

PROJEKAT

Proračun tokova snage distributivne mreže

- Dokumentacija -

Stefan Đorđević

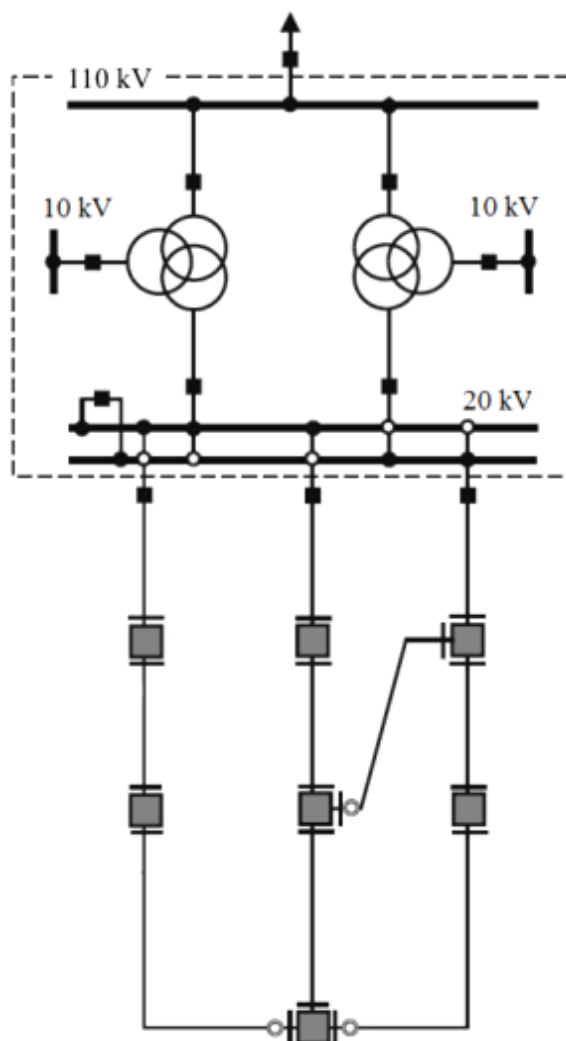
S A D R Ź A J

1. ZADATAK	3
2. DISTRIBUTIVNA MREŽA	7
2.1. Potrošač	7
2.2. Vodovi	8
2.3. Transformatori	10
3. TOKOVI SNAGA	11
3.1. Klasifikacija čvorova	12
3.2. Normalizacija	13
3.3. Formiranje strukture mreže	13
3.4. Algoritam sumiranja struja	15
3.5. Gubici snage	19
3.6. Moduo kompleksnog broja	19
4. LITERATURA	20
5. PRILOG	21

1. ZADATAK

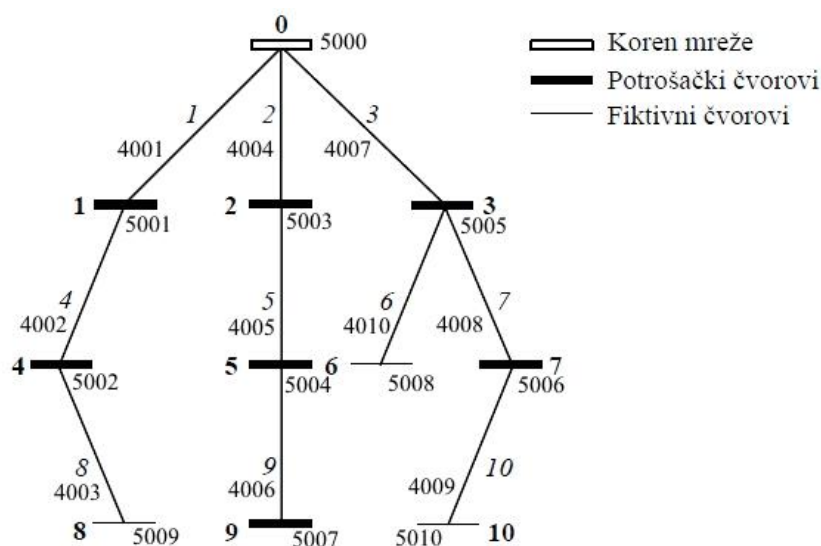
Za datu distributivnu mrežu izvršiti proračun tokova snaga specijalizovanim algoritmom sumiranja struja, poznatijim kao Shirmohammadi-ev algoritam.

Mreža za proračun je radijalna distributivna mreža naponskog nivoa 20kV data na slici 1.1.



Slika 1.1. Distributivna mreža

Na slici 1.2 data je i struktura mreže sa numerisanim čvorovima i granama po lejerima i njihovim šiframa. Formiranje strukture mreže biće objašnjeno u nekom od sledećih glava ovog rada.



Slika 1.2. Struktura test mreže

Mreža se sastoji od jedne transformatorske stanice VN/SN1/SN2 (110/20/10 [kV/kV/kV]) i sedam transformatorskih stanica SN/NN (20/0.4 [kV/kV]). Sve transformatorske stanice su povezane kablovskim deonicama i njihovi parametri su dati u nastavku. Na osnovu datog uklopnog stanja mreže sledi da je potrošnja raspoređena na tri izvoda koji se napajaju sa srednjenaponskih sabirnica VN/SN postrojenja. Mrežu čine 10 čvorova. Transformatorske stanice SN/NN predstavljaju potrošačke čvorove (PQ čvorovi), koji su na *slici 1.2.* prikazani debljim linijama. Potrošači su tipa konstantne snage. Grane koje poseduju normalno otvorene prekidače, koji su prikazani praznim kružićima, na svom kraju imaju fiktivne čvorove. Prvi čvor, nulti, predstavlja koren mreže, koji je ujedno i balansni čvor (ΘV).

Vrednosti podužnih parametara svih deonica dati su u *tabeli 1*, dok su dužine tih deonica dati u *tabeli 2*. U *tabeli 3* nalaze se poznate vrednosti potrošnje čvorova.

DEONICA	r [Ω/km]	x [Ω/km]	g [S/km]	b [S/km] ¹
1	$2.0890 \cdot 10^{-1}$	$1.1690 \cdot 10^{-1}$	0.0	$1.1590 \cdot 10^{-4}$
2	$2.0900 \cdot 10^{-1}$	$1.1700 \cdot 10^{-1}$	0.0	$1.1600 \cdot 10^{-4}$
3	$2.0910 \cdot 10^{-1}$	$1.1710 \cdot 10^{-1}$	0.0	$1.1610 \cdot 10^{-4}$
4	$2.0890 \cdot 10^{-1}$	$1.1690 \cdot 10^{-1}$	0.0	$1.1590 \cdot 10^{-4}$
5	$2.0900 \cdot 10^{-1}$	$1.1700 \cdot 10^{-1}$	0.0	$1.1600 \cdot 10^{-4}$
6	$2.0910 \cdot 10^{-1}$	$1.1710 \cdot 10^{-1}$	0.0	$1.1610 \cdot 10^{-4}$
7	$2.0890 \cdot 10^{-1}$	$1.1690 \cdot 10^{-1}$	0.0	$1.1590 \cdot 10^{-4}$
8	$2.0900 \cdot 10^{-1}$	$1.1700 \cdot 10^{-1}$	0.0	$1.1600 \cdot 10^{-4}$
9	$2.0910 \cdot 10^{-1}$	$1.1710 \cdot 10^{-1}$	0.0	$1.1610 \cdot 10^{-4}$
10	$2.0900 \cdot 10^{-1}$	$1.1700 \cdot 10^{-1}$	0.0	$1.1600 \cdot 10^{-4}$

Tabela 1: Vrednosti parametra deonica

¹ r – podužna redna rezistansa, x – pod. redna reaktansa, g – pod. konduktansa, b – pod. susceptansa

DEONICA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DUŽINA DEONICE [km]	1	1	1	2	2.5	2	2	4	2	2

Tabela 2: Dužina deonica

ČVOR	POTROŠNJA AKTIVNE SNAGE [kW]	POTROŠNJA REAKTIVNE SNAGE [kVAr]
0	0.0	0.0
1	1262.4255	256.221
2	2416.4255	490.455
3	612.738	124.35885
4	435.1095	88.31025
5	1147.9545	232.98975
6	0.0	0.0
7	575.442	11.79255
8	0.0	0.0
9	1188.18	241.15455
10	0.0	0.0

Tabela 3: Snage potrošnje za svaki čvor

Posle unesenih podataka, a pre početka proračuna potrebno je normalizovati mrežu tj. izvršiti normalizaciju svih parametara, kao i proračunati ukupne admitanse u čvorovima. Bazne vrednosti odabrane za normalizaciju su sledeće:

- **bazna snaga mreže:** 31.5 [MVA]
- **bazni napon meže:** 20 [kV]

Napisati program koji daje rešenje problema tokova snaga primenom metode sumiranja struja, odnosno nudi izračunavanje stacionarnog režima razmatrane distributivne mreže, tj.:

1. učitavanje podataka o mreži iz ulaznih datoteka
2. izračunavanje parametara ekvivalentnih šema elemenata
3. formiranje strukture mreže po lejerima
4. proračun izvedenih baznih veličina
5. normalizaciju parametara mreže
6. proračun sume otočnih admitansi u čvorovima
7. proračun tokova snaga metodom sumiranja struja (proračun vrednosti modula napona, injektirane struje, aktivne i reaktivne snage...)

8. proračun prividne snage i gubitaka aktivne snage svake grane i proračun ukupnih gubitaka u mreži
9. vraćanje veličina mreže u apsolutne jedinice
10. ispis u izlaznu datoteku i na ekran unete konfiguracije mreže, dobijenih rezultata i izvršen broj iteracija.

U daljem tekstu sledi teorijska osnova na kojoj se bazira izloženi problem u projektu i koja je potrebna za sam proračun. Problem je rešen kombinacijom programskih jezika FORTRAN i C++ . Svi ulazni podaci dati su u spoljašnjim datotekama koje su predstavljene u prilogu ovog dokumenta.

2. DISTRIBUTIVNA MREŽA

Ovde ćemo reći nešto više o strukturi distributivne mreže. Nju možemo definisati kao 'sponu' između prenosne mreže i konkretnog potrošača, tj. predstavlja deo mreže koji raspodeljuje električnu energiju konkretnim potrošačima.

Trofazna distributivna mreža se sastoji od rednih i otočnih elemenata, a elementi se međusobno povezuju trofaznim čvorovima. Svaki trofazni čvor se sastoji od tri fazna čvora, neutralnog čvora i/ili zemlje. Redni elementi su elementi mreže kojima su povezana dva trofazna čvora, a u njim se svrstavaju sekcije vodova i transformatori. Otočni su oni elementi koji su priključeni u jednom trofaznom čvoru. Oni mogu da budu povezani sa čvorom referentnog potencijala, ali i ne moraju. Zemlja se smatra čvorom referentnog, odnosno nultog potencijala. Distributivne mreže su uglavnom radijalne.

Proračuni elektroenergetskih mreža, kao i problem tokova snaga, sastoje se uobičajeno od sledeće četiri komponente:

- matematički model mreže
- matematički metod za proračun modela mreže (obično se izračunava stanje mreže, a najčešće su to naponi čvorova),
- formiranje postupka za proračun stanja mreže i rekonstrukcija svih veličina režima mreže koje su od interesa
- računarski program za proračun stanja mreže i rekonstrukcija svih veličina koje su od interesa.

Sva razmatranja koja slede zasnovana su na sledećim pretpostavkama:

- svaki trofazni element je konstruisan kao uravnotežen,
- sistem je u simetričnom režimu na svim naponskim nivoima.

Na osnovu tih pretpostavki sledi:

- svaki trofazni element može se tretirati pofazno, tj. raspregnuti na tri nezavisna monofazna elementa (reprezenta), i predstaviti jedinstvenom pogonskom ekvivalentnom šemom koja se sastoji od pogonskih parametara,
- svi elementi elektroenergetskog sistema međusobno se priključuju tropsno.

Trofazni uravnotežen element je izveden sa tri konstruktivno identične faze koje su međusobno i u odnosu na zemlju u istom položaju.

U daljem tekstu ove glave dati su matematički modeli trofaznih uravnoteženih potrošača, sekcija vodova i transformatora. Matematički modeli su prikazani pofazno. Svrha prikaza ovih elemenata je ta što su potrebni radi konstituisanja modela za proračun tokova snaga distributivnih mreža.

2.1. Potrošač

Snaga potrošnje potrošača je u funkciji od modula napona i učestanosti sistema. Pošto je učestanost sistema za proračun tokova snaga unapred definisana, aktivna i reaktivna

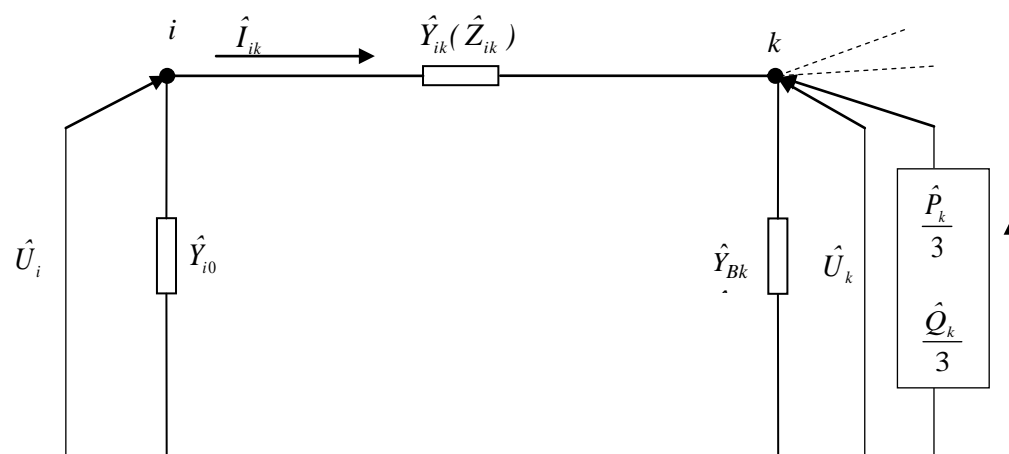
snaga potrošnje potrošača, priključenog u čvoru, zavise samo od modula napona. Snagu potrošača distributivne mreže obično iskazujemo preko tri komponente, a to su:

- konstantna snaga,
- snaga srazmerna sa modulom napona, odnosno sa konstantnim modulom struje i faktorom snage i
- konstantna impedansa (admitansa), odnosno snaga srazmerna sa kvadratom modula napona.

Model prve vrste potrošnje dat je u nastavku (od interesa je u ovom projektu).

Potrošač tipa konstantne snage

Potrošače konstantne snage predstavljamo preko aktivne i reaktivne snage. Primer na sledećoj slici.



Slika 2.1.1. Potrošač predstavljen kao potrošač konstantne snage

Trofazna kompleksna snaga koja je injektirana u čvor k za ovako usvojene smerove napona i injektiranih struja u čvor, definisana je kao:

$$\hat{S} = 3 \cdot \hat{U}^* \cdot \hat{I} = P(U) - jQ(U), \quad (2.1)$$

a zbog nezavisnosti od napona može se definisati kao:

$$\hat{S} = 3 \cdot \hat{U}^* \cdot \hat{I} = P - jQ \quad (2.2)$$

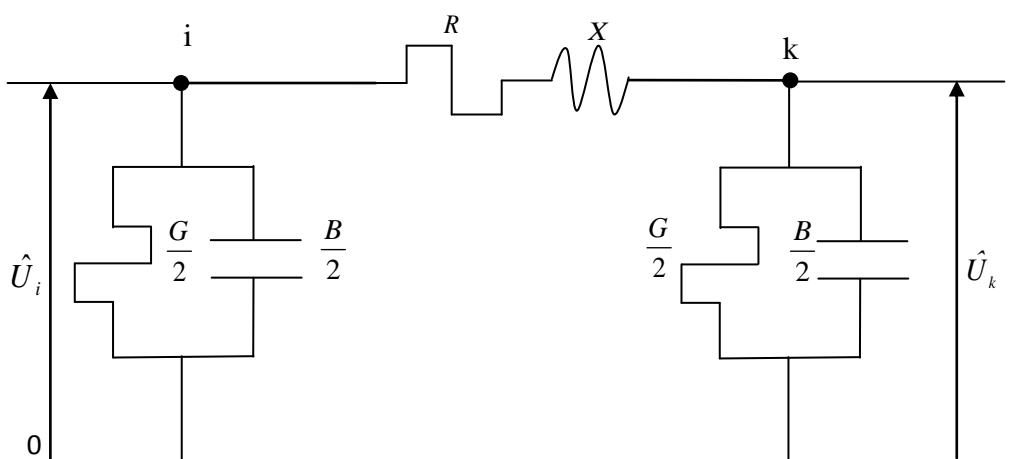
2.2. Vodovi

Vodovi su elementi elektroenergetskog sistema namenjeni prenosu i distribuciji napona i električne energije, pri čemu razlikujemo nadzemne (vazdušne) i kablovske (obično u zemlji) vodove. Trofazni kablovi, s obzirom da su skuplji od nadzemnih vodova, uglavnom se koriste kada su prenos i distribucija nadzemnim vodovima teško izvodljivi.

Kada je trofazni kabl jedinstven, u smislu da su u okviru istog plašta smeštena sva tri fazna provodnika, tada je on uravnotežen. Kada su izvedeni sa golim provodnicima, da bi bili

uravnoteženi, trofazni vodovi se moraju transponovati. Transpozicija vodova je konstruktivan postupak za postizanje uravnoteženosti vodova, koji se sastoji od postavljanja njihovih faznih provodnika duž trase tako da se provodnici svake faze nađu isti broj puta u svakom od tri moguća položaja u prostoru. Ako su uravnoteženi, trofazni vodovi se mogu prikazati pomoću tri monofazna reprezentata, odnosno pogonske šeme.

Kako bismo izvršili potrebnu analizu električnih pojava u vodovima, pogodno je predstaviti vodove zamenskim ekvivalentnim šemama. Ove šeme su crteži fiktivnih električnih kola sastavljenih od osnovnih električnih elemenata: otpornika, prigušnice, kondenzatora. Parametri elemenata su takvi da su električne veličine (naponi, struje, snage), na ulazu i na izlazu, ekvivalentne električnim veličinama na početku i na kraju posmatranog voda (po intenzitetu i po faznom stavu). Ekvivalentne šeme se mogu smatrati pomoćnim sredstvom koje nam omogućava da lakše napišemo matematičke relacije koje čine matematički model voda. Pritom se u analizama najčešće koristi, takozvana, π ekvivalentna šema, prikazana na slici 2.2.1.



Slika 2.2.1. Šema sekcije voda

Parametri:

- redna otpornost $R = r \cdot l$ (2.3)

- redna reaktansa $X = x \cdot l$ (2.4)

- otočna susceptansa $G = g \cdot l$ (2.5)

- otočna konduktansa $B = b \cdot l$ (2.6)

- redna impedansa grane $\hat{Z} = R + jX$ (2.7)

- otočna admitansa grane $\hat{Y} = G + jB$ (2.8)

Gde je:

- r, x – podužni parametri voda [Ω/km]

- g, b – podužni parametri voda [S/km]

- l – dužina voda [km]

Pored prethodnih parametara, osnovni nominalni podaci za vodove su I nominalni napon i struja:

- *nominalni linijski napon* - V_n (odnosno fazni - $U_n = V_n / 3$) 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,
- *nominalna struja voda* - I_n je fazna struja kojoj vod, u predviđenom veku trajanja, može biti trajno izložen, a da se pri tom termički ne ošteti, odnosno struja za koju je vod konstruisan.

Nominalni napon i struja određuju nominalnu snagu voda:

$$S_n = 3U_n I_n \quad (S_n = 3V_n I_n).$$

2.3. Transformatori

Transformator je jedan od najprostijih električnih uređaja koji za cilj ima da transformiše električnu energiju jednog napona i struje sa jedne strane na drugu, energije drugog napona i struje, tj. iz jednog kola u drugo posredstvom magnetne sprege, bez pokretnih delova i uz minimalne gubitke. Dalji opis ovog elementa nije neophodan za implementaciju ovog projekta, pa iz tog razloga nema potrebe isti i obrađivati.

3. TOKOVI 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, odnosno osnova, u okviru drugih energetske funkcije.

U ovom delu data je opšta postavka problema proračuna tokova snaga u distributivnim mrežama i metodologije za njegovo rešavanje. Zatim će se u daljem radu predstaviti specijalizovani algoritam za proračun tokova snaga u čisto radijalnim mrežama – algoritam sumiranja struja, i na kraju koristeći se ovim algoritmom, uz prikaz postupka normalizacije i formiranja strukture mreže, rešiće se problem proračuna tokova snaga i naponskih prilika na prethodno datom primeru distributivne mreže od 10 čvorova.

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. Takođe, prenosne mreže koriste proračune koje se zasnivaju na matričnom pristupu, a takav pristup zahteva da se u svakoj iteraciji reši linearizovana matrica sistema dimenzija ' $n \times n$ ' (n – broj čvorova) što bi zbog velike dimenzionalnosti distributivnih mreža i njihove slabe upetljanosti, kao i visokog odnosa R/X prouzrokovalo slabu uslovljenost matrica kojim opisujemo takve probleme, što bi dalje numeričke postupke bazirane na matričnom proračunu činilo neefikasnim u rešavanju problema 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 problem 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 i koristeći se ovom pretpostavkom razvijen je čitav niz vrlo efikasne numeričke postupaka koji su orijentisani ka granama. U ovim postupcima proračun se vrši po granama distributivne mreže, čime se potreba za rešavanjem jednačina slabo uslovljenih matričnih sistema potiskuje iz proračuna i na taj način se značajno povećava brzina proračuna i opadaju memorijski zahtevi. Kao što je navedeno, jedan od problema neefikasnosti je vezan za memorijske zahteve, jer pri porastu dimenzija razmatranog sistema, kod algoritama orijentisanih prema granama, zahtevi za memorijom i vreme proračuna rastu linearno, dok s druge strane, kod matrično orijentisanih algoritama, zahtevi za memorijom rastu kvadratno, a vreme proračuna raste sa trećim stepenom. Pored ovih prednosti, pokazuje se da specijalizovani algoritmi orijentisani prema granama veoma brzo konvergiraju, postićući vrlo veliku tačnost proračuna.

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

- **Algoritam sumiranja struja**
- Algoritam sumiranja snaga
- Algoritam sumiranja admitansi
- Kombinovani algoritam.

Ovi algoritmi se uglavnom razlikuju po načinu proračuna i po mogućnostima za modelovanje potrošnje. Za problem tokova snaga od važnosti je klasifikacija čvorova mreže za koju se proračun vrši.

3.1. Klasifikacija čvorova

Svaki čvor karakterišu sledeće nepoznate: P_i, Q_i, V_i i θ_i , što ukazuje da je ukupan broj nepoznatih u sistemu $4N$ (N - broj čvorova). Problem nepoznavanja svih prethodno navedenih promenljivih se može rešiti ukoliko se u svakom čvoru unapred specificiraju po dve nepoznate čime se broj nepoznatih svodi na $2N$.

Klasifikacija čvorova se vrši u zavisnosti od toga koje nepoznate su unapred specificirane, a koje se proračunavaju. Na osnovu prethodnog, čvorove delimo na:

1. **Potrošački ili PQ čvorovi.** Kao što se može zaključiti iz njihovog naziva, u ovim čvorovima se zadaju aktivna i reaktivna snaga injeckiranja (P_i^{sp}, Q_i^{sp}), dok su nepoznate promenljive moduli i fazni uglovi napona (V_i, θ_i).
2. **Naponski kontrolisani ili PV čvorovi.** Zavisno od načina na koji se održavaju zadati naponi, dele se u dve grupe (nisu od značaja za projekat, pa nema potrebe za njihov detaljniji opis):
 - generatorske ili PVG čvorove i
 - transformatorske ili PVT čvorove.
3. **Referentno balansni ili ΘV čvor.** Koncept ovog čvora je neophodan i često postoji samo jedan ovakav čvor u mreži. Zbog nepoznavanja Džulovih gubitaka unapred, ne može se tačno izvršiti uravnoteženje potrošnje i proizvodnje na generatorima u svim čvorovima što prejudicira proglašenje nekog od naponski kontrolisanih čvorova za balansni čvor. Ujedno ovaj čvor igra ulogu i referentnog čvora za merenje faznih uglova napona, tj. unapred su zadati moduo i fazni ugao napona (V_i^{sp}, θ_i^{sp}), dok aktivnu i reaktivnu snagu (P_i, Q_i) naknadno proračunavamo.

3.2. Normalizacija

Pre početka proračuna potrebno je normalizovati podatke. Na taj način se mreža sa više naponskih nivoa svodi na mrežu jedinstvenog naponskog nivoa, čime se znatno pojednostavljuje dalji proračun. Potrebno je odrediti bazne vrednosti za korišćene veličine. U prvoj glavi određene su neke bazne veličine, a preostale bazne vrednosti podataka se računaju na sledeći način:

$$I_x^b = \frac{S^b}{\sqrt{3} \cdot V_x^b} \quad Z_x^b = \frac{(V_x^b)^2}{S^b} \quad Y_x^b = \frac{1}{Z_x^b} \quad (3.1)$$

Nakon normalizacije dobijaju se normalizovane veličine čije su vrednosti izražene u relativnim jedinicama:

$$a = \frac{A}{A^b} \quad (3.2)$$

Vraćanje „na staro“, odnosno računanje apsolutnih vrednosti veličina:

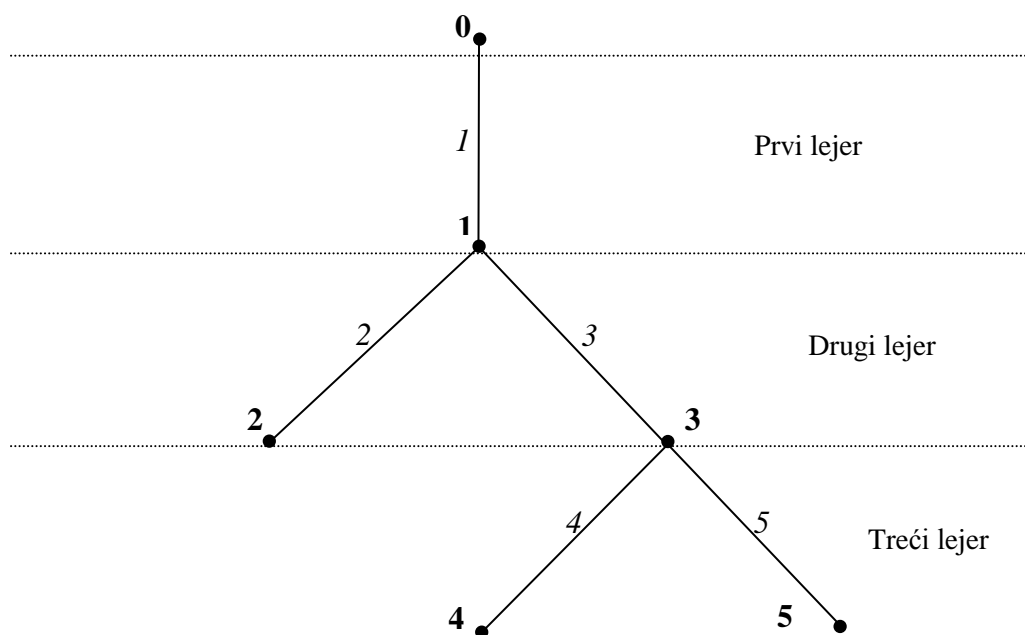
$$A = a \cdot A^b \quad (3.3)$$

3.3. Formiranje strukture mreže

Nakon što se se parametri mreže pripreme za obradu, tj. normalizuju i predstave odgovarajućim šemama dobija se odgovarajuće ekvivalentno kolo u kojem je potrebno numerisati čvorove i grane. Ako uzmemo u obzir vreme proračuna i utrošenu memoriju, numeracija čvorova i grana je od velikog značaja za računsku realizaciju proračuna.

U distributivnim mrežama je najpogodnije čvorove i grane mreže numerisati po lejerima, odnosno nivoima. Ako se razmatra radijalna mreža sa jednim izvorom, ukupno n_{gr} grana i n_{cv} čvorova. Prvi čvor je koren (izvor) mreže, a najčešće je to neka od sabirnica u transformatorskoj stanici VN/SN1/SN2 i numerisan je sa '0'. Preostali $n_{cv} - 1$ numerisani su brojevima od 1 do n_{gr} . U radijalnim mrežama je broj čvorova za jedan veći od broja grana ali postoji mogućnost da broj grana bude veći od broja čvorova što znači da u kolu postoji jedna ili više petlji.

Numeracija čvorova i grana prikazana je na sledećoj slici, a detaljan postupak numeracije je dat ispod slike.



Slika 3.3.1. Primjer radijalne mreže predstavljene lejerima

Čvorovi na prethodnoj slici su označeni brojevima i podebljani su, dok su grane takođe označene brojevima, ali zakrivljenim (*italic*). Postupak se sastoji od sledećih koraka:

1. Prvo se numerišu grane koje su jednim krajem vezane za koren mreže i to su grane prvog lejera. Numerišu se počevši od broja 1 i koristeći sve prirodne brojeve do ukupnog broja tih grana. Čvorovi na drugim krajevima tih grana se numerišu sa istim brojem kao i grane. Redosled numeracije unutar istog lejera je proizvoljan ali se teži redoslednoj numeraciji radi lakše preglednosti.
2. Postupak se nastavlja numeracijom grana koje polaze iz čvorova lejera koji je prethodno numerisan prema istom principu sa kojim je vršena i dotadašnja numeracija. Pri numeraciji čvorova na kraju grana treba proveriti da se do toga čvora nije prethodno došlo preko neke druge grane pa je već numerisan. U takvom slučaju se ti čvorovi numerišu sa istim brojem kao i grane. Taj novi čvor se kratkospojnikom povezuje sa osnovnim čvorom.

Rukovanje granama i čvorovima

Jedan od čvorova svake grane će biti označena kao čvor koji šalje, takozvani ‘slanje čvor’, a drugi čvor koji prima, ‘prijemni čvor’. ‘Slanje čvor’ je onaj čvor čiji put do izvornog čvora sadrži manje grana. Osnovna pravila određivanja su:

- a) ‘slanje čvor’ ima manji indeks od indeksa ‘prijemni čvor’ i
- b) indeks grane jednak je indeksu ‘prijemni čvor’.

Takođe, pozitivna orijentacija kroz granu je u smeru od ‘slanje čvor’ do ‘prijemni čvor’. Uobičajena praksa je da se izvornom čvoru dodijeli indeks nula, dok je n najveći indeks grane u mreži. Kada se vrši određivanje topologije, sve što nam treba kao informacija za topološku strukturu radijalne mreže je jedan vektor pokazivač koji sadrži indekse ‘slanje čvor’ i ‘prijemni čvor’.

3.4. Algoritam sumiranja struja

Metoda sumiranja struja, poznatija kao Shirmohammadi-ev algoritam, predstavlja iterativni postupak za proračun tokova snaga. Kod proračuna simetričnih tokova snaga polazi se od pretpostavki da su svi elementi u distributivnoj mreži trofazni, simetrični i uravnoteženi.

Algoritam počinje sa inicijalizacijom postupka. Pod inicijalizacijom se podrazumeva učitavanje podataka o distributivnoj mreži, numeraciji grana i čvorova po lejerima (formiranja strukture mreže), proračunom ukupnih admitansi u čvorovima i setovanje indeksa iteracija (h) na početnu vrijednost ($h=1$).

Ukupna admitansa u čvoru je jednaka sumi otočnih admitansi grana koje su vezane za taj čvor.

Nakon inicijalizacije započinje se iterativni postupak. Svaka iteracija se sastoji od sledeća tri koraka:

1. KORAK: Proračun injektiranih struja

Proračuni u ovom koraku izvedu se za svaki čvor prema sledećoj relaciji:

$$i_i^h = \left(\frac{S_{p,i}}{v_i^{h-1}} \right)^* + y_{0,i} \cdot v_i^{h-1}, \quad i = 1, \dots, n_{cv} \quad (3.4)$$

gde je:

i - indeks čvora,

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 ($h-1$)²,

$y_{0,i}$ - suma admitansi svih otočnih elemenata u čvoru (i) i

n_{cv} - broj čvorova.

Prvi član u relaciji (3.4) predstavlja struju potrošnje u čvoru (i), u iteraciji (h):

$$i_{p,i}^h = \left(\frac{S_{p,i}}{v_i^{h-1}} \right)^* \quad (3.5)$$

Drugi član u istoj relaciji predstavlja kapacitivnu struju grane (i), u iteraciji (h) za usvojene referentne smerove kao na slici 3.4.1.:

² U prvoj iteraciji vrednosti napona svih čvorova su jednake vrednosti napona korena.

$$i_{c,i}^h = y_{0,i} \cdot v_i^{h-1} \quad (3.6)$$

2. KORAK: Proračun struja po granama („zamena unazad“)

Ovaj proračun se izvodi za svaku granu, počevši od grana u poslednjem lejeru, prema sledećoj relaciji:

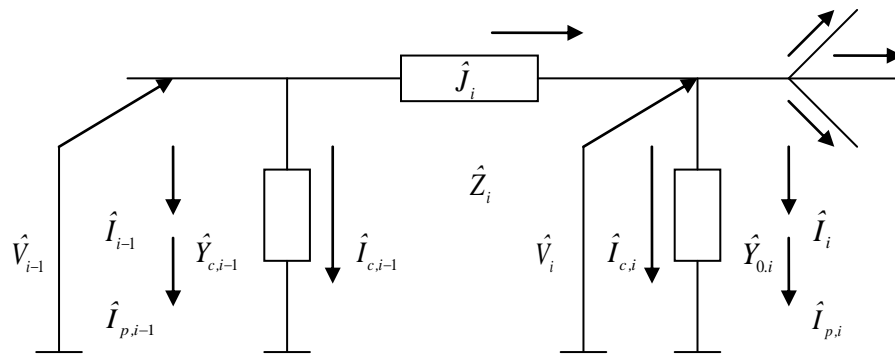
$$j_i^h = i_i^h + \sum_{j \in i} j_j^h, \quad i = n_{gr}, \dots, 1 \quad (3.7)$$

gde je:

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

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

n_{gr} - broj grana



Slika 3.4.1. 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:

$$v_i^h = v_{i-1}^h - z_i \cdot j_i^h, \quad i = 1, \dots, n_{cv} \quad (3.8)$$

gde je:

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

z_i - redna impedansa grane (i).

Na kraju svake grane se ispituju USLOVI KONVERGENCIJE:

$$Dp^h < \varepsilon, \quad (3.9)$$

$$Dq^h < \varepsilon, \quad (3.10)$$

gde su:

$$Dp^h = \max\{|\Delta p_i^h|, i=1, \dots, n_{cv}, \quad (3.11)$$

$$Dq^h = \max\{|\Delta q_i^h|, i=1, \dots, n_{cv}, \quad (3.12)$$

Uslovi konvergencije su ispunjeni u slučaju kad su zadovoljene nejednakosti 3.9 i 3.10, odnosno, kada je vrijednost maksimalnog debalansa aktivne Dp^h i reaktivne Dq^h snage manji od ε , pri čemu je ε unapred specificirana i dovoljno mala vrednost. Debalansi snage za svaki čvor se računaju prema sledećim relacijama:

$$\Delta p_i^h = \operatorname{Re}(\Delta s_i^h) = \operatorname{Re}(s_i^h - s_i) \quad (3.13)$$

$$\Delta q_i^h = \operatorname{Im}(\Delta s_i^h) = \operatorname{Im}(s_i^h - s_i) \quad (3.14)$$

gdje su:

Δs_i^h - debalans snage u čvoru (i) u iteraciji (h) i

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

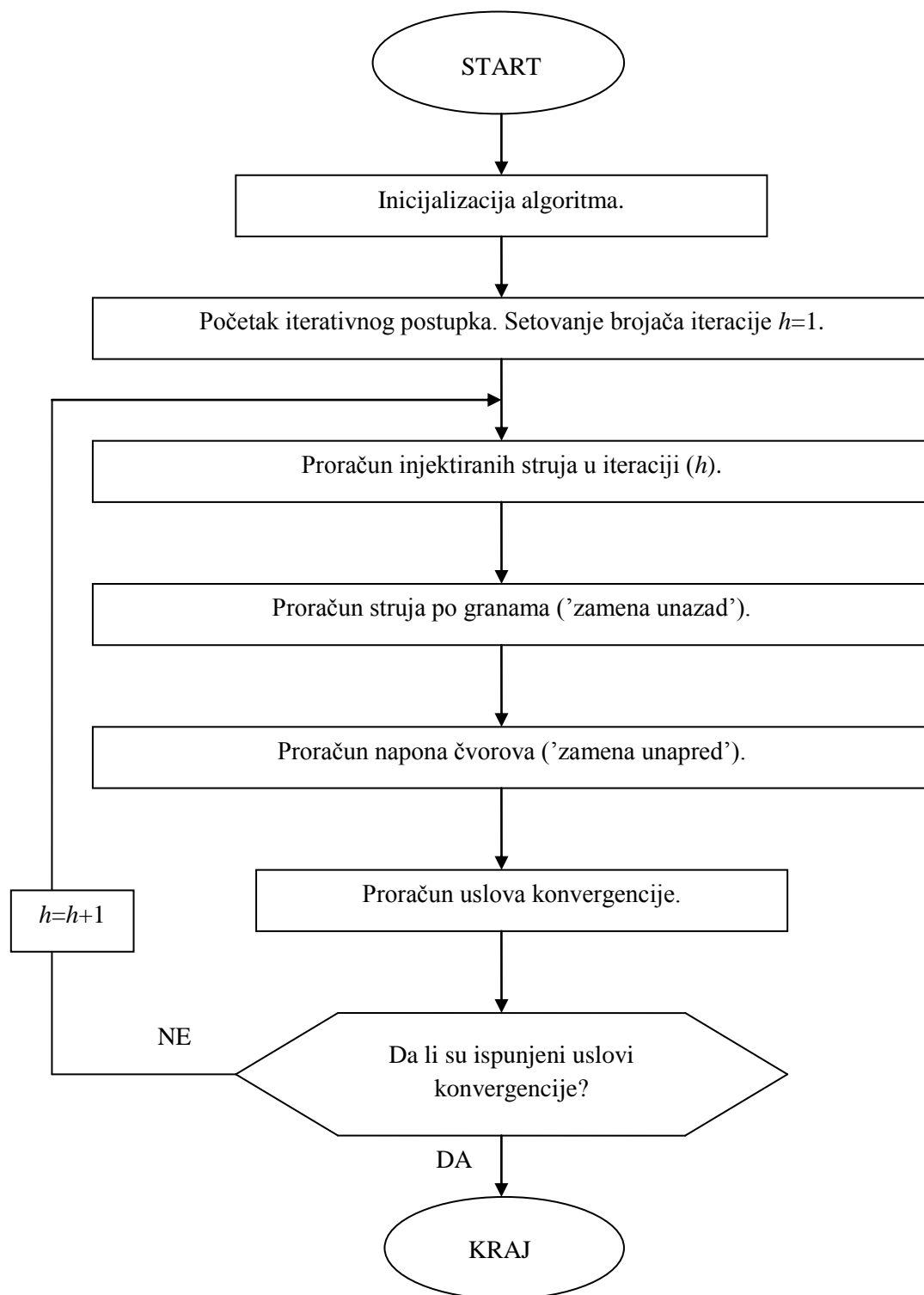
$$s_i^h = v_i^h \cdot (i_i^h)^* - (y_i)^* \cdot |v_i^h|^2 \quad (3.15)$$

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

Suština efikasnosti prethodno prikazanog postupka leži u činjenici da je u radijalnoj mreži moguće veoma dobro pogoditi raspodelu struja po granama već u prvoj iteraciji. Naime, sa poznatim snagama potrošnje u svim čvorovima i početnom aproksimacijom napona, moguće je već u prvoj iteraciji pogoditi struje po svim granama sa tačnošću većom od 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 trećim korakom, odnosno proračunom napona u čvorovima (zamena unapred). Postupak se ponavlja do konačne konvergencije do koje se dolazi najčešće već nakon par iteracija.

Kada je postupak iteracije završen, time je izračunato stanje razmatrane distributivne mreže. I moguće je posle toga izračunati vrednosti svih veličina režima i u apsolutnim jedinicama.

Na sledećoj slici prikazan je globalni blok dijagram gore navedenog algoritma.



Slika 3.4.2. Globalni blok dijagram algoritma sumiranja struja

3.5. Gubici snage

Gubici aktivne snage se definišu kao:

$$P_g = R \cdot I^2, \quad (3.16)$$

gde je:

P_g - gubici aktivne snage

R – reaktansa

I - moduo struje

3.6. Moduo kompleksnog broja

Moduo kompleksnog broja \underline{z} :

$$\underline{z} = x + iy \quad (3.17)$$

se označava sa $|\underline{z}|$ i definiše kao:

$$|\underline{z}| = z = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.18)$$

4. LITERATURA

- [1] D.Popović, D.Bekut, V.Dabić: *Specijalizovani DMS Algoritmi*; Prosveta, Novi Sad, 2011.
- [2] V.C.Strežoski: *Analiza elektroenergetskih sistema*; skripta, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, 2011.
- [3] *Osnovi elektroenergetike (elektroenergetski sistemi)* – Vladimir Strežoski, radni materijal, školska 2002/2003.god

5. PRILOG

Lokacija ulaznih datoteka:

...\PRuEE_Stefan_Djordjevic\PRuEE_PROJEKAT\FORTRAN_PROJEKAT

Datoteka koja sadrži podatke o broju elemenata EES-a (**Broj_Elemenata**):

NAZIV PODATKA	FORMAT	ZNAČENJE
broj_Vodova	*	ukupan broj deonica (vodova)
broj_Potrosaca	i4	ukupan broj potrošača

Datoteka koja sadrži podatke o deonicama EES-a (**Deonice_Podaci**):

NAZIV PODATKA	FORMAT	ZNAČENJE
i	i4	redni broj
ID_Elementa(i)	i9	šifra deonice
r_poduzno(i)	f10.4	podužna rezistansa [Ω /km]
x_poduzno(i)	f10.4	podužna reaktansa [Ω /km]
g_poduzno(i)	e10.3	podužna konduktansa [S/km]
b_poduzno(i)	e10.3	podužna susceptansa [S/km]
duzina(i)	f10.3	dužina deonice [km]

Datoteka koja sadrži podatke o potrošačima EES-a (**Potr_Podaci**):

NAZIV PODATKA	FORMAT	ZNAČENJE
i	i4	redni broj
ID_Elementa(i)	i9	šifra deonice
P_cons(i)	f10.5	aktivna snaga potrošnje [kW]
Q_cons(i)	f10.5	reaktivna snaga potrošnje [kVAr]

Datoteka koja sadrži podatke o topologiji mreže (**Topol_Podaci**):

NAZIV PODATKA	FORMAT	ZNAČENJE
ČVOROVİ		
broj_Cvorova	i6	ukupan broj čvorova
i	i4	redni broj
cvor_ID(i)	i9	šifra čvora
GRANE		
broj_Grana	i6	ukupan broj grana
i	i4	redni broj
grana_ID(i)	i12	šifra grane
gornji_Cvor(i)	i12	čvor grane bliži izvoru napajanja
donji_Cvor(i)	i12	čvor grane udaljeniji od izvora napajanja

Datoteka koja sadrži podatke o baznim vrednostima (**Bazne_Vrednosti**):

NAZIV PODATKA	FORMAT	ZNAČENJE
S_bazno	e12.1	bazna snaga [VA]
V_bazno	e12.1	bazni napon [V]