veličine su: jedinstvena bazna snaga za ceo sistem i po jedan bazni napon za svaki naponski nivo razmatranog elektroenergetskog sistema. Na osnovu njih se izvode bazne vrednosti za sve ostale veličine i parametre (struje, impedanse, admitanse itd.) po naponskim nivoima.

U standardnom sistemu relativnih jedinica, sve bazne vrednosti su realne. Bazna snaga se bira po želji, a bazni naponi se biraju sa ciljem da se eliminiše najveći broj idealnih odnosa transformacije u ekvivalentnoj šemi razmatranog sistema. Da bi se taj cilj postigao, bazni naponi se biraju tako da su njihovi odnosi jednaki sa odnosima transformacije korespondentnih transformatora.

Relacije za pofazne vrednosti baznih napona:

$$U^b = V^b / \sqrt{3}$$

gde je V^b usvojena bazna vrednosti faznog napona.

Bazni naponi se biraju za svaki naponski nivo dok je bazna snaga jedinstvena za ceo sistem, i glasi:

$$S^b = S_{(3)}^b / 3$$

gde je S^b trofazna vrednost bazne snage, a $S_{(3)}^b$ fazna vrednost bazne snage.

Na osnovu baznih veličina snaga i napona, izvedene su bazne vrednosti za impedanse i admitanse:

$$Z^b = \frac{(V^b)^2}{S^b} \quad [\Omega]$$

$$Y^b = \frac{1}{Z^b} = \frac{S^b}{(V^b)^2} \quad [S]$$

Pomoću prethodno izračunatih baznih vrednosti, dalje se vrši normalizacija parametara odgovarajućih grana sistema:

$$\hat{z}_i = \hat{Z}_i / Z^b \quad [\text{r.j.}]$$

$$\hat{y}_{o1i} = \hat{y}_{o2i} = \hat{Y}_{o1i} / Y^b = \hat{Y}_{o2i} / Y^b \quad [\text{r.j.}]$$

gde je i indeks grane, a \hat{Z}_i , \hat{Y}_{o1i} i \hat{Y}_{o2i} impedansa i admitanse grane u relativnim jedinicama (r.j.).

Smisao sistema relativnih jedinica leži u eliminaciji (svođenju na jedinične vrednosti) idealnih odnosa transformacije iz ekvivalentnih šema transformatora, tj. svođenju elektroenergetskih sistema sa višeg naponskog nivoa na sisteme jedinstvenih naponskih nivoa. Ovaj sa efekat

postiže izborom baznih napona tako da je nominalni odnos transformacije svakog transformatora u sistemu jednak odnosu baznih napona naponskih nivoa koje taj transformator povezuje.

PRORAČUN TOKOVA SNAGA

Proračun tokova snaga se sastoji u proračunu promenljivih stanja (odnosno, kompletnog režima) distributivne mreže, na bazi poznatog napona izvora napajanja mreže (korena) i poznatih potrošnji u svim čvorovima mreže. Ova funkcija predstavlja jednu od najznačajnijih i najšire korišćenih energetske funkcije u upravljanju distributivnim mrežama. Ona se koristi ili samostalno, ili kao moduo u okviru drugih energetske funkcije.

Najpre je data opšta postavka problema proračuna tokova snaga u distributivnim mrežama i metodologije za njegovo rešavanje. Zatim su predstavljeni specijalizovani algoritmi za proračun tokova snaga u radijalnim i slaboupetljivim distributivnim mrežama.

METODOLOGIJA ZA TOKOVE SNAGA

Distributivne mreže, za razliku od prenosnih mreža, karakteriše relativno slaba potencijalna upetljanost i radijalni pogon. Pored toga, odnos R/X kod vodova i kablova u distributivnoj mreži je daleko viši nego u prenosnim mrežama. Navedene razlike su prouzrokovale da standardne metode za proračun tokova snaga u prenosnim mrežama imaju značajno manju efikasnost kada se primenjuju u distributivnim mrežama.

Naime, većina poznatih i široko korišćenih iterativnih algoritama za proračun tokova snaga u prenosnim mrežama (Newton-Raphson-ov postupak, brzi-raspregnuti postupak, Gaus-Seidel-ov postupak) bazirana je na matričnom pristupu. U matričnom pristupu se koristi matrica admitansi čvorova sistema i njeni derivati (matrica Jacobian-a itd.). Takvim pristupom se zahteva da se u svakoj iteraciji reši linearizovana matrica sistema dimenzija $(N_{\text{čv}} \times N_{\text{čv}})$, gde $(N_{\text{čv}})$ predstavlja broj čvorova u sistemu.

Međutim, velika dimenzionalnost realnih distributivnih mreža i njihova slaba potencijalna upetljanost, kao i relativno visok odnos R/X , prouzrokovali su vrlo slabu uslovljenost matrica kojom se opisuju takvi problemi.

Na taj način, svi navedeni numerički postupci, koji su bazirani na matričnom pristupu, postaju neefikasni u rešavanju problema proračuna tokova snaga u distributivnim mrežama. Ova neefikasnost se ogleda u sporom proračunu, velikom broju potrebnih iteracija, maloj tačnosti proračuna, a često i nemogućnosti da postupak uopšte i konvergira.

Da bi se ovi problemi prevazišli, kao i da bi se ovi proračuni maksimalno ubrzali korišćenjem poznavanja karakteristika distributivne mreže, razvijeni su specijalizovani algoritmi za proračun tokova snaga u distributivnim mrežama. Ovi postupci polaze od glavne pretpostavke

da je distributivna mreža radijalna. Koristeći se ovom pretpostavkom razvijen je čitav niz vrlo efikasnih numeričkih postupaka koji su orijentisani ka granama. U ovim postupcima proračun se vrši po granama distributivne mreže, čime se potiskuje potreba za rešavanjem slabo uslovljenih matričnih sistema jednačina. Na taj način, značajno se povećava brzina proračuna i opadaju memorijski zahtevi.

Naime, pri porastu dimenzija razmatranog sistema, kod algoritama orjentisanih prema granama, zahtevi za memorijom i vreme proračuna rastu linearno. S druge strane, kod matrično orjentisanih algoritma, zahtevi za memorijom rastu kvadratno, a vreme proračuna raste sa trećim stepenom.

Pored ovih prednosti, pokazuje se da specijalizovani algoritmi orjentisani prema granama veoma brzo konvergiraju, postižući vrlo veliku tačnost proračuna. Sve navedene prednosti važe kada se razmatra distributivna mreža u radijalnom pogonu, što je i uobičajena praksa. Međutim, u određenim slučajevima potrebno je razmotriti i pogon distributivne mreže sa malim brojem petlji – slaboupetljani pogon. Ovakav pogon se u specijalizovanim algoritmima rešava primenom kompenzacije metode. Korišćenjem ove metode uvažava se efekat upetljanosti distributivne mreže, pri čemu se i dalje u suštini koriste specijalizovani algoritmi orjentisani prema granama. S obzirom da je potencijalna upetljanost realnih distributivnih mreža relativno mala, primenom kompenzacije metode ne gubi se bitnije na efikasnosti proračuna specijalizovanim algoritmima.

U distributivnim mrežama postoje generatori malih snaga (od nekoliko desetina [kW] do nekoliko [MW]) – distributivni generatori. U najvećem broju slučajevi ovi generatori rade u režimu konstantne proizvodnje aktivne (reaktivne) snage, dok se u malom broju slučajeva koriste i za regulaciju napona. Za uvažavanje pomenutih regulacionih efekata ovih generatora koristi se kompenzaciona metoda.

Specijalizovani algoritmi za proračun tokova snaga u radijalnim distributivnim mrežama mogu se podeliti u četiri grupe:

1. Algoritam sumiranja struja,
2. Algoritam sumiranja snaga,
3. Algoritam sumiranja admitansi,
4. Kombinovani algoritam

Ovi algoritmi se uglavnom razlikuju po načinu proračuna i po mogućnostima za modelovanje potrošnje. Potrošnja se u svim algoritmima za proračune tokova snaga u distributivnim mrežama modeluje na jedan od tri načina:

- kao naponski nezavisna potrošnja (ovaj tip potrošnje označava se kao potrošnja tipa konstantne snage)
- potrošnja linearno zavisna od napona (ovaj tip potrošnje označava se kao potrošnja tipa konstantne struje) i

- potrošnja kvadratno zavisna od napona (ovaj tip potrošnje označava se kao potrošnja tipa konstantne impedanse).

Kada je reč o strukturi kola za proračun tokova snaga i kratkih spojeva, ona može biti ista, ali se i može značajno razlikovati. Ako se ima u vidu da je često od interesa za proračune tokova snaga režim samo u SN delovima mreže, tada se iz strukture kola mogu izostaviti grane koje bi se dobile ekvivalentiranjem transformatora VN/SN1 /SN2 , kao i grane od transformatora SN/NN. Na taj način se smanjuje broj čvorova kola.

Kod kratkih spojeva i posebno relejne zaštite, od interesa su praktično svi delovi (ne samo SN delovi), tako da je odgovarajuća struktura kola i broj čvorova u njemu veći.

ALGORITAM SUMIRANJA STRUJA

Metoda sumiranja struja, poznatija kao Shirmohammadi-ev algoritam, predstavlja iterativni postupak za proračun tokova snaga. Algoritam počinje sa inicijalizacijom postupka. Ova inicijalizacija se sastoji u učitavanju podataka o distributivnoj mreži, numeraciji grana i čvorova po lejerima i setovanja indeksa iteracija (h) na početnu vrednost ($h = 1$). Pre toga je izvršena normalizacija svih zadatih parametara mreže.

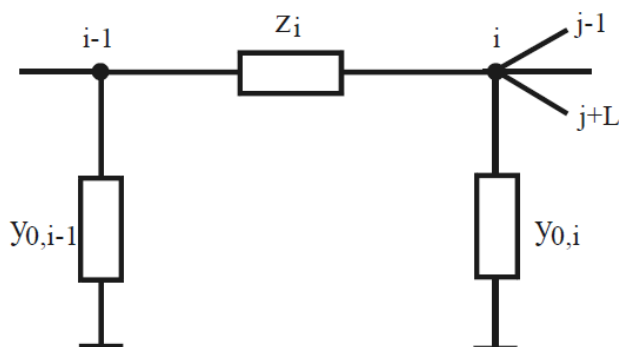
Formiranje strukture mreže i numeracija čvorova

Nakon normalizacije elemenata mreže i njihovog predstavljanja odgovarajućim ekvivalentnim šemama dobija se odgovarajuće kolo u kojem je potrebno numerisati čvorove i grane. Numeracija grana, odnosno, čvorova distributivne mreže nije od interesa za teorijski deo proračuna, ali je u algoritmima i računarskoj realizaciji proračuna to vrlo važan momenat, budući da se pogodnom numeracijom mogu značajno redukovati vreme proračuna i utrošena memorija. Za proračune u distributivnim mrežama pogodno je numerisati čvorove i grane mreže po lejerima (nivoima).

Neka se razmatra radijalna mreža sa jednim izvorom, ukupno (n_{cv}) čvorova i (n_{gr}) grana. Prvi čvor je izvor mreže – "koren". On je numerisan sa "0". Najčešće se kao koren biraju neke od sabirnice u transformatorskim stanicama VN/SN1 /SN2 . Da li će to biti čvor kome su korespondentne VN ili neke od SN sabirnice zavisi od toga da li je od interesa da se u proračunima odgovarajućih veličina obuhvati i transformator VN/SN1 /SN2 . Dakle, preostalih ($n_{cv} - 1$) čvorova numerisani su brojevima od (1) do (n_{gr}). U radijalnim mrežama broj čvorova (n_{cv}) je za jedan veći od broja grana ($n_{gr} = n_{cv} - 1$), dok jednak ili veći broj grana od broja čvorova znači da u kolu postoji jedna ili više petlji.

Na slici 6. je prikazana jedna grana (i) kola, predstavljena π - šemom. Čvor na desnom kraju grane je dalji od korena i njegov indeks je isti kao indeks grane. Na slici je simbolično

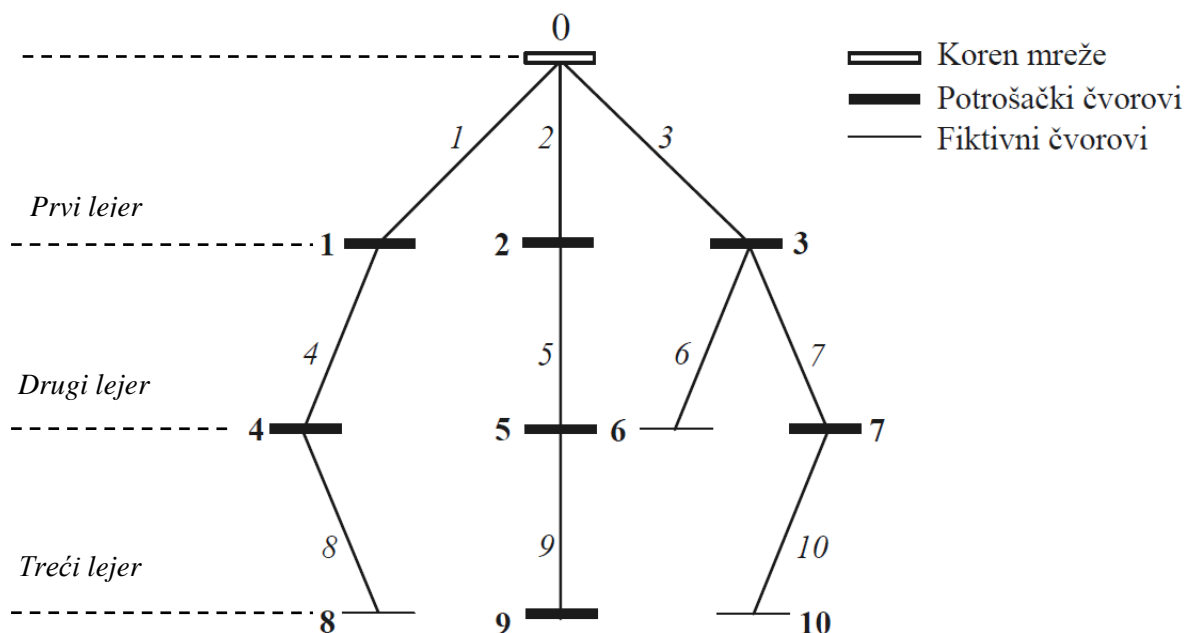
označeno da sa tog čvora polaze grane koje pripadaju sledećem lejeru. Redni elementi grane su dati preko impedanse, a otočni su predstavljeni kao sumirane admitanse čvorova.



Slika 6. – Pogonska ekvivalentna π - šema sa relativnim veličinama i sumiranim admitansama

Numeracija grana i čvorova po lejerima se vrši kao što je prikazano na slici 7. Na slici 7. se nalazi šema sistema zadatog u zadatku. Indeksi čvorova su napisani bold ciframa, dok su italikom napisani indeksi grana. Prvi čvor (odnosno nulti) je čvor korena i indeksira se nulom.

Najpre se numerišu grane koje su svojim jednim krajem vezane za koren. To su grane prvog lejera i one se numerišu počevši od 1 i koristeći sve prirodne brojeve do ukupnog broja tih grana. Čvorovi na drugim krajevima tih grana numerišu se istim brojevima kao i grane (ovi čvorovi i grane čine prvi lejer).



Slika 7. – Numeracija čvorova po lejerima
(šema mreže iz zadatka)

Redosled numeracije grana (i čvorova) unutar istog lejera je proizvoljan. Međutim, najbolje je numerisati “redom”, s leva na desno, jer se time olakšava račun i rad programa.

Figure 1 consists of two graphs, (a) and (b). Graph (a) is a tree with 6 vertices labeled 0 to 5. Vertex 0 is at the top, connected to vertex 1 by an edge labeled 1. Vertex 1 is connected to vertices 2, 3, and 4 by edges labeled 2, 3, and 4 respectively. Vertex 3 is connected to vertex 5 by an edge labeled 3. Graph (b) shows the resulting graph G . It contains all the vertices and edges of graph (a), but with an additional vertex 6 and edge. Vertex 6 is connected to vertex 5 by a dashed edge labeled 5, and to vertex 4 by a solid edge labeled 6. This creates a cycle with vertices 3, 4, 5, and 6.

Na ovaj način formalno se ne menja struktura kola, ali se istovremeno omogućuje da se uklanjanjem kratkospojnika generiše kolo sa radijalnom strukturom (na slici 11.6b kratkospojnik je prikazan debljom isprekidanom linijom). Upravo kolo sa radijalnom strukturom biće jedan od osnovnih zahteva za realizaciju proračuna u distributivnim mrežama.

- Kolo je implicitno prevedeno u radijalnu strukturu. Kao što je pomenuto to će biti jedan od osnovnih uslova za praktičnu primenu algoritama za proračune u distributivnim mrežama. Eventualna mesta otvaranja petlji pri tome se identifikuju, što je, takođe, od neposrednog značaja za pomenute proračune.
- Ako se pri izvršenju algoritma grane uzimaju po rastućem indeksu, onda će se bez dodatnog testiranja u postupku obrađivati sve grane jednog, a zatim sledećeg (po indeksu većeg) lejera. U slučaju da se grane uzimaju po opadajućem indeksu, onda će obrađivati sve grane jednog, a zatim sledećeg (po indeksu manjeg) lejera. Ova činjenica predstavlja jednu od osnova za efikasnu primenu algoritama za proračune u distributivnim mrežama. Ako se u toku numeracije upamte i ukupni brojevi grana po lejerima, onda je identifikovanje svih grana bilo kog lejera i identifikovanje puta od bilo kog čvora do izvora maksimalno pojednostavljeno.

Sumiranje admitansi

Proračun tokova snaga započinje proračunom ukupnih admitansi u čvorovima. Ukupna admitansa u čvoru je jednaka sumi otočnih admitansi grana koji su vezane za taj čvor. Primera radi, biće prikazana sumirana admitansa u čvoru 3 sa slike 7:

$$\hat{y}_{e3} = \hat{y}_{o3} + \hat{y}_{o6} + \hat{y}_{o7}$$

Nakon numeracije čvorova i grana, normalizacije, sumiranja ekvivalentnih admitansi čvorova započinje iterativni postupak. Svaka iteracija, sastoji se od sledeća tri koraka:

1. korak: **Proračun injektiranih struja** - Proračuni u ovom koraku izvode se za svaki čvor (i), počevši od čvorova u prvom lejeru, prema sledećoj relaciji:

$$i_i^{(h)} = \left(\frac{s_{p,i}}{v_i^{(h-1)}} \right)^* + y_{e,i} \cdot v_i^{(h-1)} \quad i = 1, 2, \dots, n_{\text{čv}} - 1$$

gde su:

$i_i^{(h)}$ - struja injektirana u čvoru (i) u iteraciji (h),

$s_{p,i}$ - specificirana snaga potrošnje u čvoru (i),

$v_i^{(h-1)}$ - napon u čvoru (i) u iteraciji ($h - 1$),

$y_{e,i}$ - suma admitansi svih otočnih elemenata u čvoru (i),

$n_{\text{čv}}$ - broj čvorova

U prvoj iteraciji vrednosti napona svih čvorova su jednake vrednosti napona korena.

Pošto je u ukupan broj čvorova uračunat i nulti čvor (koren), indeksiranje ide od jedinice do ($n_{\text{čv}} - 1$).

Prvi član gornje relacije predstavlja struju potrošnje u čvoru (i) u iteraciji (h):

$$i_{p,i}^{(h)} = \left(\frac{s_{p,i}}{v_i^{(h-1)}} \right)^*$$

Drugi član u toj relaciji predstavlja kapacitivnu struju grane (i) u iteraciji (h) za usvojene referentne smerove kao na slici 9:

$$i_{p,i}^{(h)} = y_{e,i} \cdot v_i^{(h-1)}$$

Sve oznake korišćene u napred navedenom tekstu su prikazane na slici 9. koja predstavlja jednu granu razmatrane radijalne distributivne mreže.

2. korak: **Proračun struja po granama ("zamena unazad")** – Ovaj proračun se izvodi za svaku granu, počevši od grana u poslednjem lejeru, prema sledećoj relaciji:

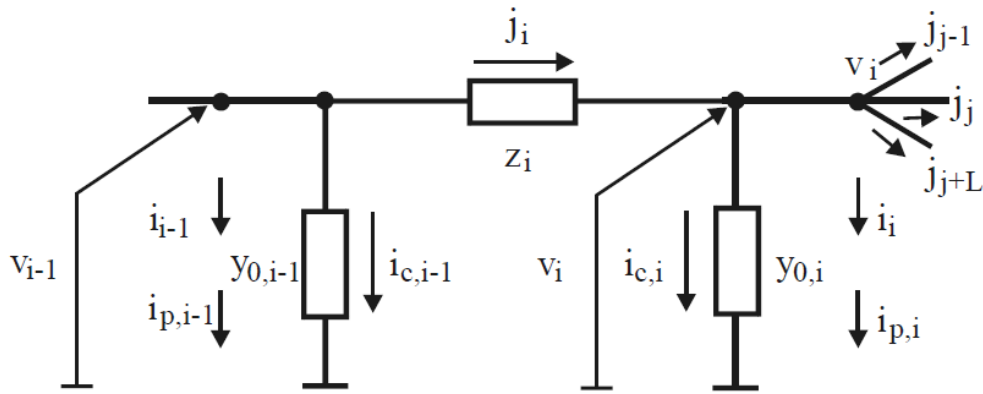
$$j_i^{(h)} = i_i^{(h)} + \sum_{j \in i} j_j^{(h)}, \quad i = n_{gr}, n_{gr} - 1, \dots, 1,$$

gde su:

$j_i^{(h)}$ - struja u grani (i) u iteraciji (h),

$\sum_{j \in i} j_j^{(h)}$ - suma struja svih grana koja polaze iz čvora (i) u iteraciji (h),

n_{gr} - broj grana (odnosno broj čvorova umanjen za jedan)



Slika 9. – Ekvivalentna šema grane

3. korak: **Proračun napona u čvorovima ("zamena unapred")** – Ovaj proračun se izvodi za svaki čvor, počevši od čvora u prvom lejeru, prema sledećoj relaciji:

$$v_i^{(h)} = v_{i-1}^{(h)} - z_i \cdot j_i^{(h)}, \quad i = 1, \dots, n_{\check{v}}$$

gde su:

$v_{i-1}^{(h)}$ - napon u čvoru ($i - 1$) u iteraciji (h)

z_i - redna impedansa grane (i)

Ispitivanje uslova konvergencije

Na kraju svake iteracije se ispituju uslovi konvergencije:

$$Dp^{(h)} < \varepsilon \quad \text{i}$$

$$Dq^{(h)} < \varepsilon ,$$

gde su:

$$Dp^{(h)} = \max \left\{ \left| \Delta p_i^{(h)} \right| \right\},$$

$$Dq^{(h)} = \max \left\{ \left| \Delta q_i^{(h)} \right| \right\}.$$

Uslovi konvergencije su ispunjeni u slučaju kad su zadovoljene gornje nejednakosti, odnosno, kada je vrednost maksimalnog debalansa aktivne $Dp^{(h)}$ i reaktivne snage $Dq^{(h)}$ manja od unapred specificirane vrednosti ε . U opštem slučaju, vrednosti za proveru konvergencije mogu biti različite za aktivnu i reaktivnu snagu.

Debalansi snage za svaki čvor se računaju prema sledećim relacijama:

$$\Delta p_i^{(h)} = \operatorname{Re}(\Delta s_i^{(h)}) = \operatorname{Re}(s_i^{(h)} - s_i)$$

$$\Delta q_i^{(h)} = \operatorname{Im}(\Delta s_i^{(h)}) = \operatorname{Im}(s_i^{(h)} - s_i)$$

gde su:

$\Delta s_i^{(h)}$ - debalans snage u čvoru (i) u iteraciji (h),

$s_i^{(h)}$ - injektirana snaga u čvoru (i), proračunata preko napona $v_i^{(h)}$ i struja $i_i^{(h)}$ u iteraciji (h), računata prema sledećoj relaciji:

$$s_i^{(h)} = v_i^{(h)} \cdot \left(i_i^{(h)} \right)^* - (y_i)^* \cdot \left| v_i^{(h)} \right|^2.$$

Ukoliko su uslovi konvergencije ispunjeni iterativni postupak se završava, u suprotnom slučaju prelazi se na sledeću iteraciju.

Sušтина ефикасности горе приказаног поступка лежи у чињеници да је у радијалној мрежи могуће веома добро погодити расподелу струја по гранама већ у првој итерацији. Наиме, са познатим snagama потрошње у свим чворовима и почетном апроксимацијом napona, могуће је већ у првој итерацији погодити струје по свим гранама са tačnoшћу већом од 90%. Takva tačnost se dobija već posle prvog koraka, odnosno proračuna struja po granama ("zamena unazad"). Zatim sa tako pogođenim strujama moguće je značajno popraviti početnu aproksimaciju vrednosti napona u svim čvorovima koristeći se drugim korakom, odnosno proračunom

napona u čvorovima (“zamena unapred”). Postupak se ponavlja do konačne konvergencije do koje se dolazi najčešće već posle par iteracija.

PRILOG

Podaci o elementima EES iz zadatka i podaci potrebni za rad programa se nalaze u spoljašnjim datotekama.

Datoteka **Grid_Layout.txt**

Naziv podatka	Format	Značenje
Number_of_Nodes	i1	Ukupan broj čvorova, zajedno sa (nultim) čvorom korena
Number_of_Consumer_Nodes	i1	Ukupan broj čvorova sa potrošnjom
B_S(i)	i1	Početni čvor grane
Line_Length(i)	i4	Dužina grane (indeksi grane i kranjeg čvora su isti)
B_E(i)	i1	Kranji čvor grane

Datoteka **Power_Line_Parameters.txt**

Naziv podatka	Format	Značenje
Zd	f5.3, f7.4	Realna i imaginarna vrednost podužne impedanse (u direktnom režimu) – jednaka za sve vodove
Y0	e11.2	Imaginarna vrednost podužne admitanse (pošto je $G = 0$, nema realnog dela) – jednaka za sve vodove
Consumer_Node(i)	i2	Indeks potrošačkog čvora
S(i)	e14.4, e14.5	Realni i imaginarni deo kompleksne snage potrošačkog čvora
V1	e10.2	Linijski napon čvora korena
Sb	e10.0	Bazna vrednost kompleksne snage

Datoteka **Setup.txt**

Naziv podatka	Format	Značenje
Units_Selector	i1	Odabir mernih jedinica za dužinu (1 – metri, 2 – stope)
Max_Iter	i2	Maskimalan broj iteracija (u slučaju da je konvergiranje neuspešno)
Epsilon	e7.0	Uslov iteracije