

# Proračun elektroenergetskih mreža sa više naponskih razina

---

**Horvatović, Božidar**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:495425>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-05-13**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**PRORAČUN ELEKTROENERGETSKIH MREŽA SA  
VIŠE NAPONSKIH RAZINA**

**Završni rad**

**Božidar Horvatić**

**Osijek, 2017.**

**Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Osijek, 04.09.2017.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada**

|                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ime i prezime studenta:</b>                                                                    | Božidar Horvatić                                                                                                                                                                                  |
| <b>Studij, smjer:</b>                                                                             | Prediplomski sveučilišni studij Elektrotehnika                                                                                                                                                    |
| <b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>                                                           | 3905, 18.07.2014.                                                                                                                                                                                 |
| <b>OIB studenta:</b>                                                                              | 15027901305                                                                                                                                                                                       |
| <b>Mentor:</b>                                                                                    | Doc.dr.sc. Krešimir Fekete                                                                                                                                                                        |
| <b>Sumentor:</b>                                                                                  |                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Sumentor iz tvrtke:</b>                                                                        |                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Naslov završnog rada:</b>                                                                      | Proračun elektroenergetskih mreža sa više naponskih razina                                                                                                                                        |
| <b>Znanstvena grana rada:</b>                                                                     | <b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>                                                                                                                                               |
| <b>Predložena ocjena završnog rada:</b>                                                           | Izvrstan (5)                                                                                                                                                                                      |
| <b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b> | Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda<br>Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda<br>Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda<br>Razina samostalnosti: 3 razina |
| <b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>                                                           | 04.09.2017.                                                                                                                                                                                       |
| <b>Datum potvrde ocjene Odbora:</b>                                                               | 11.09.2017.                                                                                                                                                                                       |
| Potpis mentora za predaju konačne verzije rada<br>u Studentsku službu pri završetku studija:      | Potpis:                                                                                                                                                                                           |
|                                                                                                   | Datum:                                                                                                                                                                                            |

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O ORIGINALNOSTIRADA**

Osijek, 13.09.2017.

**Ime i prezime studenta:**

Božidar Horvatović

**Studij:**

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

3905, 18.07.2014.

**Ephorus podudaranje [%]:**

2%

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Proračun elektroenergetskih mreža sa više naponskih razina**

izrađen pod vodstvom mentora Doc.dr.sc. Krešimir Fekete

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. UVOD .....                                                                   | 1  |
| 1.1. Zadatak završnog rada.....                                                 | 1  |
| 2. ELEKTROENERGETSKI SUSTAV (EES).....                                          | 2  |
| 2.1. Podjela elektroenergetskog sustava.....                                    | 3  |
| 2.2. Povijesni razvoj elektroenergetskog sustava.....                           | 5  |
| 2.3. Proizvodnja električne energije u Hrvatskoj i budući trendovi.....         | 6  |
| 3. NADOMJESNE SCHEME GLAVNIH ELEMENATA EES-A.....                               | 12 |
| 3.1. Nadomjesne sheme voda.....                                                 | 12 |
| 3.2. Nadomjesne sheme transformatora .....                                      | 14 |
| 3.3. Nadomjesne sheme generatora.....                                           | 18 |
| 3.4. Nadomjesne sheme potrošača .....                                           | 19 |
| 4. METODE ZA PRORAČUN ELEKTROENERGETSKIH MREŽA SA VIŠE NAPONSKIH<br>RAZINA..... | 21 |
| 4.1. Brojčane veličine u proračunu.....                                         | 21 |
| 4.2. Metoda apsolutnih vrijednosti .....                                        | 22 |
| 4.3. Metoda relativnih (jediničnih) vrijednosti.....                            | 24 |
| 5. PRORAČUN MALOG ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA.....                               | 34 |
| 6. ZAKLJUČAK .....                                                              | 43 |
| LITERATURA.....                                                                 | 44 |
| SAŽETAK.....                                                                    | 45 |
| ABSTRACT .....                                                                  | 46 |
| ŽIVOTOPIS .....                                                                 | 47 |

# 1. UVOD

Elektroenergetski sustav je najrasprostranjeniji i najveći tehnički sustav koji postoji, te zbog tih karakteristika i svoje složenosti je ujedno i najskuplji sustav. Njegova svrha je omogućiti pouzdan prijenos električne energije od proizvođača (elektrana) do krajnjih potrošača (kupaca). Detaljnije o elektroenergetskom sustavu opisano je u drugom poglavlju ovog završnog rada, gdje je prikazana podjela elektroenergetskog sustava, zatim njegov povijesni razvoj te analiza proizvodnje električne energije u Republici Hrvatskoj kao i budući trendovi u proizvodnji električne energije koja se sve više temelji na obnovljivim izvorima energije. U trećem poglavlju završnog rada opisane su nadomjesne sheme glavnih elemenata elektroenergetskog sustava, odnosno nadomjesne sheme voda, transformatora, generatora i potrošača. Za svaki element sustava dan je kratki opis, te su prikazane nadomjesne sheme koje su popraćene odgovarajućim formulama. Glavni dio završnog rada opisan je u četvrtom poglavlju pod nazivom metode za proračun elektroenergetskih mreža sa više naponskih razina. U tom poglavlju se navedene i objašnjene brojčane veličine koje se koriste u proračunu (stvarne, nazivne, bazne, reducirane i relativne veličine), te su navedene i objašnjene dvije metode koje se koriste za proračun elektroenergetskih mreža sa više naponskih razina, a to su: metoda apsolutnih vrijednosti i metoda relativnih (jediničnih) vrijednosti. Svaka metoda je objašnjena na karakterističnom primjeru. U petom poglavlju je na istom primjeru samostalno izvršen proračun elektroenergetskih mreža sa više naponskih razina pomoću obje metode za proračun.

## 1.1. Zadatak završnog rada

U radu je potrebno dati kratak pregled elektroenergetskih mreža (funkcija, način izvedbe, naponske razine i nadomjesne sheme glavnih elemenata). Detaljno je potrebno objasniti dvije metode koje se koriste za proračun elektroenergetskih mreža sa više naponskih razina: metoda apsolutnih i metoda relativnih impedancija. Na nekoliko primjera, samostalno izvršiti proračun elektroenergetskih mreža sa više naponskih razina.

## 2. ELEKTROENERGETSKI SUSTAV (EES)

Elektroenergetski sustav se može smatrati najsloženijim i najvećim tehničkim sustavom na Zemlji koji se sastoji od postrojenja za proizvodnju električne energije (elektrane), električne mreže koja može biti prijenosna i distribucijska te od potrošača koji troše tu električnu energiju.

Prema literaturi [1]: “Zadatak je elektroenergetskog sustava opskrba potrošača električnom energijom. Električna energija koja se predaje potrošaču mora biti kvalitetna, a mjerila kvalitete su: frekvencija, napon i trajna raspoloživost.“

Prema literaturi [1]: “Frekvencija (u Europi 50 Hz, u Japanu i SAD-u 60 Hz) mora biti konstantna, a odstupanja od osnovne frekvencije neznatna. Moguća odstupanja moraju biti nadoknađena tako da srednja frekvencija kroz određeno vrijeme mora biti precizno 50 Hz. Znatnija odstupanja od osnovne frekvencije uvijek su znak poremećaja u mreži.“

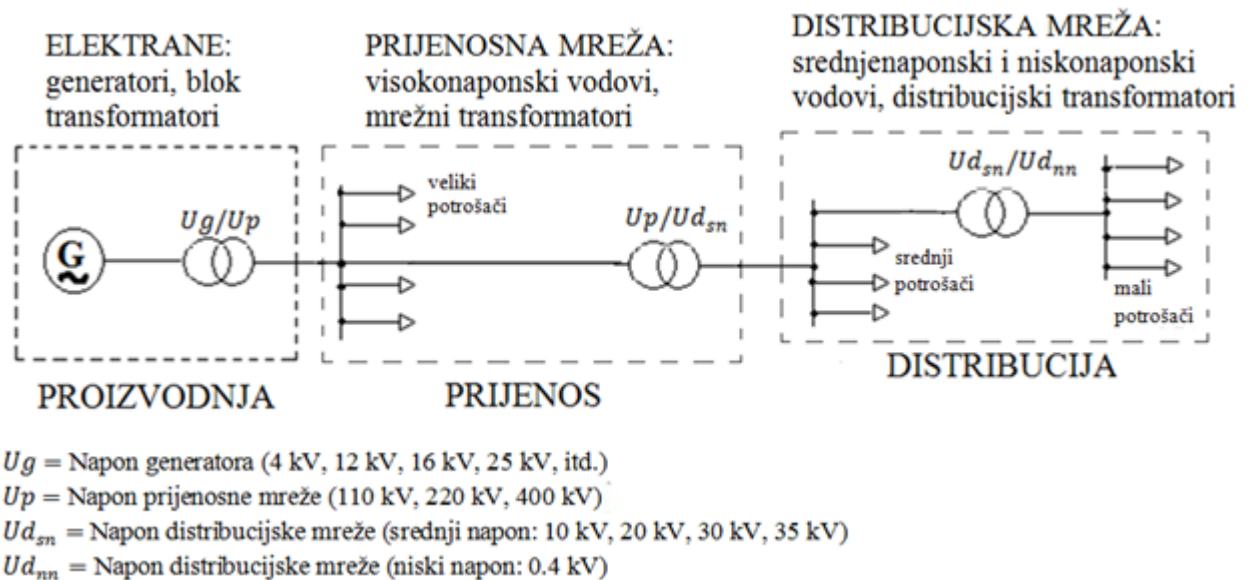
Prema literaturi [1]: “Napon ne može, zbog padova napona, biti isti u svim točkama mreže i biti jednak nazivnom naponu. Ipak dimenzioniranjem mreže i sredstvima za regulaciju napona treba potrošačima osigurati praktički konstantni napon koji je što bliži nazivnom naponu. U samoj mreži napon neizbježno odstupa od nazivnog napona, ali ne smije prekoračiti propisani maksimalni pogonski napon. Pogon nižim naponom povećava gubitke, a viši napon jače napreže izolaciju i može štetiti uređajima. Kvalitetni napon trofazne mreže mora još biti simetričan po fazama i mora biti sinusoidalnog oblika.“

Trajna raspoloživost električne energije označava sposobnost elektroenergetskog sustava da potrošač na mjestu priključka u svako doba dana može uzimati potrebnu mu električnu energiju, po količini i po snazi [1].

Uza ova navedena mjerila kvalitete koja elektroenergetski sustav treba zadovoljiti bitan je i ekonomski faktor, a to je da elektroenergetski sustav potrošačima u bilo koje doba dana treba osigurati električnu energiju uz što nižu cijenu.

## 2.1. Podjela elektroenergetskog sustava

Elektroenergetski sustav može se podijeliti na: proizvodnju, prijenos i distribuciju električne energije kao što je prikazani na slici 2.1.



*Sl. 2.1. Funkcionalni dijelovi elektroenergetskog sustava*

Uobičajena je i podjela sustava na: izvore (elektrane), mrežu, i na potrošače [1]. Mreža se može podijeliti na: prijenosnu i distributivnu [1].

Elektroenergetska mreža se sastoji od sljedeći elemenata:

- Generatora
- Transformatora
- Vodova
- Trošila

Proizvodnja električne energije se odvija u postrojenjima u kojima se iz različiti izvora energije (obnovljivih ili ne obnovljivih) nizom pretvorbi dobiva mehanička energija koja se u električnom generatoru pretvara u električnu energiju, ta postrojenja se nazivaju elektrane. Nazivni naponi generatora koji se koriste u elektranama su: 4 kV, 12 kV, 16 kV, 25 kV itd. Taj napon se povećava blok transformatorom na visoki napon kako bi gubici prijenosa električne energije bili što manji.



Prijenos električne energije se odvija pomoću visokonaponske prijenosne mreže. Visokonaponskom prijenosnom mrežom se prenosi napon koji blok transformator iz elektrane povećava na visoki napon: 400 kV, 200 kV ili 110 kV.

Prijenosom električne energije na veće udaljenosti posredstvom povezane visokonaponske prijenosne mreže omogućeno je [1]:

- korištenje proizvodnje velikih ekonomičnih izvora (elektrana) u udaljenim potrošačkim centrima;
- povezivanje elektrana različitih karakteristika i njihovo optimalno prilagođavanje potrebama konzuma;
- smanjenje potrebne rotirajuće i hladne rezerve u elektranama u odnosu na odvojeni rad manjih sustava; Rotirajuća rezerva su elektrane (odnosno agregati) koje se neopterećene vrte sinkrono sa sustavom i služe kao rezerva. Hladna rezerva su obustavljene elektrane (odnosno agregati) koje mogu ući u mrežu prema potrebi.
- smanjenje maksimalnog opterećenja izvora povezivanjem potrošača i konzumnih područja različitih karakteristika.

Prema literaturi [1]: “Iz gornjeg se vidi značaj prijenosne mreže kao dijela elektroenergetskog sustava za njegovo skladno, potrošnji prilagođeno i ekonomično funkcioniranje. Pri tome treba imati u vidu istovremenost proizvodnje i potrošnje, odnosno nemogućnost uskladištenja električne energije (osim u malim količinama).“

Distribucija električne energije preuzima električnu energiju iz prijenosne mreže u mrežnim transformatorima gdje se visoki napon od 110 kV transformira na srednji napon: 35, 30, 20 ili 10 kv. Distribucija se bavi prijenosom električne energije do krajnjih potrošača koji se dijele na srednje i male potrošače. Za srednje potrošače se koristi gore navedeni srednji naponi dok za male se još dodatno distribucijskim transformatorom transformira srednji napon od 10 kV na niski napon 0.4 kV.

Prema literaturi [1]: “U tehničkoj praksi govorimo o vrlo visokom naponu 400 kV, o visokom naponu 220 i 110 kV, o srednjem naponu 60, 35, 20 i 10 kV i o niskom naponu 0,4 kV. Dokazano je da su mreže s manjim brojem naponskih nivoa, odnosno sa većim omjerom susjednih nazivnih napona ekonomičnije u pogledu troškova izgradnje i u tom su pravcu usmjereni naponi mnogih elektroprivreda. Glavna smetnja ostvarenju tih zamisli su već izgrađeni

i još uvijek ispravni elementi mreže, koji se ne uklapaju u novu koncepciju. Put ka cilju je dugotrajan i svodi se na postepenu eliminaciju pojedinih nivoa napona. Primjer u Hrvatskoj je eliminacija 35 kilovoltnog i 10 kilovoltnog naponskog nivoa i njegova zamjena s nivoom od 20 kV uz transformacije 110/20 kV i 20/0,4 kV (umjesto transformacija 110/35 kV, 35/10 kV, 10/0,4 kV).“

## **2.2. Povijesni razvoj elektroenergetskog sustava**

Napomena: Poglavlje 2.2. završnog rada nastalo je prijevodom i obradom materijala iz literature: J. D. Glover, M. S. Sarma, T. J. Overbye, Power System Analysis and Design, Fifth Edition [2], od 10. do 13. stranice.

Godine 1878. Thomas Alva Edison započeo je raditi na električnom svjetlu i formulirao je koncept centralne elektrane s distribuiranom rasvjetom za opskrbljivanje okolnog područja. Usavršio je svoju tehnologiju rasvjete do listopada 1879. godine, te otvaranje njegove povijesne elektrane Pearl Street Station u New Yorku četvrtog rujna 1882. godine označilo je početak razvoja elektroindustrije. U Pearl Streetu, istosmjerni generatori, tada zvani dinamo, bili su pogonjeni parnim motorima da bi opskrbljivali početna opterećenja od 30 kW za 110 voltne rasvjetne žarulje za 59 potrošača unutar 2,5 četvornih kilometara.

Od 1882. do 1972. godine električna industrija se razvijala izvanrednom brzinom što je dovelo do kontinuiranih smanjenja cijena električne energija sukladno sa tehnološkim postignućima i inženjerskom kreativnosti.

Uvođenje praktičnog istosmjernog motora tvrtke Sprague Electric, kao i razvoj ulične rasvjete, potaknulo je širenje Edisonovih istosmjerni sustava. Razvoj trofaznog 220 voltnog istosmjernog sustava je omogućio malo povećanje opterećenja, ali kako je rastao prijenos električne energije na sve veće udaljenosti i pojavljivao se sve veći broj potrošača tako su nastajali i problemi s naponom. Ta ograničenja maksimalne udaljenosti i opterećenja su savladana 1885. godine kada je William Stanley razvio komercijalno praktični transformator. Stanley je instalirao izmjenični distribucijski sustav u Great Barringtonu, Massachusetts, koji je opskrbljivao 150 svjetiljki. S transformatorom, sposobnost prijenosa snage na viskom naponu s odgovarajućom nižom strujom i manjim padovima napona učinilo je izmjeničnu struju privlačnijom od istosmjerne.

Razvoj izmjeničnih sustava je nadalje potaknut 1888. godine kada je Nikola Tesla predstavio članak na sastanku Američkog instituta elektrotehničkih inženjera koji opisuje dvofaznu indukciju i sinkrone motore, što je očigledno prikazalo prednosti višefaznih sustava u odnosu na jednofazne sustave. Prvi jednofazni izmjenični vod, naponske razine 4 kV i duljine 24 km, u SAD-u postavljen je 1889. godine u Oregonu, između Oregon Cityja i Portlanda. Prvi trofazni sustav u Njemačkoj je pušten u pogon 1891. godine, prenoseći snagu 179 km na 12 kV razini. Prvi trofazni sustav u SAD-u (u Kaliforniji) postao je operativan 1893. godine, prenoseći snagu 12 km na 2.3 kV. Trofazni indukcijski motor koji je osmislio Tesla postao je glavni element industrije.

Rani izmjenični sustavi radili su na različitim frekvencijama uključujući 25, 50, 60 i 133 Hz. Godine 1891. predloženo je da 60 Hz bude standardna frekvencija u Sjedinjenim Američkim Državama. Godine 1893. uvedeni su 25 Hz sustavi sa sinkronim pretvaračem. Međutim, ti sustavi su prvenstveno bili primjenjivani za elektrifikaciju željeznice (i mnogi su uklonjeni) zbog toga što su imali nedostatak uzrokujući treperenje žarulja sa žarnom niti. U Kaliforniji, Los Angelesu, Odjel za energiju i vodu radio je na 50 Hz, ali je pretvoren na 60 Hz kada je Hooverova brana puštena u pogon 1937. godine. Godine 1949. u Južnoj Kaliforniji Edison je također odlučio koristiti frekvenciju od 60 Hz umjesto dotadašnjih 50 Hz.

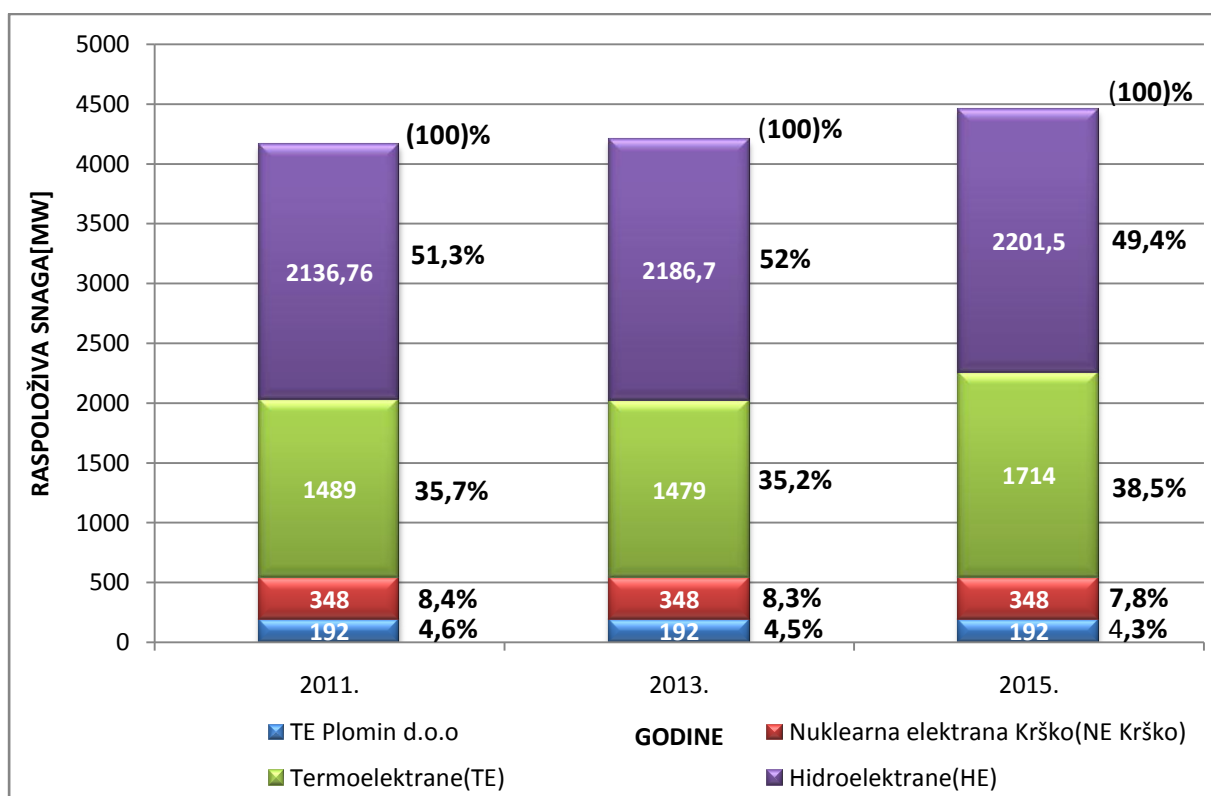
Danas, dvije standardne frekvencije za generiranje, prijenos i distribuciju električne energije u svijetu iznose 60 Hz (u SAD-u, Kanadi, Japanu, Brazilu) i 50 Hz (u Europi, bivšim sovjetskim republikama i Južnoj Americi osim Brazila i Indije). Prednost 60 Hz sustava je da su generatori, motori i transformatori u ovim sustavima općenito manjih dimenzija nego što je to slučaj kod 50 Hz opreme sa istim specifikacijama. Prednost 50 Hz sustava je ta da dalekovodi i transformatori imaju manje reaktancije na 50 Hz nego na 60 Hz.

### **2.3. Proizvodnja električne energije u Hrvatskoj i budući trendovi**

Iz literature [8]: “Početak proizvodnje električne energije u Hrvatskoj započet je izgradnjom hidroelektrane Krka 28. kolovoza 1895. godine (kasnije nazvana Jaruga I) na slapovima rijeke Krke koja je uvrštena na popis povijesno važnih inženjerskih iskoraka u svijetu kao najstarija izmjenična hidroelektrana na ovom prostoru (a samo tri dana „mlađa” od hidroelektrane na slapovima Niagare) i sastavnica jednog od prvih cjelovitih elektroenergetskih sustava u svijetu. To je bio prvi cjeloviti hrvatski elektroprivredni sustav i jedan od prvih te vrste u svijetu.”

Iz literature [6]: “Današnji instalirani kapaciteti za proizvodnju električne energije u Republici Hrvatskoj obuhvaćaju hidro i termoelektreane u sastavu HEP grupe, sve veći broj vjetroelektrana i drugih elektrana na obnovljive izvore energije u privatnom vlasništvu te određeni broj industrijskih termoelektrana. Kapaciteti za proizvodnju električne energije u sastavu HEP grupe obuhvaćaju 16 pogona hidroelektrana, sedam pogona termoelektrana i polovinu instaliranih kapaciteta u nuklearnoj elektrani Krško (na teritoriju Slovenije). Termoelektreane koriste ugljen, plin i loživo ulje. Većinski vlasnik nad proizvodnim kapacitetima Republike Hrvatske je HEP d.d.“

Na slici 2.2. izrađeni su dijagrami prema podacima preuzetih iz publikacije Energija u Hrvatskoj za razdoblje od 2011. do 2015. godine [3],[4],[6], iz kojih se vidi kako se je mijenjala raspoloživa snaga proizvodnih kapaciteta Republike Hrvatske u sastavu HEP grupe kroz određene godine.

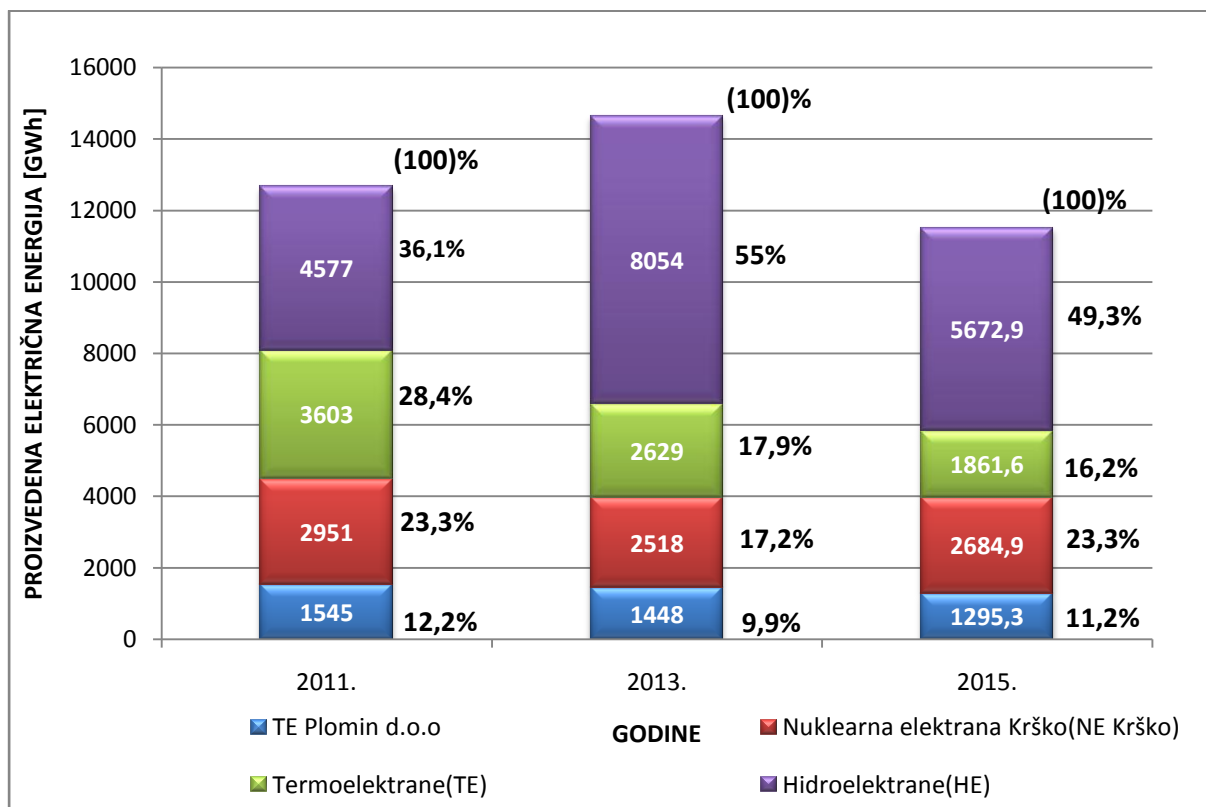


**Sl. 2.2.** Raspoloživa snaga proizvodnih kapaciteta za potrebe Republike Hrvatske u sastavu HEP grupe

Iz slike 2.2. vidi se da se je raspoloživa snaga od 2011. godine do 2015. godine povećala za otprilike 290 MW što je otprilike porast za 7 %. Taj porast se ostvario u povećanju raspoložive

snage kod hidroelektrana i termoelektrane u kojima se ujedno i nalazi najveći dio proizvodnih kapaciteta Republike Hrvatske.

Na slici 2.3. izrađeni su dijagrami prema podacima preuzetih iz publikacije Energija u Hrvatskoj za razdoblje od 2011. do 2015. godine [3],[4],[6], iz kojih se vidi kako se je mijenjala količina proizvedene električne energije proizvodnih kapaciteta Republike Hrvatske u sastavu HEP grupe kroz određene godine.

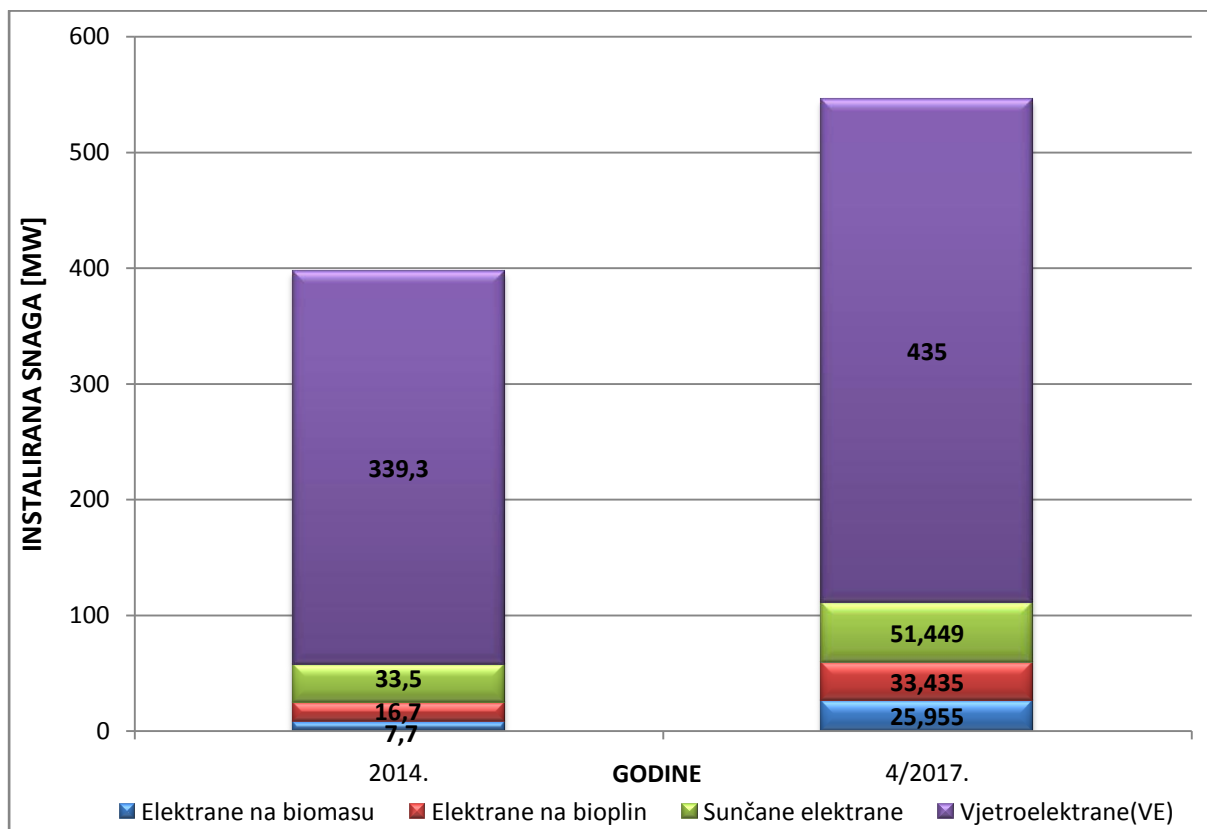


**Sl. 2.3.** Proizvedena električna energija proizvodnih kapaciteta za potrebe Republike Hrvatske u sastavu HEP grupe

Iz slike 2.3. se vidi da je količina proizvedene električne energije varirala kroz godine te da nema određene tendencije rasta ili smanjenja proizvodnje. Također se vidi da većina proizvedene električne energije se proizvodi u hidroelektranama što je i logično za očekivati pošto se najviše raspoložive snage nalazi upravo u njima. Ako se slika 2.3. usporedi s slikom 2.2. može se primijetiti da iako se raspoloživa snaga hidroelektrana nije znatno povećala, razlike u proizvodnji za različite godine su velike što je rezultat meteoroloških uvjeta. Vidi se da je količina proizvodnje za 2013. godinu skoro duplo veća nego što je to bilo 2011. godine upravo zbog toga što je 2013. godina bila kišna dok je 2011. godina bila sušna. Također se može primijetiti da iako

u NE Krško ima oko 8% raspoložive snage da je postotak u proizvodnji električne energije u Republici Hrvatskoj vrlo značajan i iznosi oko 20%.

Sve značajniju ulogu u proizvodnji električne energije u Republici Hrvatskoj imaju i obnovljivi izvori energije. Prema podacima iz Hrvatskog operatora tržišta energije (HROTE) [7] u Republici Hrvatskoj do četvrtog mjeseca 2017. godine je instalirano oko 660 MW električne snage iz obnovljivih izvora energije koje nisu u sastavu HEP grupe. Na slici 2.4. izrađeni su dijagrami prema podacima preuzetih iz publikacije Energija u Hrvatskoj za 2014. godinu [5] i prema podacima Hrvatskog operatora tržišta energije [7] kojima su prikazane instalirane snage proizvodnih kapaciteta Republike Hrvatske nekih elektrana na obnovljive izvore energije za 2014. godinu i za 2017. godinu (do četvrtog mjeseca).

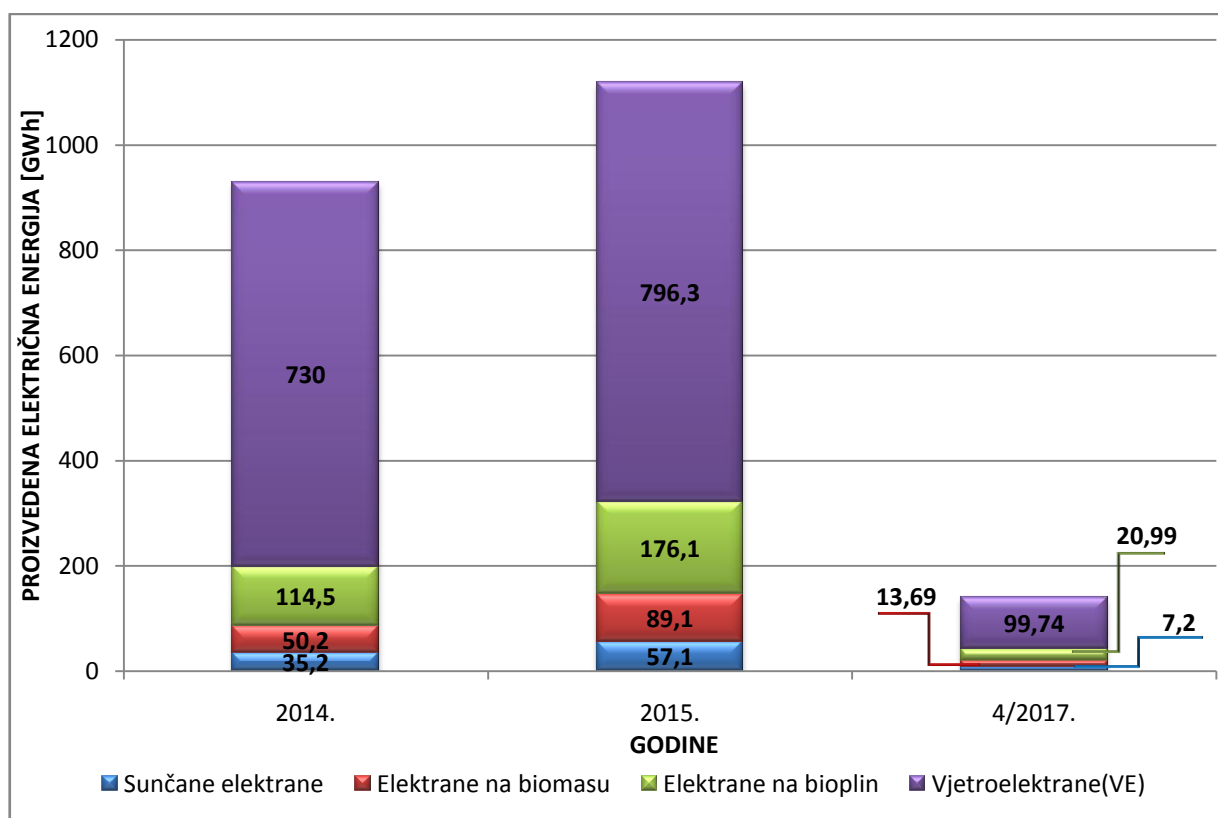


**Sl. 2.4.** Instalirana snaga proizvodnih kapaciteta nekih elektrana na obnovljive izvore za potrebe Republike Hrvatske koje nisu u sastavu HEP grupe.

Iz slike 2.4. se vidi da se je instalirana snaga od 2014. godine do četvrtog mjeseca 2017. godine, promatrajući na slici navedene elektrane na obnovljive izvore, povećala za otprilike 150 MW što je otprilike porast za 37%. Također se vidi da je instalirana snaga porasla u svim navedenim

elektranama na obnovljive izvore te da najviše instalirane snage ima u vjetroelektranama te zatim redom u sunčanim elektranama, elektranama na bioplin te u elektranama na biomasu.

Na slici 2.5. izrađeni su dijagrami prema podacima preuzetih iz publikacije Energija u Hrvatskoj za 2014. godinu [5], 2015. godinu [6] i prema podacima Hrvatskog operatora tržišta energije [7] kojima je prikazano kako se je mijenjala količina proizvedene električne energije proizvodnih kapaciteta Republike Hrvatske nekih elektrana na obnovljive izvore energije za 2014. godinu, 2015. godinu i za 2017. godinu (do četvrtog mjeseca).



**Sl.2.5.** *Proizvedena električna energija proizvodnih kapaciteta nekih elektrana na obnovljive izvore za potrebe Republike Hrvatske koje nisu u sastavu HEP grupe.*

Prema slici 2.5. može se zaključiti da se najviše električne energije u RH iz obnovljivih izvora proizvodi u vjetroelektranama zatim redom u elektranama na bioplin, elektranama na biomasu i u sunčanim elektranama. Također se može uočiti da je proizvodnja od 2014. godine do 2015. godine porasla u svim elektranama na obnovljive izvore. Ako se promotri 3. graf koji prikazuje proizvodnju za 2017. godinu do mjeseca travnja, vidi se da je do mjeseca travnja proizvedeno oko 140 GWh električne energije što nije ni približno koliko je proizvedeno 2014. i 2015. godine, ali ta proizvodnja će do kraja godine vjerojatno dostići i preći proizvodnju iz 2014. i 2015. godine.

Prema svim prikazanim slikama može se zaključiti da u Republici Hrvatskoj se najviše raspoložive snage i najviše električne energije dobiva iz hidroelektrana. Također se može zaključiti da se proizvodni kapaciteti nuklearnih elektrana i termoelektrana ne mijenjaju ili imaju mali porast što nije slučaj kod elektrana na obnovljive izvore energije. Kod elektrana na obnovljive izvore instalirana snaga i proizvodnja električne energije je značajno porasla u svim elektranama. Stoga, prema svim ovim podacima budući trendovi proizvodnje električne energije se sve više okreću prema obnovljivim izvorima energije, a sve manje prema ne obnovljivima izvorima (nafte, ugljena i prirodnog plina) koji su glavna goriva za proizvodnju električne energije u termoelektranama. Prema tome, u budućnosti može se očekivati sve veći broj elektrana na obnovljive izvore energije, sve manji broj termoelektrana na ne obnovljive izvore te isti broj nuklearnih elektrana kao i dosada.



### 3. NADOMJESNE SCHEME GLAVNIH ELEMENATA EES-A

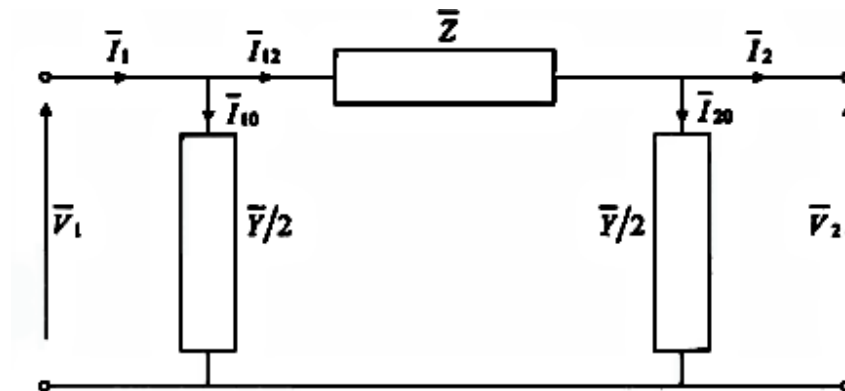
Kao što je navedeno u drugom poglavlju glavni elementi EES-a odnosno elektroenergetske mreže su:

- Vodovi
- Transformatori
- Generatori
- Trošila

Stoga u ovom poglavlju će biti prikazane nadomjesne sheme upravo tih elemenata EES-a.

#### 3.1. Nadomjesne sheme voda

Vod je pasivni element u mreži i prikazuje se pasivnim četveropolom. Taj četveropol ima različite unutarnje spojeve ( $\pi$ -shema, T-shema...) [10]. Najčešće se kao ekvivalenta rabi približna  $\pi$ -shema (za vodove duljine do 200 km) prikazana na slici 3.1. [10].



Sl. 3.1. Približna nadomjesna  $\pi$ -shema voda [10]

gdje je:

$\bar{Z}$  - impedancija uzdužne grane

$\bar{Y}$  - admitancija poprečne grane

$\bar{I}_1, \bar{V}_1, \bar{I}_2, \bar{V}_2$  - fazna struja i napon na početku voda odnosno fazna struja i napon na kraju voda

$\bar{I}_{10}, \bar{I}_{20}, \bar{I}_{12}$  - struje kroz poprečne grane odnosno struja kroz uzdužnu granu

Izrazi za impedanciju uzdužne grane  $\bar{Z}$  i admitanciju poprečne grane  $\bar{Y}$  voda duljine L prema [10] glase :

$$\bar{Z} = R_1 \cdot L + jX_1 \cdot L [\Omega] \quad (3-1)$$

$$\bar{Y} = G_1 \cdot L + jB_1 \cdot L [S] \quad (3-2)$$

gdje je:

$R_1$  - jedinični radni otpor [ $\Omega/\text{km}$ ]

$X_1$  - jedinična reaktancija [ $\Omega/\text{km}$ ]

$G_1$  - jedinični odvod [ $S/\text{km}$ ]

$B_1$  - jedinična susceptancija [ $S/\text{km}$ ]

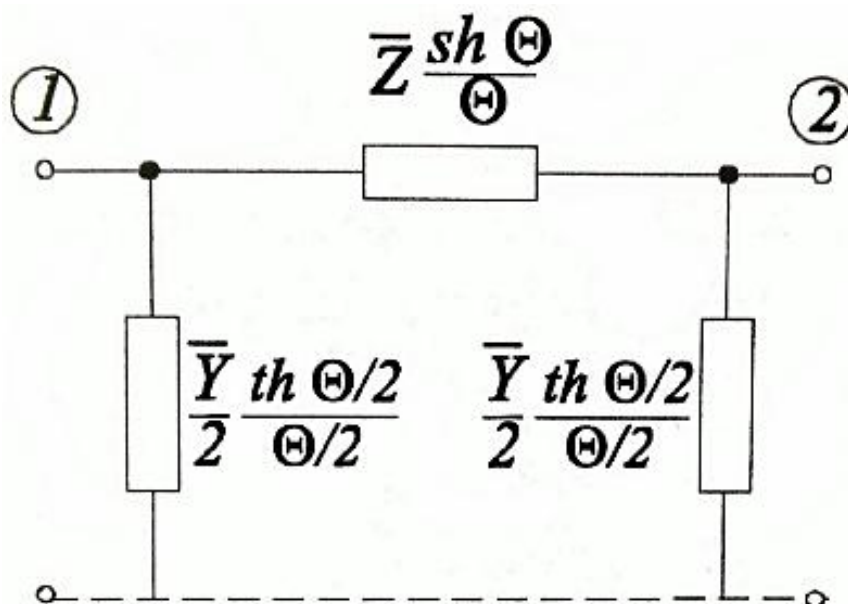
$L$  - duljina voda [km]

Ako se vod dužine do 200 km preračunava po približnoj nadomjesnoj shemi greška ne prealzi 0,5%, a to je u granicama točnosti ostalih koraka analize mreže [9].

U slučaju voda dužeg od 200 km ne može se koristiti približna  $\pi$ -shema jer bi u tom slučaju nastala određena odstupanja. Stoga je za takve vodove potrebno koristiti točnu nadomjsnu  $\pi$ -shemu voda gdje se uzdužna i poprečna admitancija voda množe s tzv. korekcijskim faktorima:

$$\frac{\sinh \Theta}{\Theta} \text{ i } \frac{\tanh \Theta/2}{\Theta/2}.$$

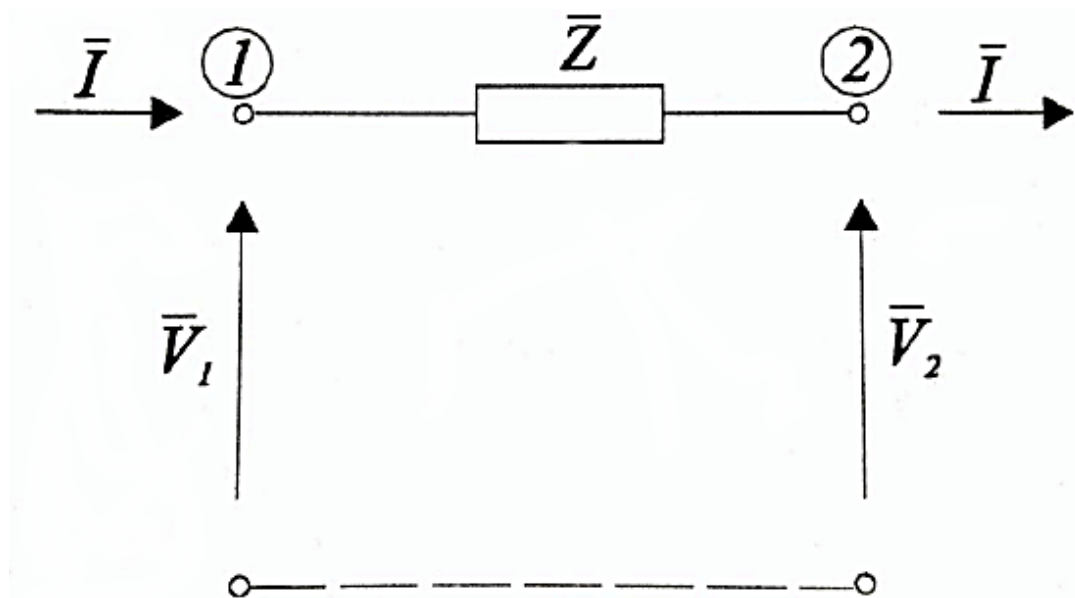
Na slici 3.2. prikazana je točna nadomjesna  $\pi$ -shema voda.



Sl. 3.2. Točna nadomjesna  $\pi$ -shema voda [9]

Kod vodova kraćih od 200 km ti korekcijski faktori se približavaju jedinici pa se mogu zanemariti. Upravo iz tog razloga za vodove duljine do 200 km se koristi približna nadomjesna  $\pi$ -shema.

Kod vodova napona nižeg od 40 kV struje kroz poprečne grane bit će neznatne u usporedbi s pogonskom strujom, pa ćemo poprečne grane moći potpuno zanemariti [9]. Nadomjesna shema takvih vodova atrofirati će na sljedeći oblik (Sl. 3.3.) [9]:



Sl. 3.3. Nadomjesna shema voda srednjeg napona [9]

### 3.2. Nadomjesne sheme transformatora

Transformator kao element mreže je pasivni element mreže, premda u zamkastoj mreži u stanovitim okolnostima može biti uzrokom strujama izjednačenja, koje su posljedica elektromotorne sile nastale u transformatoru pobudom same mreže, što izaziva privid aktivnog elementa [9].

Ako izuzmemo posebni slučaj izolacijskih transformatora kojima je broj zavoja jednak na obadvije strane (svrha im je isključivo galvansko odvajanje dvaju dijelova mreže), transformator ima najmanje dvije naponske razine, kojima se omjer navodi kao prijenosni odnos, ili omjer broja zavoja [9].

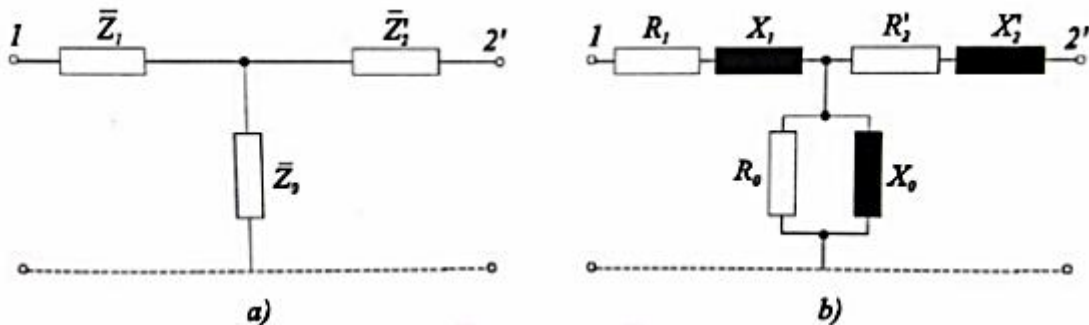
Kod trofaznih transformatora namoti pojedinih faza iste naponske razine mogu biti spojeni na tri načina (skupine spoja) [9]:

- u zvijezdu (simbol Y,y)

- trokut (D,d) ili
- cik –cak (Z,z).

Nije rijedak slučaj da trofazni transformatori imaju više od dvije naponske razine, pa su to onda, za razliku o dvonamotnih, tronamotni i višenamotni transformatori [9]. Dvonamotni transformatori skupine spoja Yy često imaju treći tzv. tercijarni namot, spojen u trokut (d), a dimenzioniran obično za jednu trećinu snage glavnih namota [9].

Prema literaturi [9]: “Transformator se obično promatra između krajeva 1”–2 odnosno 1–2’, pa se u nadomjesnim shemama ne crta idealni transformator. Bez obzira na izvedbu trofazni transformator možemo smatrati simetričnim elementom mreže, bez međusobnog utjecaja faza, pa se u računu isključivo koriste jednofazne sheme. T-shema predstavlja najtočniji ekvivalentni prikaz transformatora. Na slici 3.4a prikazana je jednofazna verzija kod koje su parametri dvonamotnog transformatora preračunati na primarnu stranu, na slici 3.4b su parametri rastavljeni još i na komponente.“



Sl. 3.4. T-shema transformatora [9]

Izrazi za  $\bar{Z}_1, \bar{Z}_2'$  prema [10] glase:

$$\bar{Z}_1 = R_1 + jX_1 [\Omega] \quad (3-3)$$

$$\bar{Z}_2' = (R_2 + jX_2) \cdot \left( \frac{U_1}{U_2} \right)^2 = \bar{Z}_2 \cdot \left( \frac{U_1}{U_2} \right)^2 [\Omega] \quad (3-4)$$

Izraz za  $\bar{Z}_0$  prema [9] glasi:

$$\bar{Z}_0 = \frac{R_0 \cdot jX_0}{R_0 + jX_0} [\Omega] \quad (3-5)$$

odakle izlazi da je popriječna admitancija  $\bar{Y}_0$ :

$$\bar{Y}_0 = \frac{R_0 + jX_0}{R_0 \cdot jX_0} = \frac{1}{R_0} - j\frac{1}{X_0} = G_0 - jB_0 [S] \quad (3-6)$$

gdje je:

$\bar{Z}_1$  - impedancija uzdužne grane primarnog namota

$\bar{Z}_2'$  - impedancija uzdužne grane sekundarnog namota preračunata na primarnu stranu

$\bar{Z}_0$  - impedancija popriječne grane

$R_1$  - djelatni otpor primarnog namota

$X_1$  - uzdužna reaktancija primarnog namota

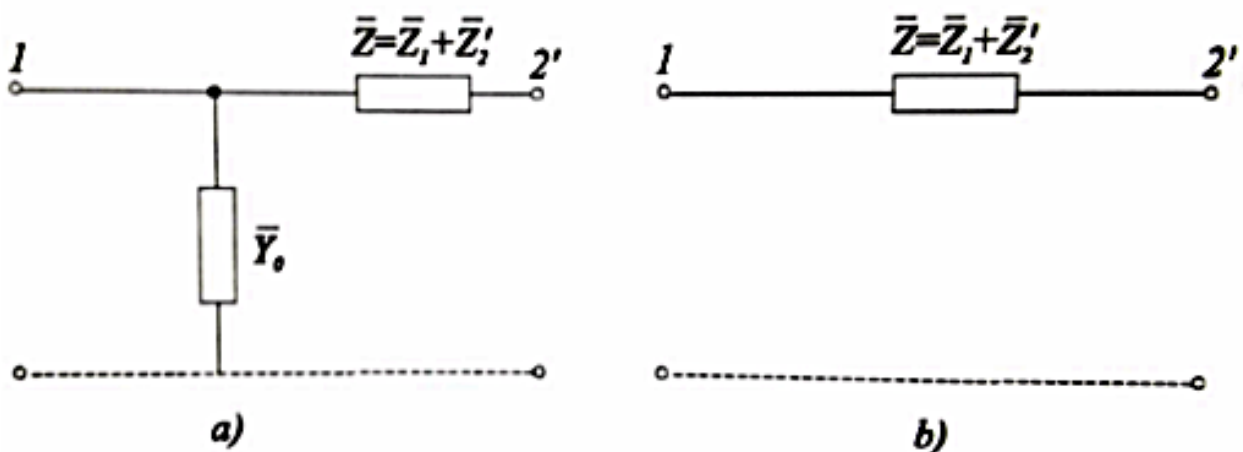
$R_2'$  - djelatni otpor sekundarnog namota preračun na primarnu stranu

$X_2'$  - uzdužna reaktancija sekundarnog namota preračunata na primarnu stranu

$R_0$  - djelatni otpor koji predstavlja gubitke u željezu transformatora

$X_0$  - poprečna reaktancija

Prema literaturi [9]: “Manje točna je (gama)  $\Gamma$ -shema, ali u praksi zadovoljava u svim proračunima osim u onima gdje se zahtijeva velika točnost (slika 3.5a). Treba imati još u vidu i to da često nećemo raspolagati podacima iz kojih bismo mogli izračunati impedancije  $\bar{Z}_1$  i  $\bar{Z}_2$  svaku za sebe. U mrežama srednjih napona zadovoljava I-shema (slika 3.5b), kod koje je popriječna grana potpuno zanemarena. Ova najjednostavnija shema zadovoljit će i svim slučajevima kod proračuna prilika u kratkom spoju.”



Sl. 3.5. a)  $\Gamma$ -shema i b) I-shema transformatora [9]

Za proračun parametara  $\Gamma$ -sheme potrebni su sljedeći podaci o transformatoru [10]:

- nazivni (linijski) naponi:  $U_{n1}$  i  $U_{n2}$
- nazivne prividne snage:  $S_{n1}$  i  $S_{n2}$
- relativni napon kratkog spoja:  $u_k$  (%)
- gubici pri kratkom spoju:  $P_k$
- gubici pri prazom hodu:  $P_0$
- relativna struja magnetiziranja:  $i_0$

Navedeni podaci su redovito dostupni za svaki transformator zbog toga jer se nalaze na njegovoj natpisnoj pločici što je velika prednost u odnosu na T-shemu. Kod T-sheme su potrebni i neki podaci koji se ne nalaze na natpisnoj pločici već se do njih dolazi eksperimentalnim putem tj. potrebne su ispitne liste sastavljene u tvornici, iz koje je pojedini transformator proizveden, što može biti problem jer su neki transformatori proizvedeni još u prošlom stoljeću, te se stoga se u praksi češće upotrebljava gama shema.

Tada se mogu računati parametri  $\Gamma$ -sheme prema [10]:

a) Uzdužna impedancija  $\bar{Z}[\Omega]$ :

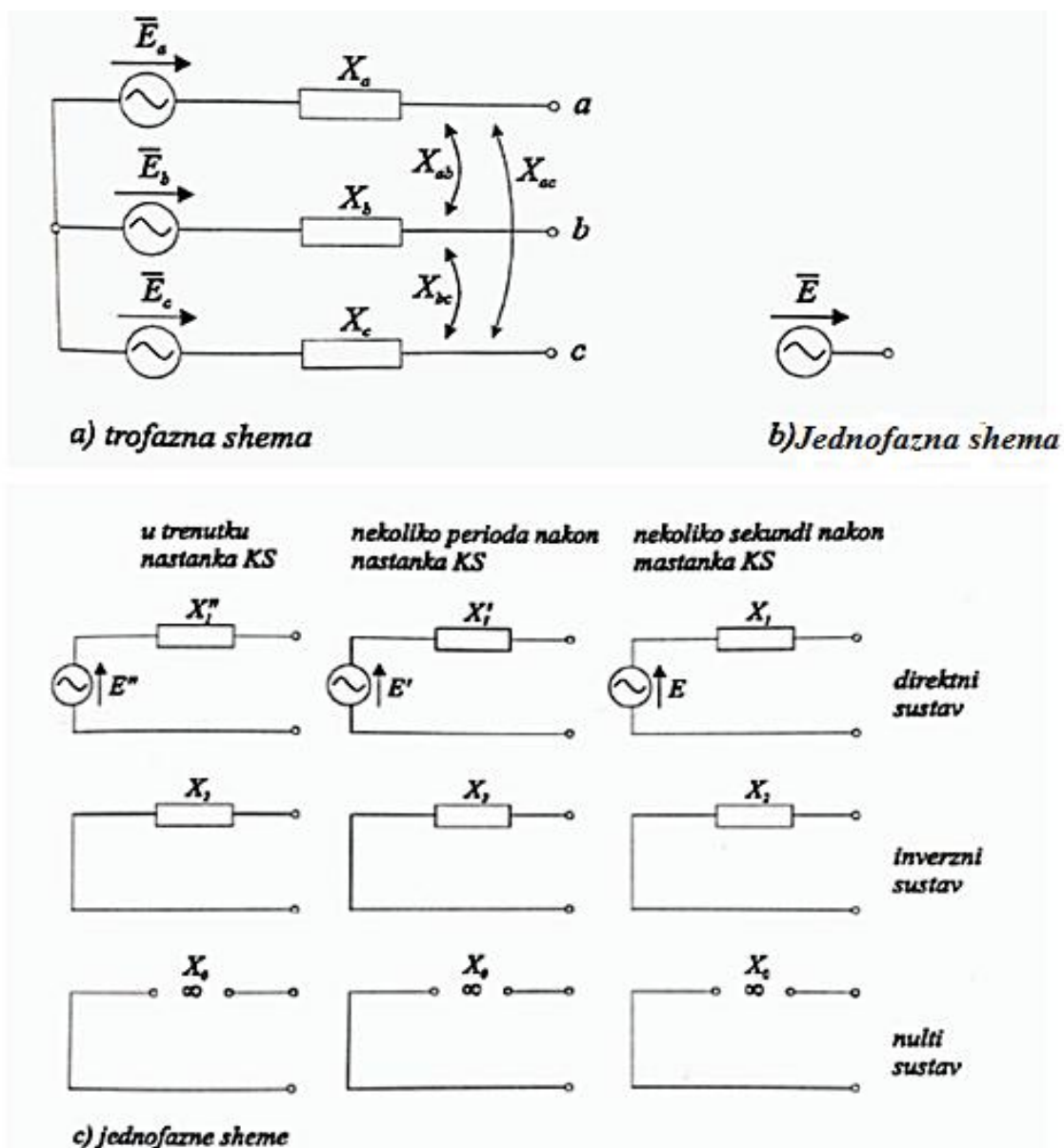
$$Z = u_k \cdot \frac{U_n^2}{S_n}; R = \left( \frac{U_n}{S_n} \right)^2 \cdot P_k; X = \sqrt{Z^2 - R^2} \rightarrow \bar{Z} = R + j \cdot X \quad (3-7)$$

b) Poprečna admitancija  $\bar{Y}_0[S]$ :

$$Y_0 = i_0 \cdot \frac{S_n}{U_n^2}; G_0 = \frac{P_0}{U_n^2}; B_0 = \sqrt{Y_0^2 - G_0^2} \rightarrow \bar{Y}_0 = G_0 + j \cdot B_0 \quad (3-8)$$

### 3.3. Nadomjesne sheme generatora

Prema literaturi [9]: “Na slici 3.6. nacrtane su nadomjesne sheme sinkronog genratora. Jednofazna shema prikazuje položaj generatora u mreži, a uz ili za ovu shemu ispisuju se potrebni podaci. Jednofazna shema mreže, u koju je uključena jednofazna shema generatora služi za proračun kada je to moguće, a iz ovog proračuna slijedi proračun električnih veličina u trofaznim nadomjesnim elementima mreže. Opisano ponašanje generatora u početnom, prijelaznom i trajnom razdoblju te rastavljanje na simetrične komponente dalo je za generator devet jednofaznih nadomjesnih shema.”

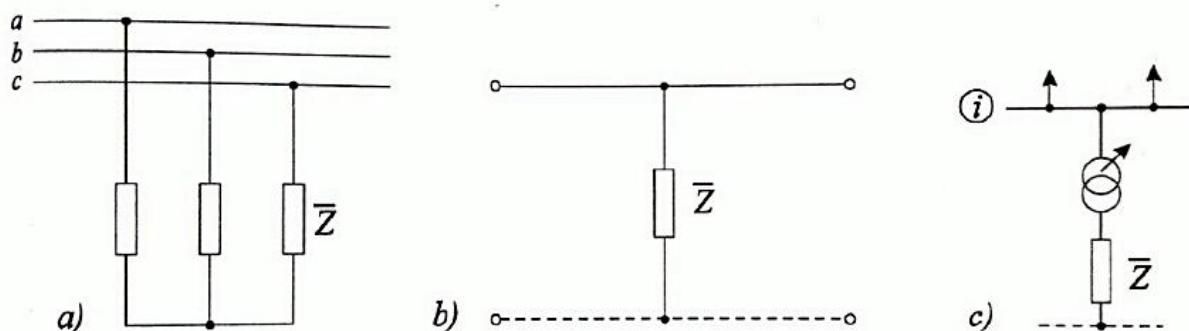


Sl. 3.6. Nadomjesne sheme sinkronog generatora [9]

### 3.4. Nadomjesne sheme potrošača

Prema literaturi [9]: “Prilikom analize elektroenergetske mreže pod pojmom potrošač može se zavisno o prirodi problema, misliti striktno na pojedinačno trošilo (sijalica, grijač, motor i sl.), ali se znatno češće misli na manju ili veću skupinu trošila, priključenih na neki čvor (stan, stambena zgrada, tvornički pogon, cijela tvornica, stambeni blok, poljoprivredno gospodarstvo, selo, gradski predio, grad, itd.). U pravilu se potrošači računaju kao trofazni i simetrični. iznimku čine npr. samo proračuni kućnih instalacija, a u visokonaponskim mrežama izrazito nesimetrični potrošači (izmjeničnim naponom napajane kontaktne mreže elektrovuče, jednofazne elektrolučne peći i sl.).“

Jednofazni nadomjestak simetričnog trofaznog potrošača grafički se prikazuje kao popriječna grana između faze i neutralnog vodiča, dakle u obliku koji se još naziva I-shema [9]. Prema tome pojedine faze nadomjesnog trofaznog potrošača spojene su u zvijezdu (Slika 3.7.) [9].



**Sl. 3.7.** a) trofazna i b) jednofazna nadomjesna shema potrošača; c) potrošač priključen na čvor i preko regulacijskog transformatora (jednofazni prikaz) [9]

Impedancija, odnosno admitancija jedne faze tako prikazanog trofaznog potrošača određuje se po formulama prema [9]:

$$\bar{Z} = \frac{|\bar{U}|^2}{\bar{S}^*} ; \quad \bar{Y} = \frac{\bar{S}^*}{|\bar{U}|^2} \quad (3-9)$$

ako je kompleksna snaga određena s  $\bar{S} = \sqrt{3} \cdot \bar{U} \cdot \bar{I}^*$ , odnosno:

$$\bar{Z} = \frac{|\bar{U}|^2}{\bar{S}} ; \quad \bar{Y} = \frac{\bar{S}}{|\bar{U}|^2} \quad (3-10)$$

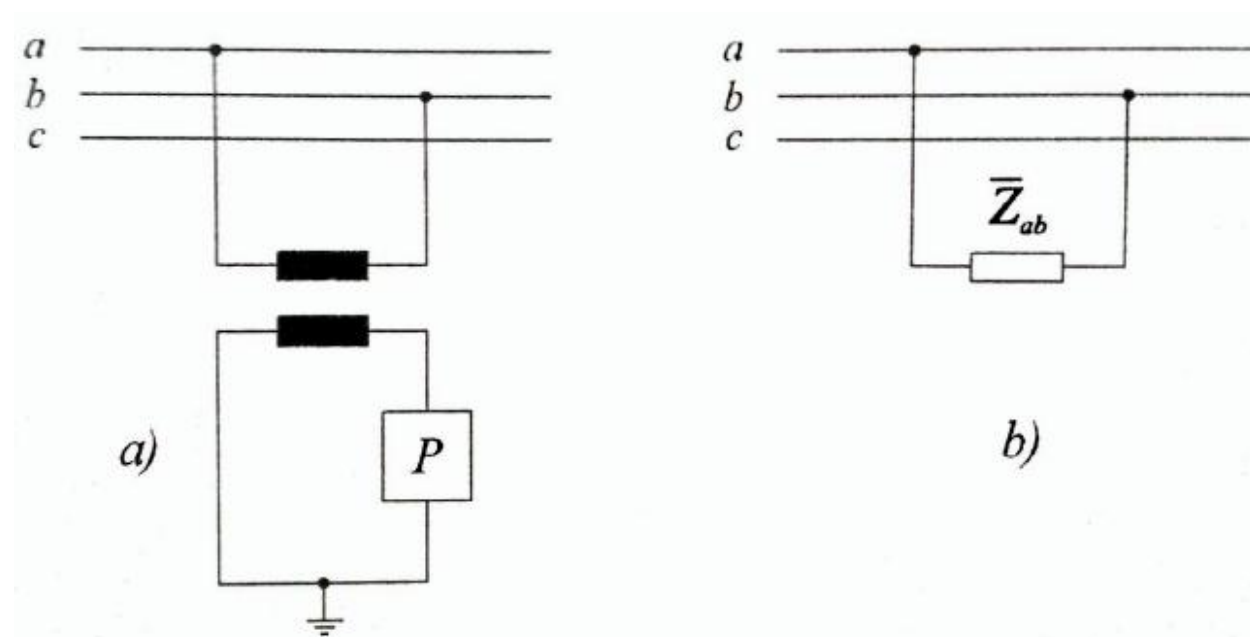
ako je kompleksna snaga određena s  $\bar{S} = \sqrt{3} \cdot \bar{U}^* \cdot \bar{I}$ , U je linijski napon, a S trofazna snaga.



Izrazi su praktički univerzalni, jer su potrošači električne energije gotovo uvijek zadani podatkom o snazi, uz dodatno navođenje nazivnog napona [9].

Prema literaturi [9]: “Nesimetrije napona i struje u mreži su nepoželjne, jer se u slučaju nesimetrija osim direktne komponente napona i struje, pojavljuje još i inverzna komponenta, a katkada i nulta komponenta. Inverzna komponenta izaziva nepoželjne smetnje u radu nekih trošila i elemenata mreže, dok nulta komponenta izaziva smetnje u metalnim tvorevinama u blizini vodova (cjevovodi, a naročito žični nadzemni vodovi telekomunikacija).“

Prema literaturi [9]: “Mnogo značajniji uzročnici nesimetrija su nesimetrični, u pravilu jednofazni potrošači. Tipični takvi potrošači su jednofazne elektrolučne peći i električna vuča (željeznica) s jednofaznim napajanjem lokomotiva. Jednofazni potrošač  $P$  priključuje se na mrežu na dvije faze putem jednofaznog transformatora (slika 3.8a), shematski na slici 3.8b). Impedancija potrošača  $\bar{Z}_{ab}$  na slici 3.8b izračunava se uz poznati linijski napon i snagu potrošača prema izrazima (3-9) i (3-10), a time što se uvrštava stvarna (jednofazna) snaga potrošača.“



**Sl. 3.8.** Način priključka jednofaznog potrošača na trofaznu mrežu visokog napona [9]

## 4. METODE ZA PRORAČUN ELEKTROENERGETSKIH MREŽA SA VIŠE NAPONSKIH RAZINA

Prema literaturi [11]: “Bez obzira primjenjuju li se za proračun elektronička računala ili ne, proračun mreže izvodimo na nadomjesnoj shemi mreže u kojoj su svi parametri svedeni na jednu naponsku razinu. Tako se izbjegava neugodno računanje s transformatorima. Samo ako se neka zamka ne zaključuje, i u ovakvoj nadomjesnoj shemi pojavljuje se idealni transformator. Međutim, u većini slučajeva broj time uvjetovanih transformatora bit će jako malen ili ih uopće nema.”

Najčešće koristimo dvije metode za proračun elektroenergetskih mreža, a to su: metoda apsolutnih vrijednosti i metoda relativnih (jediničnih) vrijednosti. Kod metode apsolutnih vrijednosti se sve vrijednosti reduciraju na jednu naponsku razinu dok kod metode relativnih vrijednosti se sve vrijednosti dijele sa baznim veličinama.

### 4.1. Brojčane veličine u proračunu

Razlikujemo stvarne, nazivne, bazne, reducirane i relativne veličine [11].

Nazivne veličine su one veličine za koje je uređaj građen. Snaga  $S_n$ , struja  $I_n$  i napon  $U_n$  daju uvid u mogućnosti prijenosa, te strujnog i električnog naprezanja, dok nazivni prijenosni odnos  $r_n$  daje omjer broja zavoja transformatora kada je regulacijska sklopka u srednjem položaju [11]. Ako transformator nije regulacijski, nazivni prijenosni odnos jednak je stvarnom prijenosnom odnosu [11].

Prema literaturi [11]: “Stvarne veličine  $\bar{S}, \bar{U}, \bar{I}$  i  $\bar{Z}$  su stvarne fizikalne veličine, i mogu se utvrditi mjerenjem. Njima nećemo dodijeliti indeks i računat ćemo da je takva veličina stvarna, ako nije drugačije naglašeno. Tako se i stvarni prijenosni odnos regulacijskog transformatora označava sa  $r$ . Kao posebni slučaj, stvarne veličine (osim stvarnih impedancija, koje su invarijantne tijekom pogona) mogu poprimiti vrijednost nazivnih. Stvarni prijenosni odnos regulacijskog transformatora može iznimno poprimiti vrijednost omjera nazivnih napona tim transformatorom povezanih mreža.”

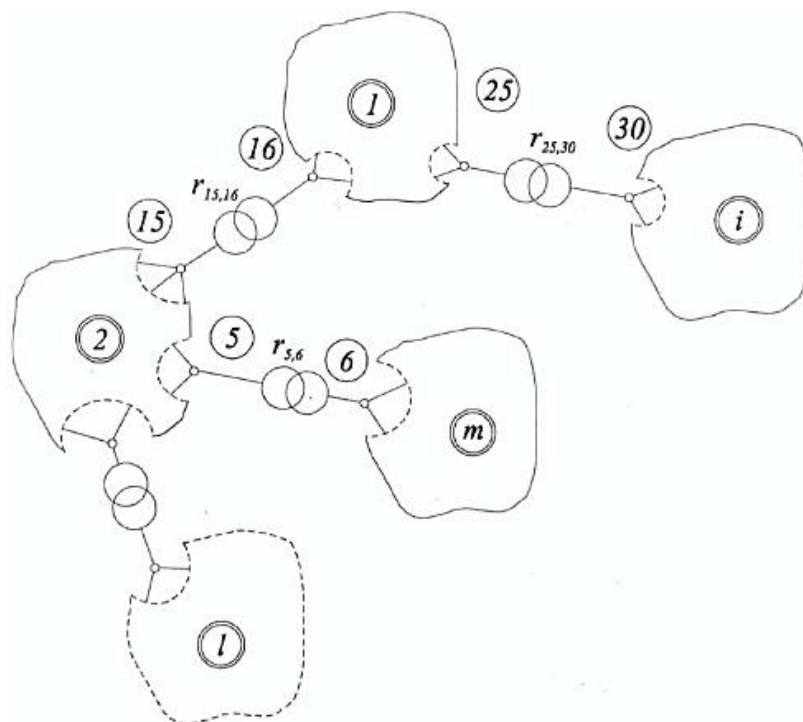
Bazne veličine  $S_B, U_B, I_B$  i  $Z_B$  dobivamo kod idealnog praznog hoda mreže uz stvarni prijenosni omjer transformatora [11]. Po slobodnoj volji se odabire bazna snaga koja je jednaka za cijelu mrežu i bazni napon jedne naponske razine [11]. Iako u idealnom praznom hodu u mreži ne teku nikakve struje, bazne struje definiramo kao veličine izvedene iz bazne snage i baznih napona [11].

Reducirane veličine  $\bar{S}_r, \bar{U}_r, \bar{I}_r$  i  $\bar{Z}_r$  dobivamo ako cijelu mrežu preračunamo (reduciramo) na jednu naponsku razinu [11]. Reducirane veličine one naponske razine na koju su proračunate ostale, jednake su stvarnima (metoda otpora). [11]

Relativne, tzv. jedinične veličine, su omjer stvarnih veličina i baznih veličina, te ih označavamo s malim tiskanim slovima:  $\bar{s}, \bar{u}, \bar{i}, \bar{z}$ .

## 4.2. Metoda apsolutnih vrijednosti

Cjelokupnu mrežu rastavimo na onoliko dijelova koliko ima naponskih razina povezanih transformatorima [11]. Dijelove mreže označimo brojevima od 1 do  $m$  (slika 4.1.) [11]. Odaberimo mrežu na čiju naponsku razinu želimo svesti cijelu mrežu. Neka to bude npr. mreža 1 [11].



**Sl. 4.1.** Numerirane naponske razine [11]

Bazne napone određujemo s pomoću stvarnih prijenosnih omjera transformatora, pošto su omjeri baznih napona identični sa stvarnim prijenosnim omjerima transformatora kojima su te mreže povezane [11]. Bazni napon onog dijela mreže kojem smo dodijelili broj 1 označimo sa  $U_{B1}$ , a analogno i ostale do  $U_{Bm}$  [11].

U mreži na čiju naponsku razinu svodimo cijelu mrežu vrijedi prema [11]:

$$\bar{Z}_r = \bar{Z} \quad \bar{U}_r = \bar{U} \quad \bar{I}_r = \bar{I} \quad (4-1)$$

Usvojimo li da je:

$$r_{ik} = \frac{1}{r_{ki}} \quad i, k = \text{čvorovi mreže} \quad (4-2)$$

možemo pisati:

$$\frac{U_{B1}}{U_{B2}} = r_{16,15} \rightarrow U_{B2} = r_{15,16} \cdot U_{B1}$$

$$\frac{U_{B1}}{U_{Bi}} = r_{25,30}$$

$$\frac{U_{B2}}{U_{Bm}} = r_{5,6} \rightarrow U_{B1} \cdot r_{15,16} = U_{Bm} \cdot r_{5,6}$$

$$\frac{U_{B1}}{U_{Bm}} = r_{5,6} \cdot r_{16,15}$$

Odnose između stvarnih i reduciranih veličina izražavamo omjerima baznih napona. Pošto su reducirana i stvarna snaga jednake [11]:

$$\bar{S}_r = \bar{S} \quad (4-3)$$

za cijelu mrežu moraju nam vrijediti slijedeći odnosi:

$$\bar{U}_{ri} = \bar{U}_i \cdot \frac{U_{B1}}{U_{Bi}} \quad \text{ili} \quad \bar{U}_i = \bar{U}_{ri} \cdot \frac{U_{Bi}}{U_{B1}} \quad (4-4)$$

$$\bar{I}_{ri} = \bar{I}_i \cdot \frac{U_{Bi}}{U_{B1}} \quad \text{ili} \quad \bar{I}_i = \bar{I}_{ri} \cdot \frac{U_{B1}}{U_{Bi}} \quad (4-5)$$

Kontrola:

$$\sqrt{3} \cdot \bar{U}_{ri} \cdot \bar{I}_{ri}^* = \sqrt{3} \cdot \bar{U}_i \cdot \frac{U_{B1}}{U_{Bi}} \cdot \bar{I}_i^* \cdot \frac{U_{Bi}}{U_{B1}} = \sqrt{3} \cdot \bar{U}_i \cdot \bar{I}_i^* \quad (4-6a)$$

$$\bar{Z}_{ri} = \frac{\bar{U}_{ri}^2}{\bar{S}} = \frac{\bar{U}_{ri}^2}{\bar{U}_i^2} \cdot \bar{Z}_i = \bar{U}_i^2 \cdot \frac{U_{B1}^2}{U_{Bi}^2} \cdot \frac{\bar{Z}_i}{\bar{U}_i^2} = \bar{Z}_i \cdot \left( \frac{U_{B1}}{U_{Bi}} \right)^2$$

i obrnuto:

$$\bar{Z}_i = \bar{Z}_{ri} \left( \frac{U_{Bi}}{U_{B1}} \right)^2 \quad (4-6b)$$

### 4.3. Metoda relativnih (jediničnih) vrijednosti

Napomena: Poglavlje 4.2. završnog rada nastalo je prijevodom i obradom materijala iz literature: J. D. Glover, M. S. Sarma, T. J. Overbye, Power System Analysis and Design, Fifth Edition [2], od 108. do 116. stranice.

Fizikalne veličine elektroenergetskog sustava kao što su napon, struja, i impedancija često su izražene po jedinici (engl. *per-unit*) ili postotku određenih baznih vrijednosti. Na primjer, ako je određen bazni napon od 20 kV, tada je napon 18 kV ( $18/20$ ) = 0.9 po jedinici ili 90%. Izračuni se tada mogu izvesti sa jediničnim veličinama umjesto sa stvarnim veličinama. Prednost jediničnog sustava je da se odgovarajućim određivanjem baznih vrijednosti, nadomjesni krug transformatora može pojednostaviti. Namot idealnog transformatora se može eliminirati, tako da naponi, struje i vanjske impedancije i admitancije izražene po jedinici se ne mijenjaju kada su reducirane s jedne strane transformatora na drugu. Ovo može biti značajna prednost čak i u elektroenergetskim sustavima umjerene veličine, gdje se može nalaziti stotine transformatora. Jedinični sustav nam omogućuje da izbjegnemo mogućnost ozbiljnih pogrešaka u proračunu kada reduciramo veličine s jedne strane transformatora na drugu. Još jedna prednost jediničnog sustava je da jedinične impedancije električne opreme sličnog tipa obično se nalaze unutar uskog broječanog raspona kada se nazivni podaci opreme koriste kao bazne vrijednosti. Zbog ovoga, jedinični podaci o impedanciji mogu se brzo provjeriti u slučaju velikih pogrešaka od strane nekoga tko je upoznat sa jediničnim vrijednostima. Osim toga, proizvođači obično iskazuju impedanciju strojeva i transformatora u jediničnim vrijednostima ili postotku na natpisnoj pločici.

Jedinične veličine se računaju na sljedeći način:

$$\text{jedinična veličina} = \text{stvarna veličina} / \text{bazna vrijednost veličine} \quad (4-7)$$

gdje je stvarna veličina vrijednost veličine u stvarnim jedinicama. Bazna vrijednost ima iste jedinice kao i stvarna veličina, što čini jediničnu veličinu bez dimenzije. Također, bazna vrijednost je uvijek realan broj. Stoga, kut jedinične veličine isti je kao i kut stvarne veličine. Dvije nezavisne bazne vrijednosti mogu se proizvoljno odabrati u jednoj točki u elektroenergetskom sustavu. Obično bazni napon  $V_B$  i bazna prividna snaga  $S_{B1f}$  se odabiru za

jednofazni krug ili za jednu fazu trofaznog kruga. Tada, da bi električni zakoni bili valjani u jediničnom sustavu sljedeće relacije moraju biti korištene za ostale bazne veličine:

$$P_{B1f} = Q_{B1f} = S_{B1f} \quad (4-8)$$

$$I_B = \frac{S_{B1f}}{V_B} \quad (4-9)$$

$$Z_B = R_B = X_B = \frac{V_B}{I_B} = \frac{V_B^2}{S_{B1f}} \quad (4-10)$$

$$Y_B = G_B = B_B = \frac{1}{Z_B} \quad (4-11)$$

gdje je  $V_B$  bazni fazni napon, a indeks  $1f$  znači vrijednost po fazi (engl. *per phase*)

Prema konvenciji, prihvaćamo sljedeća dva pravila za bazne veličine:

- 1) Vrijednost  $S_{B1f}$  je ista za cijeli elektroenergetski sustav.
- 2) Omjer baznog napona na obje strane transformatora odabran je da bude isti kao omjer nazivnih napona transformatora.

S ova dva pravila, jedinična impedancija ostaje nepromijenjena kada se reducira s jedne strana transformatora na drugu stranu.

#### **Primjer 4.1.** Jedinična impedancija: jednofazni transformator

Napomena: Primjer 4.1. završnog rada nastao je prijevodom i obradom materijala iz literature: J. D. Glover, M. S. Sarma, T. J. Overbye, Power System Analysis and Design, Fifth Edition [2], od 109. do 110. stranice.

Jednofazni dvonamotni transformator ima sljedeće nazivne podatke: 20 kVA, 480/120 V, 60 Hz. Ekvivalentna rasipna impedancija transformatora reducirana na 120 voltni namot, označen kao namot 2, iznosi  $\bar{Z}'_2 = 0.0525 \angle 78.13^\circ$ . Koristeći nazivne podatke transformatora kao bazne vrijednosti, odredite jediničnu rasipnu impedanciju reduciranu na namot 2 i reduciranu na namot 1.

**RJEŠENJE:** Vrijednosti  $S_B, V_{B1}$ , i  $V_{B2}$  (sa nazivnih podataka transformatora) su:

$$S_B = 20 \text{ kVA}, \quad V_{B1} = 480 \text{ V}, \quad V_{B2} = 120 \text{ V}$$

Koristeći relaciju (4-10), bazna impedancija na 120 voltnoj strani transformatora je:

$$Z_{B2} = \frac{V_{B2}^2}{S_B} = \frac{(120)^2}{20000} = 0.72 [\Omega]$$

Zatim, koristeći (4-7), jedinična rasipna impedancija reducirana na namot 2 je:

$$\bar{Z}'_2 = \frac{\bar{Z}'_2}{Z_{B2}} = \frac{0.0525 \angle 78.13^\circ}{0.72} = 0.0729 \angle 78.13^\circ$$

Ako se  $\bar{Z}'_2$  reducira na namot 1,

$$\bar{Z}'_1 = r_n^2 \cdot \bar{Z}'_2 = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot \bar{Z}'_2 = \left( \frac{480}{120} \right)^2 \cdot (0.0525 \angle 78.13^\circ) = 0.84 \angle 78.13^\circ [\Omega]$$

Bazna impedancija na 480 voltnoj strani transformatora je

$$Z_{B1} = \frac{V_{B1}^2}{S_B} = \frac{(480)^2}{20000} = 11.52 [\Omega]$$

i jedinična rasipna impedancija reducirana na namot 1 je

$$\bar{Z}'_1 = \frac{\bar{Z}'_1}{Z_{B1}} = \frac{0.84 \angle 78.13^\circ}{11.52} = 0.0729 \angle 78.13^\circ = \bar{Z}'_2$$

Prema tome, jedinična rasipna impedancija ostaje nepromijenjena kada se reducira sa namota 2 na namot 1. To je postignuto određivanjem:

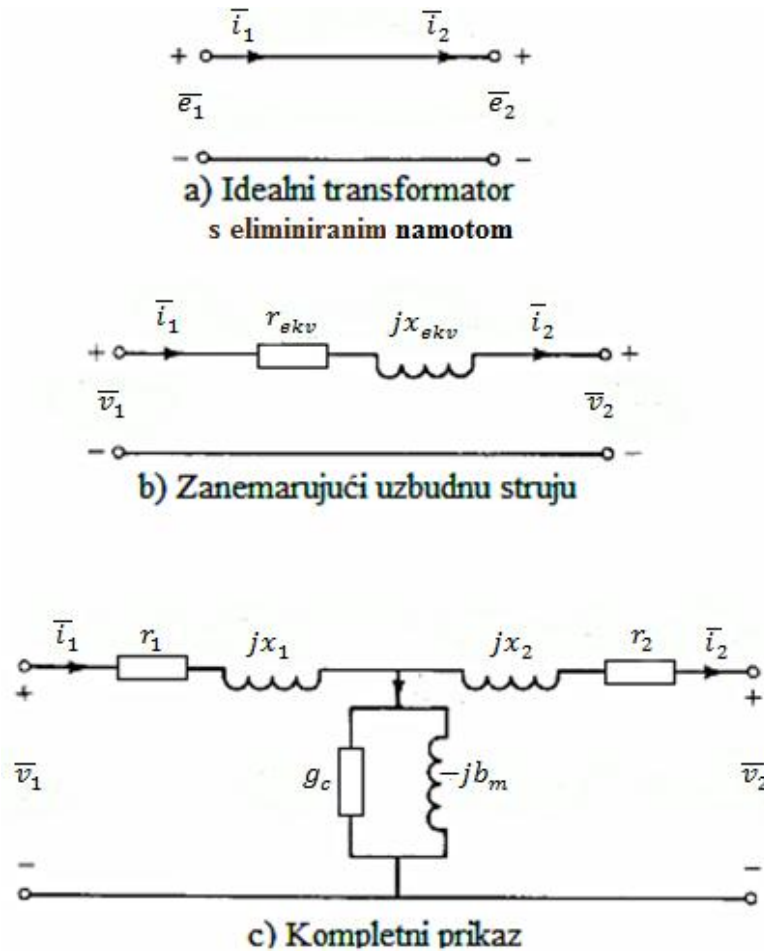
$$\frac{V_{B1}}{V_{B2}} = \frac{V_{naz1}}{V_{naz2}} = \left( \frac{480}{120} \right)$$

gdje je:

$V_{naz1}$  - Nazivni napon primarnog namota

$V_{naz2}$  - Nazivni napon sekundarnog namota

Slika 4.2. prikazuje tri jedinična kruga jednofaznog dvonamotnog transformatora.



**Sl. 4.2.** Jedinični nadomjesni krugovi jednofaznog dvonamotnog transformatora

Idealni transformator, prikazan na slici 4.2a, zadovoljava jedinične relacije  $\bar{e}_1 = \bar{e}_2$ , i  $\bar{i}_1 = \bar{i}_2$ , koje se mogu izvesti na sljedeći način:

$$\bar{E}_1 = \left( \frac{N_1}{N_2} \right) \cdot \bar{E}_2 = r_n \cdot \bar{E}_2 \quad (4-12)$$

Prvo se relacija (4-12) podijeli s  $V_{B1}$ :

$$\bar{e}_1 = \frac{\bar{E}_1}{V_{B1}} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{\bar{E}_2}{V_{B1}} \quad (4-13)$$

Tada, koristeći  $V_{B1} / V_{B2} = V_{naz1} / V_{naz2} = N_1 / N_2$ ,

$$\bar{e}_1 = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{\bar{E}_2}{\left( \frac{N_1}{N_2} \right) \cdot V_{B2}} = \frac{\bar{E}_2}{V_{B2}} = \bar{e}_2 \quad (4-14)$$

Slično, izraz (4-15) se dijeli s  $I_{B1}$ :



$$\bar{I}_1 = \left( \frac{N_2}{N_1} \right) \cdot \bar{I}_2 = \frac{\bar{I}_2}{r_n} \quad (4-15)$$

$$\bar{i}_1 = \frac{\bar{I}_1}{I_{B1}} = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{\bar{I}_2}{I_{B1}} \quad (4-16)$$

Tada, koristeći  $I_{B1} = S_B / V_{B1} = S_B / [(N_1 / N_2) \cdot V_{B2}] = (N_2 / N_1) \cdot I_{B2}$ :

$$\bar{i}_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{\bar{I}_2}{\left( \frac{N_2}{N_1} \right) \cdot I_{B2}} = \frac{\bar{I}_2}{I_{B2}} = \bar{i}_2 \quad (4-17)$$

Prema tome, namot idealnog transformatora se eliminira iz jediničnog kruga kao što je prikazano na slici 4.2a. Jedinična rasipna impedancija je uključena na slici 4.2b, a na slici 4.2c je dodana jedinična poprečna admitancijska grana kako bi se dobio kompletni prikaz.

Kada se samo jedna komponenta, kao npr. transformator, promatra, podaci s natpisne pločice te komponente obično se odabiru kao bazne vrijednosti. Kada je uključeno više komponenti, bazne vrijednosti sustava mogu biti drugačije od podataka s natpisne pločice bilo kojeg uređaja. Tada je nužno pretvoriti jediničnu impedanciju uređaja sa njegovih podataka natpisne pločice na bazne vrijednosti sustava. Za pretvorbu jedinične impedancije s “stare” na “novu” baznu vrijednost tada se koristi:

$$\bar{Z}_{nova} = \frac{\bar{Z}_{stvarna}}{Z_{Bnova}} = \frac{\bar{Z}_{stara} \cdot Z_{Bstara}}{Z_{Bnova}} \quad (4-18)$$

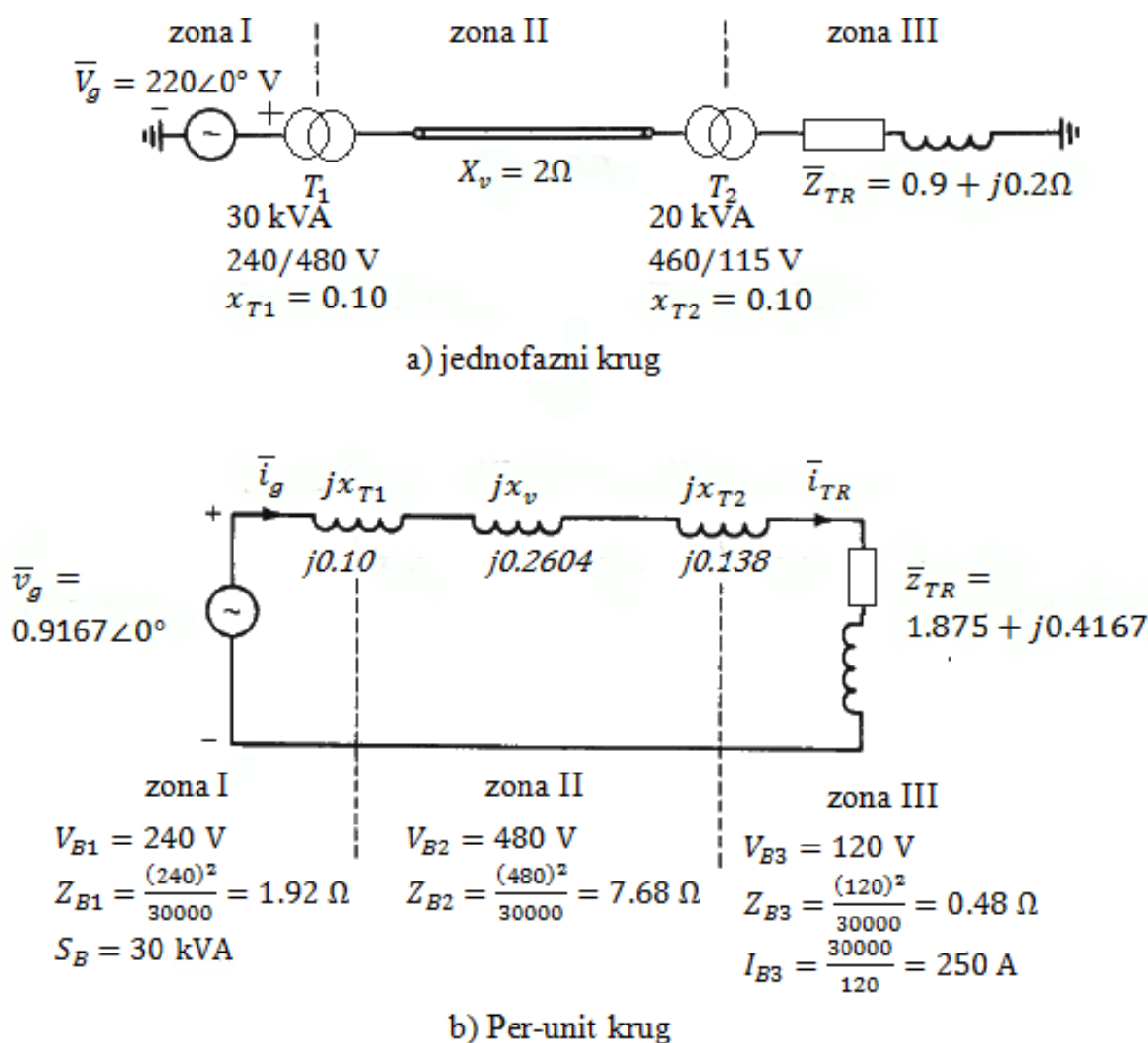
ili, prema (4-10):

$$\bar{Z}_{nova} = \bar{Z}_{stara} \left( \frac{V_{Bstara}}{V_{Bnova}} \right)^2 \cdot \left( \frac{S_{Bnova}}{S_{Bstara}} \right) \quad (4-19)$$

**Primjer 4.2.** Jedinični krug: Jednofazna mreža koja se sastoji od 3 zone

Napomena: Primjer 4.2. završnog rada nastao je prijevodom i obradom materijala iz literature: J. D. Glover, M. S. Sarma, T. J. Overbye, Power System Analysis and Design, Fifth Edition [2], od 112. do 114. stranice.

Tri zone jednofaznog kruga prikazane su na slici 4.3a. Zone su povezane transformatorima  $T_1$  i  $T_2$ , čiji podaci su također prikazani. Koristeći bazne vrijednosti od 30 kVA i 240 V u zoni I, potrebno je nacrtati jedinični krug i odrediti jedinične impedancije i jedinični napon izvora. Zatim izračunati struju trošila u jediničnoj vrijednosti i u amperima. Otpori namota transformatora i poprečne admitancijske grane se zanemaruju.



Sl. 4.3. Jednofazni i jedinični krug za primjer 4.2.

### Rješenje:

Prvo se određuju bazne vrijednosti u svakoj zoni. Bazna snaga,  $S_B = 30 \text{ kVA}$  je ista za cijelu mrežu. Također, bazni napon  $V_{B1} = 240 \text{ V}$  koji je određen za prvu zonu. Prilikom prolaska kroz transformator, bazni napon se mijenja proporcionalno s omjerom primarnog i sekundarnog napona transformatora. Prema tome:

$$V_{B2} = \left( \frac{480}{240} \right) \cdot (240) = 480 [\text{V}]$$

i

$$V_{B3} = \left( \frac{115}{460} \right) \cdot (480) = 120 [\text{V}]$$

Bazne impedancije u zonama 2 i 3 su:

$$Z_{B2} = \frac{V_{B2}^2}{S_B} = \frac{480^2}{30000} = 7.68 [\Omega]$$

i

$$Z_{B3} = \frac{V_{B3}^2}{S_B} = \frac{120^2}{30000} = 0.48 [\Omega]$$

i bazna struja u zoni 3 je:

$$I_{B3} = \left( \frac{S_B}{V_{B3}} \right) = \frac{30000}{120} = 250 [\text{A}]$$

Nadalje, jedinične impedancije kruga se izračunavaju koristeći sustav baznih vrijednosti. Kako je bazna snaga  $S_B = 30 \text{ kVA}$  jednaka kao i vrijednost kVA transformatora  $T_1$ , i bazni napon  $V_{B1} = 240 \text{ V}$  je isti kao i vrijednost napona zone I kod transformatora  $T_1$ , jedinična rasipna reaktancija transformatora  $T_1$  jednaka je nazivnoj vrijednosti s njegove natpisne pločice,  $x_{T1} = 0.1$ . Međutim, jedinična rasipna reaktancija transformatora  $T_2$  mora biti preračunata s svoje nazivne vrijednosti na baznu vrijednost sustava. Koristeći (4-19) i bazni napon

$$V_{B2} = 480 \text{ V:}$$

$$x_{T2} = (0.10) \cdot \left( \frac{460}{480} \right)^2 \cdot \left( \frac{30000}{20000} \right) = 0.1378$$

Alternativni način, koristeći  $V_{B3} = 120 \text{ V}$ :

$$x_{T2} = (0.10) \cdot \left( \frac{115}{120} \right)^2 \cdot \left( \frac{30000}{20000} \right) = 0.1378$$

što daje isti rezultat.

Vod, koji se nalazi u drugoj zoni, ima jediničnu reaktanciju:

$$x_v = \frac{X_v}{Z_{B2}} = \frac{2}{7.68} = 0.2604$$

i trošilo, koji se nalazi u trećoj zoni, ima jediničnu impedanciju:

$$\bar{Z}_{TR} = \frac{\bar{Z}_{TR}}{Z_{B3}} = \frac{0.9 + j0.2}{0.48} = 1.875 + j0.4167$$

Jedinični krug je prikazan na slici 4.3b, gdje su prikazane bazne vrijednosti za svaku zonu, jedinične impedancije, i jedinični napon izvora. Jedinična struja trošila se onda lagano prepračuna sa slike 4.3b na sljedeći način:

$$\begin{aligned} \bar{i}_{TR} = \bar{i}_g &= \frac{\bar{V}_g}{j(x_{T1} + x_v + x_{T2}) + \bar{Z}_{TR}} \\ &= \frac{0.9167 \angle 0^\circ}{j(0.10 + 0.2604 + 0.1378) + (1.875 + j0.4167)} \\ &= 0.4395 \angle -26.01^\circ \end{aligned}$$

Stvarna struja trošila je:

$$\bar{I}_{TR} = (\bar{i}_{TR}) \cdot I_{B3} = (0.4395 \angle -26.01^\circ) \cdot (250) = 109.9 \angle -26.01^\circ [\text{A}]$$

Može se primjetiti da je jedinični nadomjesni krug prikazan na slici 4.3b relativno lagano analizirati, pošto su namoti idealnog transformatora eliminirani odgovarajućim odabirom baznih vrijednosti.

Simetrični trofazni krugovi mogu biti riješeni na osnovi jediničnih vrijednosti ili po fazi nakon pretvaranja trokut spoja impedancije trošila u ekvivaletni zvijezda spoj impedancije. Bazne vrijednosti mogu biti odabrane na osnovi jediničnih vrijednosti ili po fazi. Jednadžbe (4-7) do (4-11) ostaju ispravne za trofazne krugove na osnovi jediničnih vrijednosti. Obično su odabrani  $S_{B3f}$  i  $U_B$ , gdje indeks  $3f$  označava trofaznu vrijednost, a  $U_B$  je linijski bazni napon.

$$S_{B1f} = \frac{S_{B3f}}{3} \quad (4-20)$$

$$V_B = \frac{S_{B3f}}{\sqrt{3}} \quad (4-21)$$

$$S_{B3f} = P_{B3f} = Q_{B3f} \quad (4-22)$$

$$I_B = \frac{S_{B1f}}{V_B} = \frac{S_{B3f}}{\sqrt{3} \cdot U_B} \quad (4-23)$$

$$Z_B = \frac{V_B}{I_B} = \frac{V_B^2}{S_{B1f}} = \frac{U_B^2}{S_{B3f}} \quad (4-24)$$

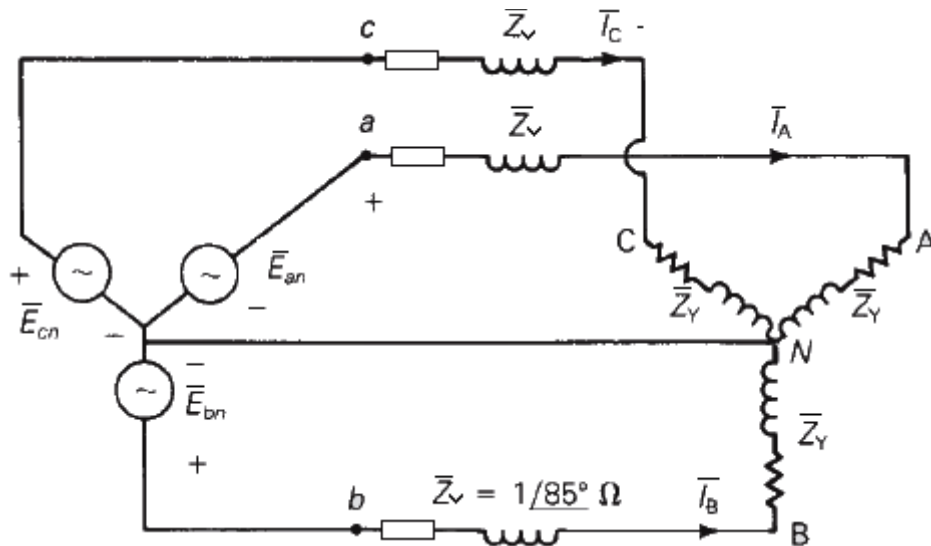
$$R_B = X_B = Z_B = \frac{1}{Y_B} \quad (4-25)$$

**Primjer 4.3.** Jedinične i stvarne struje u simetričnim trofaznim mrežama

Napomena: Primjer 4.3. završnog rada nastao je prijevodom i obradom materijala iz literature: J. D. Glover, M. S. Sarma, T. J. Overbye, Power System Analysis and Design, Fifth Edition [2], od 115. do 116. stranice.

Simetrični u zvijezdu spojen naponski izvor sa  $\bar{E}_{ab} = 480 \angle 0^\circ \text{ V}$  napaja simetrično u trokut spojeno trošilo sa  $\bar{Z}_\Delta = 30 \angle 40^\circ \Omega$ . Impedancija voda između izvora i trošila je  $\bar{Z}_v = 1 \angle 85^\circ \Omega$  po svakoj fazi. Izračunajte jediničnu i stvarnu vrijednost struje voda u fazi  $a$  koristeći da je  $S_{B3f} = 10 \text{ kVA}$  i  $U_B = 480 \text{ V}$ .

**Rješenje:** Prvo je potrebno transformirati  $\bar{Z}_\Delta$  u ekvivalent  $\bar{Z}_Y$ ; ekvivalentni fazni dijagram je prikazan na slici 4.4.



**SI. 4.4** Ekvivalentni fazni dijagram

Bazna impedacija je, prema (4-24):

$$Z_B = \frac{U_B^2}{S_{B3f}} = \frac{(480)^2}{10000} = 23.04 [\Omega]$$

Jedinične impedancije voda i trošila su:

$$\bar{z}_v = \frac{\bar{Z}_v}{Z_B} = \frac{1 \angle 85^\circ}{23.04} = 0.04340 \angle 85^\circ$$

i

$$\bar{z}_Y = \frac{\bar{Z}_Y}{Z_B} = \frac{10 \angle 40^\circ}{23.04} = 0.4340 \angle 40^\circ$$

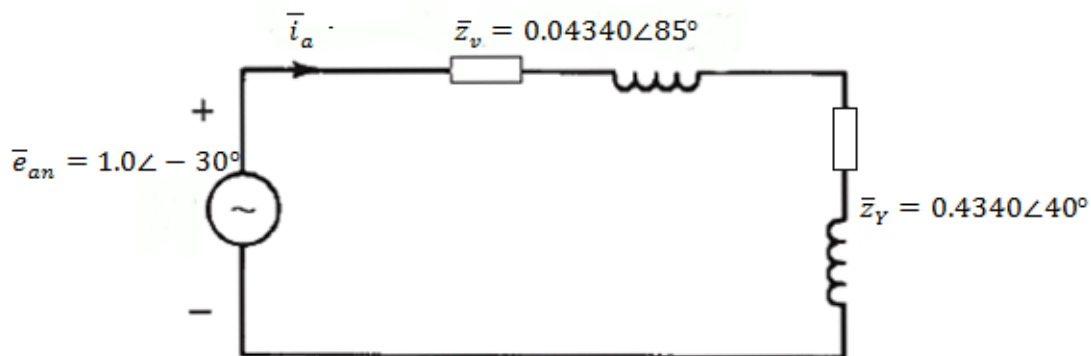
Također,

$$V_B = \frac{U_B}{\sqrt{3}} = \frac{480}{\sqrt{3}} = 277 \text{ V}$$

i

$$\bar{e}_{an} = \frac{\bar{E}_{an}}{V_B} = \frac{277 \angle -30^\circ}{277} = 1.0 \angle -30^\circ$$

Jedinični ekvivalentni krug je prikazan na slici 4.5.



**Sl. 4.5.** Jedinični ekvivalentni krug

Jedinična struja voda faze  $a$  je tada:

$$\bar{i}_a = \frac{\bar{e}_{an}}{\bar{z}_v + \bar{z}_Y} = \frac{1.0 \angle -30^\circ}{0.04340 \angle 85^\circ + 0.4340 \angle 40^\circ} = 2.147 \angle -73.78^\circ$$

Bazna struja je:

$$I_B = \frac{S_{B3f}}{\sqrt{3} \cdot U_B} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot (480)} = 12.03 \text{ [A]}$$

i stvarna struja voda faze  $a$  je:

$$\bar{I}_a = (2.147 \angle -73.78^\circ) \cdot (12.03) = 25.83 \angle -73.78^\circ \text{ [A]}$$

## 5. PRORAČUN MALOG ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

U ovom poglavlju je na primjeru proračuna malog elektroenergetskog sustava prikazana upotreba metoda za proračun elektroenergetskih mreža sa više naponskih razina tj. upotreba metode apsolutnih vrijednosti i metode relativnih vrijednosti.

**Zadatak 5.1.** Za sustav prikazan na slici 5.1. potrebno je izračunati struju, napon i snagu generatora koji napaja taj sustav koristeći:

- Metodu apsolutnih vrijednosti
  - Metodu relativnih vrijednosti (engl. *per-unit*)
- i
- Usporediti dobivene rezultate.

Poznat je napon kod potrošača koji iznosi  $U_p = 34 \text{ kV}$ . Podaci elemenata sustava su sljedeći:

Generator:  $U_n = 10 \text{ kV}$ ,  $x_d'' = 10\%$ ,  $S_n = 20 \text{ MVA}$

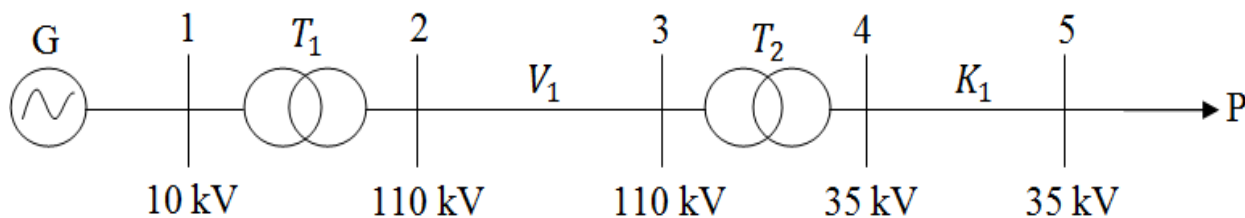
Transformator  $T_1$ :  $10/110 \text{ kV}$ ,  $S_n = 20 \text{ MVA}$ ,  $u_k = 12\%$ ,  $P_K = 18 \text{ kW}$

Transformator  $T_2$ :  $110/35 \text{ kV}$ ,  $S_n = 20 \text{ MVA}$ ,  $u_k = 8\%$ ,  $P_K = 20 \text{ kW}$

Vod  $V_1$ :  $U_n = 110 \text{ kV}$ ,  $R_l = 0.2 \Omega/\text{km}$ ,  $L_l = 1.3 \text{ mH/km}$ ,  $l = 55 \text{ km}$

Kabel  $K_1$ :  $U_n = 35 \text{ kV}$ ,  $R_l = 0.3 \Omega/\text{km}$ ,  $L_l = 1.1 \text{ mH/km}$ ,  $l = 16 \text{ km}$

Potrošač P:  $P = 4 \text{ MW}$ ,  $\cos \varphi = 0.9$  (induktivno)

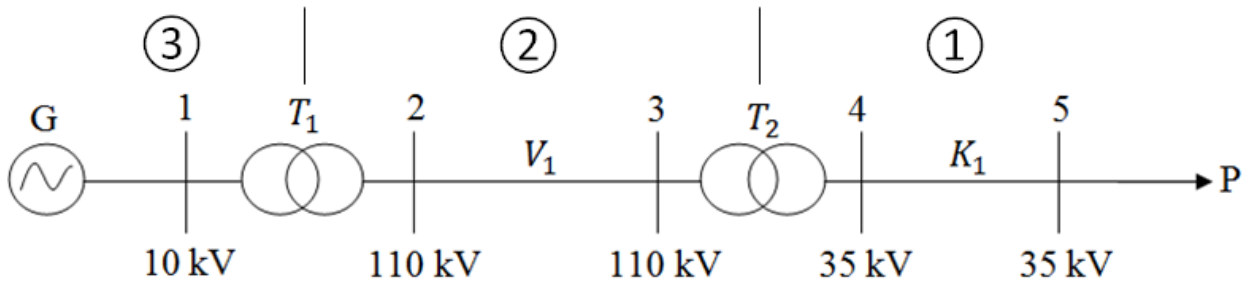


Sl. 5.1. Jednofazna shema mreže

### Rješenje:

#### a) Metoda apsolutnih vrijednosti:

Prvo se u shemi brojevima označe dijelovi mreže koji su na istoj naponskoj razini kao što je označeno na slici 5.2. Zatim je potrebno odabrati onu naponsku razinu odnosno bazni napon na koji ćemo svesti ostali dio mreže. Neka to bude napon mreže 1:  $U_B = 35 \text{ kV}$ .



Sl. 5.2. Jednofazna shema mreže s označenim dijelovima mreže na istoj naponskoj razini

Nakon što je određen bazni napon potrebno je izračunati impedancije elemenata mreže. Pošto se cijela mreža svodi na bazni napon potrebno je i impedancije reducirati na bazni napon. Reducirane impedancije transformatora  $T_1, T_2$  mogu se izračunati pomoću izraza (3-7) ako se u tom izrazu umjesto nazivnog napon  $U_n$  upotrijebi bazni napon  $U_B$ :

$$Z_{T_1} = u_{kT_1} \cdot \frac{U_B^2}{S_{nT_1}} = \frac{12}{100} \cdot \frac{(35 \cdot 10^3)^2}{20 \cdot 10^6} = 7.35 [\Omega]$$

$$R_{T_1} = \left( \frac{U_B}{S_{nT_1}} \right)^2 \cdot P_{kT_1} = \left( \frac{35 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^6} \right)^2 \cdot 18 \cdot 10^3 = 0.0551 [\Omega]$$

$$X_{T_1} = \sqrt{Z_{T_1}^2 - R_{T_1}^2} = \sqrt{7.35^2 - 0.0551^2} = 7.3498 [\Omega]$$

$$\rightarrow \bar{Z}'_{T_1} = R_{T_1} + jX_{T_1} = 0.0551 + j7.3498 [\Omega]$$

Kako se transformator  $T_2$  nalazi na istoj vrijednosti napona kao i bazni napon, iz toga slijedi da je impedancija transformatora  $T_2$  jednaka reduciranoj, odnosno vrijedi da je:  $\bar{Z}_{T_2} = \bar{Z}_{T_{2r}}$ .

$$Z_{T_2} = u_{kT_2} \cdot \frac{U_B^2}{S_{nT_2}} = \frac{8}{100} \cdot \frac{(35 \cdot 10^3)^2}{20 \cdot 10^6} = 4.9 [\Omega]$$

$$R_{T_2} = \left( \frac{U_B}{S_{nT_2}} \right)^2 \cdot P_{kT_2} = \left( \frac{35 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^6} \right)^2 \cdot 20 \cdot 10^3 = 0.06125 [\Omega]$$

$$X_{T_2} = \sqrt{Z_{T_2}^2 - R_{T_2}^2} = \sqrt{4.9^2 - 0.06125^2} = 4.8996 [\Omega]$$



$$\rightarrow \bar{Z}_{T_2} = \bar{Z}'_{T_2} = R_{T_2} + jX_{T_2} = 0.06125 + j4.8996[\Omega]$$

Ista situacija kao kod transformatora  $T_2$  vrijedi i za kabel  $K_1$ , čija se impedancija može izračunati prema izrazu (3-1):

$$\bar{Z}_{K_1} = \bar{Z}'_{K_1} = R_1 \cdot l + jX_1 \cdot l = R_1 \cdot l + j\omega \cdot L \cdot l = 0.3 \cdot 16 + j2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1.1 \cdot 10^{-3} \cdot 16 = 4.8 + j5.5292[\Omega]$$

Impedancije voda  $V_1$  se također može izračunati prema izrazu (3-1), ali je nakon toga još potrebno napraviti redukciju na bazni napon:

$$\bar{Z}_{V_1} = R_1 \cdot l + jX_1 \cdot l = R_1 \cdot l + j\omega \cdot L \cdot l = 0.2 \cdot 55 + j2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1.3 \cdot 10^{-3} \cdot 55 = 11 + j22.4624[\Omega]$$

$$\bar{Z}'_{V_1} = \bar{Z}_{V_1} \cdot \left( \frac{U_B}{U_{Vn}} \right)^2 = (11 + j22.4624) \cdot \left( \frac{35 \cdot 10^3}{110 \cdot 10^3} \right)^2 = 1.1136 + j2.2741[\Omega]$$

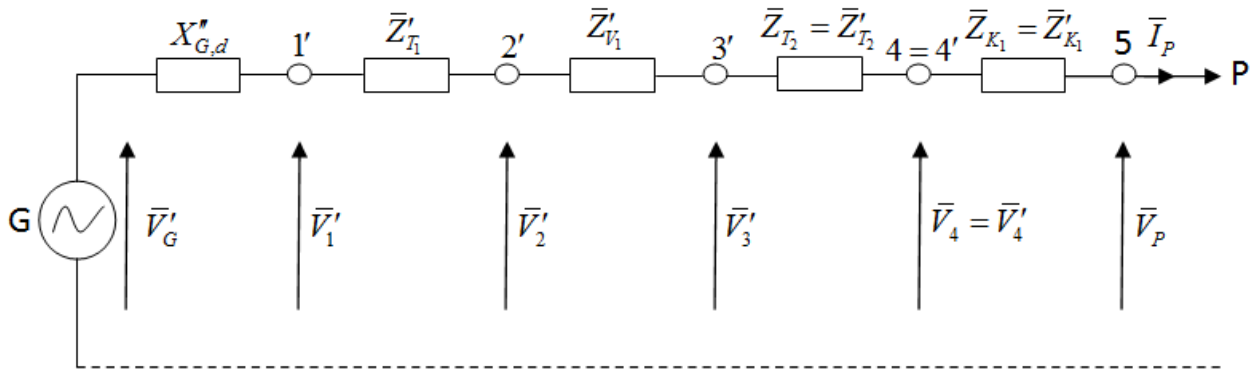
Generator nije idealan i u shemi se prikazuje kao idealni naponski izvor sa reaktancijom  $X''_{G,d}$ , kao što je prikazano na slici 3.6. Ta reaktancija se može izračunati prema sljedećem izrazu:

$$X''_{G,d} = \frac{x''_{d\%}}{100} \cdot \frac{U_B^2}{S_{nG}} \quad (5-1)$$

Pa prema tome reaktancija generatora iznosi:

$$X''_{G,d} = \frac{x''_{d\%}}{100} \cdot \frac{U_B^2}{S_{nG}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{(35 \cdot 10^3)^2}{20 \cdot 10^6} = j6.125[\Omega]$$

Nakon što su izračunate sve impedancije potrebno je nacrtati nadomjesnu shemu sustava s reduciranim veličinama na bazni napon. Nadomjesna reducirana shema sustava prikazana je na slici 5.3.

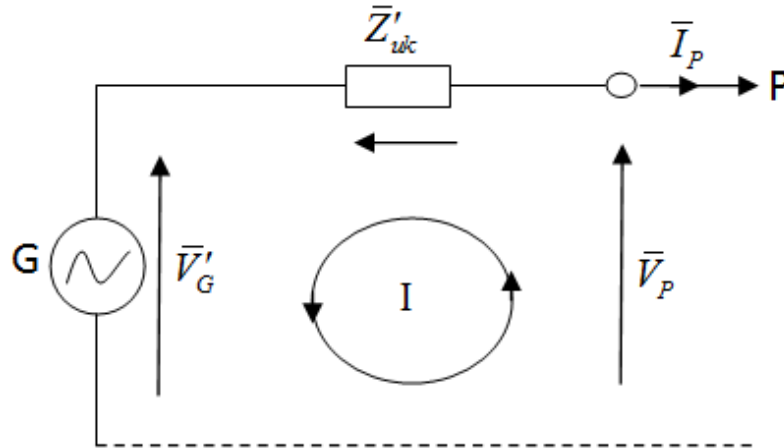


**Sl. 5.3.** Nadomjesna reducirana shema sustava

U proračunu se traže samo iznosi struje, napona i snage generatora stoga nije potrebno izračunavati sve ove napone prikazane na slici 5.3., već se shema može pojednostaviti tako da izračunamo ukupnu impedanciju sustava na sljedeći način:

$$\begin{aligned}\bar{Z}'_{uk} &= jX''_{G,d} + \bar{Z}'_{T_1} + \bar{Z}'_{V_1} + \bar{Z}_{T_2} + \bar{Z}_{K_1} = \\ &= j6.125 + 0.0551 + j7.3498 + 1.1136 + j2.2741 + 0.06125 + j4.8996 + 4.8 + j5.5292 = \\ &= 6.02995 + j26.1777 [\Omega]\end{aligned}$$

Sada se može napraviti pojednostavljena reducirana nadomjesna shema. Pojednostavljena reducirana nadomjesna shema je prikazana na slici 5.4.



Sl. 5.4. Pojednostavljena nadomjesna reducirana shema sustava

Kako bi dobili fazni iznos napona potrošača potrebno je podijeliti linijsku vrijednost napona sa  $\sqrt{3}$ :

$$\bar{V}_P = \frac{\bar{U}_P}{\sqrt{3}} = \frac{34[kV]}{\sqrt{3}} = 19.6299[kV]$$

Struju potrošača možemo izračunati preko formule za snagu koja ima sljedeći oblik:

$$P = 3 \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (5-2)$$

Pa je struja potrošača:

$$I_P = \frac{P}{3 \cdot V_P \cdot \cos \varphi_P} = \frac{4 \cdot 10^6}{3 \cdot 19.6299 \cdot 10^3 \cdot 0.9} = 75.4706[A]$$

$$\cos \varphi_P = 0.9 \rightarrow \varphi_P = \cos^{-1}(0.9) = 25.84^\circ(ind)$$

$$\rightarrow \bar{I}_P = 75.4706 \angle -25.84^\circ [A]$$

Sada kada su izračunate sve potrebne veličine, pomoću Kirchhoffova zakona za napon jednostavno se izračuna reducirani fazni napon generatora:

$$\bar{V}'_G = \bar{V}_P + \bar{I}_P \cdot \bar{Z}'_{uk} = 19.6299 \cdot 10^3 + (75.4706 \angle -25.84^\circ) \cdot (6.02995 + j26.1777)$$

$$\bar{V}'_G = 20900.5867 + j1579.7584 = 209.6 \angle 4.32^\circ [kV]$$

Odnosno linijski:

$$\bar{U}'_G = \sqrt{3} \cdot 209.6 \angle 4.32^\circ = 36.304 \angle 4.32^\circ [\text{kV}]$$

Kako je ovo reducirani napon na 35 kV razini potrebno ga je preračunati na njegov nazivni odnosno na napon od 10 kV:

$$\bar{U}_G = \bar{U}'_G \cdot \frac{U_{Gn}}{U_B} = (36.304 \angle 4.32^\circ) \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{35 \cdot 10^3} = 10.372 \angle 4.32^\circ [\text{kV}]$$

Struja generatora je zapravo jednaka struji potrošača samo ju je potrebno preračunati na 10 kV razinu:

$$\bar{I}_G = \bar{I}_P \cdot \frac{U_B}{U_{Gn}} = (75.4706 \angle -25.84^\circ) \cdot \frac{35 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} = 264.15 \angle -25.84^\circ [\text{A}]$$

Sada kada su poznate vrijednosti napona i struje generatora može se izračunati snaga generatora prema sljedećoj formuli:

$$\bar{S} = 3 \cdot \bar{V} \cdot \bar{I}^* = \sqrt{3} \cdot \bar{U} \cdot \bar{I}^* \quad (5-3)$$

Pa je snaga generatora:

$$\bar{S}_G = \sqrt{3} \cdot \bar{U}_G \cdot \bar{I}_G^* = \sqrt{3} \cdot (10.372 \angle 4.32^\circ) \cdot 10^3 \cdot (264.15 \angle 25.84^\circ)$$

$$\bar{S}_G = (4.103 + j2.384) \cdot 10^6 = 4.745 \angle 30.16^\circ [\text{MVA}]$$

## b) Metoda relativnih vrijednosti:

Prvo se u shemi brojevima označe dijelovi mreže koji su na istoj naponskoj razini kao što je prikazano na slici 5.2. u a) dijelu zadatka. Zatim se kod ove metode odabire bazna snaga i bazni naponi sustava. Bazna snaga je jednaka za cijeli sustav, a bazni napon se odabire tako da omjer baznog napona primarne i sekundarne strane bude isti kao omjer nazivnog napona primara i sekundara. Na taj način se postiže da se jedinična impedancija ne mijenja prilikom reduciranja.

Pošto generator i transformatori imaju jednaku nazivnu snagu logično je odabrati tu snagu za baznu:  $S_B = 20 [\text{MVA}]$ . Kako u mreži postoje 3 naponske razine (10 kV, 110 kV i 35 kV), ti naponi se uzimaju za bazne napone:  $U_{B_1} = 35 [\text{kV}]$ ,  $U_{B_2} = 110 [\text{kV}]$ ,  $U_{B_3} = 10 [\text{kV}]$ .

Nakon odabrane bazne snage i baznih napona potrebno je izračunati stvarne impedancije elemenata. Impedancije transformatora  $T_1$  i  $T_2$  mogu se izračunati prema izrazu (3-7):

$$Z_{T_1} = u_{kT_1} \cdot \frac{U_{nT_1}^2}{S_{nT_1}} = \frac{12}{100} \cdot \frac{(110 \cdot 10^3)^2}{20 \cdot 10^6} = 72.6 [\Omega]$$

$$R_{T_1} = \left( \frac{U_{n_{T_1}}}{S_{n_{T_1}}} \right)^2 \cdot P_{k_{T_1}} = \left( \frac{110 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^6} \right)^2 \cdot 18 \cdot 10^3 = 0.5445 [\Omega]$$

$$X_{T_1} = \sqrt{Z_{T_1}^2 - R_{T_1}^2} = \sqrt{72.6^2 - 0.5445^2} = 72.5979 [\Omega]$$

$$\rightarrow \bar{Z}_{T_1} = R_{T_1} + jX_{T_1} = 0.5445 + j72.5979 [\Omega]$$

Pošto je bazni napon u zadatku a) bio jednak nazivnom naponu transformatora  $T_2$  ta se impedancija ne mora izračunavati već se samo preuzme iz zadatka a):

$$\rightarrow \bar{Z}_{T_2} = R_{T_2} + jX_{T_2} = 0.06125 + j4.8996 [\Omega]$$

Isto vrijedi i za impedanciju kabela:

$$\bar{Z}_{K_1} = \bar{Z}_{K_{lr}} = R_1 \cdot l + jX_1 \cdot l = R_1 \cdot l + j\omega \cdot L \cdot l = 0.3 \cdot 16 + j2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1.1 \cdot 10^{-3} \cdot 16 = 4.8 + j5.5292 [\Omega]$$

Impedancija voda računa se prema izrazu (3-1):

$$\bar{Z}_{V_1} = R_1 \cdot l + jX_1 \cdot l = R_1 \cdot l + j\omega \cdot L \cdot l = 0.2 \cdot 55 + j2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1.3 \cdot 10^{-3} \cdot 55 = 11 + j22.4624 [\Omega]$$

Reaktancija generatora računa se prema izrazu (5-1), samo se umjesto baznog napona upotrijebi nazivni napon generatora:

$$X_{G,d}'' = \frac{x_{d\%}}{100} \cdot \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{(10 \cdot 10^3)^2}{20 \cdot 10^6} = j0.5 [\Omega]$$

Nakon impedancija mogu se izračunati bazne struje prema sljedećem izrazu:

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_B} \quad (5-4)$$

$$I_{B_1} = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_{B_1}} = \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 35 \cdot 10^3} = 329.914 [A]$$

$$I_{B_2} = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_{B_2}} = \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3} = 104.9727 [A]$$

$$I_{B_3} = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_{B_3}} = \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 10^3} = 1154.7 [A]$$

Bazne impedancije mogu se izračunati prema izrazu (4-10):

$$Z_{B_1} = \frac{U_{B_1}^2}{S_B} = \frac{(35 \cdot 10^3)^2}{20 \cdot 10^6} = 61.25 [\Omega]$$

$$Z_{B_2} = \frac{U_{B_2}^2}{S_B} = \frac{(110 \cdot 10^3)^2}{20 \cdot 10^6} = 605 [\Omega]$$

$$Z_{B_3} = \frac{U_{B_3}^2}{S_B} = \frac{(10 \cdot 10^3)^2}{20 \cdot 10^6} = 5 [\Omega]$$

Sada kada su izračunate bazne impedancije mogu se izračunati jedinične impedancije pomoću izraza (4-7):

$$\bar{x}_G = \frac{X_{G,d}''}{Z_{B_3}} = \frac{0.5}{5} = j0.1$$

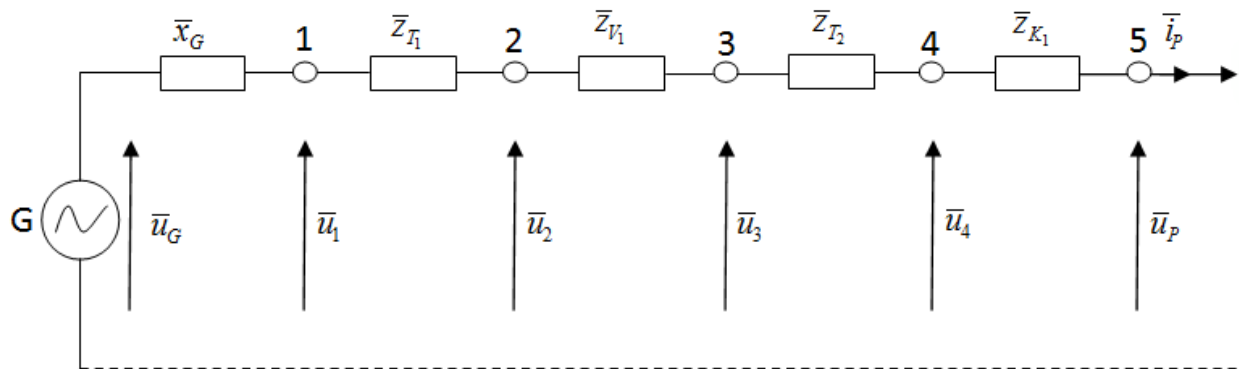
$$\bar{z}_{T_1} = \frac{\bar{Z}_{T_1}}{Z_{B_2}} = \frac{0.5445 + j72.5979}{605} = 9 \cdot 10^{-4} + j0.1199$$

$$\bar{z}_{V_1} = \frac{\bar{Z}_{V_1}}{Z_{B_2}} = \frac{11 + j22.4624}{605} = 0.01818 + j0.0371$$

$$\bar{z}_{T_2} = \frac{\bar{Z}_{T_2}}{Z_{B_1}} = \frac{0.06125 + j4.8996}{61.25} = 1 \cdot 10^{-3} + j0.07999$$

$$\bar{z}_{K_1} = \frac{\bar{Z}_{K_1}}{Z_{B_1}} = \frac{4.8 + j5.5292}{61.25} = 0.07836 + j0.09027$$

Nakon što su izračunate sve jedinične impedancije potrebno je nacrtati jediničnu nadomjesnu shemu sustava. Jedinična nadomjesna shema sustava prikazana je na slici 5.5.



**Sl. 5.5.** Jedinična nadomjesna shema sustava

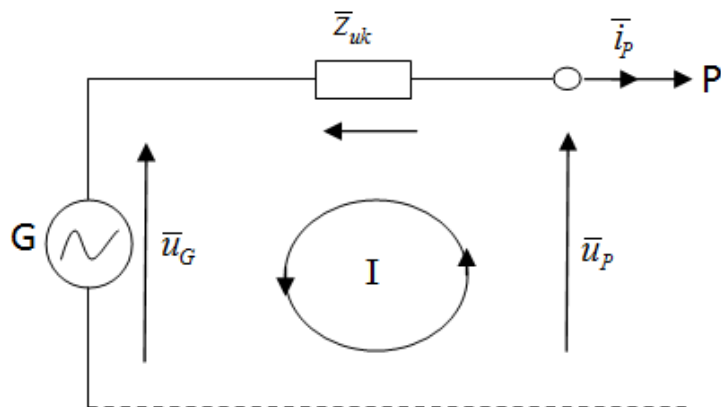
U proračunu se traže samo iznosi struje, napona i snage generatora stoga nije potrebno izračunavati sve ove jedinične napone prikazane na slici 5.5., već se shema može pojednostaviti tako da izračunamo ukupnu jediničnu impedanciju sustava na sljedeći način:

$$\bar{z}_{uk} = \bar{x}_G + \bar{z}_{T_1} + \bar{z}_{V_1} + \bar{z}_{T_2} + \bar{z}_{K_1}$$

$$\bar{z}_{uk} = j0.1 + (9 \cdot 10^{-4} + j0.1199) + (0.01818 + j0.0371) + (1 \cdot 10^{-3} + j0.07999) + (0.07836 + j0.09027)$$

$$\bar{z}_{uk} = 0.09844 + j0.42726$$

Sada se može napraviti pojednostavljena jedinična shema. Pojednostavljena jedinična shema prikazana je na slici 5.6.



Sl. 5.6. Pojednostavljena jedinična nadomjesna shema

Sada je potrebno izračunati jedinični napon potrošača i jediničnu struju potrošača. Jedinični napon potrošača može se izračunati prema izrazu (4-7):

$$\bar{u}_P = \frac{U_P}{U_{B_1}} = \frac{34 \cdot 10^3 \angle 0^\circ}{35 \cdot 10^3} = 0.9714 \angle 0^\circ$$

Da bi se odredila jedinična struja potrošača potrebno je najprije odrediti jediničnu snagu potrošača, također prema izrazu (4-7):

$$p = \frac{P}{U_{B_1} \cdot I_{B_1}} = \frac{4 \cdot 10^6}{35 \cdot 10^3 \cdot 329.914} = 0.3464$$

Sada se može izračunati jedinična struja potrošača koristeći izraz (5-2):

$$i_P = \frac{p}{\sqrt{3} \cdot \bar{u}_P \cdot \cos \varphi} = \frac{0.3464}{\sqrt{3} \cdot (0.9714 \angle 0^\circ) \cdot 0.9} = 0.2287$$

$$\cos \varphi = 0.9 \rightarrow \varphi = \cos^{-1}(0.9) = 25.84^\circ (\text{ind})$$

$$\rightarrow \bar{i}_P = 0.2287 \angle -25.84^\circ$$

Kada su izračunate sve potrebne veličine, pomoću Kirchhoffova zakona za napon jednostavno se izračuna jedinični napon generatora:

$$\bar{u}_G = \bar{u}_P + \bar{i}_P \cdot \bar{Z}_{uk} = 0.9714 \angle 0^\circ + (0.2287 \angle -25.84^\circ) \cdot (0.09844 + j0.42726)$$

$$\bar{u}_G = 1.0373 \angle 4.32^\circ$$

Kako bi se dobila stvarna vrijednost napona generatora potrebno je dobivenu jediničnu vrijednost napona generatora pomnožiti s odgovarajućim baznim naponom:

$$\bar{U}_G = \bar{u}_G \cdot U_{B_1} = (1.0373 \angle 4.32^\circ) \cdot 10 \cdot 10^3 = 10.372 \angle 4.32^\circ [\text{kV}]$$

Jedinična struja potrošača je jednaka jediničnoj struji generatora, te da bi se dobila stvarna vrijednost struje generatora potrebno je tu jediničnu struju pomnožiti s odgovarajućom baznom strujom:

$$\bar{I}_G = \bar{i}_p \cdot I_{B_3} = \bar{i}_G \cdot I_{B_3} = (0.2287 \angle -25.84^\circ) \cdot 1154.7$$

$$\bar{I}_G = 264.08 \angle -25.84^\circ [A]$$

Sada kada su poznate vrijednosti napona i struje generatora može se izračunati snaga generatora prema izrazu (5-3):

$$\bar{S}_G = \sqrt{3} \cdot \bar{U}_G \cdot \bar{I}_G^* = \sqrt{3} \cdot (10.372 \angle 4.32^\circ) \cdot (264.08 \angle -25.84^\circ)$$

$$\bar{S}_G = 4.744 \angle 30.16^\circ [MVA]$$

### c) Usporedba dobivenih rezultata

**Tablica 5.1.** Usporedba rezultata proračuna

| Tražene veličine                   | Metoda apsolutnih vrijednosti | Metoda relativnih vrijednosti |
|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Napon generatora $\bar{U}_G [kV]$  | $10.372 \angle 4.32^\circ$    | $10.372 \angle 4.32^\circ$    |
| Struja generatora $\bar{I}_G [A]$  | $264.15 \angle -25.84^\circ$  | $264.08 \angle -25.84^\circ$  |
| Snaga generatora $\bar{S}_G [MVA]$ | $4.745 \angle 30.16^\circ$    | $4.744 \angle 30.16^\circ$    |

U tablici 5.1. prikazana je usporedba traženih veličina dobivenih proračunom pomoću obje metode. Može se primijetiti da se dobiju isti rezultati s malim odstupanjima koja nastaju zbog ne uzimanja svih decimala brojeva.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu definirano je što je to elektroenergetski sustav, od kojih se elemenata sastoji i koja je njegova svrha. Prikazan je povijesni razvoj elektroenergetskog sustava u svijetu i prikazana je usporedba proizvodnje električne energije u Republici Hrvatskoj za određene godine.

U radu su prikazane i objašnjene nadomjesne sheme elemenata koje omogućuju pojednostavljeni prikaz glavnih elemenata elektroenergetskog sustava (generatora, transformatora, vodova i potrošača) pomoću kojih se tada može prikazati neki elektroenergetski sustav i provesti njegova analiza tj. izvršiti proračun kako bi se došlo do željenih veličine sustava.

Glavni dio završnog rada odnosi se na proračun elektroenergetskih mreža sa više naponskih razina. Kod proračuna koristimo stvarne, nazivne, bazne, reducirane i relativne veličine. Postoje dvije glavne metode za proračun elektroenergetskih mreža sa više naponskih razina, a to su: metoda apsolutnih i metoda relativnih vrijednosti.

Kod metode apsolutnih vrijednosti odabire se bazni napon na koji se reduciraju svi elementi mreže, dok kod metode relativnih vrijednosti se odabire bazna snaga koja je jednaka za cijeli sustav i bazne veličine s kojima se dijele ostale veličine te se tako dobiju relativne veličine odnosno bezdimenzijske veličine (veličine bez mjerne jedinice).

Vrlo važna prednost metode jediničnih vrijednosti je ta što su veličine kod te metode bezdimenzijske i zbog toga je izrazito pogodna za proračune na računalu. Još jedna prednost metode jediničnih vrijednosti naspram metode apsolutnih vrijednosti je ta što se pravilnim odabirom baznih napona i snage postiže da se jedinične struje, naponi, impedancije i admitancije ne mijenjaju prilikom reduciranja s jedne naponske razine na drugu što nam omogućuje da izbjegnemo mogućnost pogrešaka u proračunu kada reduciramo veličine. Kod metode apsolutnih vrijednosti se mora izvršiti reduciranje jer u suprotnom rezultat neće biti valjan. Problem s apsolutnom metodom nastaje kod većih sustava gdje ima više transformatora i naponskih razina, te samim time je potrebno izvršiti više redukcija čime se proračun dodatno zakomplicira.



## LITERATURA

- [1] M. Ožegović, K. Ožegović, Električne energetske mreže I, FESB Split, Split, 1996. godine
- [2] J. D. Glover, M. S. Sarma, T. J. Overbye, Power System Analysis and Design, Fifth Edition, SI, Cengage Learning, 2011. godine
- [3] Energija u Hrvatskoj 2011. - Godišnji energetske pregled, Republika Hrvatska – Ministarstvo gospodarstva, 2011.,  
Dostupno: [www.mingo.hr/userdocsimages/.../ENERGIJA%20U%20HRVATSKOJ%202011.pdf](http://www.mingo.hr/userdocsimages/.../ENERGIJA%20U%20HRVATSKOJ%202011.pdf),  
[Pristup stranici 30. svibnja 2017.]
- [4] Energija u Hrvatskoj 2013. - Godišnji energetske pregled, Republika Hrvatska – Ministarstvo gospodarstva, 2013.,  
Dostupno: [www.eihp.hr/wp-content/uploads/2015/02/Energija2013.pdf](http://www.eihp.hr/wp-content/uploads/2015/02/Energija2013.pdf),  
[Pristup stranici 30. svibnja 2017.]
- [5] Energija u Hrvatskoj 2014. - Godišnji energetske pregled, Republika Hrvatska – Ministarstvo gospodarstva, 2014.,  
Dostupno: [www.mingo.hr/public/energetika/EuHR\\_2014\\_finalna.pdf](http://www.mingo.hr/public/energetika/EuHR_2014_finalna.pdf),  
[Pristup stranici 30. svibnja 2017.]
- [6] Energija u Hrvatskoj 2015. - Godišnji energetske pregled, Republika Hrvatska – Ministarstvo gospodarstva, 2015.,  
Dostupno: [www.eihp.hr/wp-content/uploads/2015/02/Energija2013.pdf](http://www.eihp.hr/wp-content/uploads/2015/02/Energija2013.pdf),  
[Pristup stranici 30. svibnja 2017.]
- [7] HROTE- Hrvatski operator tržišta energije d.o.o, izvještaji,  
Dostupno: <http://www.hrote.hr/izvjestaji>,  
[Pristup stranici 30. svibnja 2017.]
- [8] Hrvatska elektroprivreda d.d.(HEP), Povijest,  
Dostupno: <http://www.hep.hr/o-hep-grupi/povijest/54>  
[Pristup stranici 31. svibnja 2017.]
- [9] M. Ožegović, K. Ožegović, Električne energetske mreže II, FESB Split, Split, 1997. godine
- [10] S. Nikolovski, D. Šljivac, Elektroenergetske mreže - zbirka riješenih zadataka (treće izdanje), Elektrotehnički fakultet – Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Osijek, 2003.godine
- [11] M. Ožegović, K. Ožegović, Električne energetske mreže III, FESB Split, Split, 1997. godine

## SAŽETAK

U ovom završnom radu objašnjeno je što je to elektroenergetski sustav i koja je njegova uloga. Prikazana je podjela elektroenergetskog sustava na proizvodnju, prijenos i distribuciju električne energije, odnosno na elektrane, električnu mrežu (prijenosnu i distributivnu) i na potrošače. Također je opisan povijesni razvoj elektroenergetskog sustava, te proizvodnja električne energije u Republici Hrvatskoj kao i budući trendovi proizvodnje. Prikazane su i objašnjene nadomjesne sheme glavnih elemenata elektroenergetskog sustava. Navedene su i objašnjene brojčane veličine koje se koriste u proračunu elektroenergetskih mreža. Detaljno su objašnjene dvije metode koje se koriste u proračunu elektroenergetskih mreža sa više naponskih razina, a to su: metoda apsolutnih vrijednosti i metoda relativnih (jediničnih) vrijednosti, te je napravljen proračun na istom primjeru pomoću obje metode.

Ključne riječi: elektroenergetski sustav, proizvodnja, prijenos, distribucija, elektrane, električna mreža, potrošači, nadomjesne sheme elemenata, metoda apsolutnih vrijednosti, metoda relativnih vrijednosti, proračun.

## **ABSTRACT**

This thesis describes what electric power system is and what its main role is. The partition of the power system is presented in the generation, transmission and distribution of electricity, i.e. power plants, power grid (transmission and distribution) and consumers. The historical development of the power system and electricity generation in the Republic of Croatia as well as the future trends of production has been described. Substitute schemes of the main elements of the power system are presented and explained. Numerical sizes that are used in the calculation of the power grids are described and explained. Two methods that are used in the calculation of power grids with multi voltage levels are explained in detail and those are: absolute value method and method of relative values (per-unit method), and a calculation was made on the same sample using both methods.

Key words: electric power system, production, transmission, distribution, power plants, power grids, consumers, substitute scheme elements, absolute value method, relative value method, calculation.

## **ŽIVOTOPIS**

Božidar Horvatović rođen je 28. studenog 1995. godine u Sisku. Završio je osnovnu školu Stjepana Kefelje u Kutini. Nakon završene osnovne škole upisao je Tehničku školu Kutina, smjer tehničar za električne strojeve s primijenjenim računarstvom. Srednju školu završio je 2014. godine i upisao preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku na kojem odabire smjer elektroenergetika.