

# Određivanje djelatnih gubitaka u područnom elektroenergetskom sustavu

---

**Roce, Mario**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:702229>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-29**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

**ODREĐIVANJE DJELATNIH GUBITAKA U PODRUČNOM  
ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU**



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

**ODREĐIVANJE DJELATNIH GUBITAKA U PODRUČNOM  
ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU**

prof. dr. sc. Dubravko Franković

Rijeka, 13.03.2024.

Zavod: Zavod za elektroenergetiku  
Predmet: Električna postrojenja

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Mario Roce (0069094362)**  
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij elektrotehnike (1030)

Zadatak: **Određivanje djelatnih gubitaka u područnom elektroenergetskom sustavu /  
Determination of active power losses in the regional power transmission  
system**

Opis zadatka:

U radu je potrebno prikazati teorijske osnove proračuna tokova snaga te matematičke modele osnovnih komponenti elektroenergetskog sustava (vodovi, transformatori, generatori) koji se pritom koriste. Za zadani dio hrvatskog elektroenergetskog sustava potrebno je provesti proračun tokova snaga te odrediti iznos djelatnih gubitaka za sadašnje stanje razvoja sustava kao i za budući predvidivi razvoj sustava. Razmotriti utjecaj varijacije naponskih profila na iznos gubitaka.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

Mentor:  
prof. dr. sc. Dubravko Franković

Komentor:  
dr. sc. Alen Jakoplić

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:  
prof. dr. sc. Dubravko Franković

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**TEHNIČKI FAKULTET**

Prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike

**IZJAVA**

Sukladno članku 8. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu, završetku prijediplomskih sveučilišnih studija, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad pod naslovom „Određivanje djelatnih gubitaka u područnom elektroenergetskom sustavu“ prema zadatku od 20. ožujka 2024. godine uz konzultacije sa mentorom prof. dr. sc. Dubravkom Frankovićem.

Rijeka, srpanj 2024.



---

Mario Roce

*Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Dubravku Frankoviću na vrlo korektnom i profesionalnom vođenju u stvaranju ovog rada. Zahvaljujem se i svojim roditeljima, kolegama i prijateljima na podršci u dosadašnjem tijeku studiranja.*

## Sadržaj

<b>1. Uvod</b>	<b>2</b>
<b>2. Električne energetske mreže</b>	<b>3</b>
2.1. Definicija i podjela elektroenergetskog sustava . . . . .	3
2.2. Dijelovi elektroenergetskog sustava . . . . .	4
2.2.1. Izvori električne enrgije . . . . .	5
2.2.2. Vodovi . . . . .	7
2.2.3. Transformatori . . . . .	10
2.2.4. Potrošači . . . . .	11
2.3. Osvrt na hrvatski elektroenergetski sustav . . . . .	12
<b>3. Matematički modeli u elektroenergetskom sustavu</b>	<b>15</b>
3.1. Trofazna mreža u proračunu . . . . .	15
3.2. Nadomjesni modeli elemenata u elektroenergetskom sustavu . . . . .	19
3.2.1. Nadomjesni modeli vodova . . . . .	19
3.2.2. Nadomjesni modeli generatora . . . . .	22
3.2.3. Nadomjesni modeli transformatora . . . . .	23
<b>4. Proračun tokova snaga u električnim mrežama</b>	<b>26</b>
4.1. Proračun električnih mreža . . . . .	26
4.2. Metoda jediničnih vrijednosti . . . . .	27
4.3. Formiranje matrice admitancija čvorova . . . . .	28
4.4. Gauss - Seidelova metoda . . . . .	29
4.5. Newton - Raphsonova metoda . . . . .	31
<b>5. Analiza tokova snaga u područnom elektroenergetskom sustavu</b>	<b>33</b>
5.1. Sadašnje stanje mreže i normalni pogonski uvjeti . . . . .	33
5.2. Proračun pri vršnim opterećenjima . . . . .	35
5.3. Budući uvjeti rada . . . . .	42
<b>6. Zaključak</b>	<b>61</b>
<b>Literatura</b>	<b>62</b>

<b>Sažetak i ključne riječi</b>	<b>63</b>
<b>Summary and key words</b>	<b>64</b>
<b>Dodatak A Parametri simulacije za područni elektroenergetski sustav</b>	<b>65</b>

## 1. Uvod

Električna energija u suvremenom svijetu digitalizacije i novih tehnologija predstavlja jedan od najvažnijih i nezamjenjivih energenata. Spektar mogućnosti koje električni strojevi i sklopovi pružaju mjerljiv je jedino sa naftom i zaista je teško zamisliti kako bi svijet izgledao kada električna struja ne bi tekla kako danas teče.

Prijenos električne energije predstavlja jednu od najvažnijih aktivnosti u inženjerstvu. Možemo slobodno reći da su električni energetske sustavi najkopleksniji sustavi koje je čovjek stvorio. Razumijevanje takvog složenog sustava iziskuje znanja o njegovim elementarnim dijelovima i njihovim fizikalnim načelima rada.

Ponašanje električnih energetske sustava uvjetovano je sa mnogo parametara. Neki su parametri fizički i za njih znamo kako se ponašaju, dok su neki parametri nepredvidivi i možemo samo predviđanjem i adekvatnim upravljanjem djelovati na utjecaj takvih parametara.

Raspodjela električne energije prema potrošačima za sobom vuče i određene ciljeve sa strane operatera prijenosa. Važno je dostaviti kvalitetnu električnu energiju kako bi se ostvario ispravan i dugoročan rad trošila spojenih na mrežu, ali je također važno da prijenos bude ekonomičan i ekološki održiv. Gubitci koji nastaju u prijenosu električne energije predstavljaju problem u prijenosu električne energije jer se takva energija gubi u drugim oblicima. Iako su gubitci u svim granama tehnike neizbježni, cilj svakog inženjera mora biti postizanje najveće moguće efikasnosti konverzije energije.

U ovom radu opisani su dijelovi električnog energetske sustava sa posebnim naglaskom na elemente koji služe za prijenos električne energije. Navedeni elementi predstavljenu su adekvatnim matematičkim modelima, a njihova primjena opisana je poglavljima o metodama za proračun električnih mreža. Navedena teorijska znanja primijenjena su na analizu elektroenergetske sustava Istre i analizi utjecaja sadašnjih i budućih varijacija u mreži na djelatne gubitke u prijenosu.

## 2. Električne energetske mreže

### 2.1. Definicija i podjela elektroenergetskog sustava

Elektroenergetski sustav može se definirati kao složeni sustav koji obuhvaća proizvodnju, prijenos, distribuciju i potrošnju električne energije. Osnovni zadatak elektroenergetskog sustava opskrba potrošača električnom energijom koja mora biti definirane kvalitete koja je zakonski pripisana. Mjere kvalitete električne energije jesu napon i frekvencija mreže te trajna raspoloživost.[1]

Elektroenergetski sustav može raditi kao sustav konstantnog napona ili kao sustav konstantne struje. U velikoj većini slučajeva se primjenjuje sustav konstantnog napona u kojem se napon održava stalnim, a promjenu snage prati promjena struje. Prekid mreže u ovom sustavu ostvaruje se beznaponskim stanjem na priključnicama.

Elektroenergetska mreža obično se definira kao dio elektroenergetskog sustava na kojem vlada isti nazivni napon. Napon mreže biti istosmjernan (npr. u mrežama željeznice i u istosmjernom veleprijenosu - HVDC) ili izmjeničan (npr. standardne trofazne prijenosne i distribucijske mreže). Naponske razine (profili) za obje vrste napona su standardizirane, a mogu se podijeliti na mreže niskog, srednjeg, visokog i vrlo visokog napona prema kriteriju prikazanom u sljedećoj tablici.

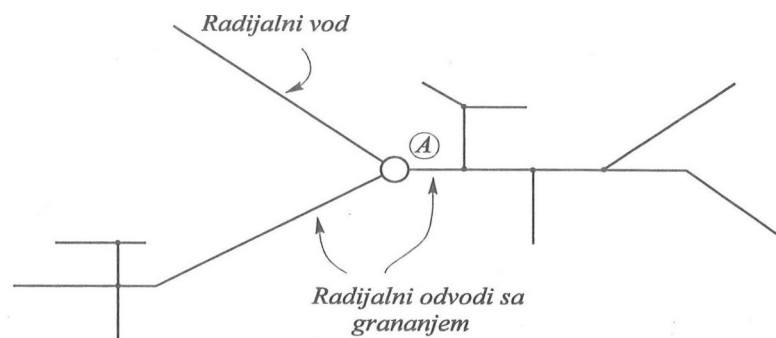
Tablica 2.1. Naponske razine

Niski napon	$U < 1 \text{ kV}$
Srednji napon	$1 \text{ kV} < U < 110 \text{ V}$
Visoki napon	$110 \text{ kV} < U < 275 \text{ kV}$
Vrlo visoki napon	$U > 275 \text{ kV}$

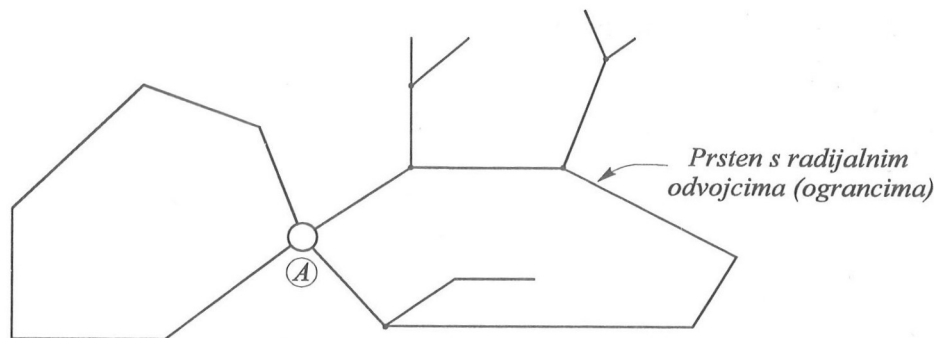
Naponske razine definiraju i podjelu mreža na prijenosne mreže (vrlo visoki i visoki napon) te distribucijske mreže (srednji i niski napon). Prijenosne mreže podrazumijevaju transport energije na veće udaljenosti i uglavnom su povezane sa okolnim zemljama kako bi se postigla veća sigurnost u vidu raspoloživosti. Distribucijske mreže podrazumijevaju prijenos na kraće udaljenosti te su razgranate prema potrošačima.

Dijelovi mreže oblikovani su prema osnovnim principijalnim konfiguracijama. Za mreže s napajanjem iz jedne točke karakteristične su radijalna i prstenasta konfiguracija, dok su za mreže s više izvora napajanja karakteristične zatvorene i zamkaste konfiguracije. Svaka konfiguracija ima svoje prednosti i nedostatke glede složenosti za vođenje mreže, ponašanju mreže usljed kvara, mjerama zaštite i pouzdanosti,...





Sl. 1.3 a - Radijalna mreža, napojna točka A



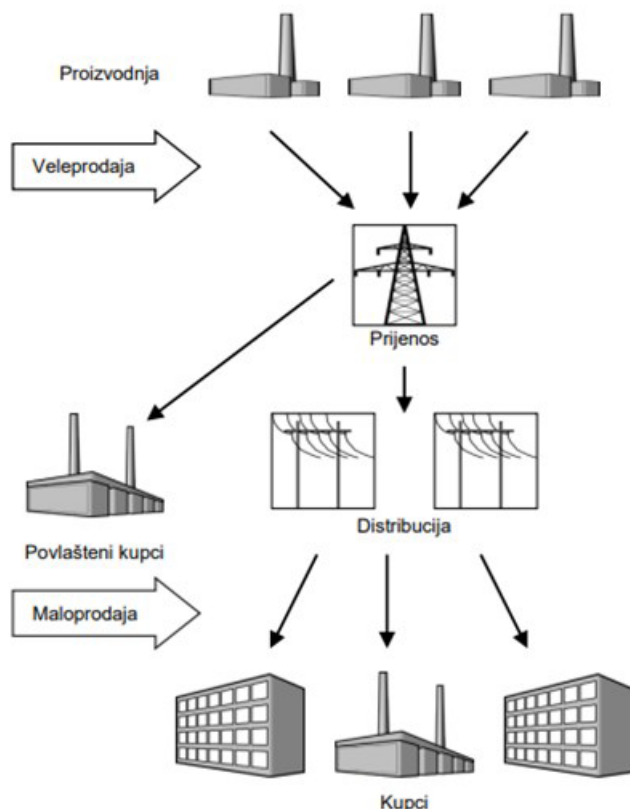
Sl. 1.3 b - Prstenasta mreža, napojna točka A

Slika 2.1. Radijalna mreža [1]

## 2.2. Dijelovi elektroenergetskog sustava

Prema samoj definiciji elektroenergetskog sustava proizlaze njegovi dijelovi: izvori, prijenos i potrošnja. Svaki dio sastoji se od pogonskog dijela kroz koji teče pogonska struja, ali se sastoji i od niza sekundarnih sustava koji uključuju sustave mjerenja, vođenja, regulacije, zaštite i sl.

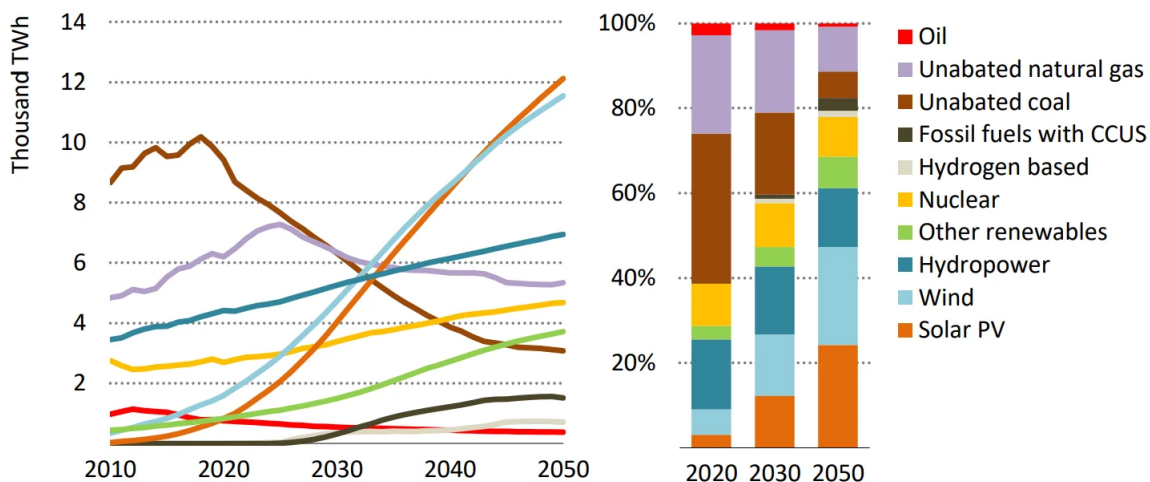
U širem smislu, elektroenergetski sustav se može shvatiti kao da ima dva podsustava, koji su obično poznati kao „strana ponude“ i „strana potražnje“. Ukupni cilj energetike inženjeringa je pokušati osigurati da su ponuda i potražnja u ravnoteži u točki krajnje uporabe.[2]



Slika 2.2. Dijelovi elektroenergetskog sustava [6]

### 2.2.1. Izvori električne energije

Električna energija dobije se pretvorbom nekog od oblika energija u za to predviđenim elektranama. Razlikujemo različite vrste izvora električne energije prema energentu koji se koristi, a njihov udio u globalnoj proizvodnji prikazan je na slici 2.3.

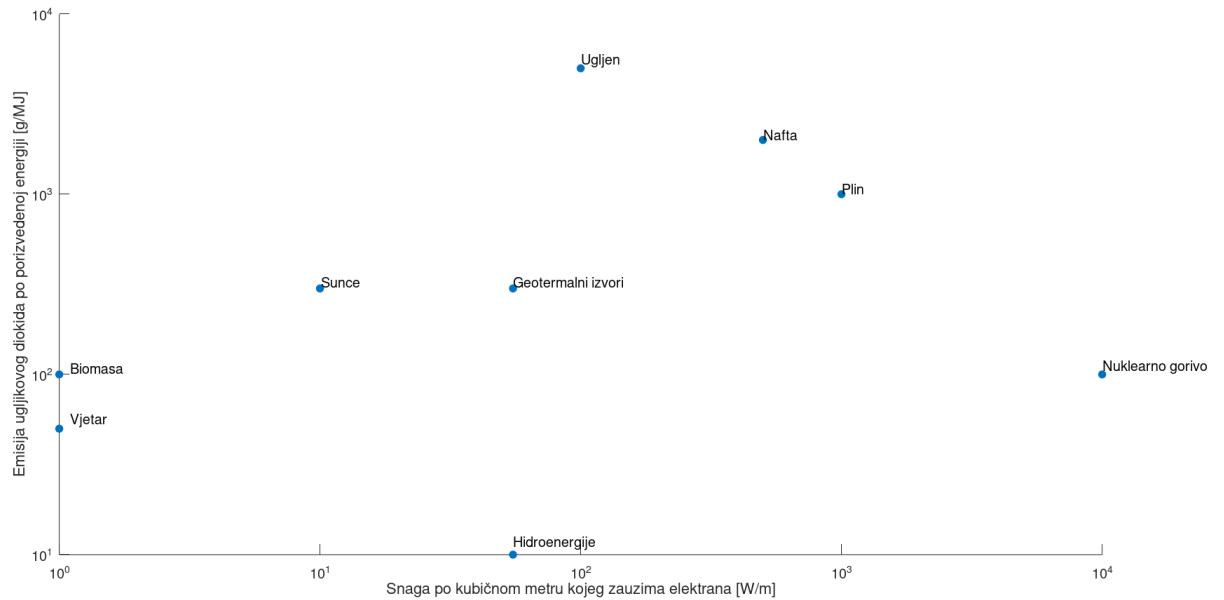


IEA. All rights reserved.

Slika 2.3. Udio izvora električne energije u globalnoj proizvodnji [3]

Mjera kvalitete izvora električne energije ovisi o proizvedenoj snazi, iskoristivosti i utjecaj na

ljude i okoliš. Jedna zanimljiva usporedba izvora energije prikazana je na slici 2.6. gdje je u odnos stavljena količina energije koju elektrana proizvede na jednom četvornom metru kojeg zauzima i količina emisije ugljikovog dioksida po proizvedenoj snazi.



Slika 2.4. Odnos gustoće energije i emisije ugljikovog dioksida prema vrstama energenata [2]

Izvori električne energije suočavaju se sa velikim izazovom, a to je dekarbonizacija elektroenergetskog sustava. U tu svrhu dolazi do aktivnih i pasivnih mjera za smanjenje stakleničkih plinova - termoelektrane će se u narednim godinama povlačiti iz pogona, dok se u pogonu preferiraju nuklearne elektrane. Obnovljivi izvori energije dobivaju na još većem značaju te se ostvaruju i brojni poticaji za izgradnju npr. solarnih elektrana na razini kućanstva.

### 2.2.2. Vodovi

Vodovi su elementi elektroenergetskog sustava koji služe za prijenos električne energije. Mogu biti izvedeni kao nadzemni vodovi ili kabeli.

Nadzemni vodovi općenito se sastoje od temelja, stupova, izolatora, vodiča, zaštitnih materijala te zaštitne užadi i uzemljenja.



*Slika 2.5. Dijelovi nadzemnih vodova: a) izolatori, b) fazni vodič, c) zaštitno uže, d) stup [DV Šijana-Raša, vlasništvo autora]*

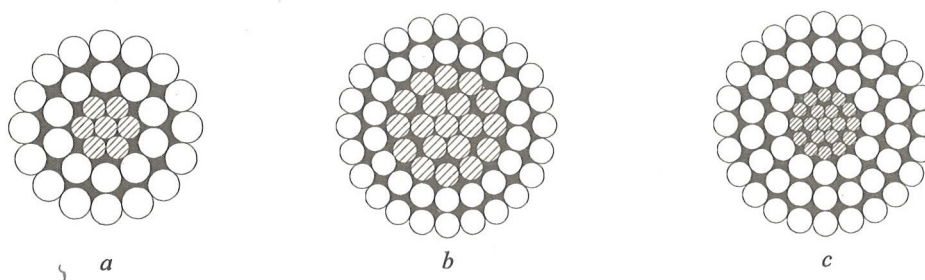
Vodiči su dijelovi vodova koji jedini imaju ulogu u prijenosu energije. Od njih se traži dobra električna vodljivost, ali i dobra mehanička čvrstoća, dobra mogućnost obrade, otpornost na mehanička i kemijska oštećenja te prihvatljiva cijena i dostupnost. Najčešći materijali tako su bakar,

aluminij i čelik.

Tablica 2.2. Karakteristične veličine materijala za izradu vodiča [1]

MATERIJAL	EL. VODILJIVNOST [ $10^6 S/m$ ]	SPEC. MASA [ $10^6 S/m$ ]	PREKIDNA ČVRSTOĆA [ $10^{-2} N/mm^2$ ]
bakar	56	8,9	40
aluminij	34,8	2,7	18
bronca (Cu,Sn,Si)	48-18	8,6-8,9	50-70
aldrej (Al,Mn,Si,Fe)	30	2,7	18
čelik	7-8	7,8	40-150
bakar-čelik		8,25	60-108
alučel 6:1		3,45	17/120
aldrej-čelik		3,45	30/120

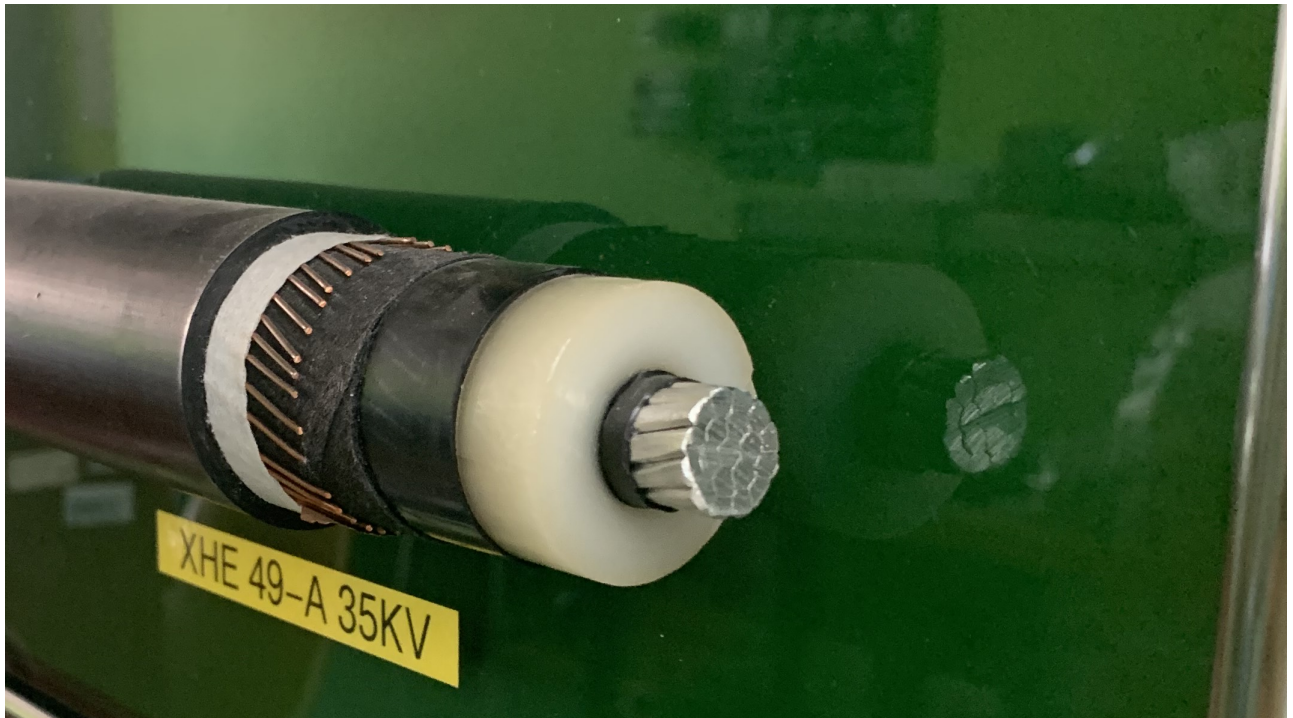
Obzirom da jedan materijal ne može u potpunosti zadovoljiti gore navedena svojstva koriste se razne legure i različite fizičke izvedbe vodiča na vodovima. Najvrjedniji za spomenuti jesu kombinirani sukani vodiči.



Slika 2.6. Kombinirani sukani vodiči u presjeku [1]

Materijali koji se najčešće koriste za izvedbu kombiniranih sukanih vodiča jesu aluminij i čelik (tzv. Alučel). Jezgra od čelika preuzima mehanička opterećenja dok aluminij preuzima svojstva električnog vodiča.

Kabeli su građeni od vodiča koji je izoliran i dalje obložen zaštitnim omotačem koji štiti od mehaničkih, termičkih, kemijskih i drugih oštećenja. Mogu biti postavljeni direktno u zemlju, pod vodu ili u kabelske kanale. Zbog relativno visoke cijene u odnosu na nadzemne vodove koriste se tamo gdje je nužno potrebno (npr. za distribuciju u naseljima).



*Slika 2.7. Presjek aluminijskog kabela za 35 kV*

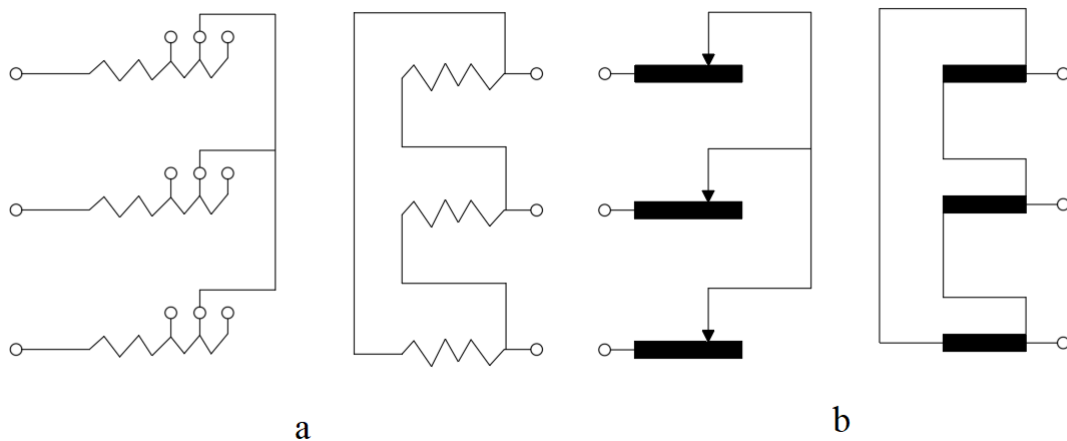
Vodiči u kablovima su pune žice od bakra ili aluminija. Kod malih presjeka su okruglog oblika, dok se za veće presjeke koriste profilirane izvedbe. Ovisno o broju vodiča u jednom zaštitnom omotaču kabeli se mogu podijeliti na jednožilne (visoki naponi), trožilne (srednji naponi) i četverožilne (niski naponi).



### 2.2.3. Transformatori

Transformator je pasivni element elektroenergetskog sustava koji transformira napon i struju jedne razine na napon i struju druge razine. Najosnovnija podjela transformatora može biti prema broju faza (jednofazni ili trofazni) i prema broju namota (dvonamotni ili tronamotni).

Važna podjela transformatora u elektroenergetici odnosi se na prijenosni omjer transformatora. Tako razlikujemo energetske transformatore sa stalnim prijenosnim omjerom i transformatore s promjenjivim prijenosnim omjerom. Regulacija napona je važan alat kojim se ostvaruje da usljed promjena u opterećenju ne dođe do propada ili prenapona. Izvedbe transformatora s promjenjivim prijenosnim omjerom jesu transformator s odcjepima i regulacijski transformatori, a njihove su principijalne sheme prikazane na slici 2.10.



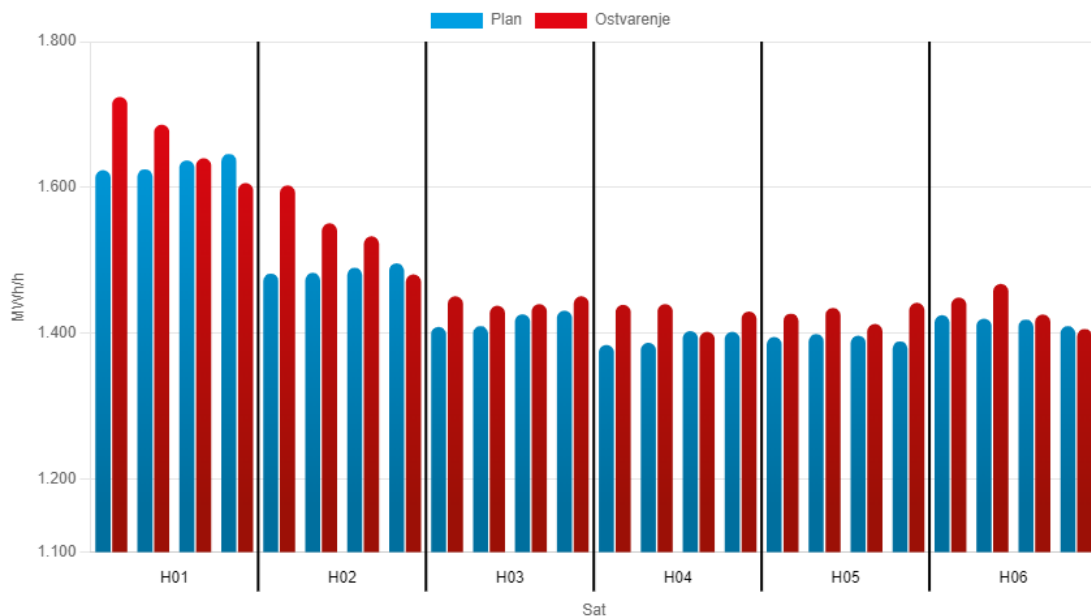
Slika 2.8. Principijalna shema: a) transformatora s odcjepima, b) regulacijskog transformatora [5]

Otkriće transformatora je uz otkriće asinkronom motora bila povijesna prekretnica u tzv. "ratu struja" koji se u 18. stoljeću vodio između Thomasa Edisona kao zagovaratelja istosmjerne struje i Nikole Tesle kao zagovaratelja izmjenične struje. Pokazalo se da se opotrebom transformatora može smanjiti struja u krugovima prijenosne mreže te se tako mogu višestruko smanjiti gubitci u prijenosu koje istosmjerna mreža nije mogla ostvariti.

## 2.2.4. Potrošači

Potrošači u elektroenergetskom sustavu jesu skupine trošila spojenih na jedan čvor u mreži i koji električnu energiju pretvaraju u druge oblike energije. Potrošnja je najsloženiji element u elektroenergetskom sustavu zbog svoje nepredvidivosti u količini energije koja se istoj mora predati. Neovisno o trenutku priključenja na mrežu elektroenergetski sustav dužan je omogućiti stalan napon i frekvenciju svakom potrošaču.

Oscilacije u potrošnji su nepoželjne jer je izvore nemoguće dovoljno brzo prilagoditi na novo stanje u mreži pa se radi toga izrađuju dijagrami opterećenja unaprijed. Prema njima se na temelju prošlih rezultata te meteoroloških, kalendarskih i drugih čimbenika određuje očekivana potreba za snagom u svakom satu u danu.

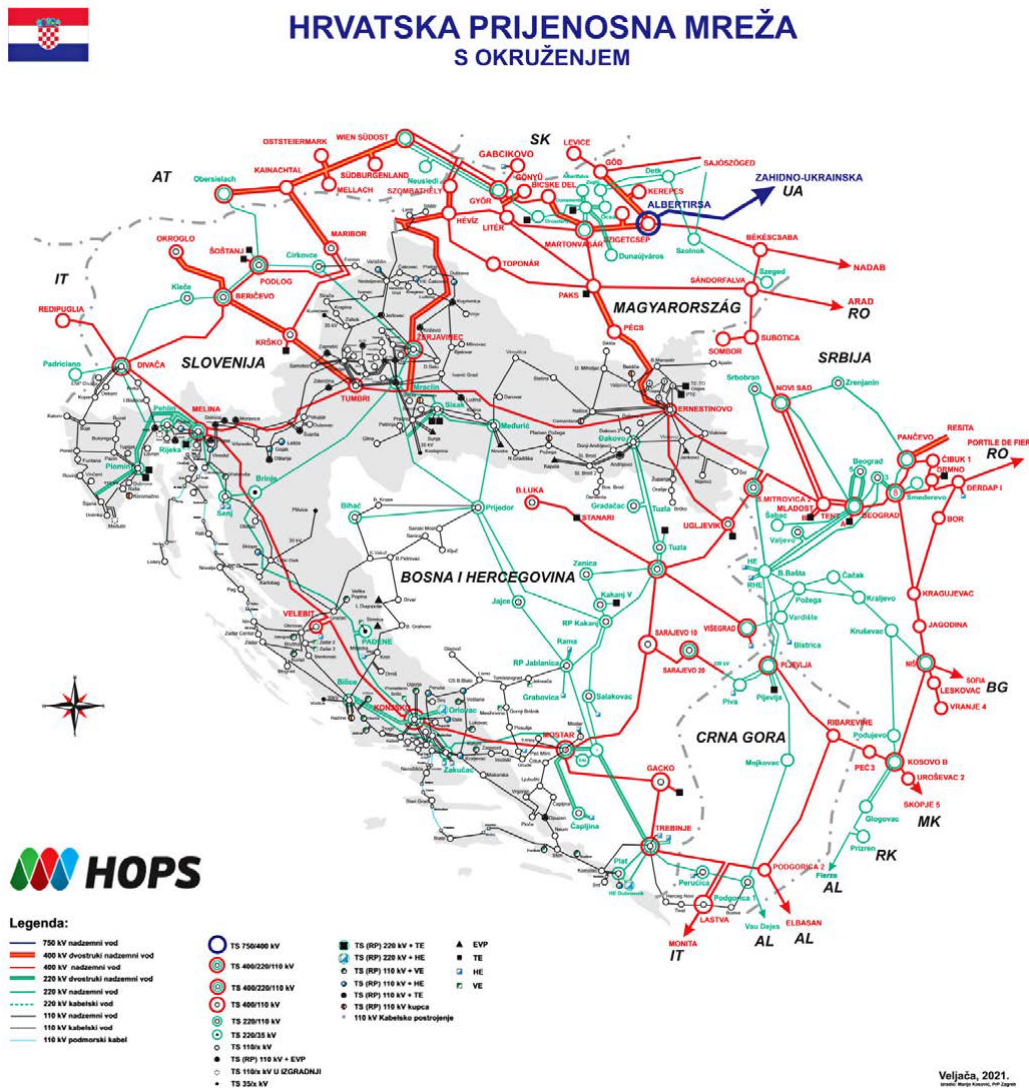


Slika 2.9. Dnevni dijagram opterećenja za 15-minutni period na dan 28.04.2024. [4]



## 2.3. Osvrt na hrvatski elektroenergetski sustav

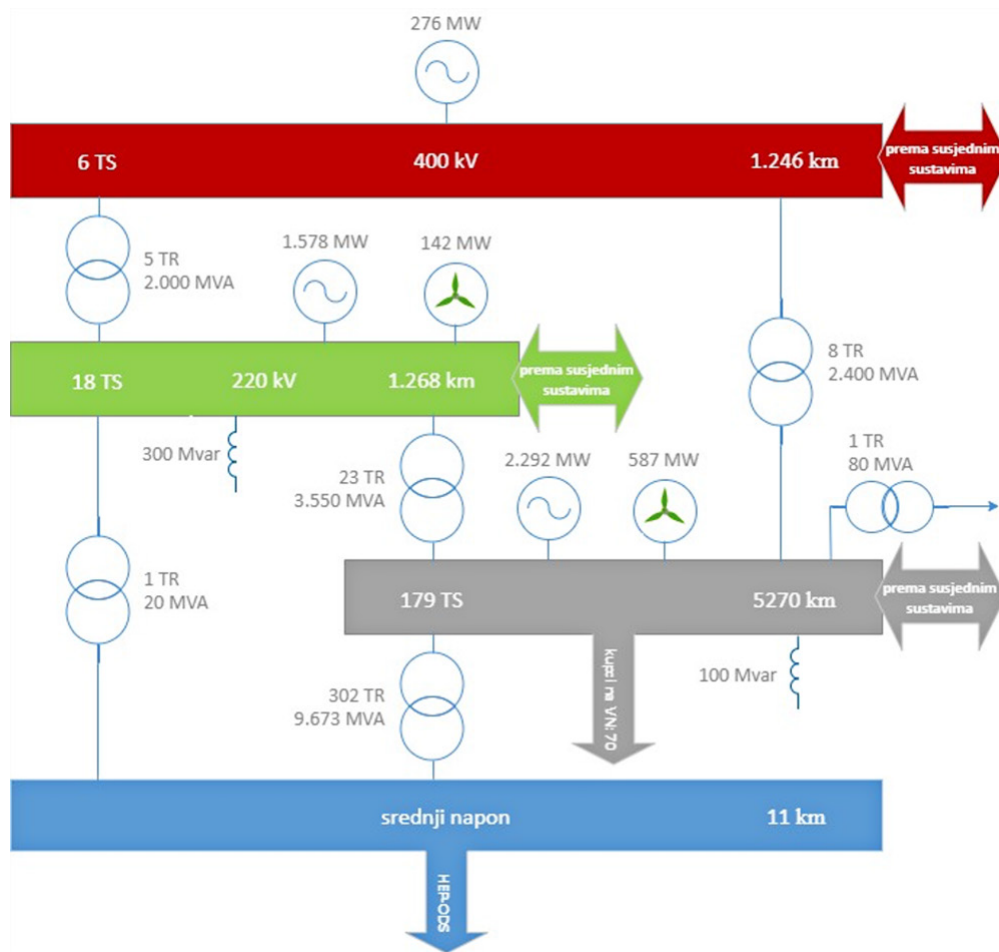
Hrvatski elektroenergetski sustav čine proizvodni objekti (elektrane) i postrojenja, prijenosna i distribucijska mreža i potrošači električne energije na području Republike Hrvatske. Radi sigurne i kvalitetne opskrbe kupaca električnom energijom i razmjene električne energije, hrvatski elektroenergetski sustav povezan je sa sustavima susjednih država i ostalim sustavima članica ENTSO-E (eng. *European Network of Transmission System Operators*) koji zajedno tvore sinkronu mrežu kontinentalne Europe. Kupci u Republici Hrvatskoj opskrbljuju se električnom energijom iz elektrana na području Hrvatske te nabavom električne energije iz inozemstva. [3]



Slika 2.10. Prijenosna mreža Hrvatske s okruženjem 2021. godine [4]

Prijenosna mreža u hrvatskom elektroenergetskom sustavu je pod kontrolom HOPS-a (*Hrvatski Operator Prijenosnog sustava*) i radi na tri naponske razine: 440 kV, 220 kV i 110 kV. Prijenosnom mrežom ostvaruje se razmjena električne energije, konkretno prema susjednoj Bosni i Hercegovini, Srbiji, Mađarskoj i Sloveniji. Dobra povezanost omogućuje značajniji tranzit energije i povećava

pouzdanost mreže. Tehnički parametri prijenosne mreže u hrvatskom elektroenergetskom sustavu prikazani su na slici 2.1.



Slika 2.11. Tehnički pokazatelji hrvatskog elektroenergetskog sustava za 2020. godinu [4]

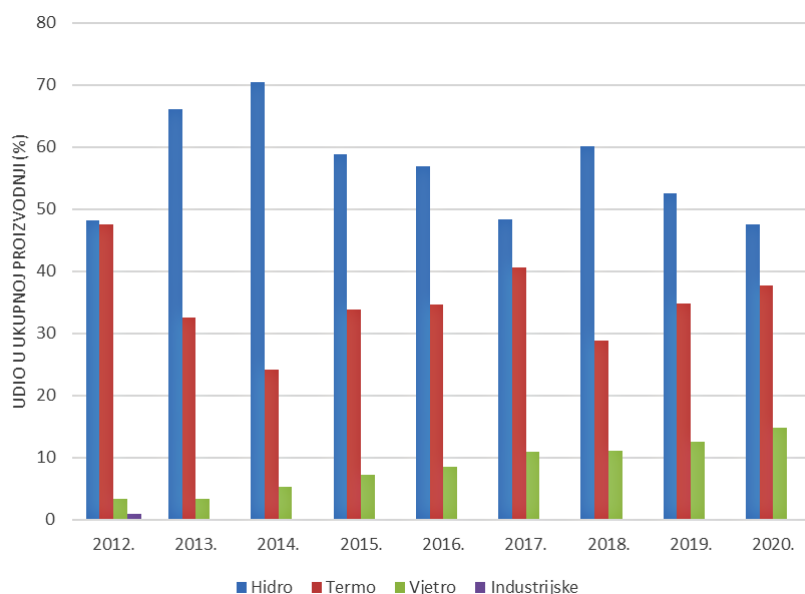
Distribucijska mreža u vlasništvu je HEP-ODS-u (*Hrvatska elektroprivreda - operator distribucijskog sustava*) koja radi na naponskim razinama srednjeg i niskog napona: 35 kV, 20 kV, 10 kV i 0,4 kV. Distribucijske mreže ne sudjeluju u razmjeni električne enrgije sa susjednim zemljama.

Prema potrošnji električne energije hrvatski elektroenergetski sustav spada među manje u Europi. Vršno opterećenje u prijenosnoj mreži obično iznosi do 3200 MW. Najveća opterećenja nastupaju u prosincu i siječnju te u ljetnim mjesecima. Prognoze opterećenja u periodu do 2031. procjenjuju da će se vršna potrošnja u zimskim i ljetnim mjesecima povećati za oko 5% kao posljedica gospodarske aktivnosti, demografskih promjena, izgradnje distribuiranih izvora, primjenama mjera energetske učinkovitosti te povećanoj elektrifikaciji u potrošnji (električna energija postaje zamjena za plin).



Slika 2.12. Vršnja godišnja opterećenja u RH za period 2011.-2020. godinu [4]

U proizvodnji električne energije na prijenosnoj mreži u Hrvatskoj su zastupljene hidroelektrane, termoelektrane i vjetroelektrane. Bitno manji udio u proizvodnji imaju industrijski izvori. Obnovljivi izvori energije obično se spajaju na distribucijsku mrežu. Udio u proizvodnji prema vrsti izvora prikazan je na slici 2.15.



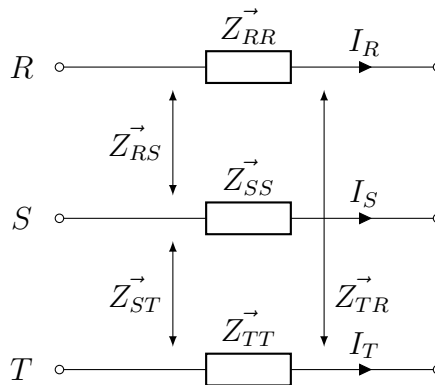
Slika 2.13. Udio proizvodnje na prijenosnoj mreži prema vrsti elektrane [4]

### 3. Matematički modeli u elektroenergetskom sustavu

#### 3.1. Trofazna mreža u proračunu

Elemente elektroenergetske mreže želimo nadomjestiti pripadajućim modelima kako bismo nad njima mogli obaviti proračun. Pasivni elementi nadomještaju se impedancijom  $\vec{Z}$  ili admitancijom  $\vec{Y}$ , dok se aktivnim elementima dodaju i naponski izvori. Modeli elemenata pa samim time i sheme mreža mogu biti trolpolne ili jednopolne.

Osnovni element u modelu mreže jest grana. Grana može sadržavati jedan ili više elemenata koji se nadomještaju npr. impedancijom  $\vec{Z}$ . U trofaznim sustavima se složeni elementi nadomještaju matricom impedancija  $[\vec{Z}]$  koja sadrži sve vlastite parametre elemenata i parametre koji nastaju kao posljedica međusobnog utjecaja elemenata (npr. međuinduktivitet). Tako se za trofazni sustav prema slici može napisati pripadna matrična jednadžba 3.1 koja povezuje linijske vrijednosti padova napona  $V_n$ , vlastite impedancije grane  $Z_{nn}$  i međusobne impedancije grane  $Z_{nm}$  te linijske vrijednosti struja  $I_n$ .



Slika 3.1. Model trofaznog vodiča

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_R \\ \vec{V}_S \\ \vec{V}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{Z}_{RR} & \vec{Z}_{RS} & \vec{Z}_{RT} \\ \vec{Z}_{SR} & \vec{Z}_{SS} & \vec{Z}_{ST} \\ \vec{Z}_{TR} & \vec{Z}_{TS} & \vec{Z}_{TT} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{I}_R \\ \vec{I}_S \\ \vec{I}_T \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Kraće se može zapisati:

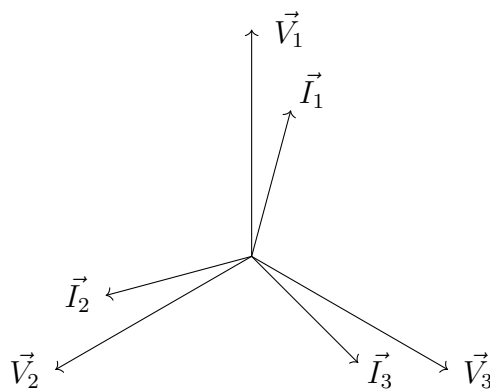
$$[\vec{V}^{RST}] = [Z^{RST}] \cdot [\vec{I}^{RST}] \quad (3.2)$$

Snaga koja se razvija na elementu u elektroenergetskom sustavu definirana je umnoškom linijske vrijednosti napona i struje na tom elementu. Za trofazni sustav ukupna snaga može se izraziti koristeći linijski ili fazni napon.

$$\vec{S} = 3 \cdot \vec{V} \cdot \vec{I}^* = \sqrt{3} \cdot \vec{U} \cdot \vec{I}^* = P + jQ \quad (3.3)$$

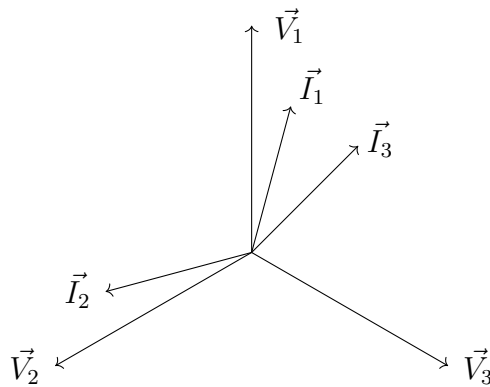
U trofaznoj mreži u sustavu konstantnog napona izvori u normalnom pogonskom stanju generiraju simetričan sustav napona gdje su efektivne vrijednosti napona jednakih iznosa međusobno fazno razmaknutih za  $120^\circ$ .

Simetrično trofazno trošilo je takvo trošilo kojem su fazne impedancije jednakog iznosa i jednakog faznog pomaka. Kada se simetrično trošilo priključi na simetričan sustav napona u krugu će poteći simetričan sustav struja, jednakih iznosa i međusobno fazno pomaknutih za  $120^\circ$  i koje će u odnosu na napon u pripadnoj fazi biti zakrenute za odgovarajući fazni pomak kojeg definira trošilo.



Slika 3.2. Simetrični trofazni sustav

U proračunu se simetričan sustav svodi na proračun u jednoj fazi obzirom da su prilike u ostalima jednake, ali fazno zakrenute za  $120^\circ$ . Ipak, pogonska stanja ne osiguravaju simetričan sustav impedancija te ukoliko je samo iznos ili samo kut jedne impedancije različit od ostalih tada je to nesimetričan sustav impedancija. Krugom sada teče i nesimetričan sustav struja koje više nisu jednakog iznosa niti su međusobno fazno pomaknute za  $120^\circ$ .



Slika 3.3. Nesimetrični trofazni sustav

Nesimetrični sustavi mogu se svesti na simetrične sustave korištenjem *medote simetričnih vrijednosti*. Zadana su tri fazna napona  $\vec{V}_R$ ,  $\vec{V}_S$  i  $\vec{V}_T$ . Prema metodi svaki se od tih napona može rastaviti na tri vektora:

$$\begin{cases} \vec{V}_R = \vec{V}_0 + \vec{V}_1 + \vec{V}_2 \\ \vec{V}_S = \vec{V}_0 + a^2\vec{V}_1 + a\vec{V}_2 \\ \vec{V}_T = \vec{V}_0 + a\vec{V}_1 + a^2\vec{V}_2 \end{cases} \quad (3.4)$$

Faktor  $a$  zovemo faktorom zakreta i on iznosi  $a = 1 \angle 120^\circ$ . Sada smo stvarne veličine napona rastavili pomoći tri napona koji čine tri sustava: nulti(0), direktni(1) i inverzni(2). U matricnom obliku prethodna formula glasi:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_R \\ \vec{V}_S \\ \vec{V}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{V}_0 \\ \vec{V}_1 \\ \vec{V}_2 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Kraće se može pisati:

$$[\vec{V}^{RST}] = [\vec{S}] \cdot [\vec{V}^{012}] \quad (3.6)$$

Matricu  $[\vec{S}]$  zovemo matricom transformacije i ona prevodi sustav simetričnih komponenti u stvarne vrijednosti. Želimo li odrediti relaciju koja prevodi stvarne vrijednosti u sustav simetričnih komponenti moramo pomnožiti jednadžbu 3.7 matricom  $[\vec{S}]$  s lijeve strane. Rješavanjem se dobije:

$$[\vec{V}^{012}] = [\vec{S}^{-1}] \cdot [\vec{V}^{RST}] \quad (3.7)$$

Matricu  $[\vec{S}^{-1}]$  zovemo inverznom matricom transformacije i ona prevodi stvarne vrijednosti u sustav simetričnih komponenti. Matematički je ova matrica zaista inverzna matrici  $[\vec{S}]$  i iznosi:

$$[\vec{S}^{-1}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Kompletan proračun analogno se prenosi i na struje pa vrijede sljedeće matricne jednadžbe:

$$[\vec{I}^{RST}] = [\vec{S}] \cdot [\vec{I}^{012}] \quad (3.9)$$

$$[\vec{I}^{012}] = [\vec{S}^{-1}] \cdot [\vec{I}^{RST}] \quad (3.10)$$

Metoda simetričnih komponenti može se primijeniti i na računanje sa impedancijama izvođenjem iz jednadžbe 3.2.

$$[\vec{Z}^{012}] = [\vec{S}^{-1}][Z^{\vec{RST}}][\vec{S}] \quad (3.11)$$

Ohmov zakon za trofazni vod u domeni simetričnih komponenti sada se može zapisati u matricnom obliku kako pokazuje jednadžba 3.12.

$$[\vec{V}^{012}] = [\vec{Z}^{012}][\vec{I}^{012}] \quad (3.12)$$

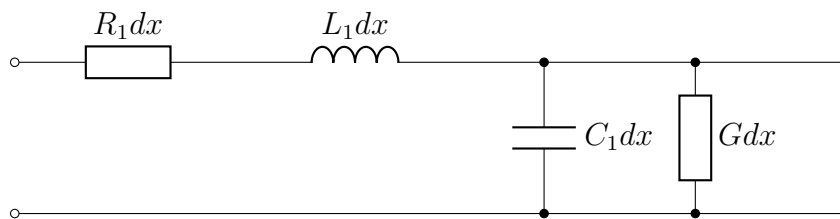
## 3.2. Nadomjesni modeli elemenata u elektroenergetskom sustavu

### 3.2.1. Nadomjesni modeli vodova

Prijenos električne energije vrši se energetskim vodom. Odnos električnih veličina na početku i na kraju voda definiran je prijenosnim jednadžbama voda. Svaki vod definiran je s četiri parametra:

- djelatni otpor  $R_1$
- induktivitet  $L_1$
- kapacitet  $C_1$
- odvod  $G_1$

Navedeni parametri voda zovu se primarni parametri. Oni su definirani fizičkom izvedbom vodiča i voda kao cjeline te o svojstvima okoline u kojima se vod nalazi. Primarni parametri nisu koncentrirani u jednu točku već su raspodijeljeni po duljini i zato se zadaju u  $\Omega/km$  ili  $S/km$ . Za infinitezimalno mali dio voda duljine  $dx$  shema voda prikazana je na slici 3.4.

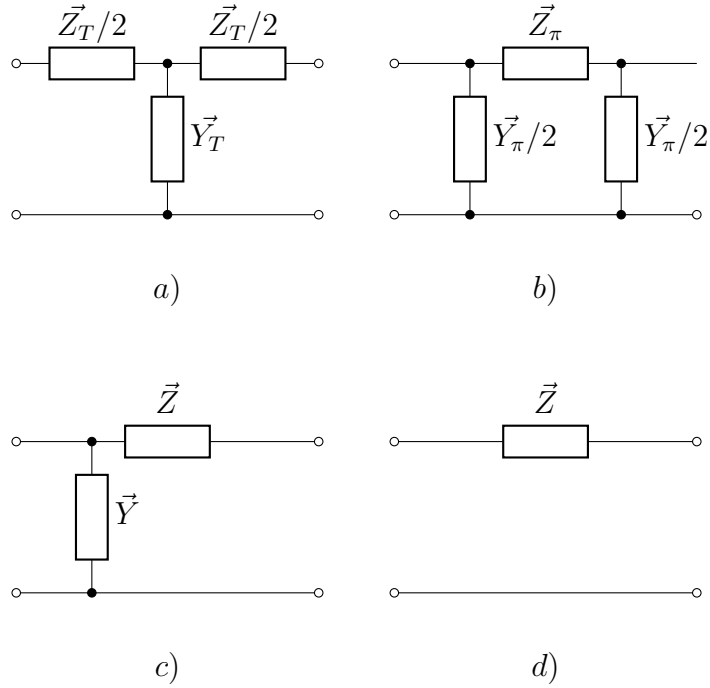


Slika 3.4. Model elektroenergetskog voda

Uzdužnu granu čine djelatni otpor i induktivitet voda i ona se može nadomjestiti jediničnom uzdužnom impedancijom  $\vec{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1$ . Poprečna grana sastoji se od kapaciteta i djelatnog odvoda voda i može se nadomjestiti jediničnom poprečnom admitancijom  $\vec{Y}_1 = G + j\omega C_1$ . Kada se jedinične vrijednosti pomnože duljinom voda dobiju se prividni otpor voda  $\vec{Z}$  i prividna vodljivost voda  $\vec{Y}$ .

Za crtanje nadomjesnim modela vodova ulazimo s pretpostavkom da je vod fizički izveden na takav način da je potpuno električki simetričan. Najčešće se koriste  $\Pi$  i  $T$  nadomjesni modeli koji imaju zadovoljavajuću preciznost na svim naponskim razinama. Na nižim naponskim razinama mogu se koristiti  $\Gamma$  i  $I$  model.





Slika 3.5. Nadomjesni modeli vodova: a) T model, b)  $\Pi$  model, c)  $\Gamma$  model, d) I model

Za određivanje vrijednosti parametara  $\Pi$  i  $T$  nadomjesnih modela vodova polazi se od prijenosnih jednadžbi vodova.

$$\begin{cases} \vec{V}_1 = \vec{V}_2 \text{ch}(\Theta) + \vec{Z}_c \vec{I}_2 \text{sh}(\Theta) \\ \vec{I}_1 = \vec{I}_2 \text{ch}(\Theta) + \frac{\vec{V}_2}{\vec{Z}_c} \text{sh}(\Theta) \end{cases} \quad (3.13)$$

Dobiju se rješenja za nadomjesne parametre  $\vec{Z}_\pi$  i  $\frac{\vec{Y}_\pi}{2}$ .

$$\begin{cases} \vec{Z}_\Pi = \vec{Z}_c \text{sh}(\Theta) \\ \frac{\vec{Y}_\Pi}{2} = \frac{1}{\vec{Z}_c} \frac{\text{ch}(\Theta) - 1}{\text{sh}(\Theta)} \end{cases} \quad (3.14)$$

Analognim postupkom dobiju se rješenja za nadomjesne parametre  $\frac{\vec{Z}_T}{2}$  i  $\vec{Y}_T$ :

$$\begin{cases} \frac{\vec{Z}_T}{2} = \vec{Z}_c \frac{\text{ch}(\Theta) - 1}{\text{sh}(\Theta)} \\ \vec{Y}_T = \frac{1}{\vec{Z}_c} \text{sh}(\Theta) \end{cases} \quad (3.15)$$

Prethodne jednadžbe mogu se izraziti preko uzdužne impedancije  $\vec{Z}$ , odnosno poprečne admittancije  $\vec{Y}$  voda korištenjem izraza za zrcalnu impedanciju voda  $Z_C$ .

$$\begin{cases} \vec{Z}_{\Pi} = \vec{Z} \frac{sh(\Theta)}{\Theta} \\ \vec{Y}_{\Pi} = \vec{Y} \frac{th(\Theta/2)}{\Theta/2} \end{cases} \quad (3.16)$$

$$\begin{cases} \vec{Z}_T = \vec{Z} \frac{th(\Theta/2)}{\Theta/2} \\ \vec{Y}_T = \vec{Y} \frac{sh(\Theta)}{\Theta} \end{cases} \quad (3.17)$$

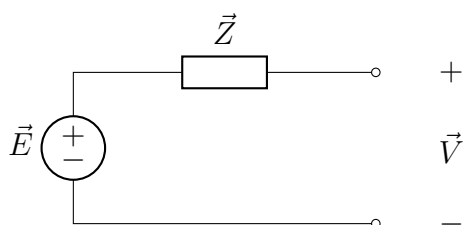
Nadomjesni modeli vodova čiji su elementi izračunati prema prethodnim izrazima zovu se *točni modeli*. Oni pokazuju veliku točnost kod svih duljina vodova i svih naponskih razina. Za kraće vodove mogu se zanemariti članovi koji sadrže faktor  $\Theta$  pa se nadomjesni parametri svode na izračunavanje uzdužne impedancije  $Z$  odnosno poprečne admitancije  $Y$ . Takve modele zovemo *približnim modelima*. U mrežama srednjeg napona dovoljno veliku preciznost ostvaruje i  $\Gamma$  model dok je u mrežama gdje je napon manji od 35 kV moguće potpuno zanemariti poprečnu granu i koristiti  $I$  nadomjesni model.

### 3.2.2. Nadomjesni modeli generatora

Aktivni elementi elektroenergetskog sustava koji služe za proizvodnju električne energije jesu sinkroni strojevi:

- sinkroni generatori: namijenjeni za proizvodnju djelatne i reaktivne energije za sustav i potrošače, a pokreće ih neki pogonski stroj (npr. turbina)
- sinkroni kompenzatori: namijenjeni za proizvodnju pozitivne (induktivne) ili negativne (kapacitivne) reaktivne energije za pokrivanje potreba sustava

Nadomjesna shema sinkronog stroja prikazana je na slici 3.6 i predstavlja stator stroja. Impedancija  $\vec{Z}$  može se zamijeniti i samo reaktancijom  $X$  obzirom da je na velikim snagama djelatni otpor statora zanemarivo malen (ispod 3%). Reaktancija stroja smatra se konstantnom dok elektromotorna sila ovisi o uzbuđivaču stroja.



Slika 3.6. Nadomjesni model sinkronog stroja

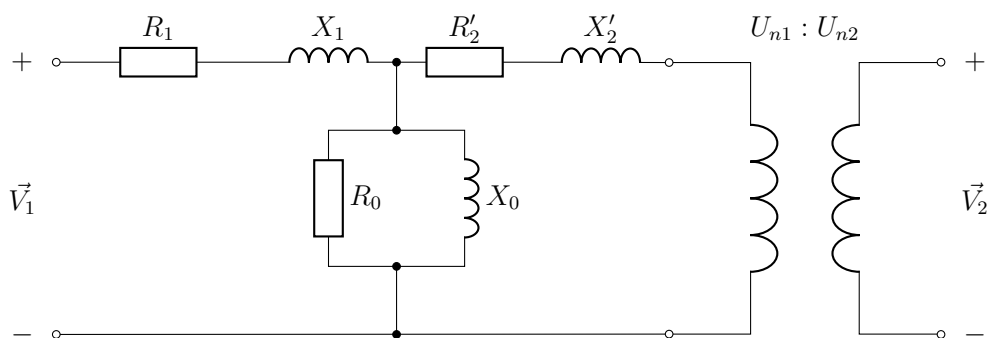
Fizikalna slika sinkronog stroja zavisi o režimu i uvjetima rada stroja (pogonsko stanje ili poremećeno stanje). Složenost sinkronog stroja može biti posljedica izraženih polova (neravnomijerna reagiranje stroja na uzdužnu i poprečnu komponentu struje), tromosti magnetskog kruga (prividna promjena parametra u različitim režimima rada), vrsti uzbuđivača, zamašnim masama ili pod utjecajem dodatnih namota.

Za sinkroni generator u normalnom pogonskom stanju pretpostavlja se da daje simetričan trofazni sustav napona. Prema tome, u domeni simetričnih komponenti i u domeni stvarnih vrijednosti za proračun je mjerodavan direktni nadomjesni model koji odgovara slici 3.6.

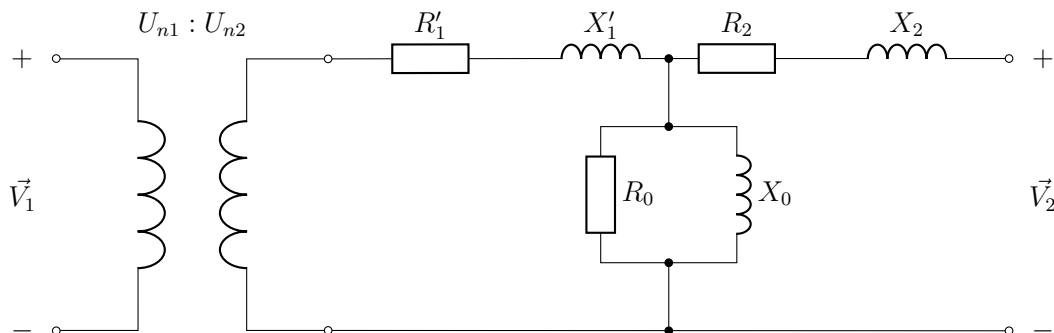
### 3.2.3. Nadomjesni modeli transformatora

Transformator je pasivni element mreže. Njegova nadomjesna shema sastoji se od uzdužne i poprečne grane. Uzdužna grana sadrži omske otpore i reaktancije namota, dok poprečna grana sadrži omski otpor i reaktanciju željezne jezgre.

Nadomjesna shema realnog transformatora crta se tako da se svi parametri transformatora skaliraju na naponsku razinu primara ili sekundara, a zatim se na primar ili sekundar dodaje idealni transformator sa nazivnim omjerom transformacije. Na slikama 3.7 i 3.8 prikazani su nadomjeni modeli transformatora s parametrima svedenima na primar odnosno na sekundar.



Slika 3.7. Jednofazni nadomjesni model dvonamotnog transformatora sa parametrima preračunatima na primar



Slika 3.8. Jednofazni nadomjesni model dvonamotnog transformatora sa parametrima preračunatima na sekundar

Električni parametri koji su navedeni na nazivnoj pločici transformatora, a koji se ujedno i koriste u proračunu nadomjenih veličina jesu:

- nazivni linijski napon primara/sekundara -  $U_{n1}/U_{n2}$
- nazivna trofazna snaga -  $S_n$
- relativni napon kratkog spoja -  $u_k\%$
- gubitci kratkog spoja -  $P_k$

- relativna struja praznog hoda -  $i_0$
- gubitci praznog hoda -  $P_0$

Uzdužnu granu nadomjesit ćemo sa impedancijom  $\vec{Z}_k = R_k + jY_k$ . Modul impedancije u uzdužnoj grani dobije se iz definicije relativnog napona kratkog spoja  $u_k$ .

$$u_k = I_n \cdot |\vec{Z}_k| = \frac{I_n \cdot |\vec{Z}_k|}{V_n} \Rightarrow |\vec{Z}_k| = \frac{u_k \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} \cdot \frac{U_n}{U_n} = u_k \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (3.18)$$

Omski otpor uzdužne grane dobije se iz snage kratkog spoja.

$$P_k = 3 \cdot I_n^2 \cdot R = 3 \cdot \left(\frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n}\right)^2 \cdot R \Rightarrow R = P_k \cdot \frac{U_n^2}{S_n^2} \quad (3.19)$$

Uzdužna reaktancija sada se može dobiti iz trokuta otpora.

$$X = \sqrt{Z_k^2 - R^2} = \frac{U_n}{S_n} \sqrt{u_k \cdot S_n - P_k} \quad (3.20)$$

Poprečnu granu nadomjestit ćemo sa admitancijom  $\vec{Y}_0 = G_0 - jB_0$ . Modul admitancije u poprečnoj grani dobije se iz definicije za relativnu struju praznog hoda  $i_k$ .

$$i_0 = \frac{I_0}{I_n} = \frac{1}{I_n} \cdot V_n \cdot |\vec{Y}_0| \cdot \frac{U_n}{U_n} = \frac{U_n^2}{S_n} \cdot |\vec{Y}_0| \Rightarrow |\vec{Y}_0| = i_0 \cdot \frac{S_n}{U_n^2} \quad (3.21)$$

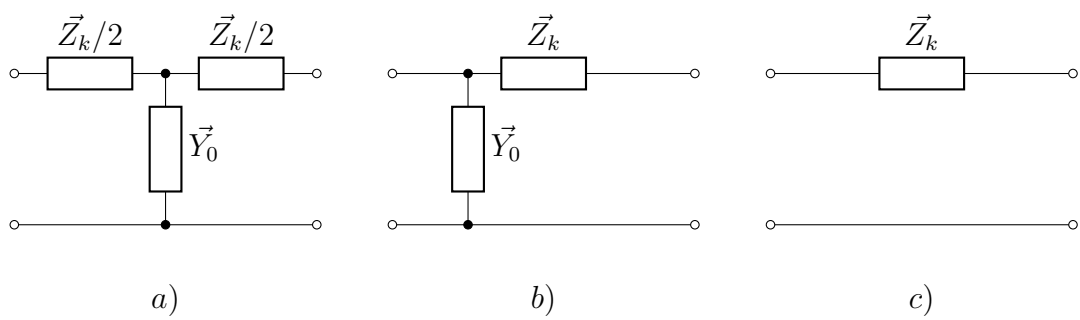
Vodljivost uzdužne grane dobije se iz snage praznog hoda.

$$P_0 = \sqrt{3} \cdot U_n^2 \cdot G_0 = U_n^2 \cdot G_0 \Rightarrow G_0 = \frac{P_0}{U_n^2} \quad (3.22)$$

Uzdužna susceptancija  $B_0$  dobije se iz trokuta vodljivosti.

$$B_0 = \sqrt{Y_0^2 - G_0^2} = \frac{1}{U_n} \sqrt{i_0 \cdot S_n - P_0} \quad (3.23)$$

Vrijednosti nadomjesne impedancije i admitancije mogu se sada posložiti u više nadomjesnih modela kako pokazuje slika 3.9. Svaki model daje određenu točnost gdje je  $T$  model definitivno najprecizniji model. Prema nižim napona mogu se radi olakšanja proračuna koristiti i drugi modeli bez prevelike greške u rezultatima.



Slika 3.9. Nadomjesni modeli transformatora: a) T model, b)  $\Gamma$  model, c) I model

## 4. Proračun tokova snaga u električnim mrežama

### 4.1. Proračun električnih mreža

Proračun električnih mreža podrazumijeva matematičku analizu mreže i određivanje tokova radne i jalove snage, opterećenja izvora, visina napona i eventualno struja kvara. U proračun se ulazi sa nekim početnim uvjeta koji su obično snage i naponi izvora, snage potrošača ili tome slično. Metode proračuna temelje se na Ohmovom i Kirchoffovim zakonima, na raznim teoremima (Theveninov, Millmanov,...) te na raznim matematičkim alatima kojima se olakšava računanje.

Složenost proračuna električnih mreža raste sa veličinom same mreže. Današnje mreže veće su i kompleksnije nego ikada prije te je proračunu gotovo nemoguće pristupiti ručno pa se metode za proračun svode na rješavanje pomoću računala. Neizbježno je korištenje matričnih jednažbi stanja u mreži te rješavanje nelinearnih algebarskih jednažbi koje zahtijevaju iterativne metode rješavanja.

Proračun djelatnih gubitaka podrazumijeva izračun djelatne snage  $P$  koja se troši na putu od izvora do potrošača, a koja predstavlja Joulove gubitke na otpornicima kao rezultat prolaska struje kroz njih. Djelatni su gubici prisutni u svim elementima mreže, ali do najvećeg izražaja dolaze kod vodova i kod transformatora malih snaga. Njihova posljedica za električnu mrežu jest smanjenje tj. pad napona prema potrošačima što dalje zahtijeva veću proizvodnju izvora kako bi se potrošaču isporučio napon nazivne vrijednosti.

## 4.2. Metoda jediničnih vrijednosti

Metoda jediničnih vrijednosti (*eng. Per Unit Method*) je metoda kojom skaliramo vrijednosti svih elemenata u mreži u odnosu na neke zadane veličine (obično prividna snaga  $S$  i nazivni napon  $U_n$ ). Ideja je dobiti jedinstvene vrijednosti koje su međusobno kompatibilne u računu bez potrebe za prilagodbom zbog naponskih razina i na taj način olakšati proračun.

Za zadanu mrežu koja sadrži  $n$  naponskih razina definiramo bazne napone  $U_{Bn}$  koji su definirani standardnim naponskim razina (220 kV, 110 kV,...) i koji vladaju između dva transformatora.

Proizvoljno definiramo i baznu snagu  $S_B$  koja je zajednička za sve elemente kruga neovisno o naponskoj razini. Sada možemo za svaku od  $n$  naponskih razina definirati pripadnu bazu impedanciju  $Z_{Bn}$  ili baznu admitanciju  $Y_{Bn}$  i pripadnu baznu struju  $I_{Bn}$  prema izrazima:

$$Z_{Bn} = \frac{1}{Y_{Bn}} = \frac{U_{Bn}^2}{S_B} [\Omega] \quad (4.1)$$

$$I_{Bn} = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_{Bn}} [A] \quad (4.2)$$

Svi parametri i početni uvjeti mreže sada se skaliraju prema dobivenim baznim veličinama. Dobivene vrijednosti nemaju mjernu jedinicu (obično se radi snalaženja piše oznaka za *per unit - p.u.*).

U proračun se dalje ulazi sa skaliranim (jediničnim) vrijednostima za koje vrijede sve fizikalne zakonitosti. Može se još pokazati da u domeni jediničnih vrijednosti fazni i linijski napon imaju iste vrijednosti.

$$\frac{U_{pu}}{V_{pu}} = \frac{U_n}{U_B} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_n}{\sqrt{3} \cdot V_B} = 1 \quad (4.3)$$

Analogno slijedi da se u domeni jediničnih vrijednosti snaga može računati prema izrazu koji je jedinstven za fazne i linijske vrijednosti.

$$S_{pu} = \frac{S_n}{S_B} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n^*}{\sqrt{3} \cdot U_B \cdot I_B^*} = U_{pu} \cdot I_{pu}^* = V_{pu} \cdot I_{pu}^* \quad (4.4)$$



### 4.3. Formiranje matrice admitancija čvorova

Za primjenu metoda proračuna električnih mreža potrebno je napraviti pripadnu matricu admitancija čvorova  $[Y_n]$  (čvor = knot). Za svaki čvor u mreži sa  $n$  čvorova može se napisati pripadna jednačba čvora  $k$  prema izrazu 4.5.

$$V_k \sum Y_{kk} - \sum_{j=1}^{n-1} V_j \cdot Y_{kj} = \sum_{j=1}^{n-1} E_{kj} \cdot Y_{kj} + I_{kj} \quad (4.5)$$

U jednačbi 4.5  $V_k$  je napon promatranog čvora koji množi sumu admitancija  $Y_{kk}$  direktno spojenih na zadani čvor od čega se dalje oduzima suma napona susjednih čvorova  $V_j$  pomnoženih sa pripadnom admitancijom  $Y_{kj}$  koja povezuje promatrani i susjedni čvor. Desna strana jednačbe sadrži nezavisne izvore i sastoji se od sume nezavisnih izvora elektromotorne sile  $E_{kj}$  pomnoženih sa pripadnim admitancijama izvora  $Y_{kj}$ . S desne strane jednačbe piše se i algebarska suma nezavisnih strujnih izvora  $I_{kj}$ . Takvi izvori ne postoje u elektroenergetici već samo u teoriji kao nadomjesni element.

Raspisivanjem jednačbi za sve čvorove osim referentnog čvora (uzima se da je potencijal referentnog čvora jednak nuli) dobije se sustav  $n$  jednačbi sa  $n$  nepoznanica koji se može grupirati kako je navedeno izrazom 4.6 i dalje zapisati u matričnom obliku prema 4.7.

$$\begin{cases} \vec{V}_1 Y_{11} - \vec{V}_2 Y_{21} - \vec{V}_3 Y_{31} - \dots - \vec{V}_n Y_{n1} = \vec{I}_1 \\ -\vec{V}_1 Y_{12} + \vec{V}_2 Y_{22} - \vec{V}_3 Y_{32} - \dots - \vec{V}_n Y_{n2} = \vec{I}_2 \\ -\vec{V}_1 Y_{13} - \vec{V}_2 Y_{23} + \vec{V}_3 Y_{33} - \dots - \vec{V}_n Y_{n3} = \vec{I}_3 \\ \dots \\ -\vec{V}_1 Y_{1n} - \vec{V}_2 Y_{2n} - \vec{V}_3 Y_{3n} - \dots + \vec{V}_n Y_{nn} = \vec{I}_n \end{cases} \quad (4.6)$$

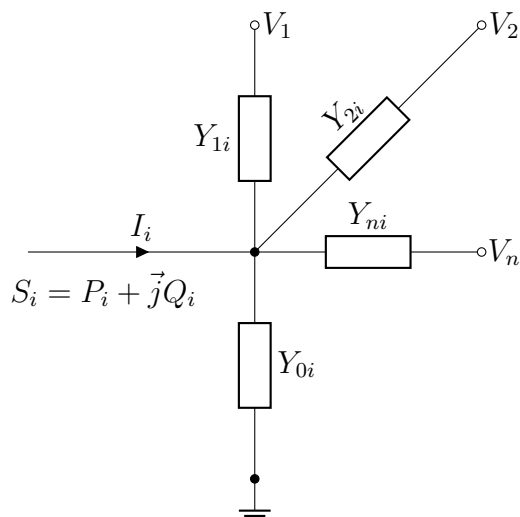
$$\begin{bmatrix} \vec{V}_1 \\ \vec{V}_2 \\ \vec{V}_3 \\ \dots \\ \vec{V}_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_{11} & -Y_{21} & -Y_{31} & \dots & -Y_{n1} \\ -Y_{21} & Y_{22} & -Y_{32} & \dots & -Y_{n2} \\ -Y_{31} & -Y_{23} & Y_{33} & \dots & -Y_{n3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -Y_{n1} & -Y_{n1} & -Y_{n1} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{I}_1 \\ \vec{I}_2 \\ \vec{I}_3 \\ \dots \\ \vec{I}_n \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Kraće se može pisati matrična jednačba 4.8 gdje je  $[\vec{V}_c]$  matrica napona čvorova,  $[\vec{Y}_c]$  matrica admitancija čvorova i  $[\vec{I}_c]$  matrica struja nezavisnih izvora.

$$[\vec{V}_c] \cdot [\vec{Y}_c] = [\vec{I}_c] \quad (4.8)$$

#### 4.4. Gauss - Seidelova metoda

Gauss - Seidelova iteracijska metoda je iteracijska metoda za rješavanje sustava nelinearnih algebarskih jednačbi.



Slika 4.1. Mreža sa n čvorova

U mreži definiramo bilančni čvor (sabirnicu). To je čvor kojem je definiran napon po iznosu i kutu i koji se u odnosu na stanje u mreži ne mijenja dok je snaga koja izlazi iz bilančnog čvora promjenjiva i određena stanjem u mreži. Bilančni čvor predstavlja izvor napajanja. i kao takav se obično crta samo na jednom mjestu u mreži.

Za svaki čvor u mreži koji je modeliran slikom 4.3 može se raspisati jednačba napona čvora kako pokazuje izraz 4.9 u kojem je ispred sume izvučen član koji sadrži napon bilančnog čvora i sumu admitancija  $Y_{ii}$  spojenih na bilančni čvor.

$$\vec{I}_i = (Y_{i0} + Y_{i1} + \dots + Y_{ii} + Y_{in})\vec{V}_i - \vec{V}_1 Y_{i1} - \vec{V}_2 Y_{i2} - \dots - \vec{V}_n Y_{in} = Y_{ii}\vec{V}_i - \sum_{j=1}^{n-1} \vec{V}_j \cdot Y_{ij} \quad (4.9)$$

Struja koja ulazi u čvor  $I_i$  može se raspisati preko snage koja ulazi u čvor i nazivnog napona promatranog čvora.

$$I_i = \frac{\vec{S}_i^*}{V_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (4.10)$$

Izjednačavanjem izraza 4.9 i 4.10 dobije se opći oblik jednačbe čvora zadanog faznim naponom  $V_i$ , sumom radne i jalove snage u čvoru te pripadnim admitancijama koje okružuju čvor.

$$\vec{V}_i Y_{ii} - \sum_{j=1}^{n-1} \vec{V}_j \cdot Y_{ij} = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (4.11)$$

Sređivanjem izraza 4.11 dobije se eksplicitni izraz za napon  $V_i$  proizvoljnog čvora u mreži.

$$V_i = \frac{1}{\vec{Y}_{ii}} \left[ \frac{P_i - \vec{j}Q_i}{\vec{V}_i^*} - \sum_{j=1}^{n-1} \vec{V}_j \cdot Y_{ij} \right] \quad (4.12)$$

Na temelju izraza 4.12 piše se Gauss-Seidelov iteracijski algoritam za rješavanje sustava jednadžbi čvorova mreže. Zadani početni uvjeti jesu napon bilančnog čvora poznatog iznosa i faznog kuta i koji je stalan u svim iteracijama te nazivni naponi ostalih napona u nultoj iteraciji za koje se uzima njihov bazni napon.

$$V_i^{(k)} = \frac{L_{ii}}{V_i^{*(k-1)}} - \sum_{j=1}^{i-1} L_{ij} V_j^{(k)} - \sum_{j=i+1}^n L_{ij} V_j^{(k-1)} \quad (4.13)$$

U izrazu 4.13 uvedeni su radi jednostavnosti članovi  $L_{ii}$  i  $L_{ij}$  koji se računaju preko izraza 4.14 i 4.15 i koji se ne mijenjaju tijekom iteracija.

$$L_{ii} = \frac{P_i - \vec{j}Q_i}{\vec{Y}_{ii}} \quad (4.14)$$

$$L_{ij} = \frac{Y_{ij}}{Y_{ii}} \quad (4.15)$$

U izrazu 4.13 dana je opća formula za raspisivanje Gauss-Seidelov algoritma gdje prva suma uzima bilančne čvorove, a druga suma ostale čvorove mreže. Radi jednostavnosti je u nastavku naveden izraz 4.16 gdje je raspisano nekoliko jednadžbi Gauss-Seidlesovog algoritama sa jednim bilančnim čvorom  $\vec{V}_1$ .

$$\begin{cases} \vec{V}_1 = |\vec{V}_1| \angle \varphi \\ \vec{V}_2^{(1)} = \frac{L_{22}}{\vec{V}_2^{*(0)}} - L_{21} \vec{V}_1 - L_{23} \vec{V}_3^{(0)} - L_{24} \vec{V}_4^{(0)} - \dots L_{2n} \vec{V}_n^{(0)} \\ \vec{V}_3^{(1)} = \frac{L_{33}}{\vec{V}_3^{*(0)}} - L_{31} \vec{V}_1 - L_{32} \vec{V}_2^{(1)} - L_{34} \vec{V}_4^{(0)} - \dots L_{3n} \vec{V}_n^{(0)} \\ \dots \end{cases} \quad (4.16)$$

Za zadanu točnost  $\varepsilon$  uzimamo da rješenje sustava konvergira ako je zadovoljen izraz 4.17 gdje se uspoređuju apsolutne vrijednosti rezultata prethodne i trenutne iteracije.

$$\Delta V_i = ||V_i^{(k)}| - |V_i^{k-1}|| < \varepsilon \quad (4.17)$$

#### 4.5. Newton - Raphsonova metoda

Newton-Raphsonova metoda rješavanja nelinearnih algebarskih jednačbi temelji se na raspisu funkcije pomoću Taylorovog polinoma. Za početne uvjete (vrijednosti napona čvorova) članovi višeg reda Taylorovog polinoma mogu se zanemariti pa račun postaje relativno kratak. U izvod Newton-Raphsonove metode polazimo iz jednačbe 4.11.

$$\vec{V}_i \vec{Y}_{ii} - \sum_{j=1}^{n-1} \vec{V}_j \cdot \vec{Y}_{ij} = \frac{P_i - \vec{j}Q_i}{\vec{V}_i^*} \quad (4.18)$$

Razdvajanjem izraza 4.18. na realni i imaginarni dio definiramo izračunatu radnu snagu čvora  $P_{i,izr}$  i izračunatu jalovu snagu  $Q_{i,izr}$  koje se razlikuju od stvarnih vrijednosti snaga koje teku kroz čvorove.

$$\begin{cases} P_{i,izr} = \sum_{j=1}^n [V_i'(G_{ij}V_j' - B_{ij}V_j'') + V_i''(G_{ij}V_j + B_{ij}V_j')] \\ Q_{i,izr} = \sum_{j=1}^n [V_i''(G_{ij}V_j' - B_{ij}V_j'') - V_i'(G_{ij}V_j'' + B_{ij}V_j')] \end{cases} \quad (4.19)$$

Definiramo razliku snaga  $\Delta P_i$  i  $\Delta Q_i$  koja je definirana izrazom 4.20 i koja predstavlja razliku između stvarne snage u čvoru i izračunate snage u istom čvoru mreže. Na temelju razlike snaga provjerava se konvergencija iteracijskog algoritma prema zadanoj točnosti  $\varepsilon$ .

$$\begin{cases} \Delta P_i^{(k)} = |P_i - P_{i,izr}^{(k)}| < \varepsilon \\ \Delta Q_i^{(k)} = |Q_i - Q_{i,izr}^{(k)}| < \varepsilon \end{cases} \quad (4.20)$$

Konačno se piše blok matrica koja povezuje matricu razlika snaga čvorova  $\Delta P$  i  $\Delta Q$  sa blok matricom razlikom napona čvorova  $\vec{V} = V \angle \delta$  koji je zapisan u polarnom obliku.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

Matrice  $J_1 - J_4$  zovu se *Matrice Jakobijana* i sadrže parcijalne derivacije snaga iz izraza 4.19 po varijabli faznog kuta  $\delta$  odnosno po varijabli napona  $V$ .

$$[J_1] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{n-1}} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial P_{n-1}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial \delta_{n-1}} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$[J_2] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_{n-1}} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial P_{n-1}}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial V_{n-1}} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$[J_3] = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_{n-1}} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial \delta_1} & \cdots & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial \delta_{n-1}} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

$$[J_4] = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_{n-1}} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial V_1} & \cdots & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial V_{n-1}} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Rješavanjem sustava blok matrica dobiju se korekcije napona  $\Delta V$  i faznog kuta  $\Delta \delta$  u  $k$  iteraciji pomoću kojih se računa napon u  $k + 1$  iteraciji. Pomoći napona u  $k + 1$  iteraciji računaju se nove vrijednosti snaga preko izraza 4.19 koje se ponovno uvrštavaju u izraz 4.20 te se ispituje konvergencija iterativne metode.

Newton-Raphsonova metoda pokazuje odličnu primjenu u računalnim proračunima zbog matricnog formata iako brzina konvergencije može biti nešto sporija u usporedbi sa ostalim metodama. Ipak, kada su početne vrijednosti napona i faznog kuta približno jednake stvarnim vrijednostima tada je brzina iteracije znatno veća.

## 5. Analiza tokova snaga u područnom elektroenergetskom sustavu

### 5.1. Sadašnje stanje mreže i normalni pogonski uvjeti

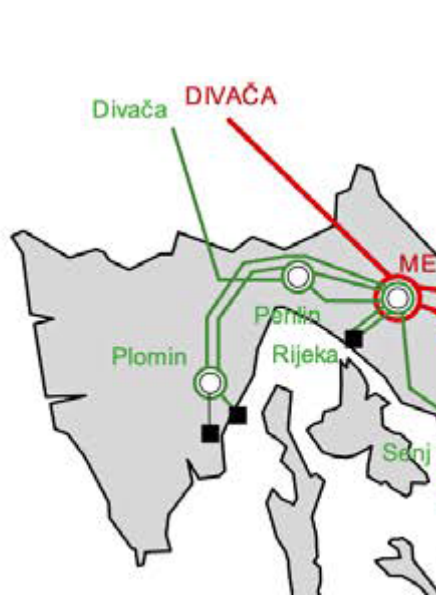
Istarski poluotok nalazi se na krajnjem zapadu Hrvatske i sa svojih 2831 četvornih metara predstavlja desetu po veličini županiju u Hrvatskoj. Sa ostatkom Hrvatske Istra je povezana uskim koridorom preko Učke, a najpristupačniji dio jesu upravo istočni dijelovi te planine. Kopnena granica ostvaruje se na sjeveru sa susjednom Slovenijom. Najbliže morske veze Istra ima sa Lošinjom i Cresom na istoku poluotoka. [8]



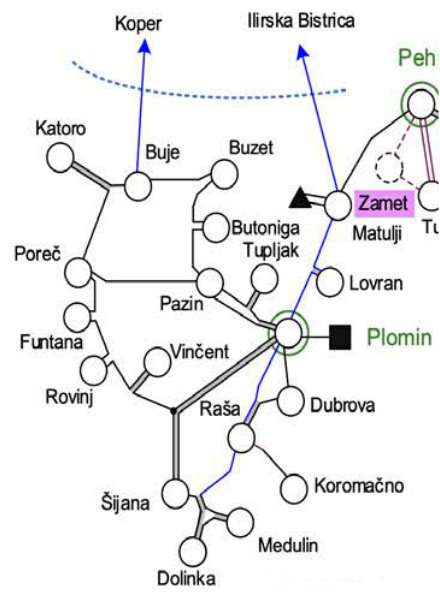
Slika 5.1. Satelitska snimka Istarskog poluotoka [8]

Geografski položaj Istre odražava se na strukturu njezinog elektroenergetskog sustava koji zbog činjenice da se radi o poluotoku nije povezan sa ostatkom hrvatskog elektroenergetskog sustava na najbolji mogući način. Prijenosna mreža poluotoka prikazana je na slikama 6.1 i 6.2 gdje je vidljivo da vezu ostvaruju dva 220 kV dalekovoda iz Pehlina i Meline te tri 110 kV od kojih jedan također iz Pehlina te dva iz susjedne Slovenije. Prijenosna mreža je radijalnog tipa u odnosu na ostatak hrvatskog EES i EES Slovenije dok je na razini čvorišta prstenastog oblika uz izuzetak čvora Koromačno. Nakon prikazanih čvorova prijenos preuzima operator distribucijskog sustava. Samostalni izvor električne energije u Istri jest TE Plomin nazivne snage 247 MVA koja nije u punom pogonu od 2017. i koja očekuje potpuno gašenje pogona do 2035.

Simulaciju tokova snaga izvest ćemo u programskom alatu Neplan. Na slici 5.3 prikazana je shema u simulacijskom programu s kojom će se analizirati sadašnji područni EES. Okolni dijelovi Hrvatskog EES nadomješteni su aktivnom mrežom *Melina* dok su veze prema Sloveniji nadomještene aktivnim mrežama *Koper* i *Ilirska Bistrica* na 110 kV te aktivnom mrežom *Divača* na 220 kV. Plavom bojom označeni su dijelovi 110 kV mreže, zelenom bojom 220 kV mreže te crvenom bojom dio 400 kV mreže.

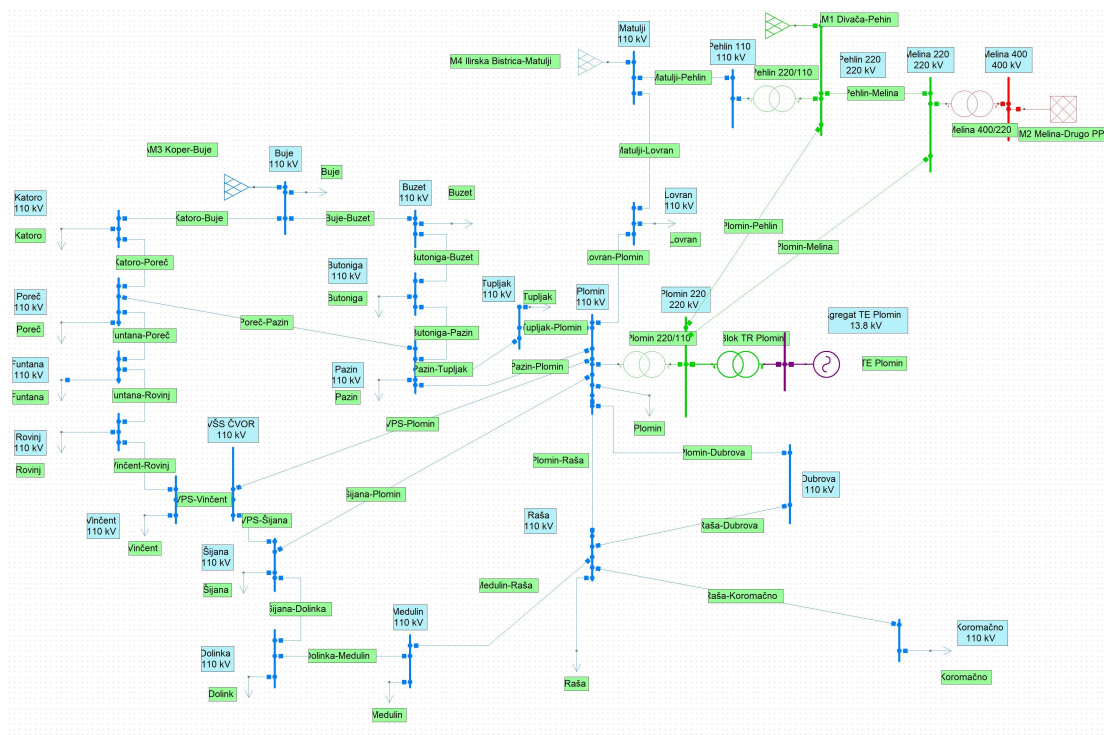


(a) Mreža 220 kV



(b) Mreža 110 kV

Slika 5.2. Shematski prikaz prijenosne mreže Istre [4]



Slika 5.3. Shema područnog EES u programskom sučelju NEPLAN

## 5.2. Proračun pri vršnim opterećenjima

Prema izvještaju HOPS-a [4] definitivno najveće opterećenje hrvatskog EES zabilježava se u ljetnim mjesecima (srpanj, kolovoz) dok su zimski mjeseci kao druga polovica godina razdoblja kada se pojavljuju najmanja opterećenja. Proračun za ekstremne uvjete rada tako podrazumijeva najveće i najmanje opterećenje koje se pojavilo u sustavu kao mjera između koje očekujemo da će se pojaviti svako drugo stanje u sustavu.

U nastavku su navedeni ulazni podatci za proračun. Tablica 5.1 prikazuje vršna (ljetna) opterećenja EES uz pretpostavku da je faktor snage za svaki čvor jednak i iznosi 0,95. Podatci za aktivne mreže koji nadomještaju susjedne dijelove EES Hrvatske i Slovenije prikazani su u tablici 5.2 sa pripadnim nazivnim napona. Čvor aktivne mreže Melina definiran je kao bilančni čvor (sabirnica) dok su ostali čvorovi aktivnih mreža definirani kao sabirnice konstantne snage.

Tablica 5.1. Vršnja (ljetna) opterećenja čvorišta područnog EES

ČVORIŠTE	$P/MW$	$Q/MVAr$
Buje	21,50	7,07
Butoniga	2,80	0,92
Buzet	7,50	2,47
Dolinka	39,90	13,11
Dubrova	0	0
Funtana	23,40	7,69
Katoro	9,70	3,19
Koromačno	5,30	1,75
Lovran	14,80	4,86
Medulin	2,60	0,85
Pazin	13,10	4,31
Plomin	6,0	1,97
Poreč	52,40	17,22
Raša	19,90	6,52
Tupljak	2,80	0,92
Rovinj	20,60	9,40
Vincent	10,60	3,48
Šijana	47,50	15,61

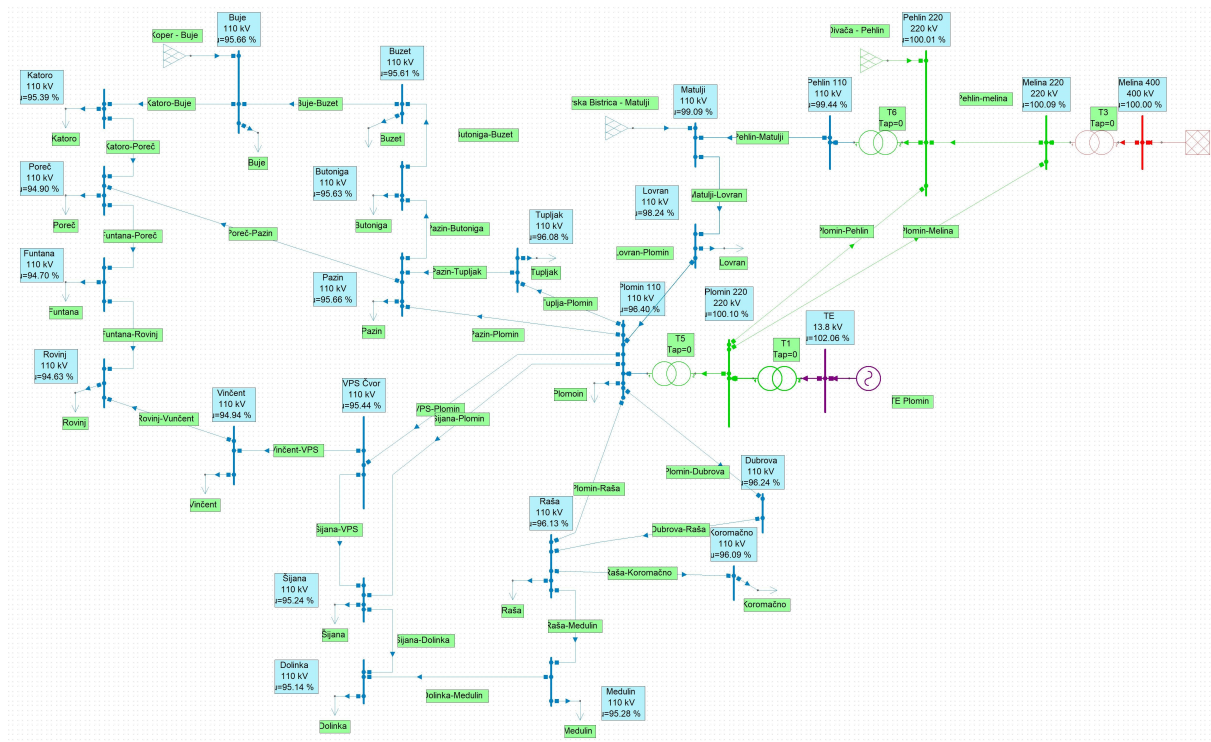
Tablica 5.2. Nazivni podatci aktivnih mreža područnog EES

NAZIV AKTIVNE MREŽE	$U/kV$	$S_{k-max}/MVA$	$S_{k-max}/MVA$	$P/MW$	$Q/MVAr$
Melina - Drugo PP	400	12000	10000		
Divača - Pehlin	220	10000	5000	40	0
Kopar - Buje	110	800	500	40	20
Ilirska Bistrica - Matulji	110	1000	800	10	0

Parametri vodova i transformatora postavljeni su radi preglednosti u Prilog ovog rada. TE Plomin podešena je tako da radi sa nazivnom radnom snagom od 209,95 MW, a jalovomom snagom

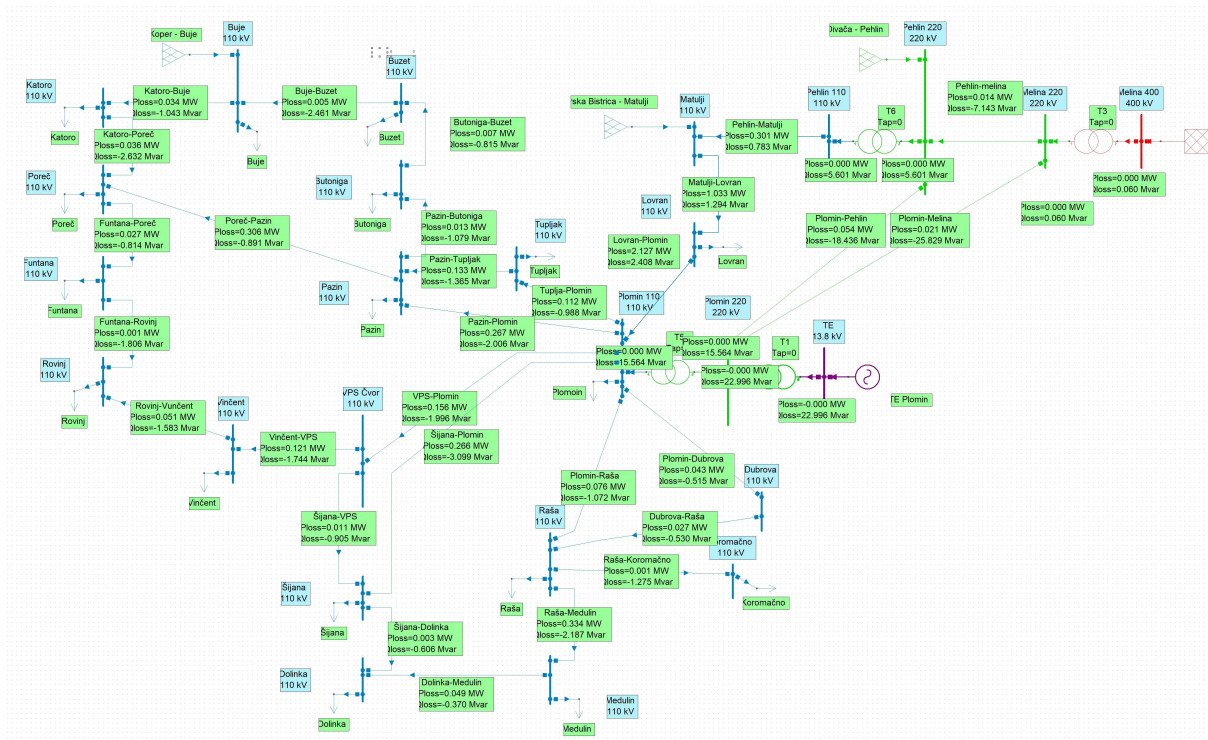


od 50 MVar. Rezultati simulacije prema navedenim parametrima prikazani su na slikama 5.4 i 5.5.



Slika 5.4. Naponi na sabirnicama za maksimalno ljetno opterećenje

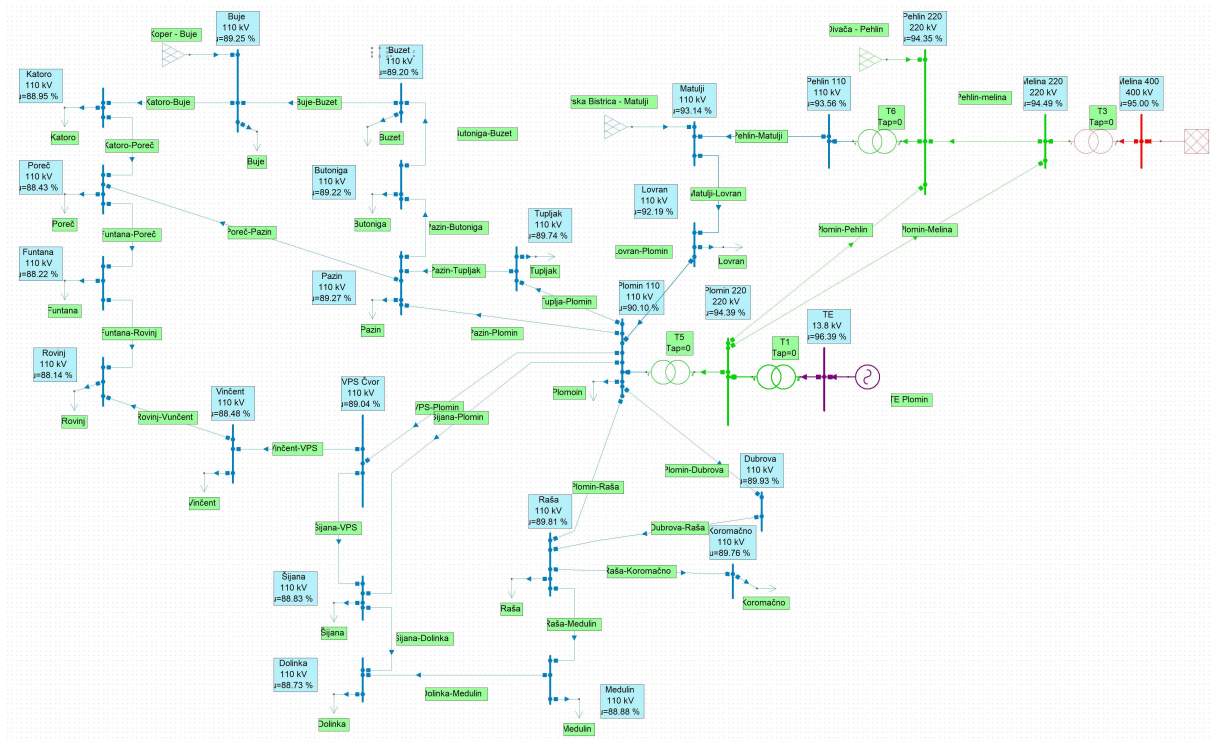
Naponi u čvorovima mreže pri vršnom opterećenju i pri nazivnom naponu bilančnog čvora Melina uglavnom su vrlo niski. Najlošije stanje osjeti se na jugu (Dolinka, Medulin) i jugozapadu (Rovinj) gdje su relativni padovi napona do gotovo 4,86%. Čvorovi središnje Istre također imaju relativno velika odstupanja od nazivnog napona - oko 4,34%.



Slika 5.5. Gubitci na vodovima za maksimalno ljetno opterećenje

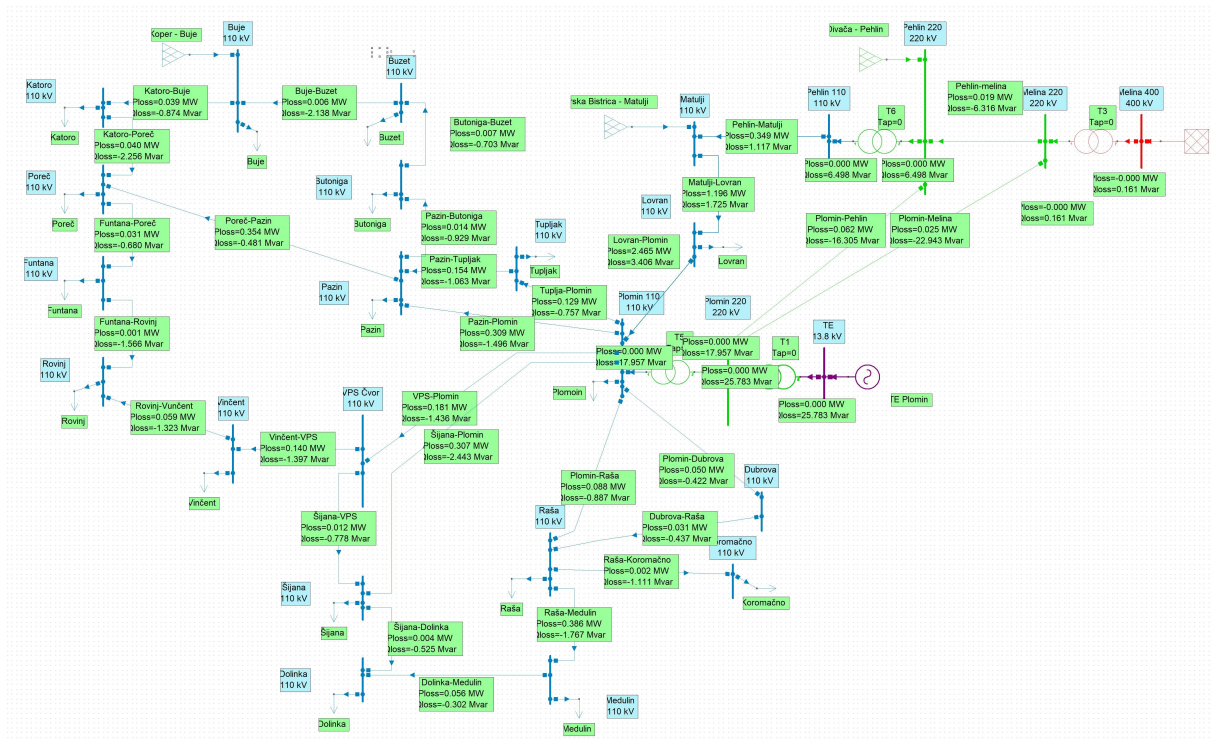
Djelatni gubitci na vodovima pri nazivnom naponu bilančnog čvora Melina očekivano su najveći na najdužim trasama vodova, a to je vod Šijana-Plomin koji ostvaruje gubitke od 266 kW. Obzirom da veliki tok snage kreće iz čvora Plomin očekivano su oko njega nastali i najveći gubitci koji se kreću između 156 kW prema VPS čvoru (budući čvor Vodnjan) do 267 kW prema Pazinu. Ukupni gubitci na vodovima u promatranoj mreži ukupno iznose 5,626 MW.

Za postojeće stanje mreže izvršena je simulacija varijacije naponskih razina kako bi se ispitao njihov utjecaj na djelatne gubitke. U nastavku su prikazani rezultati simulacije kada je čvor Melina postavljen najprije na 95 % nazivnog napona, a onda na 105 % nazivnog napona.



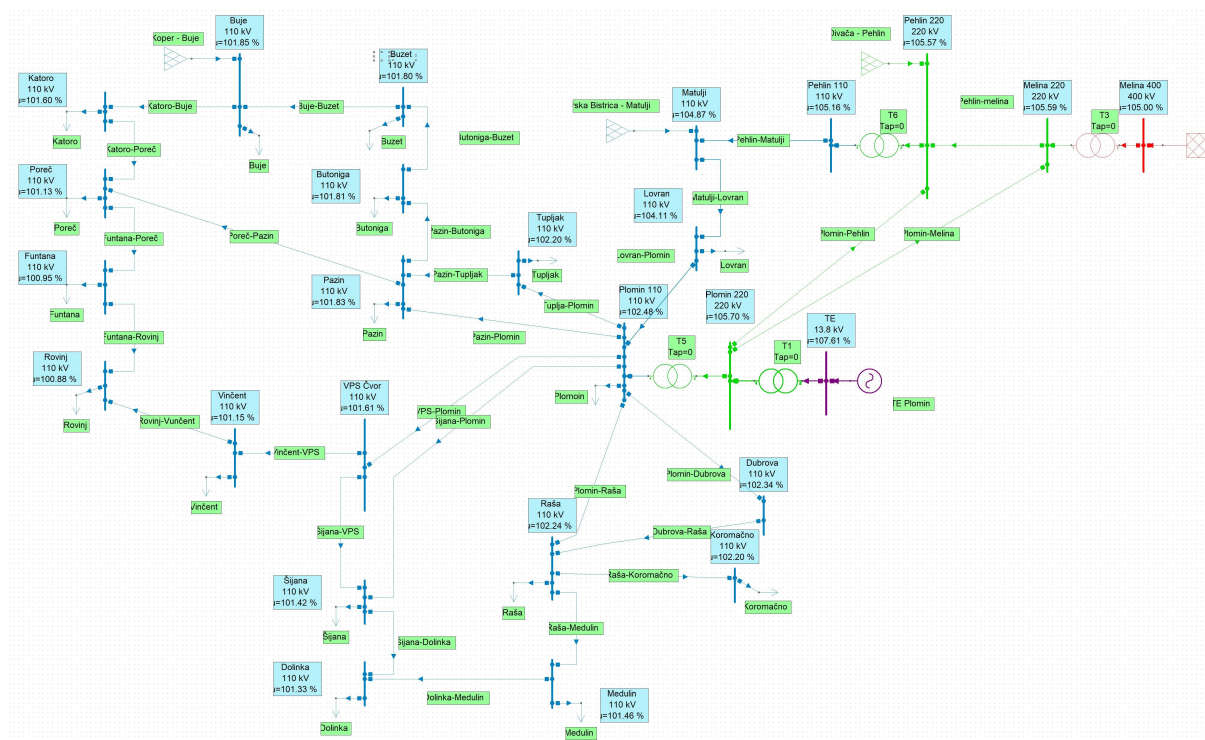
Slika 5.6. Naponi na sabirnicama za maksimalno ljetno opterećenje uz 95 % nazivnog napona u čvoru Melina

Smanjenje naponskih profila dovelo je do očekivanog porasta djelatnih gubitaka. Padovi napona drastično su se povećali i u takvim okolnostima padovi napona u potrošačkim čvorovima su veći od 10%. Ovakvo stanje je apsolutno nepoželjno u procesu vođenja EES, ali je dobra demonstracija utjecaja naponskih profila na djelatne gubitke.



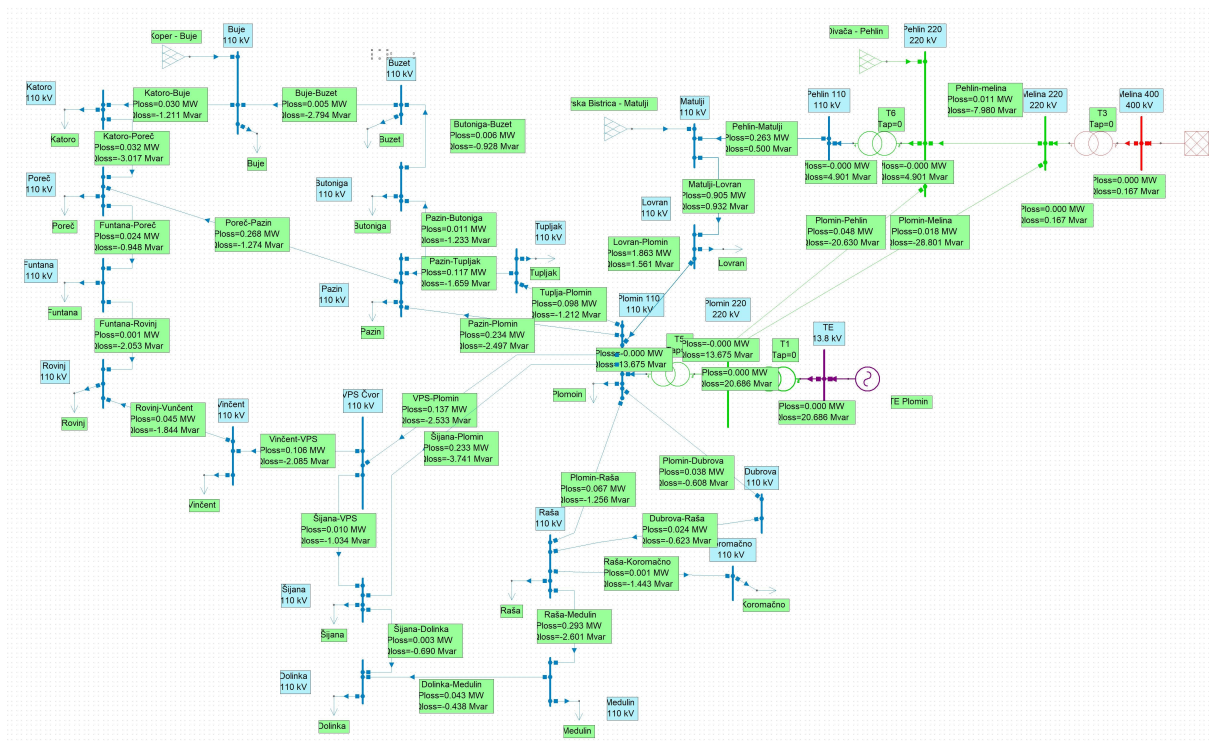
Slika 5.7. Gubici na vodovima za maksimalno ljetno opterećenje uz 95 % nazivnog napona u čvoru Melina

Povećanje djelatnih gubitaka manifestira se i većim gubiticima na vodovima. Generalno su se povećali gubici na svakom vodu, a ukupni djelatni gubici iznose 6,52 MW.



Slika 5.8. Naponi na sabirnicama za maksimalno ljetno opterećenje uz 105 % nazivnog napona u čvoru Melina

Povećanje napona bilančnog čvora Melina na 105% nazivnog napona dolazi do očekivanog smanjenja djelatnih gubitaka koji se manifestira značajnim boljim naponskim prilikama u čvorištima opterećenja. U svakom čvoru predstavljene mreže mjeri se napon koji je veći od nazivnog napona. Ovakva situacija pogoduje sigurnijem vođenju EES jer osim što se smanjuju djelatni gubitci ostavlja se i "rezerva" napona za gubitke koji će se pojaviti u distribucijskoj mreži.



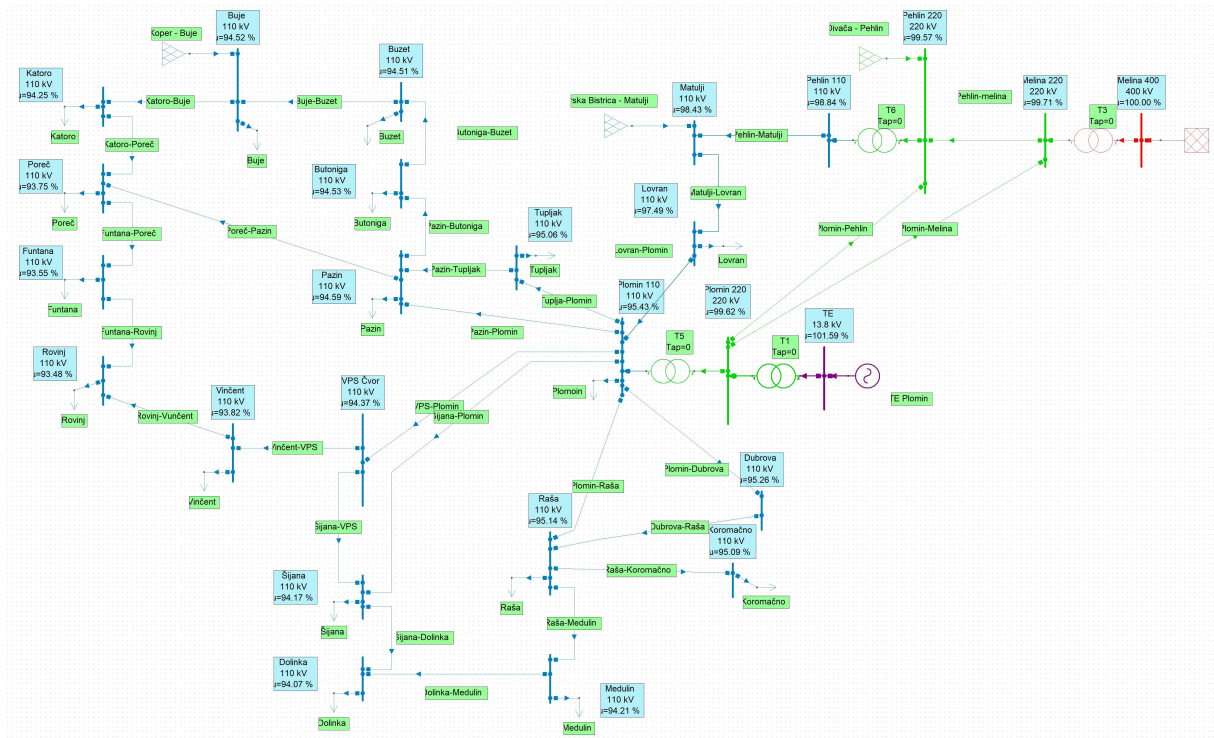
Slika 5.9. Gubici na vodovima za maksimalno ljetno opterećenje uz 105 % nazivnog napona u čvoru Melina

Gubici na vodovima generalno su se smanjili i na njima ukupni djelatni gubici iznose 4,93 MW. Razlog je upravo povećanje naponskih razina u cijeloj mreži koji uzrokuje smanjenje struje kroz vodiče te se analogno smanjuju i djelatni gubici.



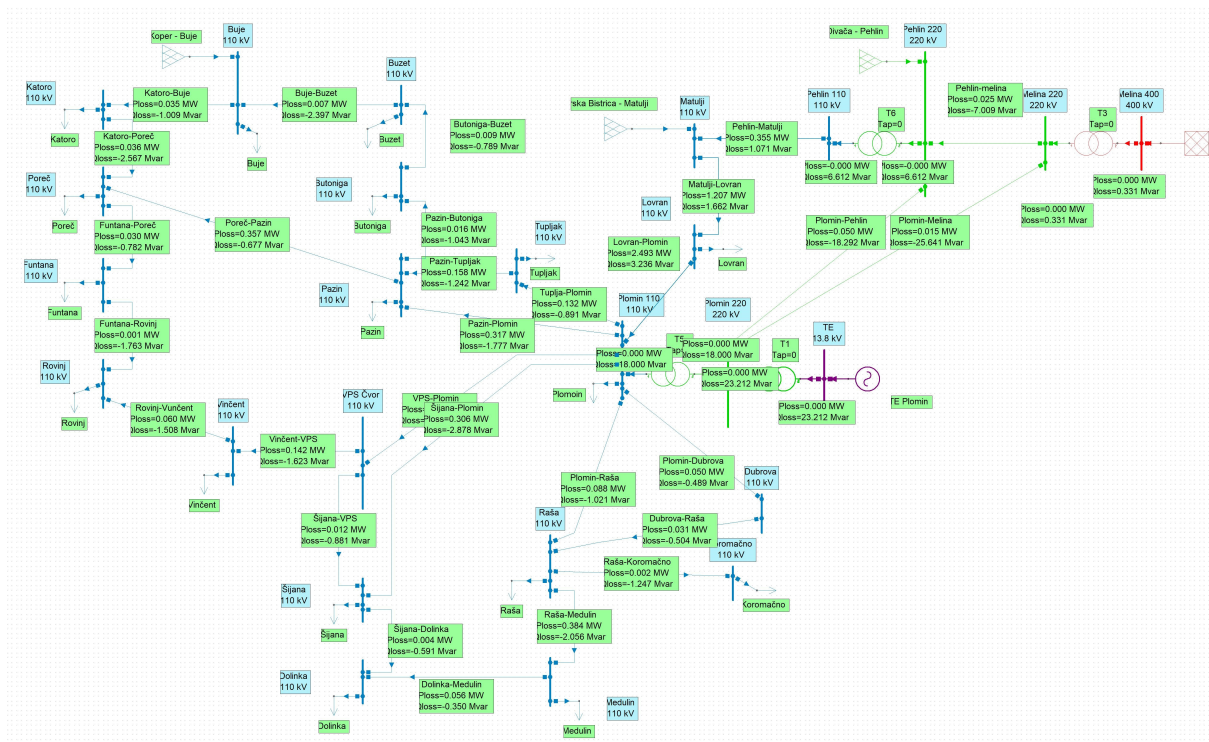
### 5.3. Budući uvjeti rada

U Hrvatskoj je od 2011. prisutan trend rasta opterećenja u svim dijelovima zemlje. Prema procjenama HOPS-a [4] do 2031. očekuje se rast od oko 0.5%. Rezultat prognoza jest povećanje ukupne ljetnje potrošnje za 5,56% odnosno povećanje ukupne zimske potrošnje 5,09%. Uzimajući u obzir pretpostavku da je odnos minimalnog i maksimalnog opterećenja ostao isti napravljena je analiza mreže čiji su rezultati prikazani na slikama 5.10 i 5.11 za sadašnje stanje mreže.



Slika 5.10. Očekivani naponi na sabirnicama za 2031. uz sadašnje stanje mreže

Povećanje potrošnje pri nazivnom naponu bilančnog čvora Melina dovelo je do povećanja padova napona na posojećoj mreži. Navedene promjene su relativno malene i ne iznose više od 1%. Ipak, treba uzeti u obzir da su u ovakvim okolnostima padovi napona idalje preveliki.

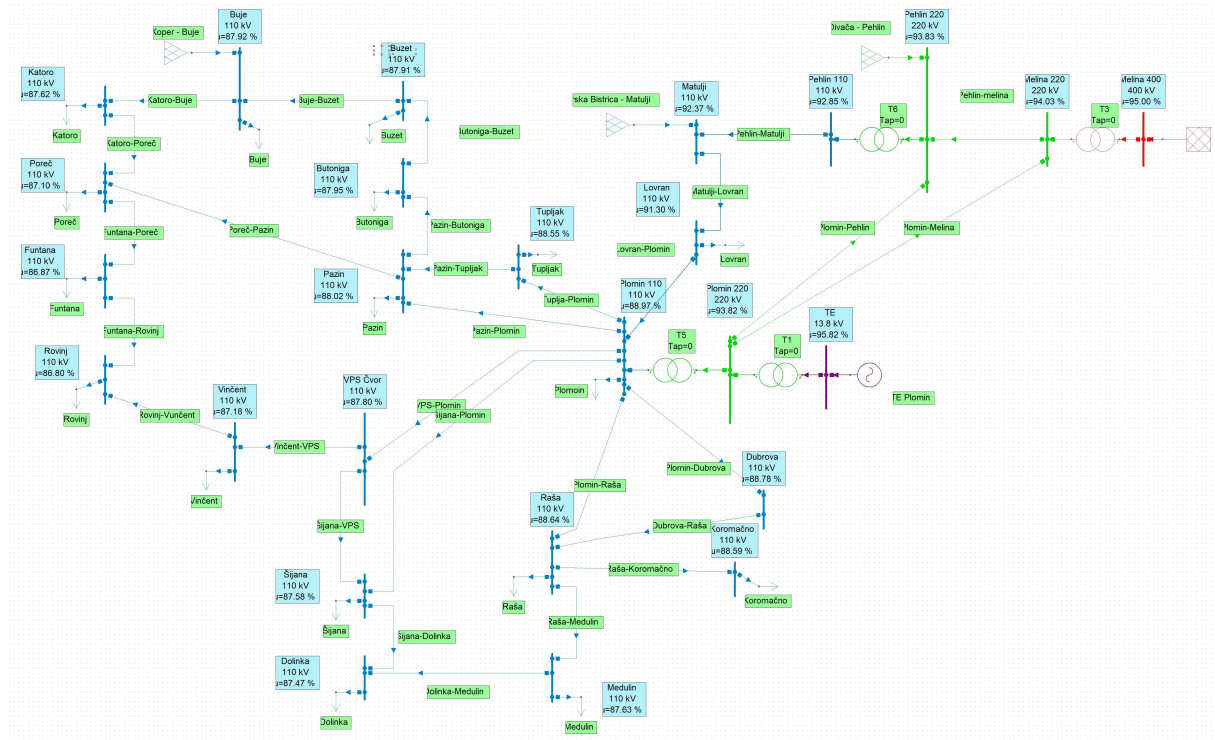


Slika 5.11. Očekivani gubitci na vodovima za 2031. uz sadašnje stanje mreže

Povećanje potrošnje analogno je dovelo i do povećanja gubitka na vodovima. Uz već navedene uvjete ukupni gubitci na vodovima sada iznose 6,349 MW što je povećanje od 12,85%. Napomenimo i kako se najveći gubitci na vodovima idalje ostvaruju u okolini čvora Plomin.

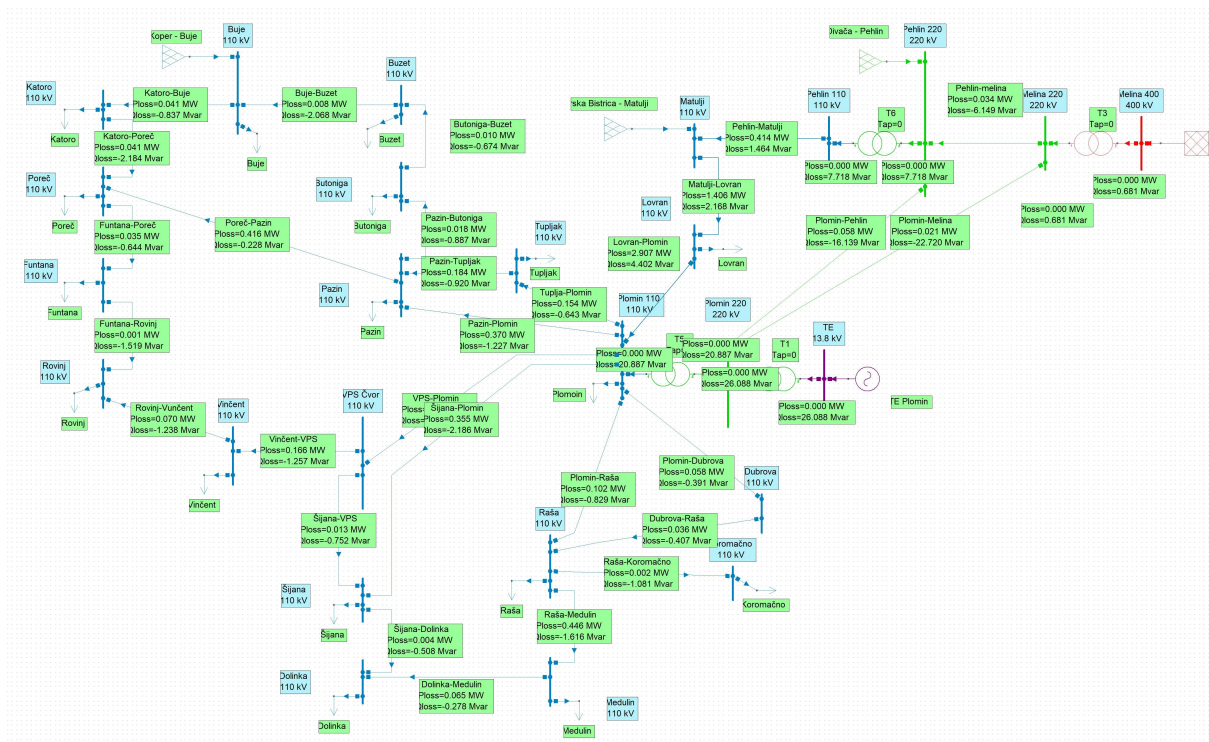


Gore provedene simulacije izvršene su pod pretpostavkom da je bilančni čvor Melina na nazivnom naponu od 110 kV. U svrhu ispitivanja utjecaja naponskih profila na djelatne gubitke i ovdje su izvedene još dvije simulacije gdje je bilančni čvor Melina postavljen na 95% odnosno na 105% nazivnog napona.



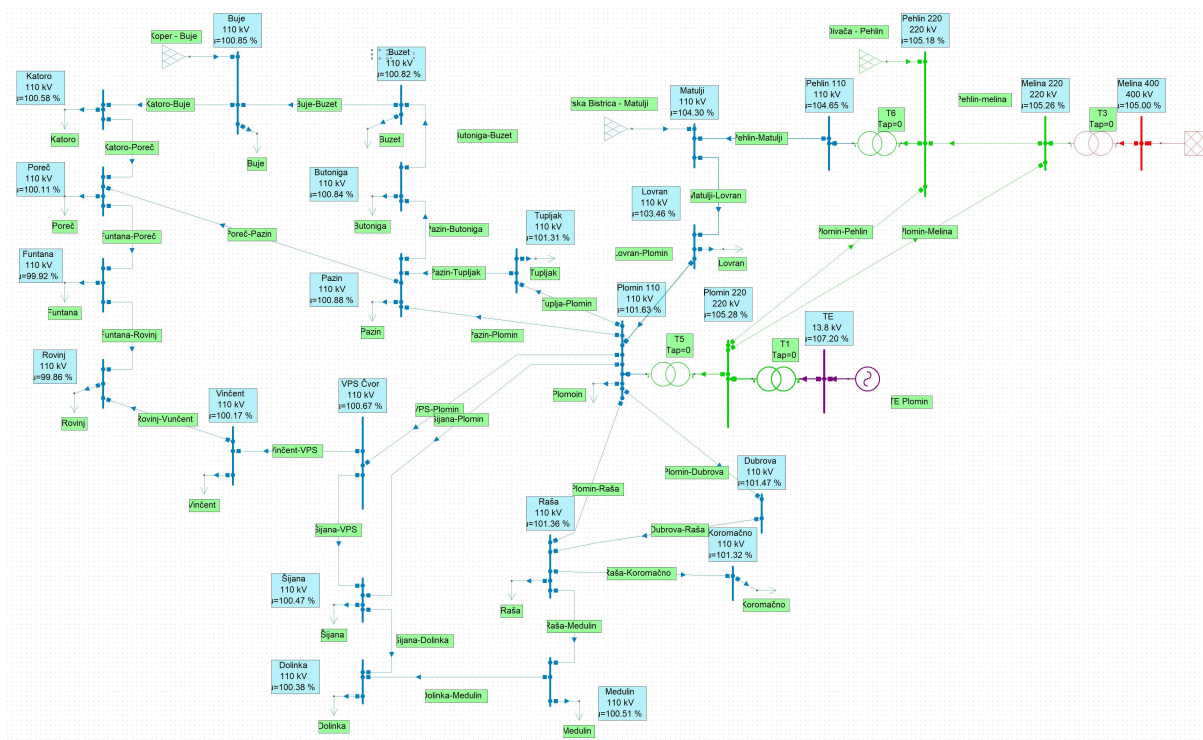
Slika 5.12. Očekivani naponi na sabirnicama za 2031. uz sadašnje stanje mreže i 95 % nazivnog napona u čvoru Melina

Smanjenje napona u bilančnom čvoru Melina na 95% nazivne vrijednosti ponovno je dovelo do iznimno nepovoljnih naponskih prilika u mreži. Padovi napona u ovako ekstremnoj situaciji manji su prelaze 10% u gotovo svim potrošačkim čvorovima.



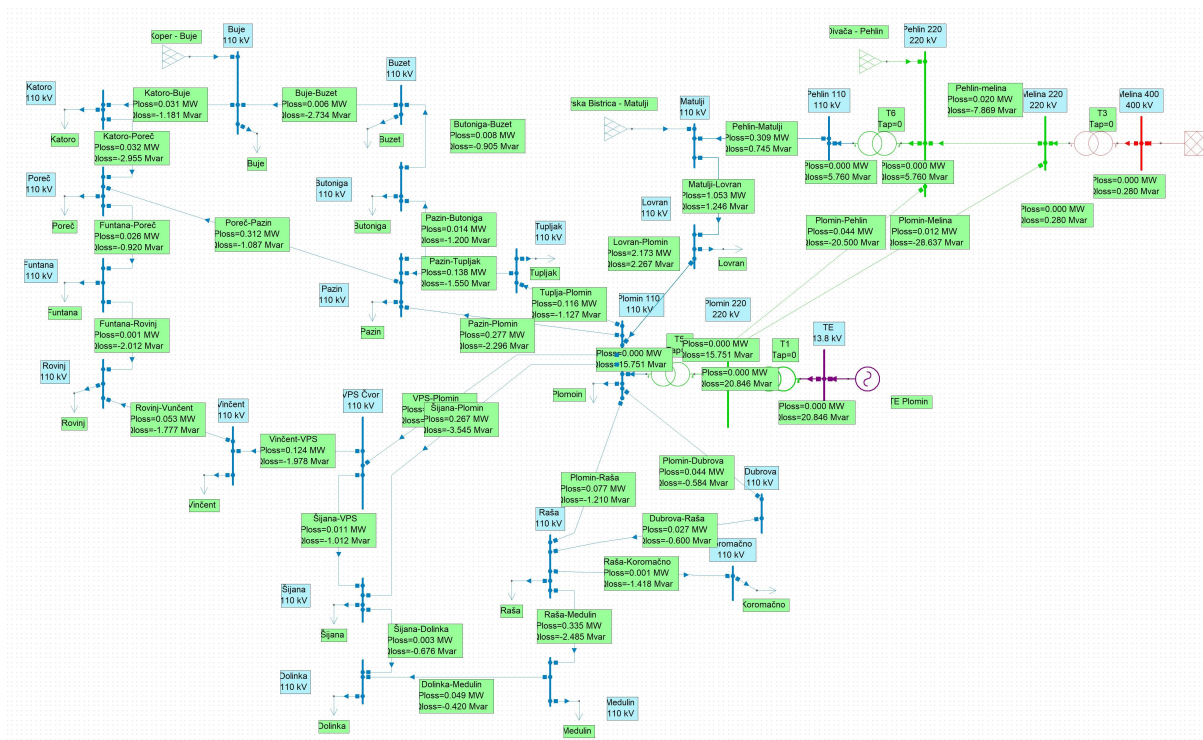
Slika 5.13. Očekivani gubitci na vodovima za 2031. uz sadašnje stanje mreže i 95 % nazivnog napona u čvoru Melin

Vrlo očekivano dolazi i do povećanja djelatnih gubitaka na vodovima. U navedenim okolnostima oni sada iznose ukupno 7,148 MW što je povećanje od 9,6% u odnosu na sadašnje vršno opterećenje.



Slika 5.14. Očekivani naponi na sabirnicama za 2031. uz sadašnje stanje mreže i 105 % nazivnog napona u čvoru Melin

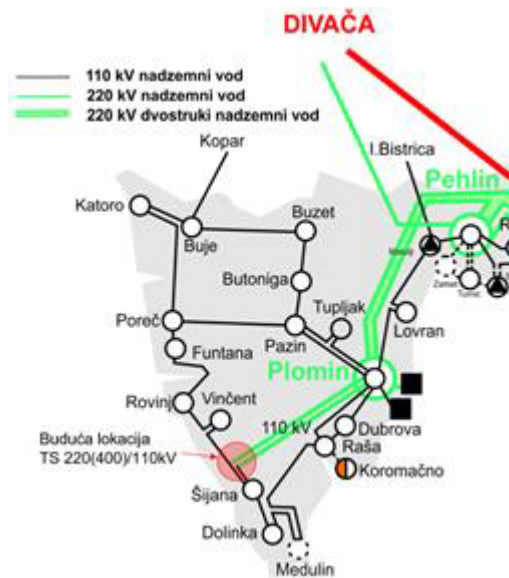
Povećanje napona bilančnog čvora Melina na 105% rezultira puno povoljnijom slikom kada su u pitanju naponi čvorova. Gotovo svi čvorovi nalaze se na nazivnom naponu, dok su rijetki izuzetci čvorovi Rovinj i Funtana koji rade na 99,86% odnosno na 99,92%. Primjećujemo da je predviđeno povećanje opterećenja dovelo mrežu u nešto manje, ali ipak dovoljno prihvatljivo stanje u odnosu na isti slučaj sa sadašnjim vršnim opterećenjima. Ipak, zbog tendencije povećanja potrošnje u dugoročnim razdobljima neophodno je poduzeti mjere koje će povećati pouzdanost sustava glede naponskih razina.



Slika 5.15. Očekivani gubitci na vodovima za 2031. uz sadašnje stanje mreže i 105 % nazivnog napona u čvoru Melin

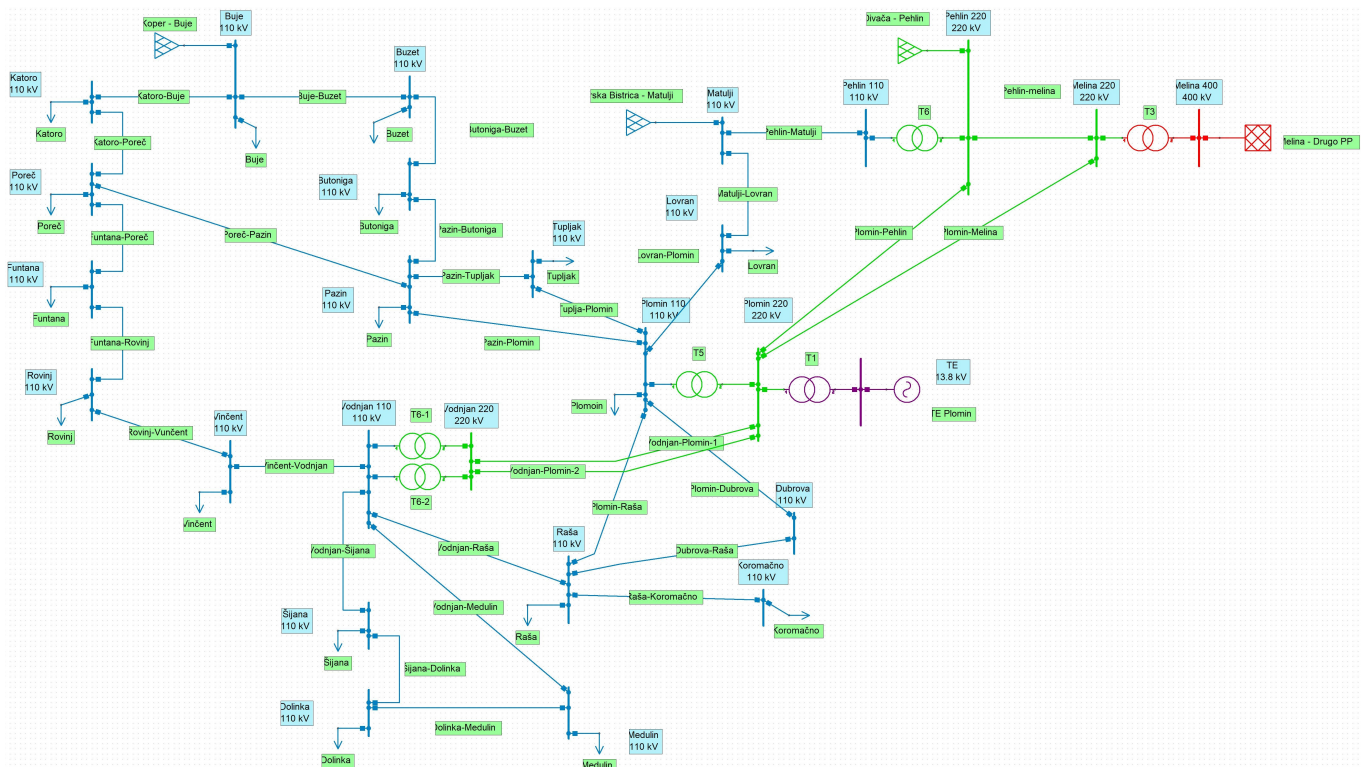
Povećanje napona bilančnog čvora Melina na 105% smanjiti će gubitke na vodovima u odnosu na stanje koje kada spomenuti čvor radi na nazivnom naponu. Ipak, ukupni gubitci su se u odnosu na stanje sa sadašnjim opterećenjem povećali za 15,8% i sada iznose 5,71 MW. Ovaj podatak potvrđuje činjenicu da povećanje opterećenja negativno utječe na učinkovitost sustava jer se povećavaju djelatni gubitci.

U svrhu postizanja boljih naponskih prilika u čvorovima EES Istre u planu je među ostalim i izgradnja trafostanice i rasklopnog postrojenja 220/110 kV Guran (Vodnjan). Projekt obuhvaća ugradnju dva transformatora snage 150 MVA te prespajanje postojećih vodova Raša-Medulin, Vincent-Šijana i Šijana-Plomin preko novog rasklopnog postrojenja.



Slika 5.16. Topologija nove prijenosne mreže na području Istre [7]

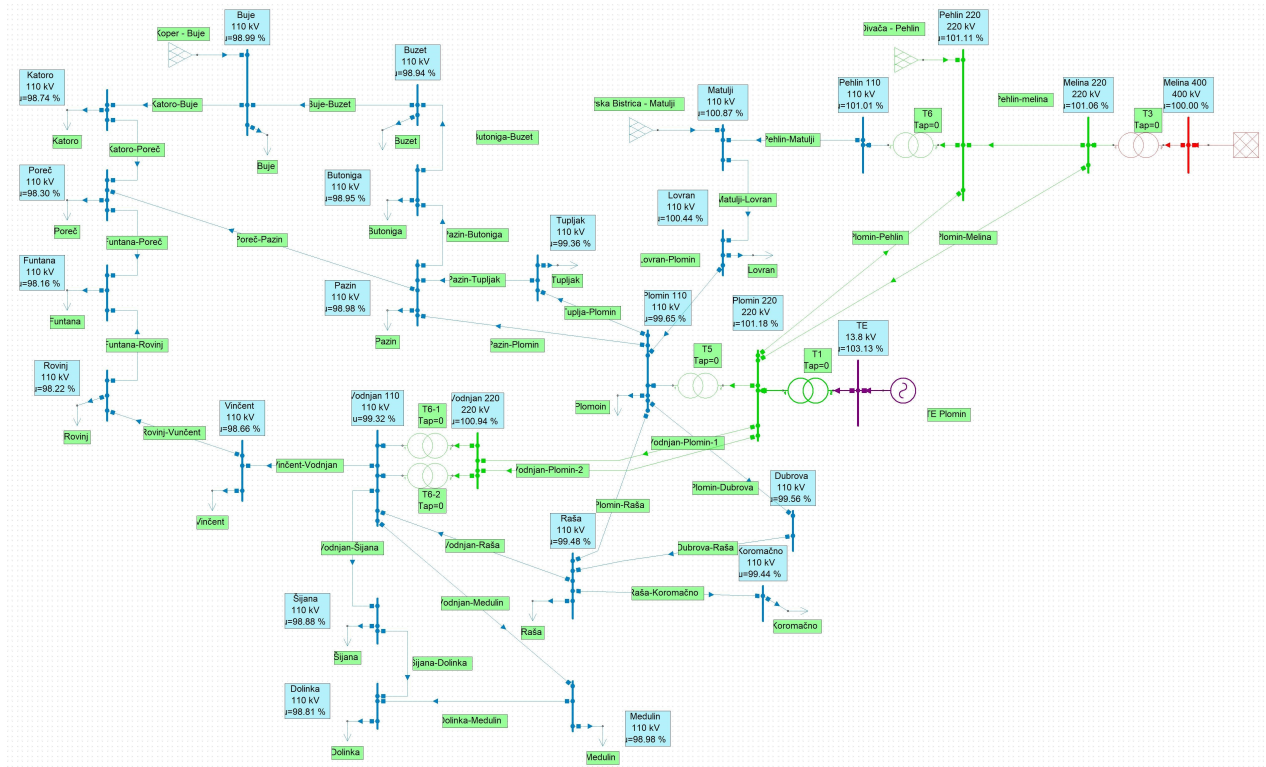
U simulacijskom programu ispitali smo utjecaj nove mreže na djelatne gubitke. Novi izgled mreže unutar programskog sučelja NEPLAN prikazan je na slici 5.17.



Slika 5.17. Shema područnog EES sa TS Vodnjan u programskom sučelju NEPLAN

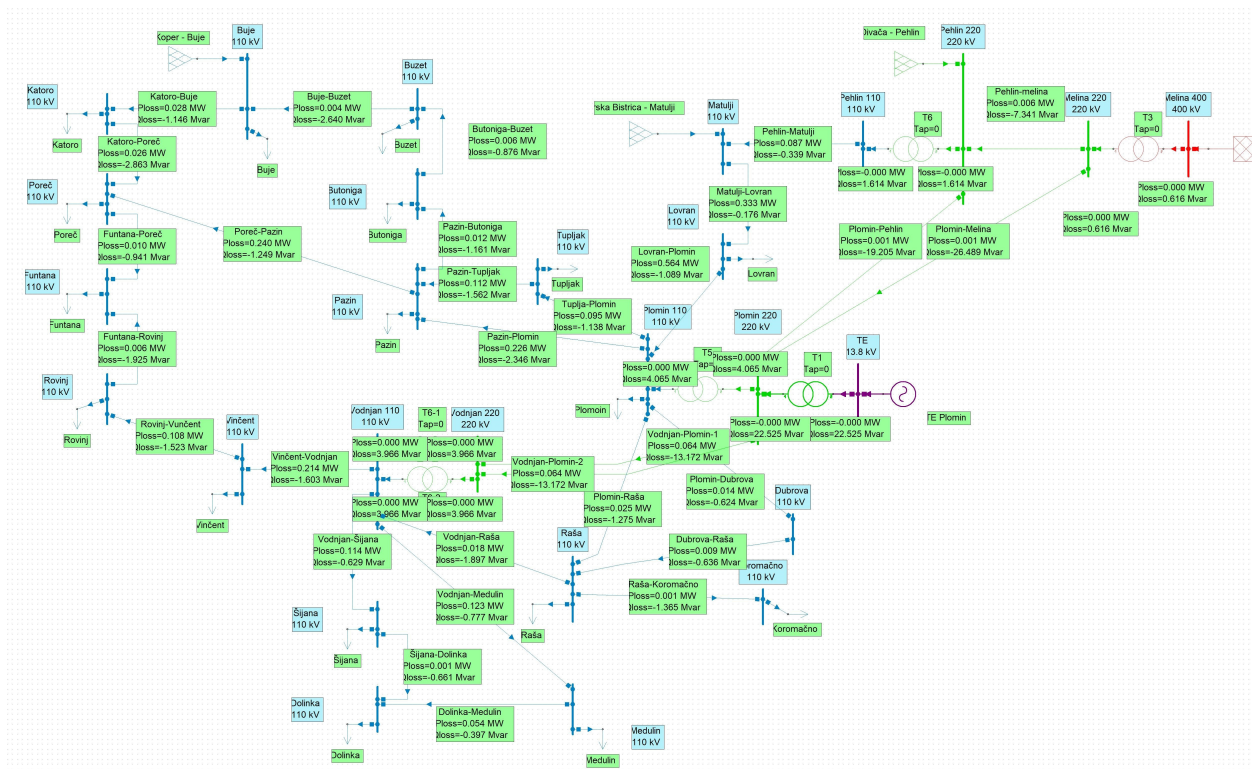


Mreža sada dobiva dvostuki vod 220 kV Vodnjan-Plomin koji treba osigurati veliku prijenosnu moć prema jako opterećenim čvorištima na krajnjem jugu i jugoistoku. U takvim čvorištima očekujemo i manje padove napona. Simulacija je izvedena prema predviđenim maksimalnim (ljetnim) opterećenjima za 2031. godinu kada se očekuje da će novo rasklopno postrojenje biti u punom pogonu. TS Vodnjan povezuje već postojeće dalekovode pa se tijekom simulacije njihovi parametri nisu mijenjali. Rezultati simulacije prikazani su na slikama 5.18 i 5.19.



Slika 5.18. Naponi na sabirnicama za predviđeno maksimalno (ljetno) opterećenje u 2031. sa TS Vodnjan

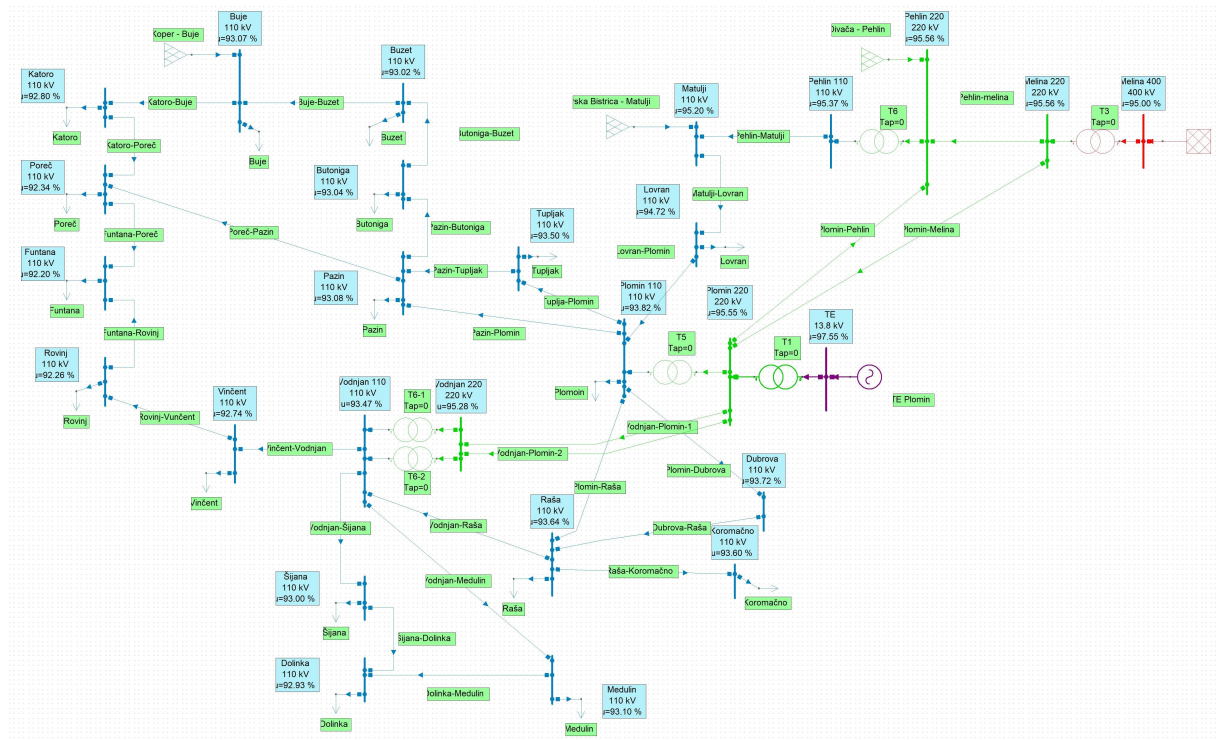
Ugradnjom TS Vodnjan postižu se očekivai efekti. Pri predviđenom opterećenju za 2031. ze uz nazivni napon bilančnog čvora Melina naponske su prilike vrlo dobre. Čvorovi središnje Istre ostvaruju gubitke od najviše 1,05% u čvoru Butoniga. Jug poluotoka ostvaruje nešto veće gubitke koji iznose 1,19% u čvoru Dolinka. Zapadni dijelovi ostvaruju najveće padove napona: Funtana 1,84% te Rovinj 1,78%.



Slika 5.19. Gubitci na vodovima za predviđeno maksimalno (ljetno) opterećenje u 2031. sa TS Vodnjan

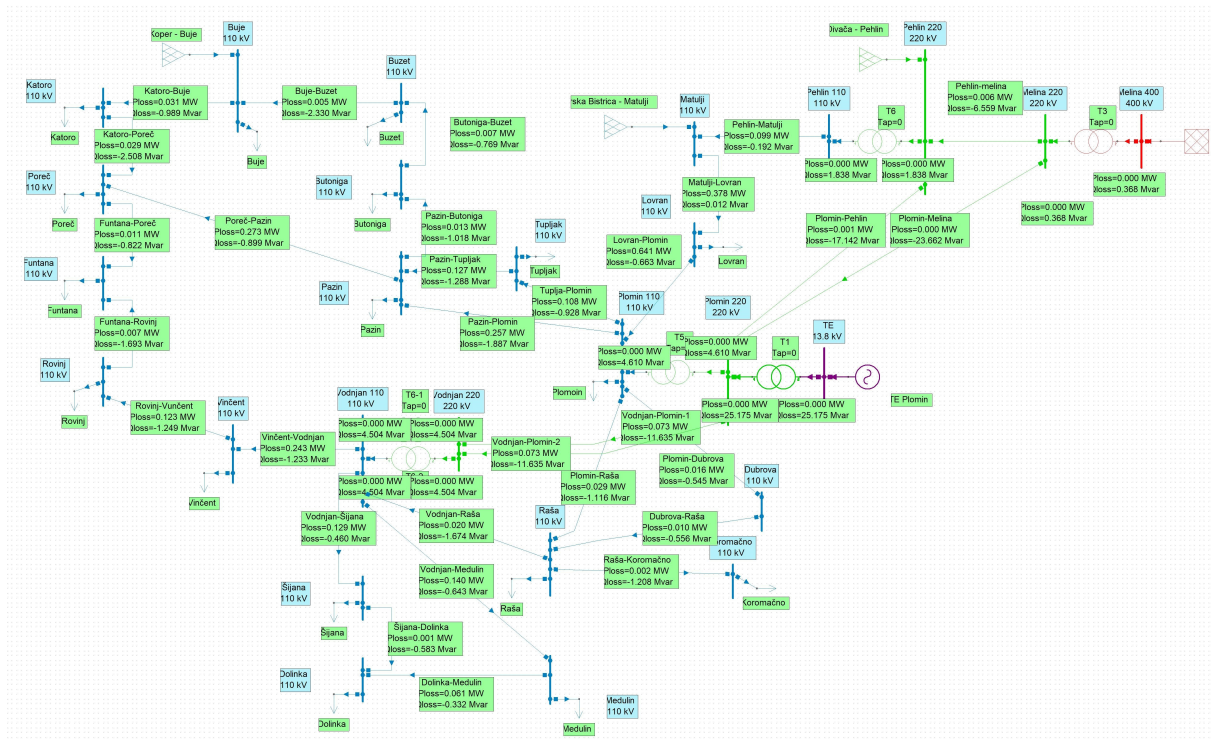
TS Vodnjan drastično je smanjila gubitke na vodovima. Ukupni gubitci u novom mreži pri nazivnom naponu bilančnog čvora Melina iznose 2,567 MW. To je najbolji rezultat u dosadašnjim simulacijama i pokazuje da je ugradnja spomenute trafostanice uvelike popravila učinkovit mreže.

Za prethodnu simulaciju također su izvršena ispitivanja utjecaja naponskih profila na djelatne gubitke pa su tako izvedene još dvije simulacije gdje je bilančni čvor Melina postavljen na 95 % odnosno na 105 % nazivnog napona.

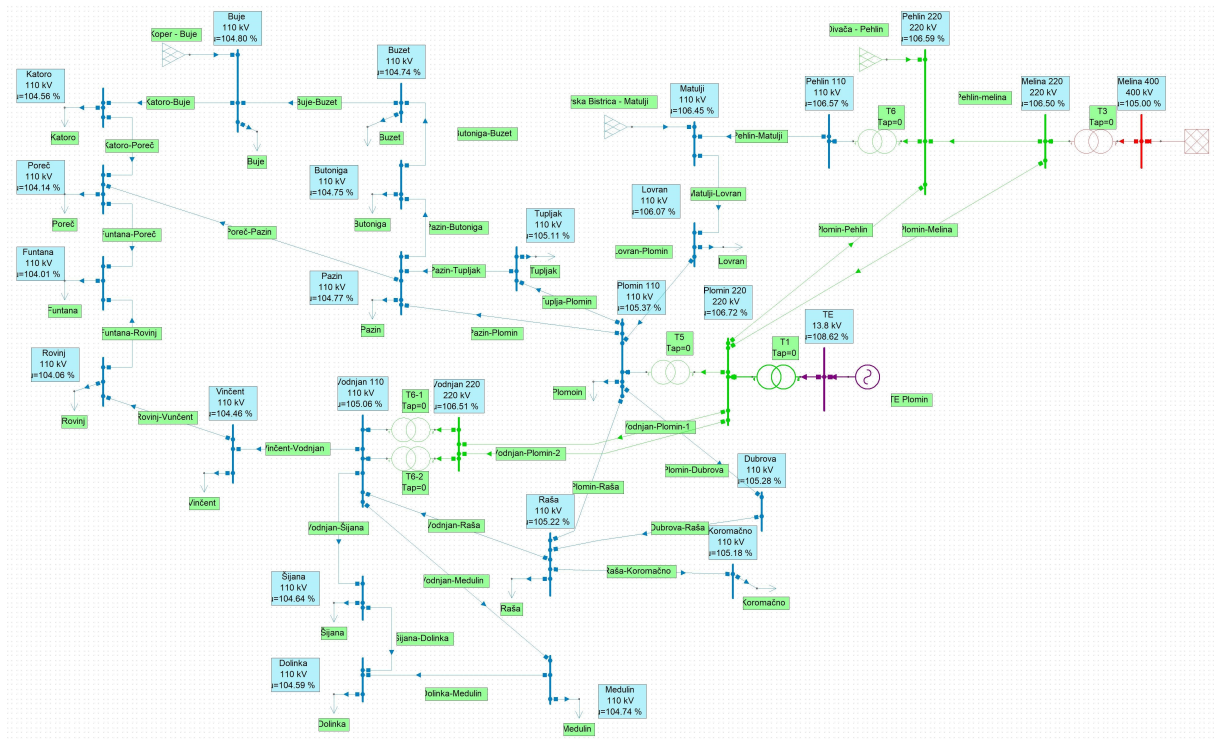


Slika 5.20. Naponi na sabirnicama za predviđeno maksimalno (ljetno) opterećenje u 2031. sa TS Vodnjan i 95 % nazivnog napona u čvoru Melina



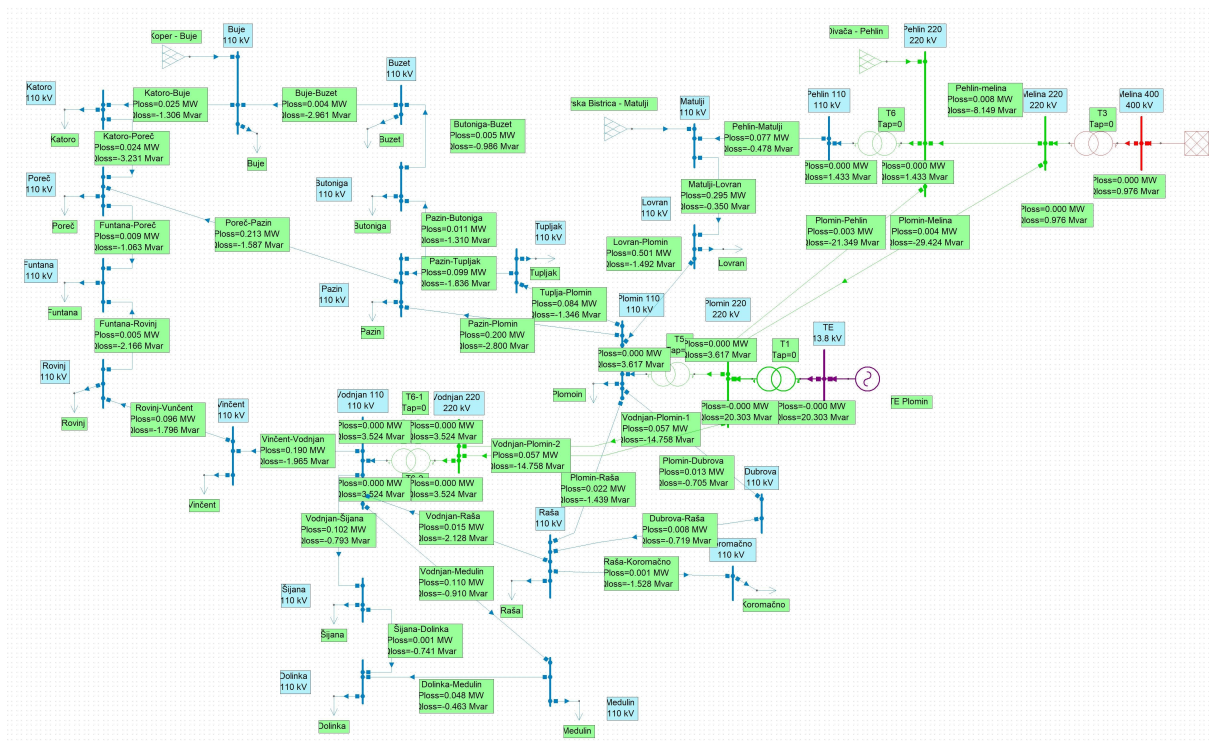


Slika 5.21. Gubitci na vodovima za predviđeno maksimalno (ljetno) opterećenje u 2031. sa TS Vodnjan i 95 % nazivnog napona u čvoru Melina



Slika 5.22. Naponi na sabirnicama za predviđeno maksimalno (ljetno) opterećenje u 2031. sa TS Vodnjan i 105 % nazivnog napona u čvoru Melina

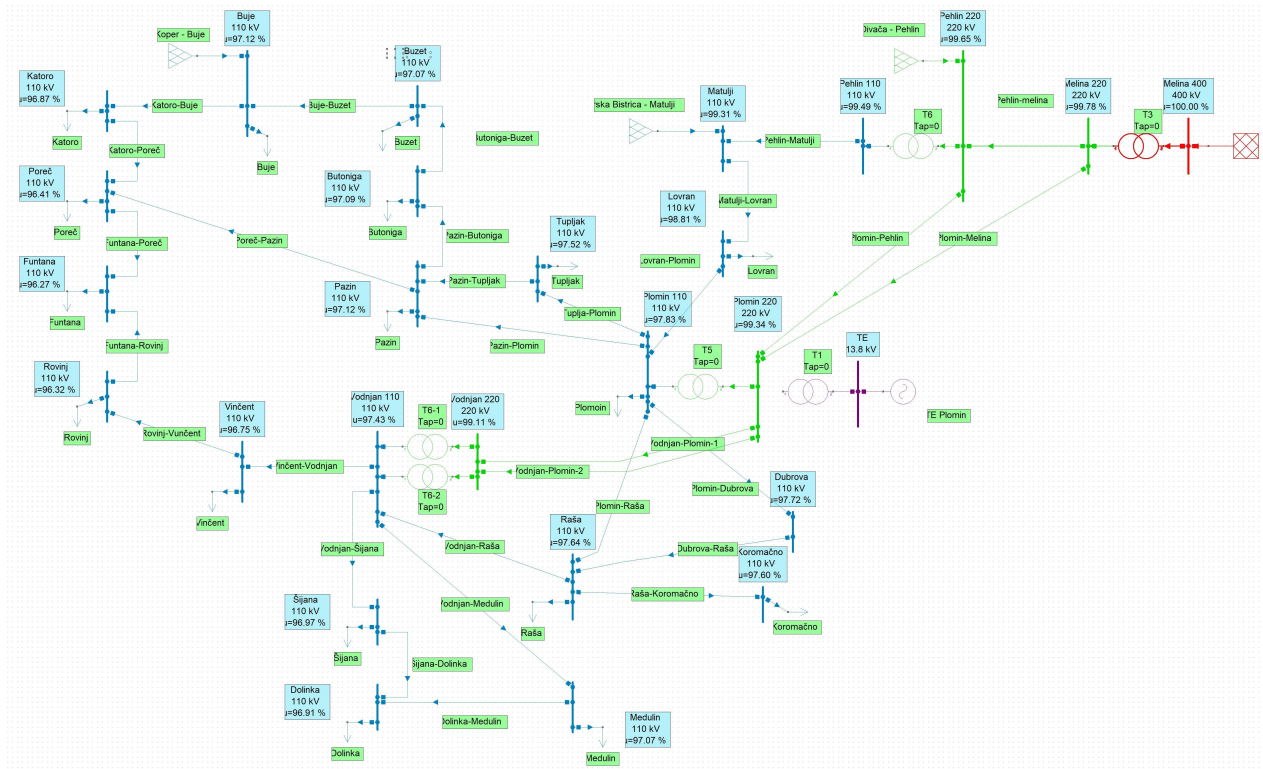
Povećanje napona u bilančnom čvoru Melina na 105% nazivnog napona uz novu TS Vodnjan pokazuje izvrsne rezultate u vidu napona u čvorištima potrošnje. U svim su čvorištima naponi u rasponu od 104% do 106% nazivne vrijednosti. Ovakav scenarij pogoduje sigurnijem vođenju te većoj kvaliteti električne energije u područnom elektroenergetskom sustavu.



Slika 5.23. Gubitci na vodovima za predviđeno maksimalno (ljetno) opterećenje u 2031. sa TS Vodnjan i 105 % nazivnog napona u čvoru Melina

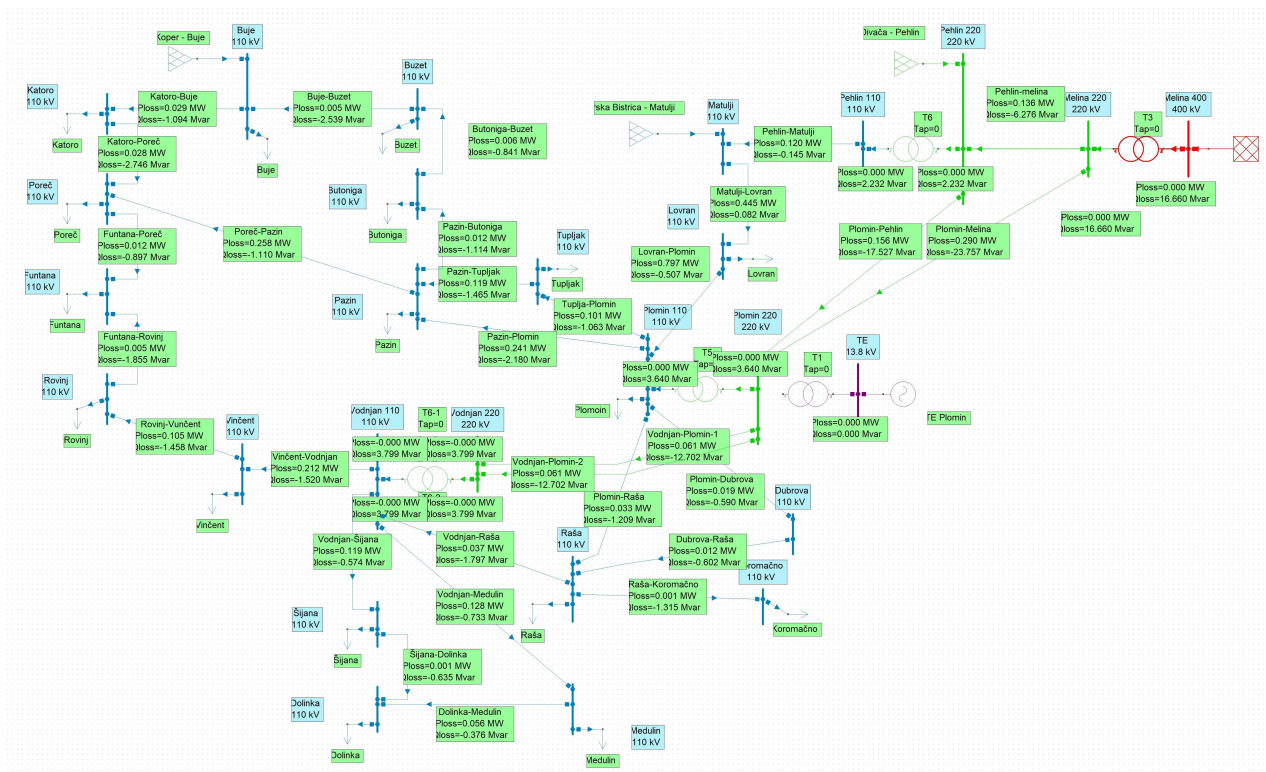
Povećanje napona u bilančnom čvoru Melina na 105% nazivnog napona smanjilo je djelatne gubitke na vodovima za 10,9% u odnosu na uvjete rada pri nazivnom naponu u čvoru Melina. Ukupni gubitci sada iznose 2,287 MW. Razlog ovako velikom smanjenju jest ugradnja dvostrukog 220 kV voda Plomin-Vodnjan na kojem usljed većeg napona nastaju manji djelatni gubitci, a koji također ima i veliku prijenosnu moć.

Posljednju simulaciju proračuna električne mreže Istre izvršit ćemo pod pretpostavkom da je TE Plomin van pogona. Očekuje se da će ova radnja biti izvedena najkasnije do 2035. godine, a sve u cilju smanjenja emisija stakleničkih plinova po direkciji Europske komisije. Simulacija je izvršena na mrežu kakvu očekujemo vidjeti u 2031. pa tako ona uključuje već spomenutu TS Vodnjan i podrazumijeva predviđena maksimalna (ljetna) opterećenja.



Slika 5.24. Naponi na sabirnicama za predviđeno maksimalno (ljetno) opterećenje u 2031. bez TE Plomin

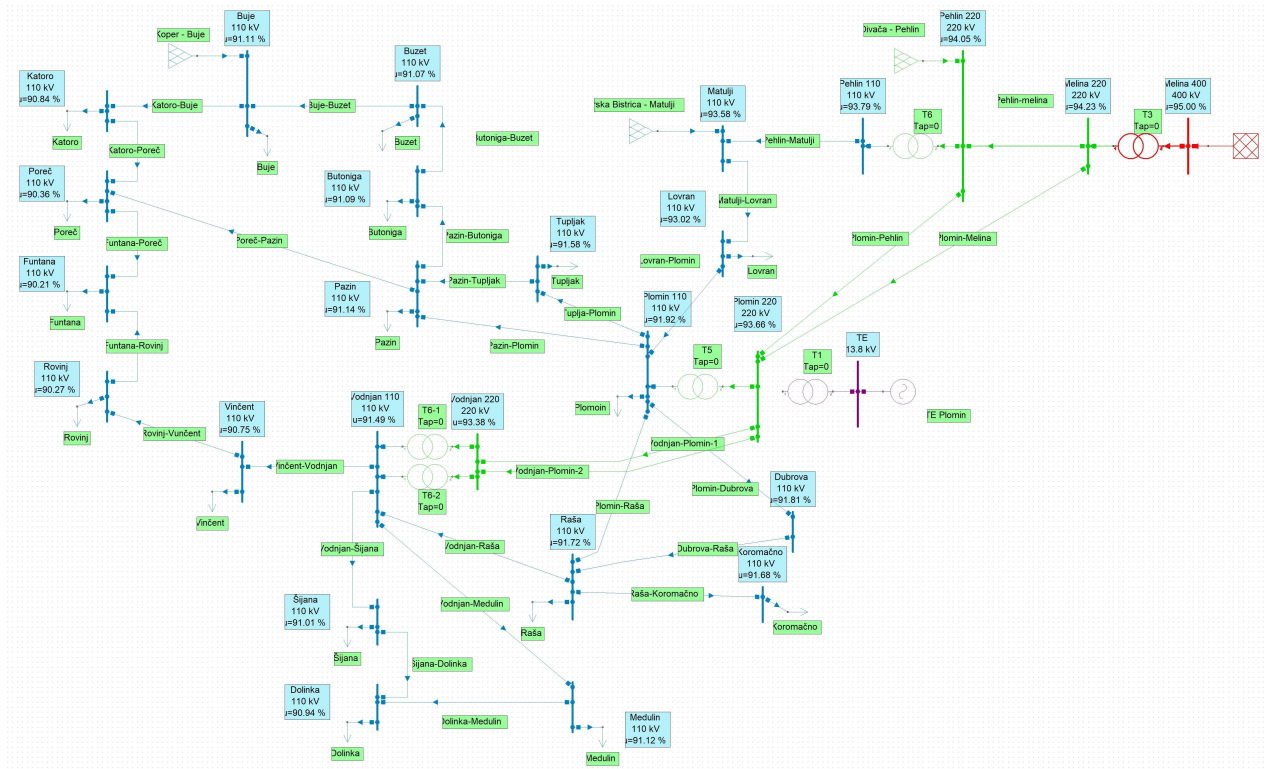
Zbog isključivanja TE Plomin iz pogona došlo je do očekivanog pada napona u svim čvorovima mreže. Izvor napajanja sada su preostale aktivne mreže prema susjednoj Sloveniji te aktivna mreža Melina. Padovi napona kreću se od 2,48% u središnjoj Istri do 3,73% na zapadu u čvoru Funtana.



Slika 5.25. Gubitci na vodovima za predviđeno maksimalno (ljetno) opterećenje u 2031. bez TE Pločin

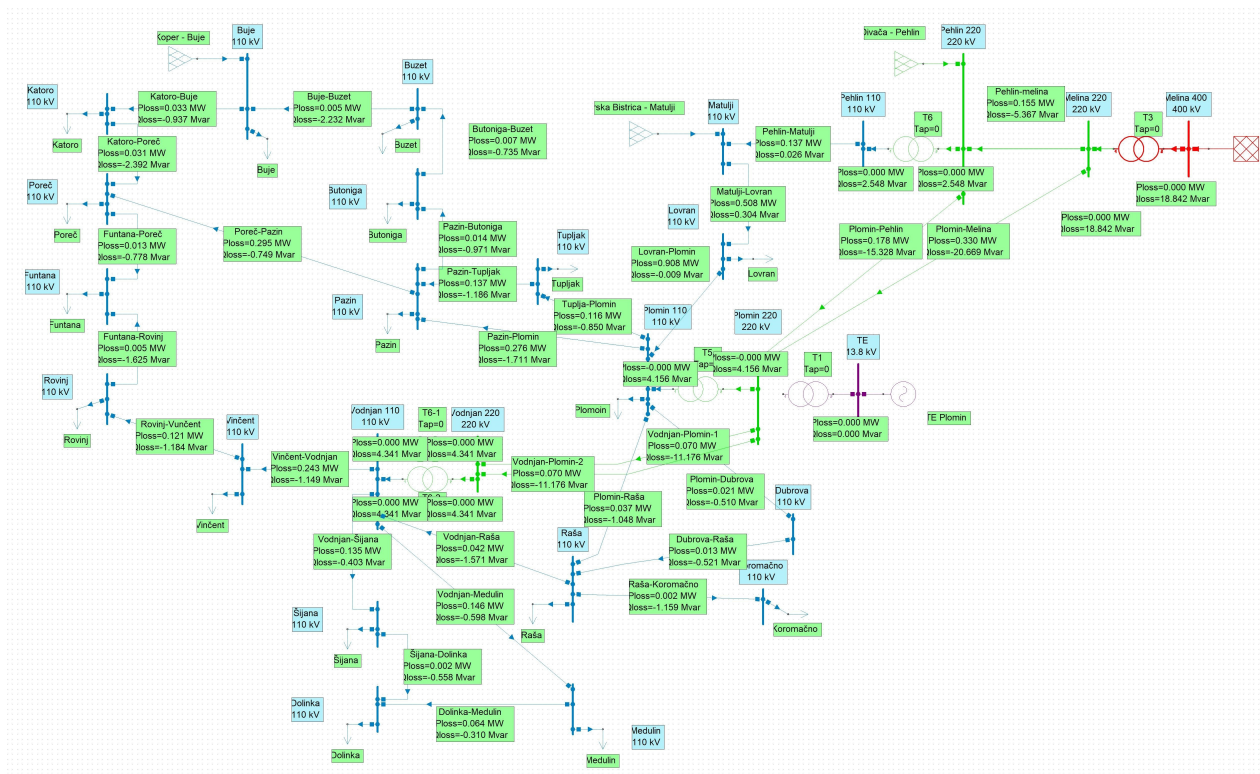
Ukupni gubitci pri isključenju TE Pločin i uz nazivni napon bilančnog čvora Melina iznose 3.905 MW. Do povećanih gubitaka dolazi zbog preraspodjele tokova snaga preko 110 kV vodova usljed gašenja TE Pločin.

U nastavku su također izvedene varijacije naponskih profila podešavanjem napona bilančnog čvora Melina na 95 % odnosno na 105 % nazivnog napona.

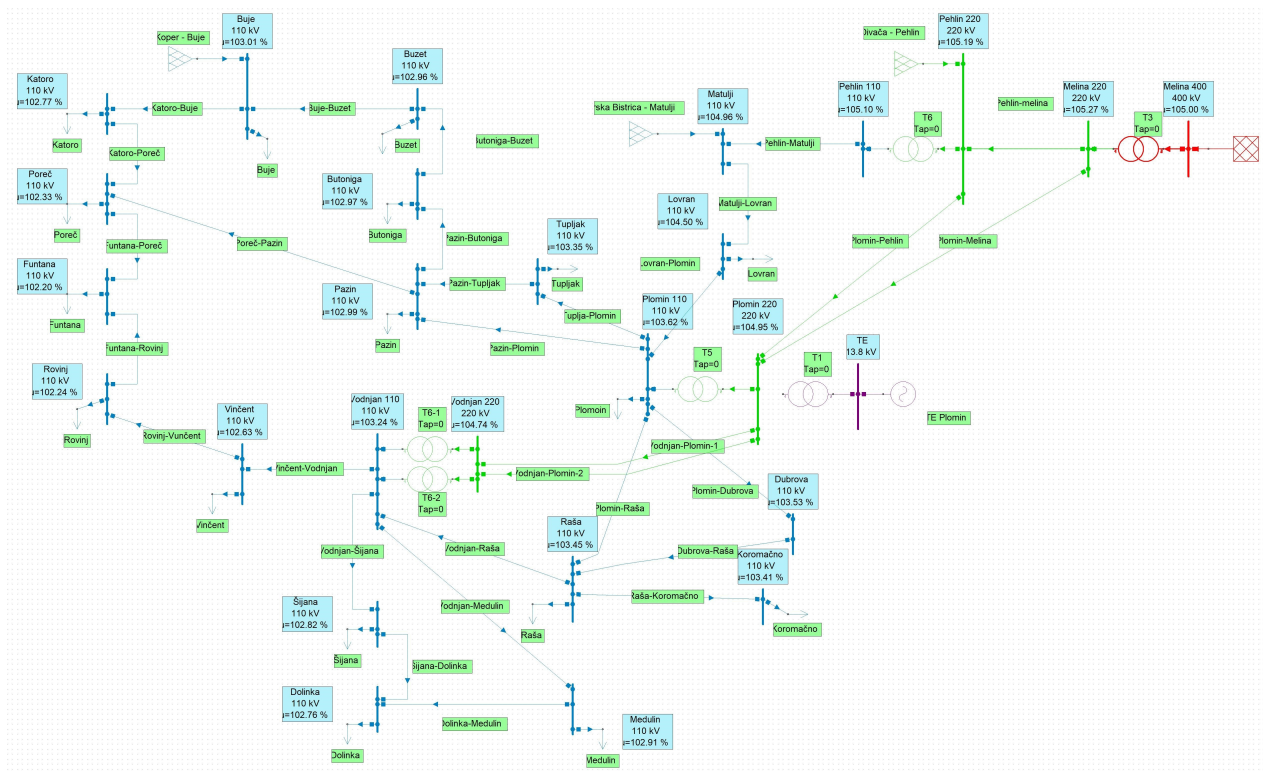


Slika 5.26. Naponi na sabirnicama za predviđeno maksimalno (ljetno) opterećenje u 2031. bez TE Plomin i 95 % nazivnog napona u čvoru Melina





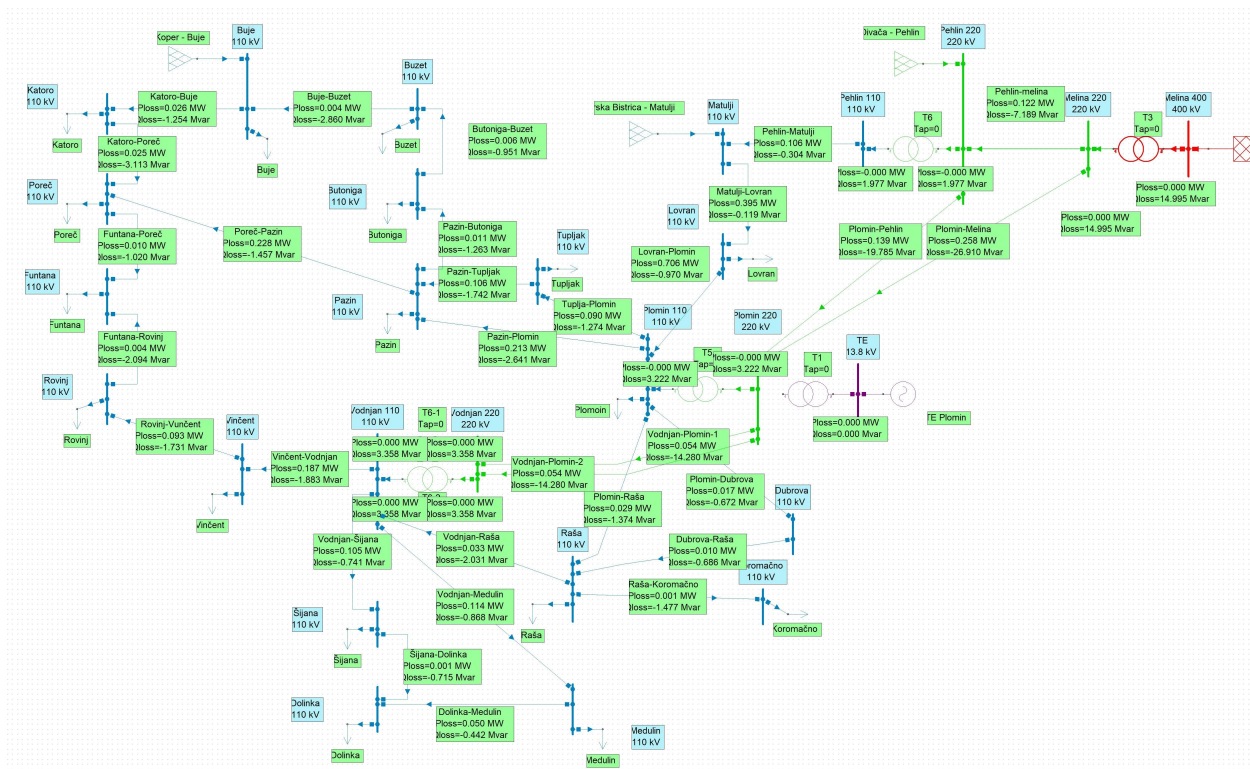
Slika 5.27. Gubitci na vodovima za predviđeno maksimalno (ljetno) opterećenje u 2031. bez TE Plomin i 95 % nazivnog napona u čvoru Melina



Slika 5.28. Naponi na sabirnicama za predviđeno maksimalno (ljetno) opterećenje u 2031. bez TE Plomin i 105 % nazivnog napona u čvoru Melina

Naponske razine bitno se popravljaju povećanjem napona bilančnog čvora Melina. Na svim je čvorovima ponovno prisutan napon koji je veći od nazivnog, a vrijednosti se kreću između 102% i 105% nazivnog napona.





Slika 5.29. Gubitci na vodovima za predviđeno maksimalno (ljetno) opterećenje u 2031. bez TE Plomin i 105 % nazivnog napona u čvoru Melina

Ukupni gubitci uz isključenu TE Plomin te pri nazivnom naponu bilančnog čvora Melina od 105% ostvaruju se djelatni gubitci od 3,197 MW. Gubitci su očekivano veći zbog već spomenute preraspodjele tokova snaga na vodove manjeg nazivnog napona.

## 6. Zaključak

Gubici predstavljaju sasatvni dio u prijenosu i distribuciji električne energije. Oni nastaju kao posljedica fizikalnih svojstva vodiča od kojih su građeni elementi elektroenergetskog sustava i kao takve ih je nemoguće u potpunosti ukloniti već samo pokušati smanjiti i dovesti na prihvatljivu razinu.

Djelatni gubici nastaju kao posljedica prolaska struje kroz radni otpor. Pritom dolazi do pretvorbe električne energije u Joulove gubitke koji izazivaju termičko naprezanje vodova i namota transformatora. U elektroenergetskoj mreži djelatni gubici uzrokuju padove napona duž voda, a manifestiraju se i smanjenjem radne snage koja se prenosi vodom. Zbog spomenutih padova napona čvorišta EES mogu se naći na neželjeno niskom naponu koji predstavlja prijetnju stabilnosti cijelog sustava.

Analiza područnog elektroenergetskog sustava potvrdila je već pretpostavljene činjenice. Povećanje potrošnje u čvorištima EES dovelo je do povećanja snage koju vodovi moraju prenositi, analogno se povećala struja u njima što je dovelo do većih radnih gubitaka na vodovima i koju uzrokuju veće padove napona. Najveći padovi napona osjete se na čvorovima koji su najudaljeniji od izvora.

Mjere za smanjenje djelatnih gubitaka koje se poduzimaju na promatranom područnom EES pokazuju dobre rezultate. Ugradnjom trafostanice u okolinu čvorova najvećeg opterećenja te povezivanjem spomenute trafostanice sa vodovima većeg nazivnog napona dolazi do vidnog povećanja napona čak i u najudaljenijim čvorištima. Povećanje prijenosne moći u obliku dvostrukog voda nazivnog napona 220 kV dovelo je do smanjenja gubitaka na vodovima u okolini nove trafostanice jer se veći dio snage prenosi spomenutim dvostrukim vodom koji zbog veće naponske razine i sam ostvaruje manje gubitke nego li je to bio slučaj u prethodnim scenarijima.

Nedostatak izvora u blizini čvorišta ima jak utjecaj na ponašanje mreže i djelatne gubitke u njoj. Zbog preraspodjele tokova snaga vodovi u blizini preostalih izvora doživjeli su povećanje gubitaka, dok su vodovi u blizini isključenog izvora doživjeli smanjenje gubitaka. Naponske prilike u čvorištima lošije su nego prije i u budućnosti će trebati pronaći novi način kako osigurati stabilan napon i za najveća opterećenja.

Utjecaj varijance naponskih profila ima jaki odraz na iznos djelatnih gubitaka u područnom elektroenergetskom sustavu. Povećanje naponskih profila dovodi do smanjenja struja u prijenosnoj mreži te su djelatni gubici na vodovima manji. Ovakva metoda smanjivanja gubitka ima i pozitivan utjecaj na vođenje kompletnog sustava jer se u čvorištima mogu postići i naponi veći od nazivnog napona što ostavlja dovoljno prostora za padove napona koji će se još javiti u distribucijskoj mreži.

## Literatura

- [1] Ožegović M., Ožegović K.: Električne energetske mreže, FESB, Split, 1997
- [2] Višković A., Franki V.: Osnove elektroenergetike i održivog razvoja, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 2023.
- [3] International Energy Agency (IEA), [www.iea.org](http://www.iea.org)
- [4] Hrvatski operator prijenosnog sustava, <https://www.hops.hr/>
- [5] Jeftimir, S.: Utjecaj distribuirane proizvodnje OI na sučelju distribucije i prijenosne mreže, Diplomski rad
- [6] Mršo, N.: Analiza utjecaja povećane penetracije distribuirane proizvodnje s aspekta prijenosne i distribucijske mreže, Završni rad
- [7] Energetski institut Hrvoje Požar: Izgradnja trafostanice i rasklopnog postrojenja 220/110 kV Guran (Vodnjan), rekonstrukcija i rasplet priključnih dalekovoda
- [8] Istrapedia, s interneta: [www.istrapedia.hr/en/](http://www.istrapedia.hr/en/)

## Sažetak i ključne riječi

Elektroenergetski sustav je složeni sustav koji obuhvaća proizvodnju, prijenos i potrošnju električne energije. Proizvodnju električne energije vrše elektrane koje su podijeljene prema vrsti energenta koji se koristi za dobivanje električne energije. Prijenos električne energije vrši se putem energetske vodova ili kabela. Važnu ulogu u prijenosu imaju i energetske transformatori koji služe za povećanje naponske razine u prijenosu kako bi se smanjili gubici. Svi elementi elektroenergetskog sustava mogu se nadomjestiti prikladnim matematičkim modelima koji su neophodni kako bi se izvršio proračun mreže koji podrazumijeva određivanje naponskih prilika u čvorovima i tokova snaga kroz mrežu. U prijenosu također dolazi do gubitaka koji mogu biti djelatni i jalovi. Djelatni gubici posljedica su radnog otpora u elementima prijenosa, a u čvorovima se manifestiraju padovima napona u odnosu na nazivnu naponsku razinu. Djelatni gubici proporcionalni su opterećenju čvorova, a obrnuto proporcionalni visini napona u nekom dijelu mreže. Gubitke ne možemo u potpunosti ukloniti, ali ih možemo smanjiti na prihvatljivu razinu ravnomjernim rasporedom tokova snaga kroz mrežu.

**Ključne riječi:** elektroenergetski sustav, prijenos, gubici

## Summary and key words

Electric power system is a complex system which contains production, transmission and consumption of electric energy. Production of electricity is done by power stations which are divided by the type of energy source that is used for conversion into electric energy. Transmission is done via electric lines or cables. Transformers play an important role in transmission due to their ability to reduce losses in transmission by transforming voltage levels. All the elements inside electric power system can be presented with corresponding mathematical models that are necessary for circuit analysis which means determination of voltage levels and load flows. Transmission also produces losses that can be active or reactive. Active losses are result of active resistance inside transmission elements and they are represented by the voltage drop in network knots. Active losses are proportional to hub loads and inversely proportional to voltage level in the certain network area. Losses are impossible to remove completely, but we can reduce them on acceptable values by equal distribution of load flows.

**Keywords:** electric power system, transmission, losses

## A – Parametri simulacije za područni elektroenergetski sustav

Tablica A 1 - Parametri vodova na 110 kV

Naziv voda	Duljina [km]	$U_n$ [kV]	$R_l$ [ $\Omega$ /km]	$X_l$ [ $\Omega$ /km]	$R_0$ [ $\Omega$ /km]	$X_0$ [ $\Omega$ /km]	$B_l$ [ $\mu$ S/km]	$B_0$ [ $\mu$ S/km]	$I_{term}$ [A]
Pehlin-Matulji	7.3	110	0.08	0.41	0.3	1.08	2.9	1.84	815
Matulji-Lovran	8.7	110	0.2	0.43	0.44	1.49	2.68	1.67	470
Lovran-Plomin	23.5	110	0.19	0.42	0.43	1.1	2.7	1.81	470
Plomin-Dubrova	6.8	110	0.19	0.43	0.45	1.49	2.68	1.8	645
Plomin-Raša	13.81	110	0.19	0.43	0.45	1.49	2.68	1.8	470
Raša-Koromačno	13.2	110	0.12	0.4	0.36	1.49	2.89	1.64	645
Raša-Dolinka	35.26	110	0.24	0.35	0.4	1.25	2.68	1.8	470
Dubrova-Raša	6.67	110	0.12	0.41	0.35	1.1	2.78	1.8	645
Šijana-Dolinka	6.7	110	0.12	0.41	0.35	1.09	2.8	1.82	645
Šijana-Plomin	42.93	110	0.12	0.41	0.35	1.1	2.8	1.8	645
VPS Čvor-Šijana	10.2	110	0.12	0.41	0.35	1.22	2.8	1.82	645
VPS Čvor-Plomin	32.77	110	0.06	0.41	0.25	1.06	2.8	1.88	645
Vincent-VPS Čvor	23.43	110	0.12	0.41	0.35	1.1	2.8	1.82	645
Vincent-Rovinj	19.29	110	0.12	0.42	0.35	1.07	2.8	1.82	645
Funtana-Rovinj	20	110	0.12	0.41	0.35	1.07	2.78	1.72	645
Funtana-Poreč	10	110	0.12	0.41	0.35	1.07	2.78	1.72	645
Poreč-Pazin	20.07	110	0.12	0.4	0.33	1.36	2.89	1.66	645
Kataro-Poreč	29.9	110	0.12	0.4	0.36	1.34	2.8	1.8	645
Kataro-Buje	12.48	110	0.12	0.41	0.35	1.22	2.8	1.8	645
Buje-Buzet	26.66	110	0.12	0.4	0.35	1.22	2.8	1.8	645
Butoniga-Buzet	9	110	0.12	0.4	0.35	1.22	2.8	1.8	645
Butoniga-Pazin	12.06	110	0.12	0.4	0.35	1.22	2.8	1.8	645
Pazin-Plomin	29.94	110	0.12	0.4	0.36	1.49	2.89	1.64	645
Tupljak-Pazin	18.75	110	0.12	0.4	0.36	1.49	2.89	1.64	645
Tupljak-Plomin	14	110	0.12	0.4	0.36	1.49	2.89	1.64	645

Tablica A 2 – Parametri vodova na 220 kV

Naziv voda	Duljina [km]	$U_n$ [kV]	$R_l$ [ $\Omega$ /km]	$X_l$ [ $\Omega$ /km]	$R_0$ [ $\Omega$ /km]	$X_0$ [ $\Omega$ /km]	$B_l$ [ $\mu$ S/km]	$B_0$ [ $\mu$ S/km]	$I_{term}$ [A]
Pehlin-Melina	17.9	220	0.06	0.4	0.2	0.94	2.78	2.04	960
Plomin-Pehlin	46.2	220	0.06	0.41	0.25	1.06	2.8	1.88	960
Plomin-Melina	64.2	220	0.06	0.4	0.2	0.94	2.78	2.04	960

Tablica A 3 – Parametri aktivnih mreža

Naziv aktivne mreže	$S_{k min}$ [MVA]	$S_{k max}$ [MVA]
Pehlin-Divača 220kv	5000	10000
Melina-Drugo Prp 400kv	10000	15000
Buje-Kopar 110kv	500	800
Matulji-Ilirska bistrica 110kv	800	1000

Tablica A 4 – Parametri energetskih transformatora

Transformatori	$U_{n1}/U_{n2}$	$S_n$ (MVA)	$U_k$ (%)	Grupa spoja	Uzemljenje
Blok Transformator G2 TE Plomin	220/13.8	245	12.6	YNd5	Kruto
Melina 400/220	400/231	400	11.6	YNyn0	Kruto
Melina 220/110	220/110	150	11.6	YNyn0	Kruto
TE Plomin 220/110	220/110	150	12	YNyn0	Kruto
TS Pehlin 220/110	220/110	150	12	Ynyn0	Kruto