

# Tehno-ekonomska analiza mjera za smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži

---

Jukić, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2021

*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:200:397205>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-26**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA MJERA ZA  
SMANJENJE GUBITAKA U DISTRIBUTIVNOJ  
MREŽI**

**Diplomski rad**

**Josip Jukić**

**Osijek, 2021.**

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

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Osijek, 09.09.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

Ime i prezime studenta:	Josip Jukić
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-1232, 06.10.2019.
OIB studenta:	99687306927
Mentor:	Izv. prof. dr. sc. Danijel Topić
Sumentor:	Zvonimir Šimić
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
Član Povjerenstva 1:	Izv. prof. dr. sc. Danijel Topić
Član Povjerenstva 2:	Nemanja Mišljenović
Naslov diplomskog rada:	Tehno-ekonomska analiza mjera za smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži
Znanstvena grana rada:	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
Zadatak diplomskog rada:	Napraviti model distributivne mreže u nekom od programa za simulacije u elektroenergetskom sustavu i primijeniti sljedeće mjere za smanjenje gubitaka: Kompenzacija jalove snage, distribuirana proizvodnja, povećanje presjeka vodova i prelazak na višu naponsku razinu. Analizirati gubitke za slučajeve minimalnog i maksimalnog opterećenja u mreži. Napraviti ocjenu isplativosti svake pojedine mjere određivanjem perioda povrata investicije. Sumentor: Zvonimir Šimić, mag. ing. el.
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	09.09.2021.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

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

Osijek, 13.09.2021.

Ime i prezime studenta:

*Josip Jukić*

Studij:

*Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika*

Mat. br. studenta, godina upisa:

D-1232, 06.10.2019.

Turnitin podudaranje [%]:

15

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Tehno-ekonomska analiza mjera za smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži**

*izrađen pod vodstvom mentora Izv. prof. dr. sc. Danijel Topić*

i sumentora *Zvonimir Šimić*

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 diplomskog rada.....	1
2. PREGLED PODRUČJA TEME – SMANJENJE GUBITAKA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI .....	2
3. DISTRIBUTIVNA MREŽA.....	4
3.1. Struktura distributivnih mreža.....	4
3.1.1. Struktura 10(20) kV distributivne mreže .....	4
3.1.2. Struktura 35(30) kV distributivne mreže .....	7
3.1.3. Struktura niskonaponskih distributivnih mreža.....	9
3.2. Distributivni transformatori i transformatorske stanice.....	9
3.3. Nadzemni vodovi i kabeli .....	13
3.3.1. Nadzemni vodovi.....	13
3.3.2. Kabelski vodovi.....	16
3.4. Distribuirana proizvodnja .....	18
3.5. Potrošači.....	19
4. METODE ZA SMANJENJE GUBITAKA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI .....	22
4.1. Utjecaj distribuirane proizvodnje na smanjenje gubitaka.....	22
4.2. Utjecaj kompenzacije jalove snage na smanjenje gubitaka .....	23
4.3. Utjecaj povećanja presjeka vodova na smanjenje gubitaka.....	26
4.4. Utjecaj prelaska na višu naponsku razinu na smanjenje gubitaka .....	26
4.5. Utjecaj upravljanja potrošnjom na smanjenje gubitaka.....	27
5. PRIMJERI MJERA ZA SMANJENJE GUBITAKA ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	28
5.1. Priključenje distribuirane proizvodnje.....	31
5.2. Kompenzacija jalove snage.....	34
5.3. Povećanje presjeka vodova .....	36
5.4. Prelazak na višu naponsku razinu .....	36

6. EKONOMSKA ANALIZA MJERA.....	38
7. ZAKLJUČAK .....	44
LITERATURA .....	45
SAŽETAK.....	48
ABSTRACT .....	49

# 1. UVOD

Distribucija električne energije, uz proizvodnju, prijenos i potrošnju, predstavlja dio elektroenergetskog sustava (EES). Distributivna mreža ima zadatak opskrbiti krajnje potrošače električnom energijom koju preuzima iz prijenosne mreže, dok dio električne energije dobiva iz manjih elektrana spojenih na distributivnu mrežu. Obično se distributivna mreža dijeli na srednjenaponsku i niskonaponsku mrežu. U Republici Hrvatskoj srednjenaponska distributivna mreža obuhvaća naponske razine 35 kV, 20 kV i 10 kV dok se pod niskonaponskom distributivnom mrežom podrazumijeva naponska razina 0,4 kV. Operator distributivnog sustava (ODS) odgovoran je za vođenje i održavanje distributivne mreže, a jedan od glavnih ciljeva ODS-a jest smanjenje gubitaka električne energije. Smanjenjem gubitaka električne energije dolazi do značajnih ušteda novca i električne energije. Stoga će se ovaj rad baviti mjerama za smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži te njihovom isplativošću. Ovaj diplomski rad sastoji se od sedam poglavlja. Drugo poglavlje sadrži pregled područja teme gdje će biti opisani stručni radovi koji se tiču ove teme. U trećem poglavlju opisana je distributivna mreža, njezine glavne značajke, njezina struktura i glavni dijelovi. U četvrtom poglavlju opisuju se gubici električne energije te mjere za smanjenje istih kao što su distribuirana proizvodnja, kompenzacija jalove snage, povećanje presjeka vodova, prelazak na višu naponsku razinu i upravljanje potrošnjom. U petom poglavlju izvršena je simulacija u programskom paketu DIgSILENT PowerFactory s već navedenim mjerama za smanjenje gubitaka. Šesto poglavlje se bavi ekonomskom isplativošću pojedinih metoda određivanjem perioda povrata investicije. U sedmom poglavlju nalazi se zaključak.

## 1.1. Zadatak diplomskog rada

Napraviti model distributivne mreže u programskom paketu DIgSILENT PowerFactory i primijeniti sljedeće mjere za smanjenje gubitaka: kompenzacija jalove snage, distribuirana proizvodnja, povećanje presjeka vodova i prelazak na višu naponsku razinu. Analizirati gubitke za slučajeve minimalnog i maksimalnog opterećenja u mreži. Napraviti ocjenu isplativosti svake pojedine mjere određivanjem perioda povrata investicije.

## 2. PREGLED PODRUČJA TEME – SMANJENJE GUBITAKA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI

Smanjenje gubitaka jedan je od glavnih ciljeva operatora distributivne mreže jer se time postižu značajne novčane uštede. Postoje razne mjere za smanjenje gubitaka. Jedna od mjera je i dodavanje distribuirane proizvodnje čiji je utjecaj analiziran u radu [1]. U radu je promatran utjecaj distribuirane proizvodnje na smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži. Simulacija je provedena u programskom paketu DIgSILENT PowerFactory, a zadana je stvarna mreža dijela Baranje koja će biti korištena i u ovom radu. Simulacija se vršila dodavanjem distribuirane proizvodnje na različita mjesta. U prvom slučaju priključen je sinkroni generator čija se snaga povećava u nekoliko koraka. Drugi slučaj izveden je postavljanjem sinkronog generatora na drugoj lokaciji te se snaga opet povećava u nekoliko koraka. U trećem slučaju spojena su dva generatora različitih snaga na različitim lokacijama u mreži, a u četvrtom slučaju tri generatora s istom snagom i istim faktorom snage. Usporedbom rezultata došlo se do zaključka da četvrti slučaj donosi najveće smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži. Također se zaključilo da je pri dimenzioniranju distribuiranog izvora najbolje podesiti da izvor daje onoliko snagu kolika je lokalna potrošnja i tada će gubici biti najmanji [1].

U radu [2] opisane su strategije za smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži na naponskoj razini 35 kV. Predstavljene su mjere za smanjenje tehničkih gubitaka kao što su: uravnoteženje opterećenja, povećanje poprečnog presjeka vodova, poboljšanje faktora snage, povećanje naponske razine, optimizacija napona, metoda optimalnog uklopnog stanja i metoda zamjene transformatora. Simulacija je provedena u programu za analizu elektroenergetskih mreža u kojem je napravljena analiza gubitaka 35 kV distributivne mreže DP Elektroslavonije. Ukupno je provedeno devet slučajeva simulacije od čega se šest slučajeva odnosilo na metodu optimalnog uklopnog stanja, a tri slučaja na metodu zamjene transformatora. Od šest slučajeva sa metodom optimalnog uklopnog stanja, samo dva su dovela do smanjenja gubitaka, a od tri slučaja sa zamjenom transformatora, smanjenje gubitaka postignuto je samo u jednom slučaju [2].

Rad [3] također se bavi analizom mjera za smanjenje tehničkih i netehničkih gubitaka u distributivnoj mreži. Zaključeno je da se smanjenje gubitaka 35 kV mreže najbolje može ostvariti optimiranjem tokova snaga što se provodi posredno pomoću 10 kV mreže, a gubitke transformacije 35/10 kV optimiranjem paralelnog rada transformatora. Gubitke 10 kV mreže potrebno je smanjiti optimiranjem topologije 10 kV mreže te ciljanim zahvatima na dionicama



s najvećim gubicima, a gubitke transformacije 10/0,4 kV optimiranjem nazivnih snaga transformatora. Gubitke niskonaponske mreže moguće je smanjiti simetriranjem opterećenja, kompenzacijom jalovih snaga te ciljanim zahvatima na objektima. Primjenom ovih metoda tehnički gubici su se smanjili za 690 MWh godišnje odnosno smanjeni su 12%. Također u radu je analizirano smanjenje netehničkih gubitaka u distributivnoj mreži koje se postiže: kontrolom tehničke ispravnosti obračunskih mjernih mjesta, ciljanim kontrolama temeljenim na analizi potrošnje kupaca te korištenje suvremenih mjernih i ispitnih uređaja [3].

Rad [4] bavi se strukturom gubitaka energije u srednjenaponskoj distributivnoj mreži. Proračun gubitaka električne energije napravljen je za srednjenaponsku mrežu pogona Trogir. Srednjenaponska mreža se napaja iz TS 110/35 kV te uključuje sve 35 kV vodove, četiri TS 35/10 kV, sve 10 kV vodove i sve TS 10/0,4 kV. Programski paket PowerCAD 4.1. korišten je za proračun gubitaka mreže pri vršnom opterećenju. Dobivena struktura gubitaka snage pri vršnom opterećenju pokazuje da najveći udio gubitaka nastaje u 10 kV vodovima i to čak 41%, a najmanji udio nastaje u 35 kV vodovima (13%). S druge strane, struktura godišnjih gubitaka energije pokazuje da najveći udio gubitaka nastaje u TS 10/0,4 kV i iznosi 32%, a najmanji udio nastaje u 35 kV vodovima (10%) [4].

Jedna od metoda smanjenja gubitaka je i kompenzacija jalove snage koju analizira rad [5]. Jalova snaga je bitna i potrebna u sustavu, no njezin prijenos uzrokuje povećanje pada napona, zahtijeva veću nazivnu snagu transformatora, veći presjek vodova i sl. Zbog toga, kako bi se smanjio prijenos jalove snage, radi se kompenzacija jalove snage. Smanjenjem prijenosa jalove snage dolazi i do smanjenja gubitaka u mreži. Kompenzacija može biti pojedinačna, grupna i centralna. U radu su opisani uređaji koji se mogu koristiti za kompenzaciju jalove snage, a to su: kondenzatorske baterije, prigušnice, elektronički kompenzatori, sinkroni motori/kompenzatori. Za simulaciju je korišten programski paket EasyPower 10.3. Simulacija je vršena na način da se dodavala kondenzatorska baterija određene kapacitivne jalove snage na sabirnice zadanih trošila. Kao rezultat kompenzacije jalove snage došlo je do povećanja napona na sabirnicama i do smanjenja gubitaka mreže [5].

### 3. DISTRIBUTIVNA MREŽA

Kao što je već rečeno u uvodu, distributivna mreža preuzima električnu energiju iz prijenosne mreže i onda ju distribuira do krajnjih potrošača. U zadnje vrijeme sve je češća integracija distribuirane proizvodnje, odnosno dodavanje više manjih izvora širom distributivne mreže što iziskuje mijenjanje njene konfiguracije. Glavne sastavnice distributivne mreže su:

- distributivni transformatori
- vodovi i kabeli
- krajnji potrošači

Glavne značajke distributivnih mreža su:

- niže naponske razine u usporedbi s prijenosnom mrežom
- prijenos snage na manje udaljenosti
- uglavnom imaju zrakastu (radijalnu) strukturu čime je smanjena pogonska sigurnost
- srednjenaponske gradske distributivne mreže su većinom zamkaste
- niskonaponske mreže (u RH) i seoske srednjenaponske mreže nemaju dvostrano napajanje [6]

#### 3.1. Struktura distributivnih mreža

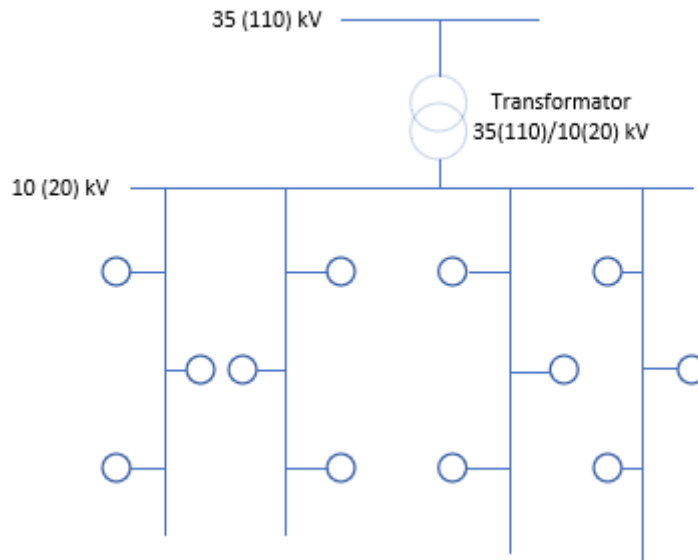
SN distributivna mreža može biti izvedena tako da se distribucija električne energije vrši preko dva naponska nivoa (prvo 35 kV pa zatim i 10 kV mreža) ili preko jednog naponskog nivoa (direktna transformacija 110/20 kV ili 110/10 kV- eliminira se 35 kV mreža) [6]

##### 3.1.1. Struktura 10(20) kV distributivne mreže

10 kV odnosno 20 kV mreže mogu biti:

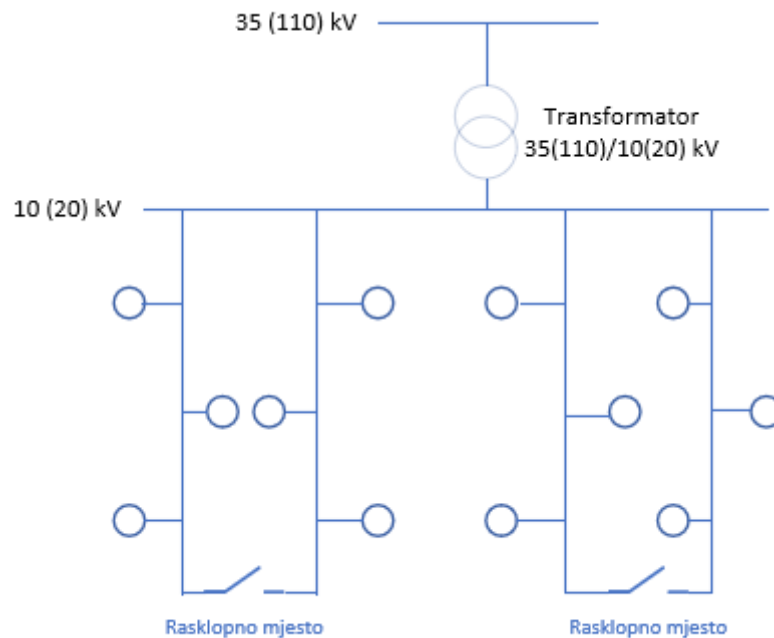
**A) Jednostrano napajane mreže:** svi vodovi napajaju se samo iz jedne transformatorske stanice x/10(20) kV. Tipovi jednostrano napajanih mreža su:

**A1) Zrakasta, odnosno, radijalna mreža:** vodovi koji izlaze iz transformatorske stanice nisu međusobno povezani što znači da ako dođe do prekida napajanja jednog voda drugi vod neće moći poslužiti kao rezerva te će svi potrošači napajani s tog voda ostati bez napajanja [6].



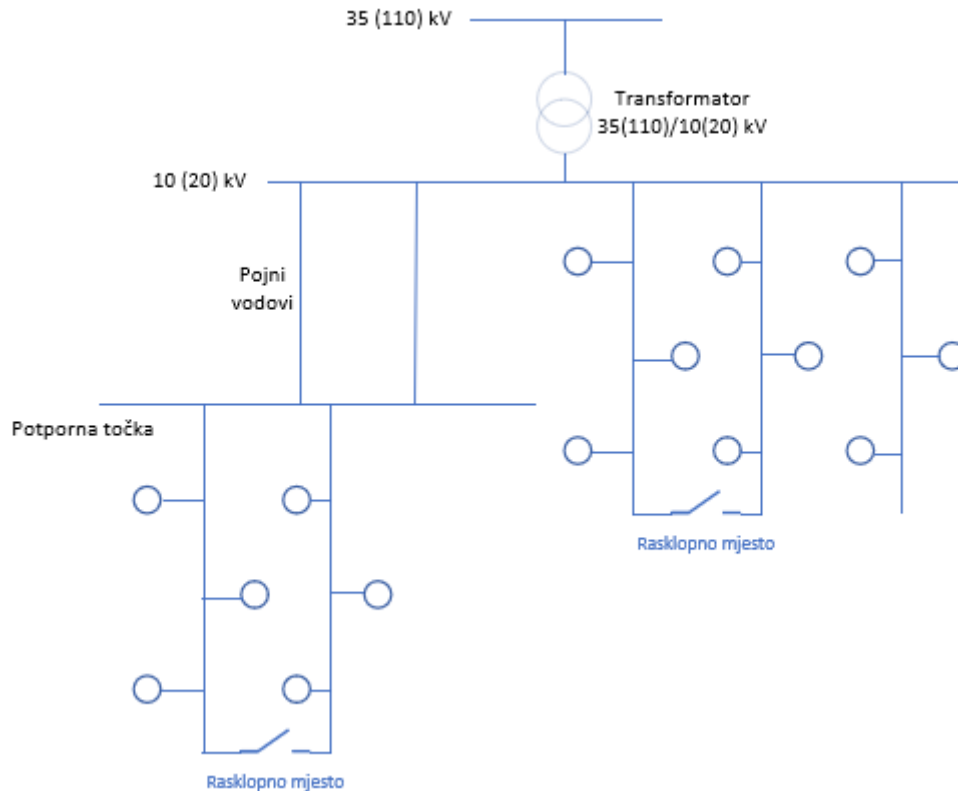
**Slika 3.1.** Zrakasta 10(20) kV mreža

**A2) Prstenasta mreža:** radijalni vodovi izlaze iz transformatorske stanice i spajaju se na rasklopnom mjestu te tako osiguravaju rezervu jedan drugom. Rasklopno mjesto je pri normalnom pogonu otvoreno, a zatvara se tek u slučaju kvara na jednom izvodu tako da se dio potrošača s tog izvoda može napajati s drugog izvoda [6].



**Slika 3.2.** Prstenasta 10(20) kV mreža

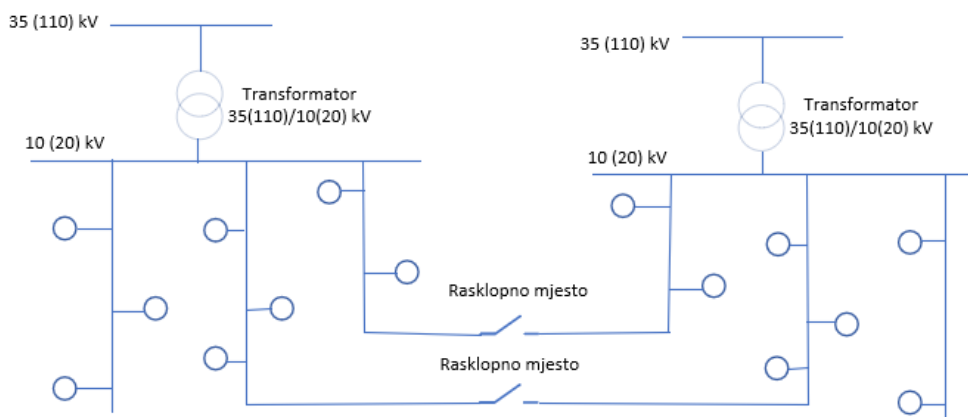
**A3) Mreže s potpornom točkom:** imaju potpornu točku uglavnom spojenu dvostrukim vodom za pojnu transformatorsku stanicu. Iz potporne točke izlaze vodovi koji mogu biti radijalni ili prstenasti [6].



**Slika 3.3.** Mreža 10(20) kV s potpornom točkom

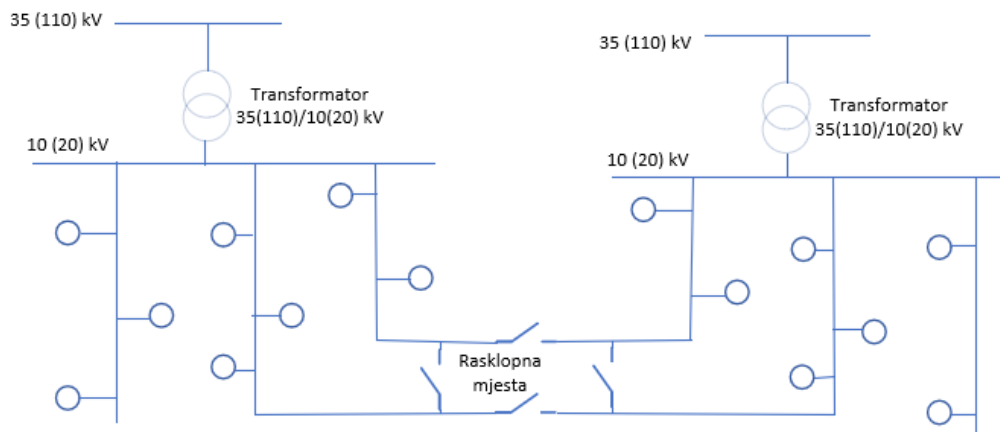
**B) Dvostrano napajane mreže:** vodovi se mogu napajati iz dvije različite transformatorske stanice. Tipovi dvostrano napajanih mreža su:

**B1) Linijske mreže:** nastaju spajanjem radijalnih vodova koji izlaze iz dviju pojmih transformatorskih stanica. Pri normalnom pogonu rasklopno mjesto je otvoreno, a u slučaju kvara vodovi se mogu napajati iz druge transformatorske stanice [6].



**Slika 3.4.** Linijska 10(20) kV mreža

**B2) Kombinirane prstenaste i linijske mreže:** nastaju dodavanjem voda u linijskim mrežama tvoreći tako prsten te je time osigurana dvostruka rezerva.

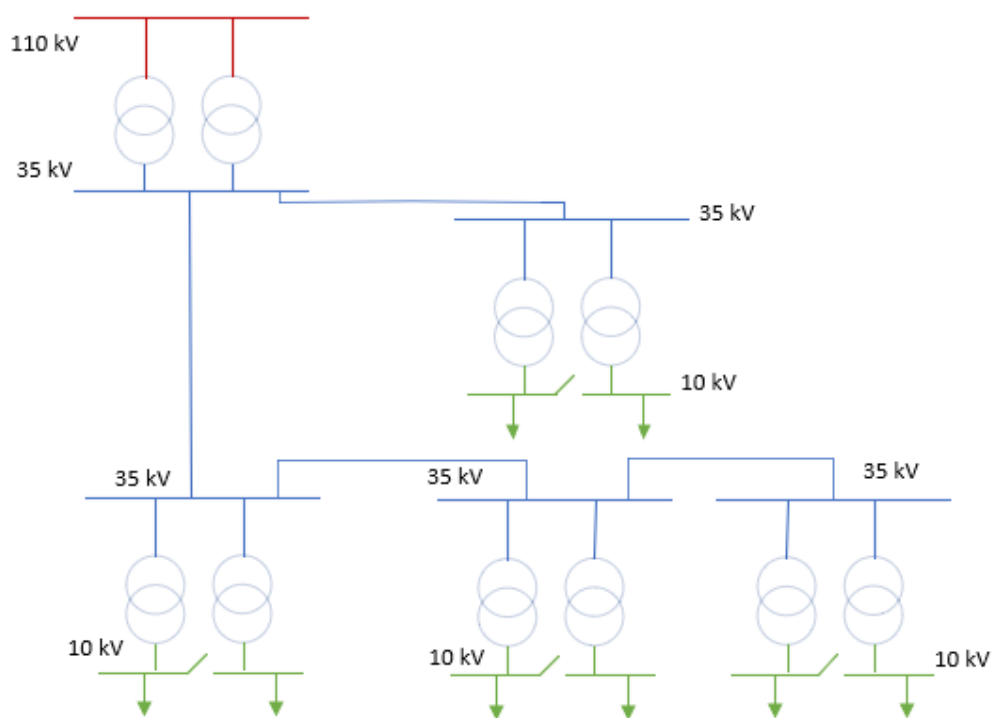


**Slika 3.5.** Kombinirana linijska i prstenasta 10(20) kV mreža

### 3.1.2. Struktura 35(30) kV distributivne mreže

Neka općenita klasifikacija ne postoji, ali tipični primjeri strukture 35(30) kV mreže su:

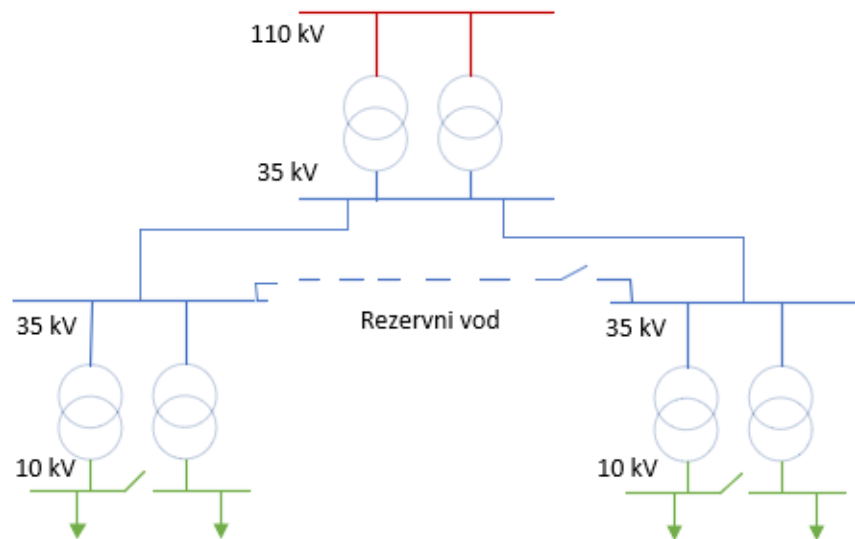
**A) Zrakasta (radijalna):** mreža radijalno napajana iz jedne transformatorske stanice 110/35 kV te nema rezerve u slučaju kvara [6].



**Slika 3.6.** Zrakasta (radijalna) 35 kV mreža

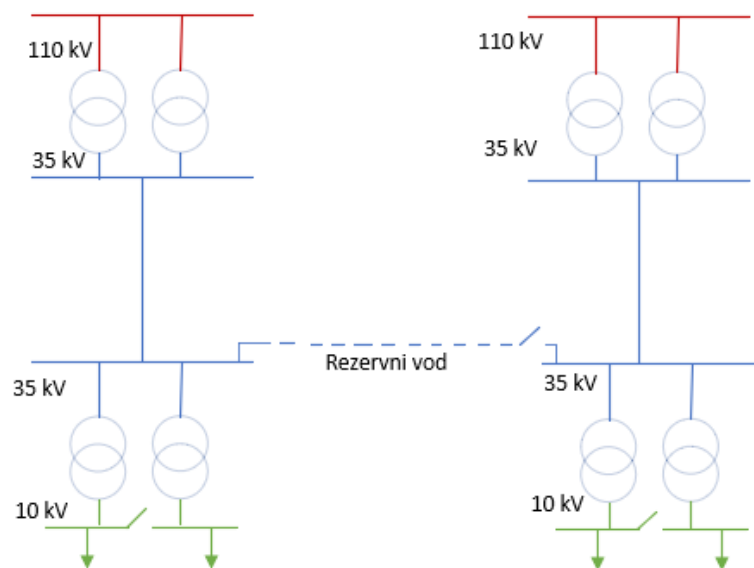
**B) Prstenasta:** omogućeno dvostrano napajanje svake transformatorske stanice 35/10 kV. Prilikom kvara na vodu od transformatorske stanice 110/35 kV do transformatorske stanice 35/10 kV napajanje se prebacuje pomoću rezervnog voda koji povezuje dvije

transformatorske stanice 35/10 kV. Pri normalnom pogonu rezervni vod je isključen. Vodovi moraju biti dimenzionirani tako da mogu preuzeti opterećenje obje transformatorske stanice 35/10 kV [6].



**Slika 3.7.** Prstenasta 35 kV mreža

C) **Linjska:** transformatorska stanica 35/10 kV ima mogućnost napajanja iz dvije različite transformatorske stanice 110/35 kV zbog dodanog rezervnog voda koji povezuje dvije transformatorske stanice 35/10 kV. Rezervni vod služi kao rezerva u slučaju ispada transformatorske stanice 110/35 kV ili u slučaju ispada jednog 35 kV voda. Kao i u prethodnom slučaju, vodovi moraju biti dimenzionirani tako da mogu preuzeti opterećenje obje transformatorske stanice 35/10 kV [6].



**Slika 3.8.** *Linjska 35 kV mreža*

### 3.1.3. Struktura niskonaponskih distributivnih mreža

Niskonaponske mreže su uglavnom izvedene kao zrakaste, a u nekim slučajevima i kao mreže sa potpornom točkom. Prstenaste i linijske mreže moguće su u gradovima, ali su najčešće u radijalnom pogonu. Dakle, njihova je struktura slična strukturi 10 kV mreža, a mreže mogu biti i uzamčane sa jednim ili više izvora [6].

## 3.2. Distributivni transformatori i transformatorske stanice

**Transformatori** su uređaji koji rade na principu elektromagnetske indukcije pretvarajući izmjenični napon jedne vrijednosti u izmjenični napon druge vrijednosti iste frekvencije. Transformatori imaju mnoge uloge u elektroenergetskom sustavu, a najznačajnija im je transformiranje napona kod prijenosa i distribucije električne energije te se takvi transformatori nazivaju energetske transformatori. Osim energetskih transformatora, u EES-u još se koriste generatorski ili blok transformatori koji se spajaju u elektranama između generatora i visokonaponske mreže te mjerni transformatori (naponski i strujni) za spajanje mjernih i zaštitnih uređaja [7]. Distributivni transformatori koriste se za napone 35 kV i niže. Glavni dijelovi energetskog transformatora su željezna jezgra, namoti te ostali dijelovi i pribor. Željezna jezgra služi da nosi namote i da se kroz nju zatvara magnetski tok te se stoga izrađuje od materijala s dobrom magnetskom vodljivošću. Namoti se izrađuju od elektrolitskog bakra ili ponekad od aluminija, a predstavljaju skup zavoja u kojima se inducira napon. Razlikuju se namot višeg napona (najčešće primar) i namot nižeg napona (najčešće sekundar) (kod

tronamotnih transformatora postoji još i namot srednjeg napona). To koji je namot primarni ili sekundarni određuje smjer toka energije. Oba namota obično se postavljaju oko istog stupa i to na način da do stupa prvo dolazi namot nižeg napona (niskonaponski), a na njega se postavlja namot višeg napona (visokonaponski) [7].



**Slika 3.9.** Prikaz namotanih namota oko stupova jezgre

Učinkovitost transformatora može se izračunati pomoću izraza:

$$Učinkovitost [\%] = \frac{Izlazna\ snaga [W]}{Ulazna\ snaga [W]} \times 100\% \quad (3 - 1)$$

Ulazna snaga jednaka je zbroju izlazne snage i ukupnih gubitaka. Ukupni gubici sastoje se od gubitaka u bakru i željezu, a pokazalo se da transformator ima najveću učinkovitost pri opterećenju kod kojeg su gubici u bakru i gubici u željezu jednaki. To opterećenje može se izračunati preko izraza:

$$Opterećenje [\%] = \sqrt{\frac{Gubici\ u\ željezu}{Gubici\ u\ bakru}} \times 100\% \quad (3 - 2)$$



Gubici u željezu odnosno gubici u jezgri transformatora dijele se još na gubitke zbog petlje histereze i na gubitke zbog vrtložnih struja. Gubici zbog petlje histereze nastaju jer se magnetiziranje jezgre transformatora izmjeničnom strujom vrši po zatvorenoj petlji, a gubici su određeni površinom koju zatvara ta petlja. Gubici zbog vrtložnih struja nastaju jer svaki električki vodljivi materijal koji se nalazi u promjenjivom magnetskom polju inducira struje koje će stvarati omske gubitke u tom materijalu [8]. Kako bi se smanjili gubici zbog vrtložnih struja jezgra transformatora se izgrađuje od tankih limova (tzv. transformatorskih limova) međusobno izoliranih izolacijskim premazom. Također, kako bi se smanjili gubici histereze i gubici vrtložnih struja koriste se posebne vrste čelika legiranog sa silicijem.



**Slika 3.10.** Jezgra transformatora izgrađena od transformatorskih limova

Gubici u željezu odnosno u jezgri transformatora ne ovise o iznosu opterećenja te su praktički uvijek konstantni dok gubici u bakru ovise o otporima primarnog i sekundarnog namota kao i o iznosima struja te stoga oni ovise o opterećenju. Transformatori se prema načinu hlađenja mogu podijeliti na uljne i suhe transformatore. Suhi transformatori izgrađuju se do 10 MVA snage i do napona 50 kV. Glavna prednost im je što su nezapaljivi pa se koriste na lokacijama gdje je to od velike važnosti kao što su bolnice, brodovi i sl. Kod uljnih transformatora jezgra

i namoti uronjeni su u izolacijsku tekućinu. Ulje ima bolja izolacijska svojstva i bolje odvodi toplinu od zraka te se stoga transformatori velikih snaga za više napone grade najčešće kao uljni. Uljni transformatori imaju konzervator koji omogućava širenje ulja uzrokovano zagrijavanjem. Konzervator je preko jedne cijevi spojen s kotlom, a preko druge cijevi ima odušak u atmosferi, a u odušku se nalazi dehidrator koji služi za uklanjanje vlage iz zraka [7].

**Distributivne transformatorske stanice** su transformatorske stanice koje povezuju srednjenaponsku i niskonaponsku mrežu (SN/NN), dvije srednjenaponske mreže (SN/SN), a dijelom i one koje povezuju visokonaponsku i srednjenaponsku mrežu (VN/SN).

- **Transformatorske stanice SN/NN:** to su transformatorske stanice prijenosnih omjera 10/0,4 kV i 20/0,4 kV, a mogu biti izvedene kao stupne (snage 50-250 kVA, koriste se u nadzemnim mrežama) ili postavljene u posebnom građevinskom objektu (do 1000 kVA, koriste se u kablskim odnosno gradskim mrežama). Transformatori mogu biti uljni ili suhi, snage 50-1000 kVA. Ukoliko je riječ o većim snaga grupa spoja je Dyn, a za manje snage je Yzn [6].



**Slika 3.11.** Stupna transformatorska stanica 20/0,4 kV

- **Transformatorske stanice SN/SN:** to su transformatorske stanice prijenosnih omjera 35/10 kV i 35/20 kV. Često imaju 2 transformatora snage 2,5-16 MVA i grupe spoja Dy5 ili Yd5. Ukoliko transformatorske stanice napajaju veliku kabelsku mrežu potrebno je uzemljiti zvjezdište transformatora pomoću prigušnice ili otpornika za uzemljenje. Sabirnice mogu biti izvedene kao: jednostruke, jednostruke sekcionirane sa sekcijским rastavljačem te dvostruke. Elementi koji još čine transformatorske stanice 35/10(20) kV su: sustav uzemljenja i gromobranska zaštita, sustav izmjeničnog i istosmjernog napajanja, sustav za daljinsko upravljanje te pomoćni sustavi (protupožarna oprema, rasvjeta...)[6].
- **Transformatorske stanice VN/SN:** to su transformatorske stanice prijenosnih omjera 110/35 kV, 110/20 kV te 110/10 kV, a zadaća im je napajanje srednjenaponske distributivne mreže. Često imaju 2 transformatora koji su u transformatorskim stanicama 110/10(20) kV snage 20 ili 40 MVA, a u transformatorskim stanicama 110/35 kV snage 40, 31.5 ili 63 MVA. Grupa spoja je YNyd5. Tronamotni transformator čije je zvjezdište na primarnoj strani kruto uzemljeno, a na sekundarnoj strani je uzemljeno pomoću prigušnice ili otpornika za uzemljenje. Tercijar nije opterećen i obično je napona 10 kV. Sabirnice mogu biti izvedene kao: jednostruke sekcionirane sa sekcijским rastavljačem, dvostruke te dvostruke s pomoćnim sabirnicama [6].

### 3.3. Nadzemni vodovi i kabeli

Za prijenos i distribuciju električne energije od elektrana do krajnjih potrošača mogu se koristiti nadzemni vodovi ili kabeli. Kabeli su dosta skuplji od nadzemnih vodova, a i popravak im je dosta teži i skuplji. Stoga se većinom koriste nadzemni vodovi, a kabeli samo u posebnim slučajevima kao npr. blizina aerodroma, povezivanje otoka, gradska područja i sl. [9]

#### 3.3.1. Nadzemni vodovi

Nadzemni vodovi mogu se podijeliti prema nazivnom naponu, broju trofaznih sustava, materijalu izrade i sl.

Prema [9], glavni dijelovi nadzemnih vodova su:

- vodiči
- stupovi
- izolatori

- pribor
- zaštitna užad
- sustav za uzemljenje

**Vodiči** su najvažniji dio dalekovoda jer služe za prijenos električne energije. Materijal od kojih se izrađuju vodiči mora, uz dobru električnu vodljivost, imati i dobra mehanička svojstva zbog svoje težine i drugih vanjskih utjecaja. S obzirom da ne postoji materijal koji sadrži dobra i električna i mehanička svojstva koriste se kombinirani vodiči. Najčešće korišteni kombinirani vodiči su tzv. alučel vodiči koji su kombinacija aluminijske i čelika. Mehanički teret na sebe preuzima jezgra od čelika, a za vođenje struje služi uglavnom aluminijski plašt. Ovakvi vodiči uglavnom se koriste od srednjih do najviših napona gdje se ne može primijeniti obično aluminijsko užad zbog visine napona. Vodiči se moraju dimenzionirati tako da zadovoljavaju i električne i mehaničke aspekte uz što manju cijenu. Električki se vodiči dimenzioniraju prema struji koja kroz njih protječe i prema naponu. Joule-ovi gubici u vodičima moraju ostati u granicama isplativosti, a temperatura ne smije prijeći maksimalno dozvoljeno vrijednost koja je obično 40 °C. Također, jakost električnog polja oko vodiča ne smije prijeći električnu čvrstoću zraka da ne dođe do proboja, a vodič ne smije uzrokovati prevelik pad napona. Mehanički se vodiči dimenzioniraju tako da se usklade mehaničko naprezanje voda i njegov provjes [9].

**Stupovi** služe za držanje vodiča na odgovarajućoj visini iznad tla te za zatezanje vodiča i zaštitnih užeta. Stupovi za dalekovode izgrađuju se od:

- drveta- za manje napone (10 i 20 kV), niska cijena, mala trajnost i potrebno stalno održavanje.
- armiranog betona- koriste se u niskonaponskoj i sredjenaponskoj mreži, velika težina, velika trajnost.
- čelika- čelično-rešetkasti stupovi imaju dobra mehanička svojstva, najupotrebljavaniji, izloženi koroziji.

S obzirom na funkciju razlikuju se:

- nosni- postavljaju se na pravocrtnoj trasi, a glavna im je uloga nositi vodič odnosno osigurati mu dovoljnu visinu iznad tla.
- zatezni- uz nošenje vodiča, svrha im je zatezanje vodiča i zaštitnih užeta.

Prema položaju u trasi, stupovi se dijele na:

- linijske- nalaze se u pravcu trase.
- kutne- nalaze se u kutu trase [9].

**Izolatori** predstavljaju pasivni električni dio, odnosno oni sprječavaju da struja proteče kroz stupove. S obzirom da su vodiči pričvršćeni na stupove pomoću izolatora, izolatori moraju biti mehanički dovoljno čvrsti. Zahtjevi koji se postavljaju izolatorima su:

- električna čvrstoća na preskok
- električna čvrstoća na proboj
- mehanička čvrstoća
- otpornost na promjene temperature
- otpornost na atmosferske prilike
- laka proizvodnja i povoljna cijena
- lako održavanje u pogonu

Kao materijal za izradu izolatoru najčešće se koriste keramički izolacijski materijali, posebice elektroporculan koji je zapravo smjesa glinenca, kvarca i kaolina [9]. U upotrebi su još staklo, umjetne mase i steatit [10]. Prema tome kako nose vodič izolatori se mogu podijeliti na:

- potporne – danas se koriste na niskonaponskim i srednjenaponskim vodovima (do 35 kV).
- ovjesne - koriste se na visokonaponskim vodovima. Mogu biti lančani (kapasti ili masivni) koji su sastavljeni od više članaka ili štapni sastavljeni od jednog dijela [9].

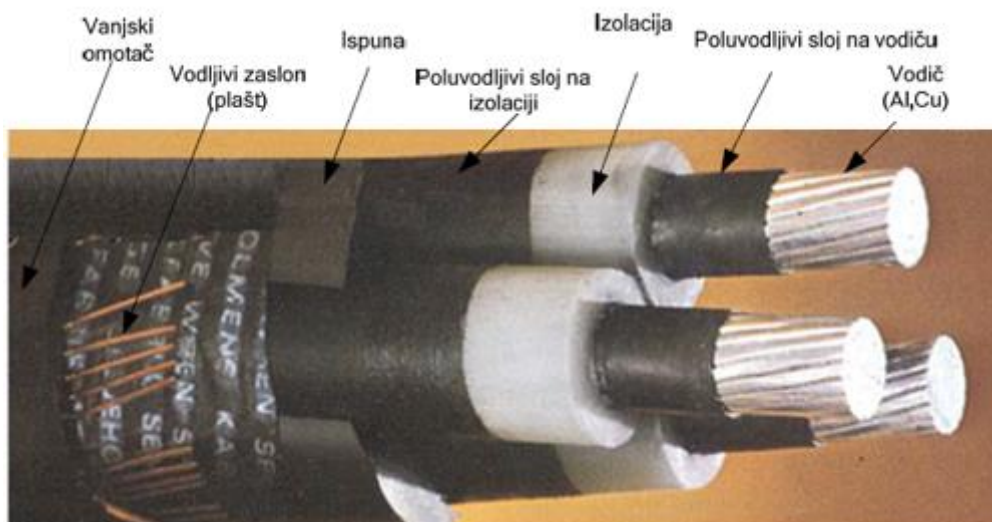
**Pribor** za nadzemne vodove može se podijeliti na zaštitni i spojni. U spojni pribor spadaju: spojnice, strujne stezaljke, podupore, pribor za sastavljanje izolatorskih lanaca, nosive i zatezne stezaljke itd. Zaštitni pribor podrazumijeva zaštitne rogove, zaštitne prstenove, prigušivače vibracija, odstojnici itd. [9]

**Zaštitno uže** ima glavnu zadaću štíćenja faznih vodiča od direktnog udara munje. Zaštitno uže je korisno i u slučaju kratkog spoja sa zemljom jer tada struja kvara ne odlazi u zemlju na samo jednom mjestu nego se raspoređi na više stupova [9]. U zaštitno uže se često ugrađuje i optički kabel koji služi za prijenos informacija. Zaštitno uže se izrađuje od čelika ili od kombiniranih materijala s boljom električnom vodljivošću. U distributivnim mrežama zaštitno uže se koristi samo na 35 kV dalekovodima [6].

**Uzemljenje** označava direktno ili indirektno uspostavljanje veze dijelova elektroenergetskog postrojenja sa zemljom. Uzemljiti se moraju svi metalni dijelovi stupa koji u uobičajenom radu nisu pod naponom. Svrha uzemljenja je održavanje vodljivih dijelova stupa na potencijalu zemlje zbog čega nisu opasni za živa bića. Danas se za stupove najčešće koriste trakasti uzemljivači u obliku plosnate trake ili užeta te se ukopavaju otprilike pola metra u zemlju [9].

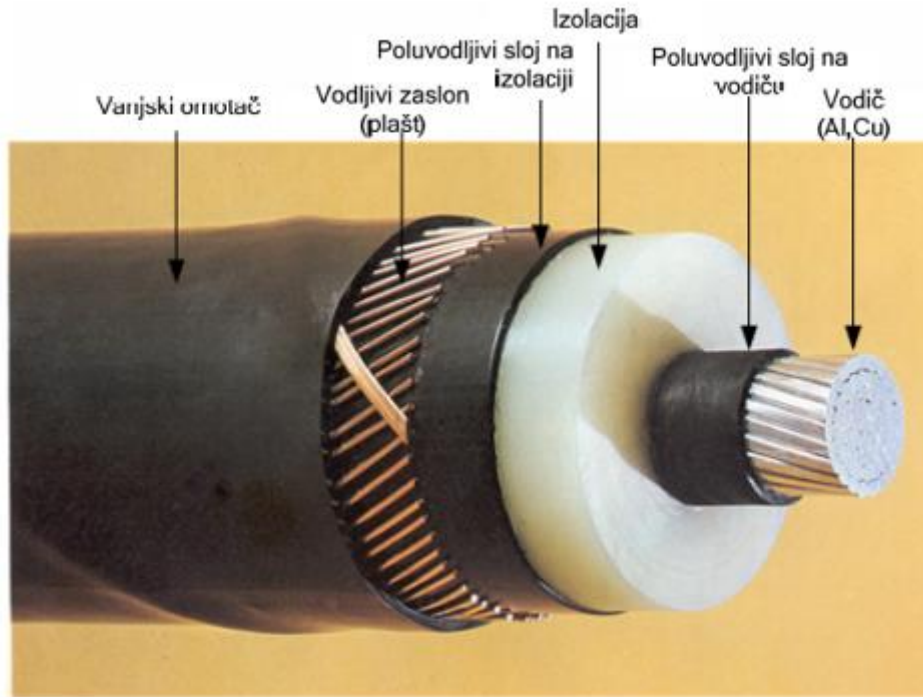
### 3.3.2. Kabelski vodovi

Kabelski vodovi koriste se za trajno postavljanje u zemlju ili u vodu. Sadrže vodiče od aluminijske ili bakrene te su izolirani od vanjskih utjecaja kao što su korozija i vlaga. Vodiči se izrađuju u obliku užeta. Iznad faznih vodiča dolazi izolacija (najčešće kruta), a materijal koji se koristi za izradu krute izolacije je umreženi polietilen. Iznad izolacije postavlja se vodljivi plašt koji može biti uzemljen na oba kraja ili na jednom kraju. Na vodljivi plašt postavlja se vanjski omotač obično izrađen od PVC-a ili običnog etilena, a uloga mu je zaštita kabela od izvanjskih utjecaja. Parametri kabela su nazivni napon, nazivna struja, dozvoljeno strujno opterećenje kabela, djelatni otpor, kapacitet i induktivitet kabela. Uobičajena podjela kabela prema broju faznih vodiča je na trožilni kabel i jednožilni. U trožilnom kabelu nalaze se 3 (ili više) fazna vodiča koja su međusobno izolirana dok se u jednožilnom kabelu nalazi samo 1 fazni vodič. Za trofazni sustav potrebna su nam, dakle 3 jednožilna kabela [6]. Jednožilni kabele mogu se polagati na 2 načina, u ravnini s međusobnim razmakom 7 cm ili u trolistu pri čemu se međusobno dodiruju.



Slika 3.12. Trožilni kabel [6]





**Slika 3.13.** Jednožilni kabel [6]

Kabeli se također mogu podijeliti i prema mjestu polaganja. Postoje podzemni, podmorski i zračni kabeli.

**Podzemni kabeli** postavljaju se u kabelaške kanale. Neposredna okolina kabela zatrpava se materijalom koji dobro odvodi toplinu kako bi se smanjilo termičko naprezanje kabela. Također je bitno postaviti upozoravajuću vrpcu kako bi se upozorili potencijalni naredni radnici da se tu nalazi električni kabel [6].

**Podmorski kabeli** postavljaju se na dnu mora pomoću posebnih brodova. Podmorski kabeli najviše su izloženi morskim strujama na ulazu i izlazu iz mora te se stoga na tim mjestima postavlja priobalna zaštita. Priobalna zaštita podrazumijeva betonske blokove za žljebovima u koje se polažu kabeli [6].



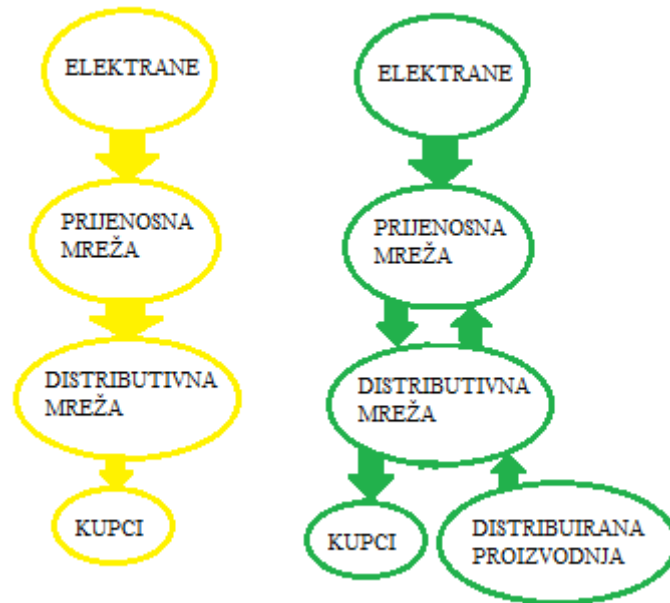
**Slika 3.14.** Priobalna zaštita 110 kV podmorskog kabela [11]

**Zračni kabe**li koriste se u posebnim slučajevima kao npr. u tunelima, rudnicima i sl. Tip zračnog kabela je i samonosivi kabelski snop koji se koristi u niskonaponskim mrežama, najčešće za nadzemne kućne priključke [6].

### **3.4. Distribuirana proizvodnja**

Distribuirana proizvodnja postala je sastavni dio modernih distributivnih mreža. Porastom integracije distribuirane proizvodnje distributivna mreža prestaje biti pasivna i postaje aktivna, što znači da i ona sudjeluje u proizvodnji električne energije. Prije nastanka distribuirane proizvodnje distributivna mreža je bila radijalna te je uzimala električnu energiju iz prijenosne mreže i dovodila ju je do krajnjih korisnika, dakle tok energije je bio jednosmjernan. Uvođenjem distribuirane proizvodnje distributivna mreža više nije radijalna te je tok energije dvosmjernan, odnosno krajnji potrošači se katkada ponašaju kao potrošači, a katkada kao izvori.





**Slika 3.15.** *Elektroenergetski sustav prije (lijevo) i nakon (desno) uvođenja distribuirane proizvodnje*

Pod distribuiranom proizvodnjom podrazumijevaju se obnovljivi izvori energije kao što su solarne elektrane, vjetroelektrane, geotermalne elektrane, elektrane na biomasu, elektrane na plimu i oseku itd. Sve elektrane na obnovljive izvore energije snage do 10 MW priključuju se na distributivnu mrežu, dok se elektrane snage veće od 10 MW priključuju na prijenosnu mrežu (najčešće vjetroelektrane). Distribuirana proizvodnja ima utjecaj na tokove snaga distributivne mreže, na naponske i strujne prilike te na struje kratkog spoja [12].

### 3.5. Potrošači

Potrošači su ustvari razlog zbog kojih postoji proizvodnja, prijenos i distribucija električne energije. Oni preuzimaju el. energiju iz distributivne ili prijenosne mreže i koriste ju za napajanje različitih električnih trošila u svrhu obavljanja nekog rada, za razonodu, uživanje i sl. Potrošači el. energije mogu se razlikovati prema:

- načinu priključka na mrežu: jednofazni priključak, dvofazni, trofazni,
- naponskom nivou mreže na koju su priključeni: prijenosna mreža, srednjenaponska ili niskonaponska,
- tehničkim karakteristikama,
- tarifama prema kojima im se naplaćuje el. energija [6].

Nazivni podaci bilo kojeg trošila su:

- njegova nazivna snaga  $P_n$
- nazivni linijski napon  $U_n$  ili nazivni fazni napon  $V_n$
- nazivni faktor snage  $\cos\varphi_n$

Iz tih podataka moguće je odrediti nazivnu struju koju će trošilo vući iz mreže [13].

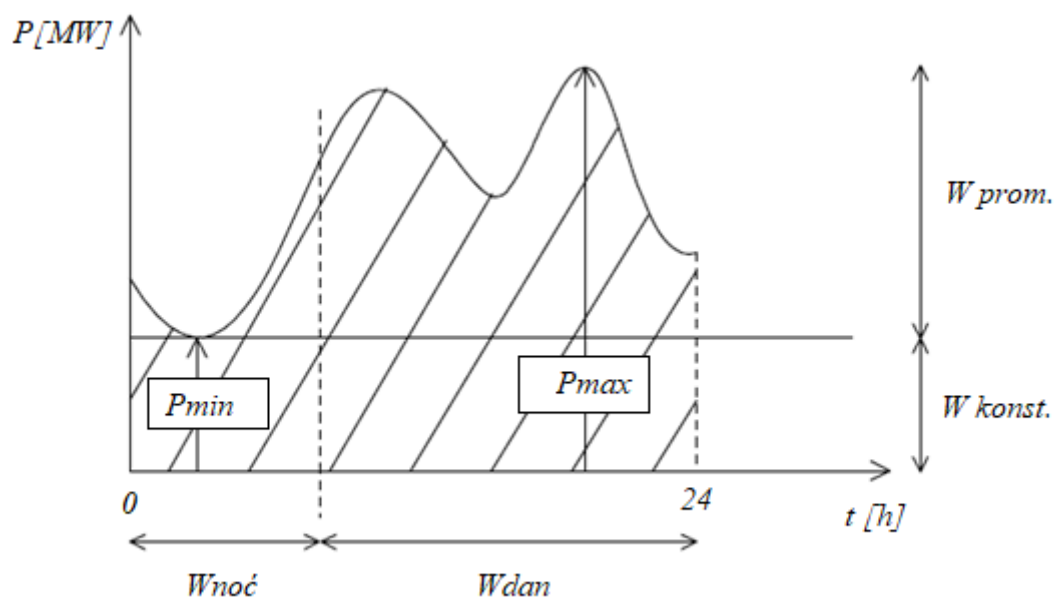
Nazivna linijska struja trofaznog trošila jednaka je:

$$I_{Ln} = \frac{P_n}{\sqrt{3} U_n \cos\varphi_n} \text{ [A]} \quad (3 - 3)$$

Nazivna struja jednofaznog trošila jednaka je:

$$I_n = \frac{P_n}{V_n \cos\varphi_n} \text{ [A]} \quad (3 - 4)$$

Uobičajena trošila koja su pojavljuju u EES-u su termička trošila, rasvjeta, elektromotori i elektronički uređaji. Osnovna zakonitost elektroenergetskog sustava (EES) kaže da proizvodnja el. energije, koju proizvode sve elektrane tog sustava, mora biti jednaka cjelokupnoj potrošnji tog sustava uvećanoj za gubitke. Razlog tomu je što ne postoji efikasan način skladištenja el. energije. S obzirom da se potrošnja odnosno potražnja el. energije tijekom dana stalno mijenja i da u EES-u postoje potrošači različitih karakteristika uvodi se dnevni dijagram opterećenja. Donji dio dijagrama opterećenja, prikazanog na slici 3.16, predstavlja konstantnu energiju, dok gornji dio predstavlja varijabilnu energiju. Promjene opterećenja tijekom dana ovisne su o dobu dana ili noći, tjedne varijacije ovise o tome je li radni dan ili neradni, dok mjesečne promjene opterećenja ovise o tome koje je doba godina te koliko se el. energije koristi za rasvjetu, grijanje ili hlađenje [13].



**Slika 3.16.** Dnevni dijagram opterećenja [13]

## **4. METODE ZA SMANJENJE GUBITAKA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI**

Gubici električne energije mogu se definirati kao razlika između predane el. energije u mrežu i preuzete el. energije iz mreže. Uobičajena podjela je na tehničke i netehničke gubitke. Tehnički gubici nastaju prolaskom el. energije kroz elemente EES-a uslijed čega dolazi do pretvaranja te energije u toplinu. Tehničke gubitke možemo podijeliti još na stalne i promjenjive gubitke. Pod stalnim gubicima podrazumijevaju se gubici u jezgrama transformatora, gubici zbog korone itd. Oni su konstantni i ne ovise o struji opterećenja. Promjenjivi gubici nastaju u vodičima i namotima transformatora i oni su proporcionalni kvadratu struje opterećenja. Netehnički gubici podrazumijevaju el. energiju koja je predana potrošaču, ali nije izmjerena i obračunata [14]. Smanjenje gubitaka el. energije jedan je od najvažnijih ciljeva operatora distributivnog sustava. Neke od mjera za smanjenje gubitaka el. energije, koje će biti opisane u nastavku, su:

- priključenje distribuirane proizvodnje,
- kompenzacija jalove snage,
- povećanje presjeka vodova,
- prelazak na višu naponsku razinu
- upravljanje potrošnjom.

### **4.1. Utjecaj distribuirane proizvodnje na smanjenje gubitaka**

Integracijom distributivne proizvodnje (obnovljivih izvora energije) tokovi snaga mreže mogu biti:

- smanjeni- ukoliko je proizvodnja manja od potrošnje električki bliskih potrošača (smanjeno opterećenje-manji gubici).
- promijeniti smjer- ukoliko je proizvodnja distribuiranog izvora veća od potrošnje obližnjih potrošača (energije ide prema prijenosnoj mreži).
- povećani- ukoliko dođe do znatnog porasta proizvodnje (veći gubici) [12].

Stoga se može doći do zaključka da maksimalna proizvodnja distribuiranih izvora, kako ne bi došlo do preopterećenja vodova i transformatora odnosno do uzlaznog toka snage, mora biti manja od ukupne minimalne potrošnje tog izvoda. Integracija distribuiranih izvora za posljedicu obično ima porast napona na mjestu priključka, što je pozitivan utjecaj. Ipak, kako

ne bi došlo do previsokog napona, broj spojenih izvora, odnosno injektirana snaga mora se ograničiti. Spajanjem distribuiranih izvora obično se smanjuju gubici jer se smanjuje tok el. energije iz nadređene mreže te distribuirani izvor napaja obližnje potrošače. No ukoliko se u mrežu injektira prevelika snaga tada će proizvodnja el. energije biti veća od potrošnje, doći će do promjene smjera energije te može doći do preopterećenja vodova odnosno povećanja gubitaka. Utjecaj distribuiranog izvora na struju kratkog spoja ovisi o:

- mjestu priključka izvora u odnosu na mjesto kvara
- vrsti priključka (izravan priključak ili preko sklopova energetske elektronike) i parametrima izvora
- snazi kratkog spoja mreže [12]

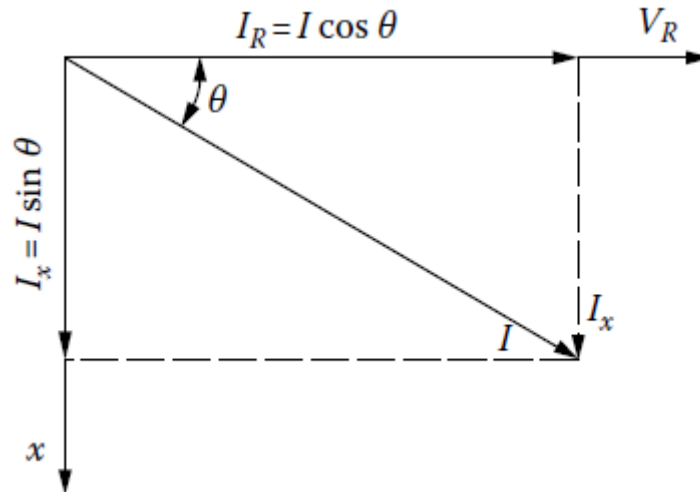
Doprinos struji kratkog spoja razlikuje se za različite vrste priključka elektrane na mrežu. Ukoliko su sinkroni ili asinkroni generatori spojeni izravno na mrežu dolazi do povišenja struje kratkog spoja, a ukoliko je priključak izveden preko sklopova energetske elektronike tada izvor nema doprinos struji kratkog spoja. Distribuirana proizvodnja može imati utjecaj:

- povećanja struje kratkog spoja na mjestu kvara
- smanjenja struja kratkog spoja iz nadređene mreže (potiskivanje struje)
- promjene smjera toka struje kratkog spoja kod kvara u mreži [12]

Distribuirani izvori utječu na selektivnost zaštite te na promjenu rasklopne moći prekidača.

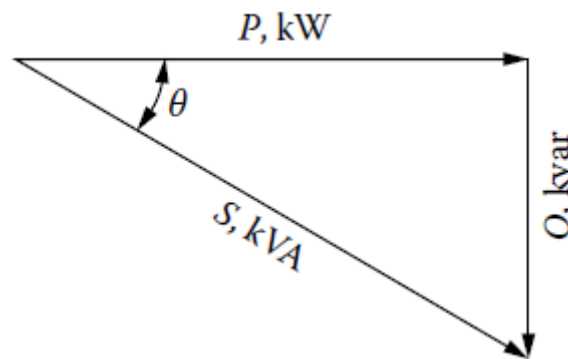
## **4.2. Utjecaj kompenzacije jalove snage na smanjenje gubitaka**

Trošila vrlo često, uz djelatnu snagu, iz mreže uzimaju i jalovu snagu, najčešće induktivnog karaktera. Najčešća takva trošila su elektromotori koji induktivnu jalovu komponentu koriste za stvaranje magnetskog polja. U mrežama EES-a uobičajeno je da struja zaostaje za naponom za neki određeni kut kao što je prikazano na slici 4.1. Kosinus tog kuta naziva se faktor snage.



**Slika 4.1.** Fazorski prikaz napona i struje [15]

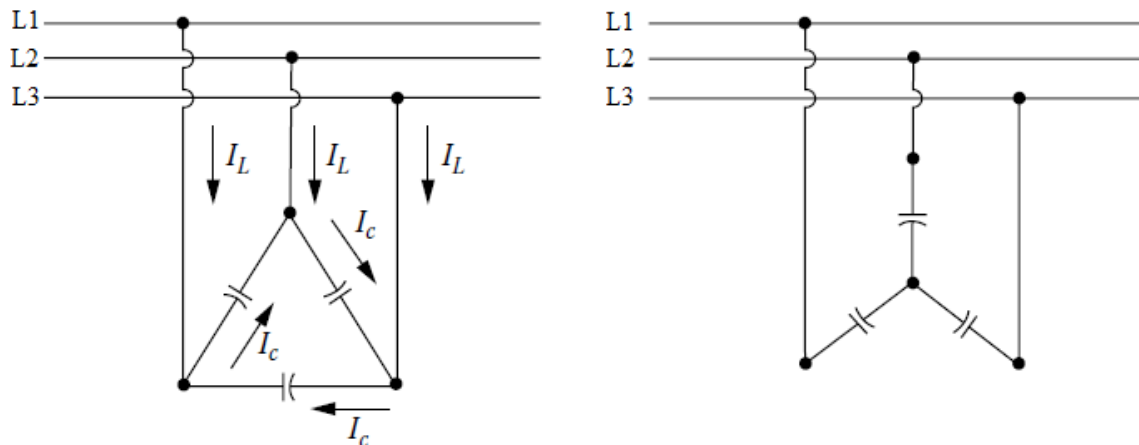
Ako se sve komponente struje pomnože s krajnjim naponom  $V_R$  dobije se trokut snaga.



**Slika 4.2.** Trokut snaga [15]

Faktor snage ( $\cos\varphi$ ) pokazuje koliko se potražuje prividne snage  $S$  za dobivanje potrebne djelatne snage  $P$  i uvijek se nalazi u rasponu od 0 do 1 [16]. S obzirom da prijenos jalove snage stvara znatno veće padove napona u odnosu na djelatnu snagu, a time i veće gubitke, javlja se potreba za kompenzacijom jalove snage. U svrhu kompenzacije induktivne jalove snage najčešće se koriste kondenzatorske baterije. U distribuciji se kondenzatorske baterije uglavnom spajaju paralelno s vodovima i isporučuju jalovu snagu takvog karaktera kako bi se neutralizirala jalova snaga tražena od strane induktivnog trošila. Kondenzatorske baterije smanjuju ili potpuno neutraliziraju induktivnu komponentu trošila stoga se može reći da imaju isti učinak kao i naduzbuđeni sinkroni stroj. Primjenom kondenzatorskih baterija može se smanjiti potrebna struja iz izvora, faktor snage će se poboljšati, a time će i pad napona biti smanjen. Proizvodnja jalove snage u elektranama i njezin prijenos do udaljenih potrošača nije ekonomski isplativa te se u tu svrhu koriste kondenzatorske baterije ili naduzbuđeni sinkroni

motori koji se ugrađuju u blizini potrošača. Faktor snage trošila može biti induktivni ili kapacitivni. Ukoliko trošilo uzima jalovu snagu iz mreže (izvora) tada je faktor snage induktivan (elektromotor), a ukoliko trošilo isporučuje jalovu snagu tada je faktor snage kapacitivan (kondenzator) [15]. Kondenzatorske baterije su trofazni simetrični uređaji koji sadrže kondenzatore u svakoj fazi koji mogu biti spojeni u trokut ili u zvijezdu kao što je prikazano na slici 4.3.



**Slika 4.3.** Kondenzatorske baterije u spoju trokut (lijevo) i spoju zvijezda (desno) [15]

Ukoliko bi kapacitet kondenzatorskih baterija bio fiksna za vrijeme niskog opterećenja dolazilo bi do porasta napona te su stoga neki kondenzatori ugrađeni kao sklopni kako bi se mogli isključiti prilikom niskog opterećenja [6]. Kompenzacija jalove snage može biti izvedena kao:

- kompenzacija za pojedinačna trošila- kondenzatorska baterija se direktno priključuje većim potrošačima.
- grupna kompenzacija- kompenzacija jalove snage grupe potrošača.
- centralna kompenzacija- kompenzacija jalove snage s centralnog mjesta (sekundara transformatora) [17].

Pozitivni učinci kompenzacije jalove snage su:

- smanjeni potrebni proizvodni kapaciteti
- smanjeni potrebni prijenosni kapaciteti
- smanjeni potrebni distributivni kapaciteti
- smanjeni gubici (u bakru)
- smanjen pad napona i poboljšana regulacija napona [15].

### 4.3. Utjecaj povećanja presjeka vodova na smanjenje gubitaka

S obzirom da se djelatni otpor voda računa pomoću izraza:

$$R = \rho \frac{l}{S} [\Omega] \quad (4 - 1)$$

gdje je:

$R$  - otpor voda [ $\Omega$ ]

$\rho$  – specifični električni otpor materijala [ $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ]

$l$  - duljina voda [m]

$S$  - poprečni presjek voda [ $\text{mm}^2$ ]

može se zaključiti da će povećanje poprečnog presjeka vodiča rezultirati smanjenjem njegovog djelatnog otpora, a time i smanjenjem djelatnih gubitaka. Djelatni gubici se računaju pomoću izraza:

$$P_g = I^2 \cdot R [\text{W}] \quad (4 - 2)$$

gdje je:

$P_g$  – djelatni gubici [W]

$I$  – struja opterećenja [A]

$R$  – otpor voda [ $\Omega$ ]

Iz izraza (4-2) vidljivo je da djelatni gubici, uz djelatni otpor, ovise i o kvadratu struje koja prolazi tim vodom. Stoga se gubici mogu smanjiti i smanjenjem te struje što se postiže dodavanjem paralelnih vodova već postojećim vodovima. Ukoliko je kabel već postavljen tada nije ekonomski isplativo raditi ikakve preinake na njemu. Stoga je bitno prilikom postavljanja kabela odrediti potrebni presjek uzimajući u obzir i mogućnost dodavanja novih trošila [18].

### 4.4. Utjecaj prelaska na višu naponsku razinu na smanjenje gubitaka

Povećanje naponske razine smanjuje potrebnu razinu struje potrebne za distribuciju jednake količine električne energije. Time se povećava strujna opteretivost mreže te se značajno smanjuju padovi napona i djelatni gubici voda. To donosi i druge prednosti kao što su smanjenje vjerojatnosti kratkih spojeva, povećanje kvalitete opskrbe i povećanje razine



integracije distribuirane proizvodnje. Ova mjera obično se primjenjuje u srednjenaponskim mrežama gdje se radi prijelaz s 10 kV na 20 kV naponsku razinu. Ukoliko koordinacija izolacije i oprema mogu podnijeti viši napon tada se prijelaz može izvesti samo zamjenom transformatora. No ipak, u većini slučajeva postoji potreba za zamjenom svih komponenata mreže i ugradnja komponenata prilagođenih za viši napon, što iziskuje određene troškove. Stoga se ova metoda često primjenjuje kada već postoji potreba za promjenom komponenata mreže zbog njihove starosti te tada nije prevelika razlika u potrebnim troškovima. Ova metoda ima jako velik potencijal u smanjenju promjenjivih gubitaka [18].

#### **4.5. Utjecaj upravljanja potrošnjom na smanjenje gubitaka**

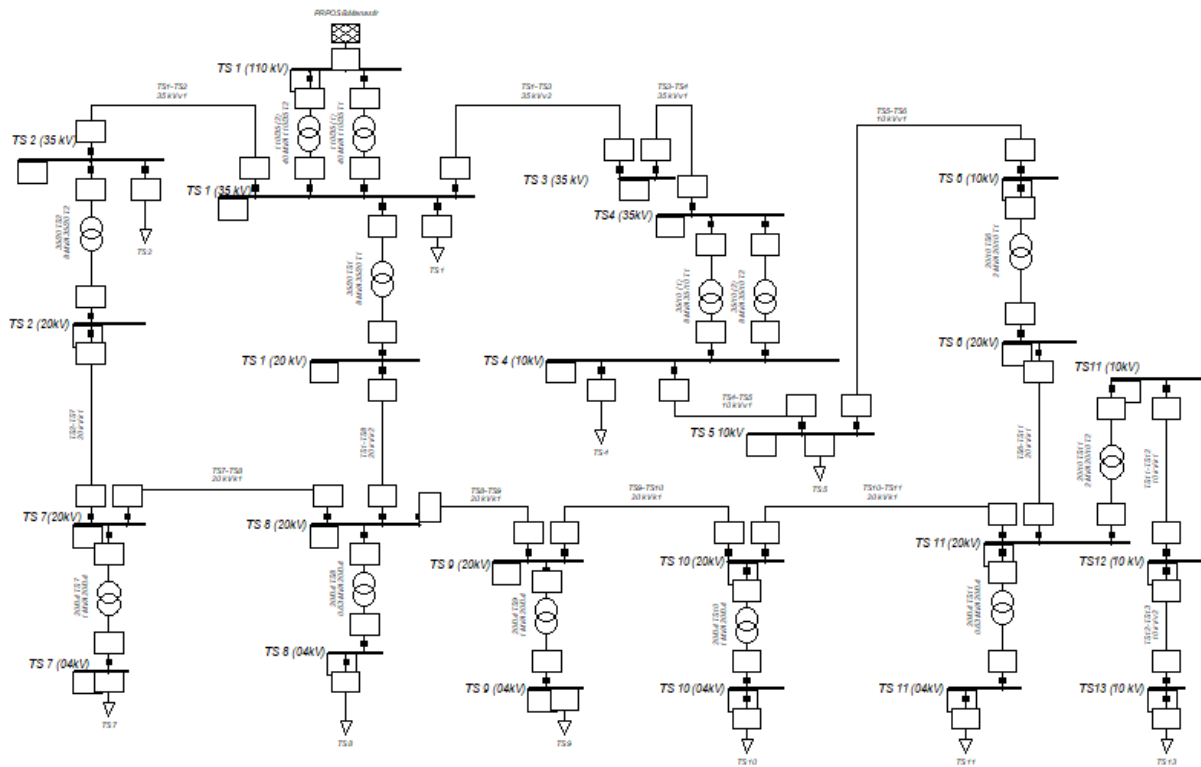
Temelj upravljanja potrošnjom jest motivacija kupaca da sudjeluju u reguliranju svoje potrošnje primjenom raznih poticaja i tarifa. Cilj je uključiti kupce u proces vođenja elektroenergetskog sustava i podići im osjećaj odgovornosti za stabilnost mreže i utjecaj na okoliš, a zauzvrat im osigurati smanjenje računa. Prednosti upravljanja potrošnjom su:

- smanjenje računa kupaca
- manje potrebe za novim proizvodnim kapacitetima
- smanjenje zagađenja okoliša
- manja cijena pri vršnom opterećenju

Upravljanje potrošnjom zapravo označava pokušaj izravnavanja krivulje opterećenja tako da se u nekim periodima poveća opterećenje, a u nekima smanji. To se postiže utjecajem na ponašanje kupaca na način da kada je opterećenje veće bude veća i cijena električne energije, a kada je opterećene manje, manja cijena električne energije. Metode upravljanja potrošnjom mogu se podijeliti na izravne, neizravne i regulirane. Kod izravne metode operator i kupac sklapaju ugovor po kojem operator može po potrebi uključivati i isključivati uređaje kupca (poput klime, bojlera, rasvjete...) radi smanjenja vršne potrošnje. Neizravna metoda nudi kupcu slobodu odlučivanja želi li sudjelovati u upravljanju potrošnjom ili ne nakon što mu operator da informaciju da je potrebno smanjiti potrošnju i ponudi neku beneficiju. Regulirana metoda sadrži vozni red s rasporedom korištenja uređaja, a moguće ju je primijeniti kod industrijskih potrošača isključenjem dijela postrojenja, pomicanjem radnih smjena i sl. [19]

## 5. PRIMJERI MJERA ZA SMANJENJE GUBITAKA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Analiza mjera za smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži rađena je u programskom paketu DIgSILENT PowerFactory na dijelu distributivne mreže prikazane na slici 5.1.



Slika 5.1. Shema distributivne mreže u DIgSILENTU

Distributivna mreža se napaja iz nadređene mreže preko dva paralelna transformatora prijenosnog omjera 110/35 kV smještenih u TS 1. Na tu 35 kV sabirnicu spojen je i transformator prijenosnog omjera 35/20 kV koji preko 20 kV kabela napaja potrošače pomoću transformatora 20/0,4 kV. Također s 35 kV sabirnice odlaze dva 35 kV nadzemna voda, jedan prema TS 2 35/20 kV, a drugi prema TS 3 (35kV) i dalje prema TS 4 35/10 kV. Iz TS 2 električna se energija preko 20 kV kabela prenosi do transformatora 20/0,4, a zatim i do krajnjih potrošača. Iz TS 4 ide 10 kV nadzemni vod do TS 5 gdje se nalazi potrošač. U TS 6 nalazi se transformator 20/10 kV koji naponsku razinu povećava s 10 na 20 kV nakon čega se električna energija prenosi do krajnjih potrošača pomoću 20 kV kabela. Zadana mreža sačinjena je od dvije prstenaste strukture što omogućuje napajanje potrošača s dvije ili tri strane (dvostruka rezerva).

Podaci o vodovima, transformatorima, opterećenjima i sabirnicama nalaze se u tablicama 5.1.-5.4.

**Tablica 5.1. Podaci o vodovima**

Napon voda [kV]	Naziv voda	Tip voda	Duljina voda [km]	Presjek voda [mm <sup>2</sup> ]
35	TS1-TS2	Nadzemni vod	6,898	120
35	TS1-TS3	Nadzemni vod	8,395	95
35	TS3-TS4	Nadzemni vod	14,567	120
20	TS2-TS7	Kabel	4,194	120
20	TS1-TS8	Kabel	6,402	240
20	TS7-TS8	Kabel	5,103	120
20	TS8-TS9	Kabel	1,473	120
20	TS9-TS10	Kabel	4,373	120
20	TS10-TS11	Kabel	7,669	120
20	TS6-TS11	Kabel	3,67	120
10	TS4-TS5	Nadzemni vod	17	95
10	TS5-TS6	Nadzemni vod	6,075	95
10	TS11-TS12	Kabel	2,353	120
10	TS12-TS13	Nadzemni vod	1,352	120

**Tablica 5.2. Podaci o transformatorima**

Prijenosni omjer [kV/kV]	Naziv transformatora	Snaga [MVA]
110/35	110/35 TS1(1)	40
110/35	110/35 TS1 (2)	40
35/20	35/20 TS2	8
35/20	35/20 TS1	8
35/10	35/10 TS4 (1)	8
35/10	35/10 TS4 (2)	8
20/10	20/10 TS6	2
20/10	20/10 TS11	2
20/0.4	20/0,4 TS7	1
20/0.4	20/0,4 TS9	1
20/0.4	20/0,4 TS10	1
20/0.4	20/0,4 TS8	0,63
20/0.4	20/0,4 TS11	0,63

**Tablica 5.3. Podaci o opterećenjima**

Opterećenja	Napon [kV]	Maksimalno		Minimalno	
		$P$ [MW]	$Q$ [Mvar]	$P$ [MW]	$Q$ [Mvar]
TS 2	35	1,4	0,8	0,35	0,2
TS 1	35	34,54	19,49	8,5	4,5
TS 4	10	3,9	1,8	1	0,45
TS 5	10	2,2	0,5	0,55	0,125
TS 13	10	0,7	0,3	0,175	0,075
TS 7	0,4	0,6	0,2	0,15	0,05
TS 8	0,4	0,5	0,2	0,125	0,05
TS 9	0,4	0,6	0,2	0,15	0,05
TS 10	0,4	0,6	0,3	0,15	0,075
TS 11	0,4	1	0,5	0,25	0,125

**Tablica 5.4. Podaci o sabirnicama**

Naziv sabirnice	Napon [kV]
TS 1 (110kV)	110
TS 1 (35kV)	35
TS 2 (35kV)	35
TS 3 (35 kV)	35
TS 4 (35kV)	35
TS 2 (20 kV)	20
TS 7 (20kV)	20
TS 1 (20kV)	20
TS 8 (20kV)	20
TS 9 (20kV)	20
TS 10 (20kV)	20
TS 11 (20kV)	20
TS 6 (20kV)	20
TS 4 (10 kV)	10
TS 5 (10kV)	10
TS 6 (10kV)	10
TS 11 (10 kV)	10
TS 12 (10 kV)	10
TS 13 (10 kV)	10
TS 7 (04 kV)	0,4
TS 8 (04kV)	0,4
TS 9 (04 kV)	0,4
TS 10 (04 kV)	0,4
TS 11 (04 kV)	0,4

Izvršavanjem tokova snaga u DIGSILENTU mogu se očitati ukupni gubici mreže koji su prikazani u tablici 5.5.

**Tablica 5.5.** Ukupni gubici mreže bez mjera za smanjenje gubitaka

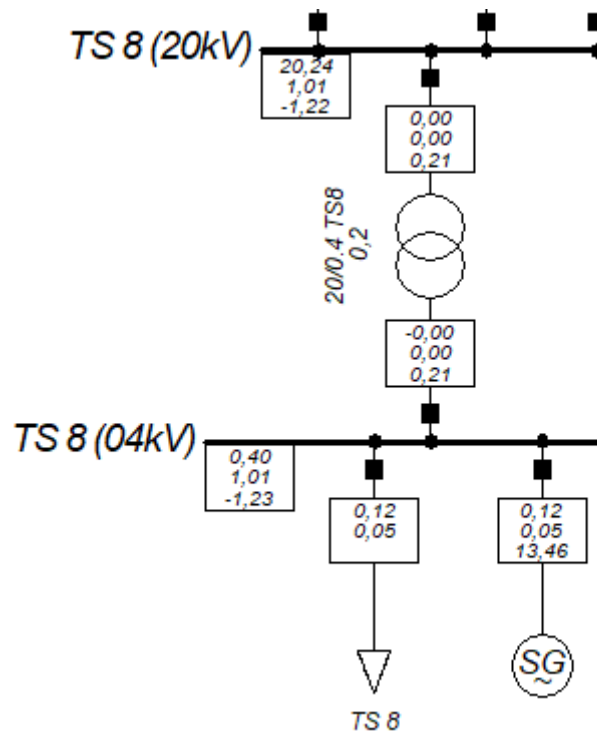
Maksimalno opterećenje		Minimalno opterećenje	
Djelatni gubici $P_g$ [MW]	Jalovi gubici $Q_g$ [Mvar]	Djelatni gubici $P_g$ [MW]	Jalovi gubici $Q_g$ [Mvar]
0,61	4,33	0,10	-0,41

Sada je cilj raznim mjerama dovesti do smanjenja ukupnih gubitaka mreže. Mjere koje će biti provedene su:

- priključenje distribuirane proizvodnje
- kompenzacija jalove snage
- povećanje presjeka vodova
- prelazak na višu naponsku razinu

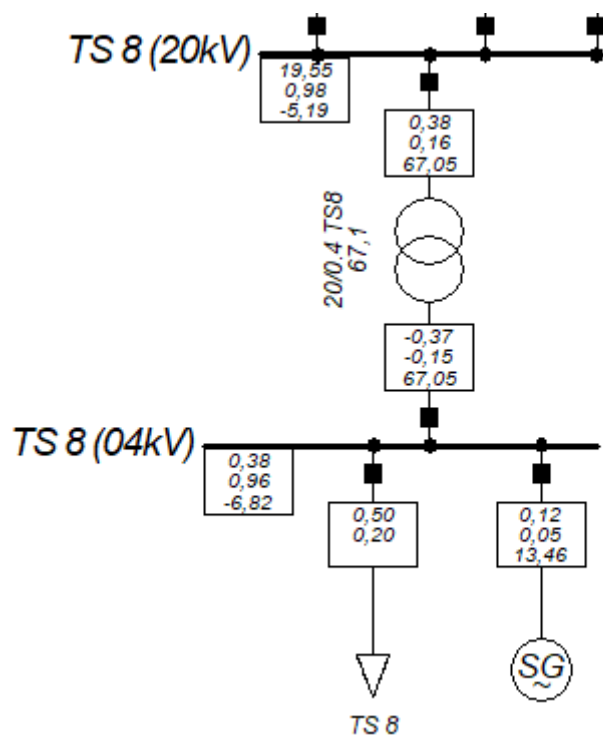
### 5.1. Priključenje distribuirane proizvodnje

Na sabirnicu TS 8 (04 kV) bit će dodan sinkroni generator koji se često koristi u elektranama na biomasu. S obzirom da maksimalna proizvodnja distribuiranih izvora ne smije biti veća od ukupne minimalne potrošnje tog izvoda, generator će biti dimenzioniran obzirom na minimalno opterećenje izvoda. Minimalno opterećenje tog izvoda iznosi 0,125 MW i 0,05 Mvar. Tokovi snaga u dijelu mreže gdje je dodan distribuirani izvor prikazani su na slici 5.2. i 5.3.



**Slika 5.2.** Tokovi snaga prilikom minimalnog opterećenja

Iz tokova snaga može se vidjeti kako sinkroni generator napaja cjelokupno opterećenje izvoda dok je transformator gotovo neopterećen. Time se smanjio tok energije iz nadređene mreže i posljedično tome smanjeni su gubici električne energije. Kada bi generator proizvodio više električne energije došlo bi do uzlaznog toka snage kroz transformator i vjerojatno do povećanja gubitaka. Na slici 5.3. prikazani su tokovi snaga pri maksimalnom opterećenju gdje se može vidjeti da je smanjen tok energije kroz transformator čime je on manje opterećen, a gubici smanjeni.



Slika 5.3. Tokovi snaga pri maksimalnom opterećenju

Tablica 5.6. Ukupni gubici mreže uz dodan jedan distribuirani izvor

Maksimalno opterećenje		Minimalno opterećenje	
Djelatni gubici $P_g$ [MW]	Jalovi gubici $Q_g$ [Mvar]	Djelatni gubici $P_g$ [MW]	Jalovi gubici $Q_g$ [Mvar]
0,6	4,29	0,10	-0,42

Usporedbom tablice 5.5. i tablice 5.6. pri maksimalnom opterećenju može se vidjeti blago smanjenje gubitaka, dok pri minimalnom opterećenju djelatni gubici ostaju jednaki, odnosno vjerojatno su smanjeni, ali ne u tolikoj mjeri da bi bili zapaženi, a jalovi gubici su blago smanjeni. Dodavanje jednog distribuiranog izvora neće znatno utjecati na smanjenje gubitaka, ali dodavanje više takvih izvora na optimalnim lokacijama zasigurno će dovesti do toga. U sljedećem slučaju bit će dodana još dva distribuirana izvora (sinkrona generatora) na sabirnice TS 7 (04 kV) i TS 11 (04 kV) također dimenzionirana prema minimalnim opterećenjima tih izvoda. Rezultati simulacije s ukupno tri spojena distribuirana izvora prikazani su u tablici 5.7.

**Tablica 5.7.** Ukupni gubici mreže uz priključena tri distribuirana izvora

Maksimalno opterećenje		Minimalno opterećenje	
Djelatni gubici $P_g$ [MW]	Jalovi gubici $Q_g$ [Mvar]	Djelatni gubici $P_g$ [MW]	Jalovi gubici $Q_g$ [Mvar]
0,58	4,18	0,10	-0,44

Očekivano dodavanjem više distribuiranih izvora, odnosno injektiranjem veće količine snage u mrežu, postiglo se dodatno smanjenje gubitaka. Kao što je ranije rečeno u radu, prekomjernim povećanjem injektirane snage u mrežu, umjesto smanjenja gubitaka, doći će do njihovog povećanja. Analiziran je i takav slučaj gdje je su sva tri spojena sinkrona generatora dimenzionirana tako da proizvode 3 MW djelatne i 1 Mvar jalove snage. Došlo je do značajnog povećanja gubitaka stoga pri dimenzioniranju izvora distribuirane proizvodnje treba biti oprezan.

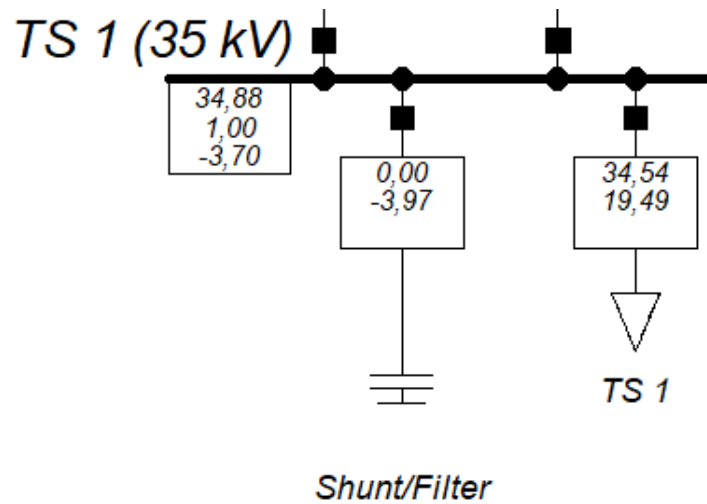
**Tablica 5.8.** Ukupni gubici mreže uz injektiranje prekomjerne snage

Maksimalno opterećenje		Minimalno opterećenje	
Djelatni gubici $P_g$ [MW]	Jalovi gubici $Q_g$ [Mvar]	Djelatni gubici $P_g$ [MW]	Jalovi gubici $Q_g$ [Mvar]
0,68	3,96	0,53	1,15

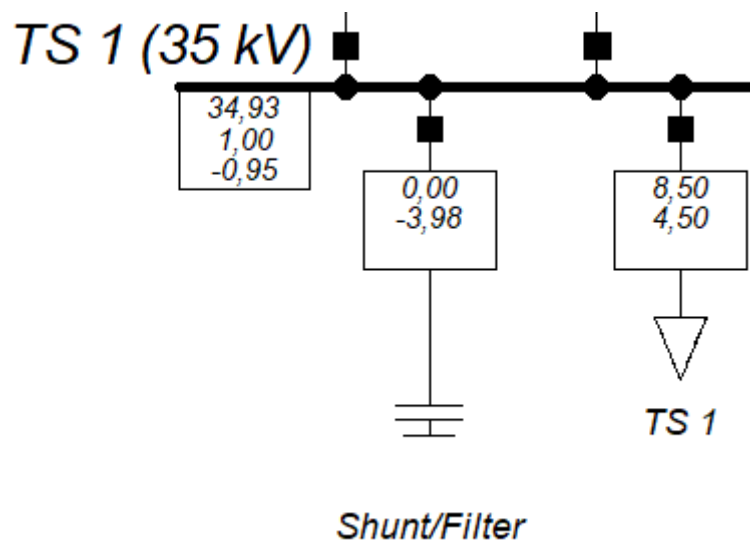
## 5.2. Kompenzacija jalove snage

U ovom slučaju se na sabirnicu TS 1 (35kV) priključuje kondenzatorska baterija jalove snage 4 Mvar.





**Slika 5.4.** *Kompensacija jalove snage pri maksimalnom opterećenju*



**Slika 5.5.** *Kompensacija jalove snage pri minimalnom opterećenju*

Kondenzatorska baterija dimenzionirana je također s obzirom na minimalno opterećenje tako da proizvodi otprilike toliku jalovu snagu koliku zahtijevaju opterećenja spojena na tu sabirnicu. Ukoliko bi se kondenzatorska baterija dimenzionirala prema maksimalnom jalovom opterećenju tada bi pri minimalnom opterećenju dolazilo do uzlaznih tokova jalove snage prema nadređenoj mreži što bi ju dodatno opterećivalo.

**Tablica 5.9.** Ukupni gubici mreže uz kompenzaciju jalove snage

Maksimalno opterećenje		Minimalno opterećenje	
Djelatni gubici $P_g$ [MW]	Jalovi gubici $Q_g$ [Mvar]	Djelatni gubici $P_g$ [MW]	Jalovi gubici $Q_g$ [Mvar]
0,59	4	0,10	-0,43

Usporedbom tablice 5.5. i tablice 5.9. pri maksimalnom opterećenju može se vidjeti smanjenje gubitaka posebice jalovih, dok se kod minimalnog opterećenja djelatni gubici praktički ne mijenjaju, a jalovi su blago smanjeni.

### 5.3. Povećanje presjeka vodova

Povećanje presjeka vodova uzrokovat će smanjenje radnog otpora vodiča što će posljedično tome rezultirati smanjenjem gubitaka. Ova metoda će biti izvršena na način da se svi vodovi presjeka 95 mm<sup>2</sup> zamijene vodovima s presjekom 120 mm<sup>2</sup>. Postoje tri takva voda, a to su: 35 kV nadzemni vod TS1-TS3, 10 kV nadzemni vod TS4-TS5 i 10 kV nadzemni vod 10 TS5-TS6. Gubici mreže nakon povećanja presjeka vodova prikazani su u tablici 5.10.

**Tablica 5.10.** Ukupni gubici mreže uz povećanje presjeka vodova

Maksimalno opterećenje		Minimalno opterećenje	
Djelatni gubici $P_g$ [MW]	Jalovi gubici $Q_g$ [Mvar]	Djelatni gubici $P_g$ [MW]	Jalovi gubici $Q_g$ [Mvar]
0,56	4,32	0,10	-0,41

Usporedbom tablice 5.5. i tablice 5.10. kod maksimalnog opterećenja može se uočiti značajno smanjenje djelatnih gubitaka i blago smanjenje jalovih gubitaka. Pri minimalnom opterećenju ne postiže se primjetno smanjenje gubitaka.

### 5.4. Prelazak na višu naponsku razinu

Prelazak na višu naponsku razinu rezultira manjom vrijednosti struje čime dolazi i do smanjenja gubitaka. Metoda prelaska na višu naponsku razinu bit će odrađena tako da se dio 10 kV mreže prebaci na 20 kV napon. Transformatori 35/10 (1) i 35/10 (2) se prebacuju na prijenosni omjer 35/20 kV, a transformatori 20/10 TS6 i 20/10 TS11 se izbacuju iz mreže.

Također bilo je potrebno promijeniti nazivne napone odgovarajućih vodova i sabirnica s 10 na 20 kV.

**Tablica 5.11.** *Ukupni gubici mreže uz prelazak na višu naponsku razinu*

Maksimalno opterećenje		Minimalno opterećenje	
Djelatni gubici $P_g$ [MW]	Jalovi gubici $Q_g$ [Mvar]	Djelatni gubici $P_g$ [MW]	Jalovi gubici $Q_g$ [Mvar]
0,52	4,04	0,09	-0,50

Usporedbom tablice 5.5. i tablice 5.11. kod maksimalnog opterećenja uočava se značajno smanjenje i djelatnih i jalovih gubitaka mreže, a kod minimalnog opterećenja blago smanjenje gubitaka.

**Tablica 5.12.** *Ukupna tablica gubitaka svih mjera*

	Maksimalno opterećenje		Minimalno opterećenje	
	Djelatni gubici $P_g$ [MW]	Jalovi gubici $Q_g$ [Mvar]	Djelatni gubici $P_g$ [MW]	Jalovi gubici $Q_g$ [Mvar]
<b>Bez mjera</b>	0,61	4,33	0,10	-0,41
<b>Jedan distribuirani izvor</b>	0,6	4,29	0,10	-0,42
<b>Tri distribuirana izvora</b>	0,58	4,18	0,10	-0,44
<b>Kompenzacija jalove snage</b>	0,59	4	0,10	-0,43
<b>Povećanje presjeka vodova</b>	0,56	4,32	0,10	-0,41
<b>Prelazak na višu naponsku razinu</b>	0,52	4,04	0,09	-0,50

Iz tablice 5.12 vidljivo je da se najveće smanjenje gubitaka ostvaruje metodom prelaska na višu naponsku razinu, zatim redom povećanje presjeka vodova, slučaj s tri distribuirana izvora, kompenzacija jalove snage te na kraju slučaj s jednim priključenim distribuiranim izvorom.

## 6. EKONOMSKA ANALIZA MJERA

U šestom poglavlju bit će napravljena ocjena isplativosti svake pojedine mjere za smanjenje gubitaka određivanjem perioda povrata investicije. Kako bi se mogao odrediti period povrata investicije mora se odrediti cijena gubitaka električne energije, a Hrvatska energetska regulatorna agencija (HERA) je odlučila da trošak energije za pokrivanje gubitaka u distributivnoj mreži za 2021. godinu iznosi 420,22 kn/MWh [20]. U mreži su zadana i maksimalna i minimalna opterećenja. Ukupni godišnji trošak za pokrivanje gubitaka tada će se računati uz pretpostavku da je pola godine, odnosno 4380 sati, vladalo maksimalno, a drugu polovicu, odnosno preostalih 4380 sati, minimalno opterećenje. Stoga trošak pokrivanja gubitaka mreže u slučaju bez ikakvih mjera, pomoću tablice 5.12., može se odrediti na sljedeći način:

$$(0,61 \cdot 4380 + 0,10 \cdot 4380) \cdot 420,22 = 1\,306\,800 \frac{kn}{god} \quad (6 - 1)$$

Dakle ukupni trošak za pokrivanje gubitaka distributivne mreže iznosi 1 306 800 kn/god.

Mjera smanjenja gubitaka dodavanjem distribuirane proizvodnje prvo je izvedena dodavanjem jednog sinkronog generatora snage 0,125 MW. Sinkroni generatori često se nalaze u elektranama na biomasu. Prema [21], približni specifični investicijski troškovi za elektranu na biomasu iznose otprilike 2900 EUR/kW iz čega proizlazi da bi postrojenje snage 0,125 MW koštalo 362 500 EUR odnosno oko 2 700 000 kn. Iz tablice 5.12. vidljivo je da se dodavanjem distribuiranog izvora postiglo neznatno smanjenje gubitaka čime trošak za pokrivanje gubitka sada iznosi:

$$(0,6 \cdot 4380 + 0,10 \cdot 4380) \cdot 420,22 = 1\,288\,000 \frac{kn}{god} \quad (6 - 2)$$

Dakle postigla se godišnja ušteda od:

$$1\,306\,800 - 1\,288\,000 = 18\,800 \frac{kn}{god} \quad (6 - 3)$$

Postrojenja koja proizvode električnu energiju iz obnovljivih izvora energije imaju poticajnu cijenu električne energije koja u slučaju elektrane na biomasu instalirane snage do uključivo 300 kW iznosi 1,30 kn/kWh [22]. Ako postrojenje radi tijekom cijele godine steći će profit:

$$125 \text{ kW} \cdot 8760 \text{ h} \cdot 1,30 \frac{kn}{kWh} = 1\,423\,500 \frac{kn}{god} \quad (6 - 4)$$

Povrat ukupne investicije tada iznosi:

$$\frac{2\,700\,000}{1\,423\,500 + 18\,800} = 1,87 \text{ god} \quad (6 - 5)$$

Vrijeme povrata investicije trebalo bi biti manje od 2 godine, ali taj povrat investicije odnosi se na vlasnika postrojenja koji stječe profit zbog prodaje električne energije. Gledajući samo sa stajališta smanjenja gubitaka povrat investicije tada iznosi:

$$\frac{2\,700\,000}{18\,800} = 143,6 \text{ god} \quad (6 - 6)$$

Uz ostvarenu uštedu u pokrivanju gubitaka, povrat investicije trebao bi se dogoditi za 143,6 godina. U drugom slučaju dodana su još dva sinkrona generatora, jedan snage 0,25 MW, a drugi snage 0,15 MW. Investicija potrebna za ugradnju ta dva generatora iznosi 8 700 000 kn. Dakle ukupna investicija potrebna za ugradnju sva tri generatora iznosi 11 400 000 kn. Pomoću tablice 5.12. može se izračunati godišnji trošak za pokrivanje gubitaka:

$$(0,58 \cdot 4380 + 0,10 \cdot 4380) \cdot 420,22 = 1\,252\,000 \frac{\text{kn}}{\text{god}} \quad (6 - 7)$$

Ostvarena godišnja ušteda tada iznosi:

$$1\,306\,800 - 1\,252\,000 = 54\,800 \frac{\text{kn}}{\text{god}} \quad (6 - 8)$$

Profit ostvaren proizvodnjom električne energije sva tri generatora iznosi:

$$(125 + 250 + 150) \text{ kW} \cdot 8760 \text{ h} \cdot 1,30 \frac{\text{kn}}{\text{kWh}} = 6\,000\,000 \frac{\text{kn}}{\text{god}} \quad (6 - 9)$$

Povrat ukupne investicije jednak je:

$$\frac{11\,400\,000}{6\,000\,000 + 54\,800} = 1,88 \text{ god} \quad (6 - 10)$$

Povrat investicije gledajući samo sa stajališta smanjenja gubitaka iznosi:

$$\frac{11\,400\,000}{54\,800} = 208 \text{ god} \quad (6 - 11)$$

Povrat investicije sa stajališta vlasnika postrojenja trebao bi se dogoditi za manje od 2 godine, dok povrat investicije gledajući samo smanjenje gubitaka iznosi 208 godina. S obzirom da je tema ovog rada smanjenje gubitaka, u analizi će biti korišten povrat investicije sa stajališta

smanjenja gubitaka mreže. U računu u obzir nisu uzeti troškovi goriva, održavanja, osoblja, poreza, amortizacije i sl.

Druga mjera za smanjenje gubitaka bila je kompenzacija jalove snage koja je ostvarena dodavanjem kondenzatorske baterije snage 4 Mvar na 35 kV sabirnicu. Tokovi jalovih snaga stvaraju veće gubitke i padove napona od tokova djelatne snage te je stoga često isplativa ugradnja kondenzatorskih baterija za kompenzaciju jalovih snaga. Prema [23], prosječna cijena kondenzatorske baterije iznosi 22,5 kn/kvar što znači da bi se za kondenzatorsku bateriju snage 4 Mvar moralo izdvojiti 90 000 kn. Pomoću tablice 5.12. može se izračunati ukupan trošak za pokrivanje gubitaka nakon ugradnje kondenzatorske baterije:

$$(0,59 \cdot 4380 + 0,10 \cdot 4380) \cdot 420,22 = 1\,270\,000 \frac{kn}{god} \quad (6 - 12)$$

Usporedbom dobivenih troškova i troškova bez dodatnih mjera dobivenih formulom (6-1) može se dobiti ostvarena godišnja ušteda:

$$1\,306\,800 - 1\,270\,000 = 36\,800 \frac{kn}{god} \quad (6 - 13)$$

Uz ostvarenu godišnju uštedu od 36 800 kn/god i investiciju od 90 000 kn može se odrediti povrat investicije:

$$\frac{90\,000}{36\,800} = 2,44 \text{ god} \quad (6 - 14)$$

Dakle povrat investicije trebao bi se dogoditi za otprilike 2,5 godine. U obzir nisu uzeti troškovi priključenja kondenzatorske baterije.

Sljedeća mjera za smanjenje gubitaka jest povećanje presjeka vodova. Postoji više mogućih rješenja: zamjena vodiča s vodičem većeg presjeka, zamjena i stupova i vodiča te izgradnja potpuno novog dalekovoda. Zamjena vodiča je ekonomski najjeftinije rješenje [24]. U simulaciji je povećan presjek samo trima nadzemnim vodovima s 95 mm<sup>2</sup> na 120 mm<sup>2</sup> s obzirom da je presjek ostalih vodova barem 120 mm<sup>2</sup> ili veći. Prema [25], cijena zamjene nadzemnih vodova iznosi otprilike 143 000 kn/km, a s obzirom da je ukupna duljina sva tri voda 31,47 km, dođemo do potrebne investicije u iznosu od 4 500 000 kn. Pomoću tablice 5.12. može se izračunati ukupan trošak za pokrivanje gubitaka nakon povećanja presjeka vodova:

$$(0,56 \cdot 4380 + 0,10 \cdot 4380) \cdot 420,22 = 1\,215\,000 \frac{kn}{god} \quad (6 - 15)$$

Stoga slijedi da je postignuta godišnja ušteda jednaka:

$$1\,306\,800 - 1\,215\,000 = 91\,800 \frac{kn}{god} \quad (6 - 16)$$

Uz ostvarenu godišnju uštedu i potrebnu investiciju može se izračunati povrat investicije koji iznosi:

$$\frac{4\,500\,000}{91\,800} = 49 \text{ god} \quad (6 - 17)$$

Sljedeća mjera za smanjenje gubitaka jest prelazak na višu naponsku razinu. Prelaskom na višu naponsku razinu postiže se smanjenje gubitaka i povećava se prijenosna moć mreže. Prilikom implementacije ove metode potrebno je zamijeniti svu opremu deklariranu za 10 kV napon i zamijeniti ju opremom za 20 kV napon [26]. Dakle, potrebno je zamijeniti sve 10 kV vodove s 20 kV vodovima. Postoje tri nadzemna voda koja je potrebno zamijeniti i jedan kabel. Prema [26], cijena zamjene kabela iznosi 250 000 kn/km. Cijena zamjene nadzemnih vodova iznosi 143 000 kn/km [25]. Stoga ukupna investicija iznosi nešto više od 4 000 000 kn. Ostvareno je značajno smanjenje gubitaka te sada troškovi za pokrivanje gubitaka iznose:

$$(0,52 \cdot 4380 + 0,09 \cdot 4380) \cdot 420,22 = 1\,123\,000 \frac{kn}{god} \quad (6 - 18)$$

Ostvarena je godišnja ušteda u iznosu:

$$1\,306\,800 - 1\,123\,000 = 183\,800 \frac{kn}{god} \quad (6 - 19)$$

Prema tome može se dobiti povrat investicije:

$$\frac{4\,000\,000}{183\,800} = 22 \text{ god} \quad (6 - 20)$$

Povrat investicije trebao bi se dogoditi za otprilike 22 godine. U izračun nisu uzeti ostali troškovi poput zamjene izolacije, odvodnika prenapona, moguća zamjena transformatora i sl.

Bilo bi ostvareno još veće smanjenje gubitaka i još veća ušteda ako bi se uvela direktna transformacija 110/20 kV, tj. kada bi se izbacila i 35 kV mreža.

**Tablica 6.1. Ekonomska analiza mjera za smanjenje gubitaka**

	Distribuirana proizvodnja		Kompenzacija jalove snage	Povećanje presjeka vodova	Prelazak na višu naponsku razinu
	Jedan distribuirani izvor	Tri distribuirana izvora			
Investicija [kn]	2 700 000	11 400 000	90 000	4 500 000	4 000 000
Ostvarena ušteta [kn/god]	18 800	54 800	36 800	91 800	183 800
Povrat investicije [god]	143,6	208	2,5	49	22

Prema tablici 6.1. najmanje je potrebno investirati u priključak kondenzatorske baterije i ta investicija iznosi 90 000 kn. Zatim slijedi distribuirana proizvodnja čija investicija iznosi 2 700 000 kn pa prelazak na višu naponsku razinu s investicijom od 4 000 000 kn i povećanje presjeka vodova s investicijom od 4 500 000 kn. Kao najskuplja mjera pokazao se priključak tri distribuirana izvora odnosno tri sinkrona generatora čija investicija iznosi 11 400 000 kn. Dakle, s obzirom na potrebne investicije najisplativija mjera bi bila kompenzacija jalove snage, a najmanje isplativa priključenje većeg broja distribuiranih izvora.

Najveću ostvarenu godišnju uštedu ostvarila bi mjera prelaska na višu naponsku razinu i to u iznosu od 183 800 kn/god. Povećanje presjeka vodova ostvarilo bi uštedu od 91 800 kn/god što je više nego dvostruko manje od mjere prelaska na višu naponsku razinu. Slučaj priključenja tri distribuirana izvora donosi godišnju uštedu u iznosu od 54 800 kn/god. Ušteta ostvarena kompenzacijom jalove snage iznosi 36 800 kn/god što je gotovo dvostruko više od uštete ostvarene dodavanjem jednog distribuiranog izvora koja iznosi 18 800 kn/god. Daleko najveća ušteta ostvarena je prelaskom na višu naponsku razinu. Ta ušteta je dvostruko veća od sljedeće najveće uštete ostvarene povećanjem presjeka vodova te čak deseterostruko veća od uštete ostvarene jednim distribuiranim izvorom koja ima najmanji iznos.



S obzirom na vrijeme povrata investicije daleko najisplativija metoda bila bi kompenzacija jalove snage prije svega zbog svoje male investicije. Povrat investicije trebao bi se dogoditi za 2,5 godine. Sljedeća metoda s najmanjim periodom povratka investicije jest prelazak na višu naponsku razinu s periodom povratka od 22 godine. To je gotovo deset puta veći period povratka investicije od kompenzacije jalove snage. Za povećanje presjeka vodova povratni period investicije iznosio bi 49 godina. Povrat investicije priključenja jednog distribuiranog izvora iznosi 143,6 godina, dok za tri takva izvora iznosi čak 208 godina.

Ukoliko bi se gledalo kratkoročno kompenzacija jalove snage bila bi najisplativija mjera zbog svoje male investicije, relativno dobre godišnje uštede novca i brzog povratka investicije. No ukoliko bi se gledalo dugoročno, najisplativija mjera bila bi prelazak na višu naponsku razinu zbog ostvarene daleko najveće godišnje uštede novca i prihvatljivog perioda povratka investicije.

## 7. ZAKLJUČAK

Smanjenje gubitaka jedan je od najvažnijih ciljeva HEP-ODS-a. Smanjenjem gubitaka dolazi do smanjivanja emisija CO<sub>2</sub>, smanjuje se potrošnja energenata i ostvaruje se ušteda novca. U ovom radu opisana je distributivna mreža i njeni osnovni elementi te metode za smanjenje gubitaka kao što su distribuirana proizvodnja, kompenzacija jalove snage, povećanje presjeka vodova, prelazak na višu naponsku razinu, upravljanje potrošnjom. Simulacijom je pokazano da sve opisane mjere uzrokuju smanjenje gubitaka, ali u različitoj mjeri. Distribuirana proizvodnja, uz smanjenje gubitaka, rezultira uštedom energenata i smanjenjem emisija CO<sub>2</sub>, kompenzacija jalove snage uzrokuje smanjenje tokova jalovih snaga kroz mrežu čime se postižu manji padovi napona i manje opterećenje vodova, povećanje presjeka vodova povećava njihov kapacitet i smanjuje padove napona, a prelazak na višu naponsku razinu povećava prijenosnu moć mreže. Ekonomska analiza je pokazala da će se povrat investicije najprije dogoditi u slučaju kompenzacije jalove snage, dok prelazak na višu naponsku razinu dugoročno osigurava daleko najveće novčane uštede za pokrivanje gubitaka. Ipak, još uvijek ima puno mjesta za napredak u implementaciji ovakvih mjera za smanjenje gubitaka distributivne mreže i implementaciju novih mjera kao što je upravljanje potrošnjom gdje se kupac motivira za korištenje električne energije onda kada elektroenergetskom sustavu to odgovara.

## LITERATURA

- [1] L. Gudelj: Utjecaj distribuirane proizvodnje na smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži, Diplomski rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2020.
- [2] M. Barišić: Strategije za smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži 35 kV DP Elektroslavonije Osijek, Diplomski rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2020.
- [3] K. Trupinić: Mjere za smanjenje gubitaka u distribucijskoj mreži, Magistarski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva Zagreb, 2005.
- [4] R. Goić, E. Mudnić, D. Milun: Struktura gubitaka snage i energije u srednjenaponskoj distributivnoj mreži, IV simpozij o elektrodistribucijskoj djelatnosti HK Cigre / Velebit, Zagreb, 2002.
- [5] N. Budim: Kompenzacija jalove snage kao mjera energetske učinkovitosti, Završni rad, Fakultet elektrotehnike računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2020.
- [6] R. Goić, D. Jakus, I. Penović: Distribucija električne energije, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split, 2008.
- [7] B. Skalicki, J. Grilec: Električni strojevi i pogoni, Zagreb, 2004.
- [8] L. Štrac: Modeliranje elektromagnetskih svojstava čelika za proračun dodatnih gubitaka u energetskim transformatorima, Doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike i računarstva Zagreb, 2010.
- [9] L. Jozsa: Nadzemni vodovi, ETF, Osijek, 2001.
- [10] M. Delimar: Prijenos i razdjela električne energije, Zapisi s predavanja, Fakultet elektrotehnike i računarstva Zagreb, 2017.
- [11] I. Santica: Dileme o načinu izvedbe priobalnih zaštita 110 kV podmorskih kabela, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije, Umag, pp. 1-8, 16.-19. svibnja 2010.
- [12] D. Šljivac: Integracija OIE i napredne mreže, Predavanja, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2020.
- [13] S. Nikolovski: Prijenos i distribucija električne energije, Predavanja, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2020.

- [14] M. Poljak, D. Brkić, L. Wagmann, S. Žutobradić: Usporedba gubitaka električne energije u europskim državama, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije, Opatija, pp. 1-10, 13.-16. svibnja 2018.
- [15] T. Gönen: Electric power distribution engineering, Third edition, CRC Press, 2014.
- [16] HEP - Operator distribucijskog sustava: Naknada za prekomjernu jalovu energiju, Dostupno na linku: <https://www.hep.hr/ods/korisnici/savjeti-kupcima/naknada-za-prekomjernu-jalovu-energiju/579> , pristup ostvaren 6.4.2021.
- [17] CS d.o.o.: Kompenzacija jalove energije – uređaji za kompenzaciju jalove energije. Dostupno na linku: <https://kondenzatori.hr/kompenzacija-jalove-energije/> , pristup ostvaren 31.3.2021.
- [18] TRACTEBEL engineering: Identifying energy efficiency improvements and saving potential in energy networks, including analysis of the value of demand response, Brussels, Belgium, 2015.
- [19] D. Šćulac, A. Pavlinić, D. Damjanić: Pregled mogućnosti upravljanja potrošnjom, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije, Opatija, pp. 1-9, 13.-16. svibnja 2018.
- [20] Hrvatska energetska regulatorna agencija: Odluka o davanju suglasnosti na Godišnji plan nabave energije za pokriće gubitaka u distributivnoj mreži za 2021. godinu, Zagreb, 30. prosinca 2020. Dostupno na linku: [https://www.hera.hr/hr/docs/2020/Odluka\\_2020-12-30\\_01.pdf](https://www.hera.hr/hr/docs/2020/Odluka_2020-12-30_01.pdf) , pristup ostvaren 25.6.2021.
- [21] B. Čosić: Analiza potencijala izgradnje energetskih postrojenja loženih različitim tipovima biomase u Hrvatskoj i odabir lokacija, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2008.
- [22] Narodne novine: Tarifni sustav za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije, 2013. Dostupno na linku: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013\\_11\\_133\\_2888.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013_11_133_2888.html) , pristup ostvaren 25.6.2021.
- [23] B. Posedel, P. Posedel: Tehno-ekonomska kompenzacija jalove snage distributivnih transformatora SN/NN, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije, Trogir/Seget Donji, pp. 1-13, 11.-14. svibnja 2014.

[24] I. Modrić, Ž. Modrić, I. Petrović: Smjernice za određivanje zahvata na vodovima u PrP Osijek, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije, Sveti Martin na Muri, pp. 1-9, 13-16. svibnja 2012.

[25] A. Hajdu, D. Smojver, F. Klarić, T. Kezele: Pristup rekonstrukciji SN ZDV sa samonosivim kabelima, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije, Trogir/Seget Donji, pp. 1-8, 11.-14. svibnja 2014.

[26] N. Gašparović, G. Grgurić, M. Volarić: Prijelaz na 20 kV srednjenaponske mreže Riječkog prstena – pristup realizaciji, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije, Osijek, pp. 1-10, 15.-18. svibnja 2016.

## SAŽETAK

U ovom diplomskom radu opisana je distributivna mreža, njezine osnovne strukture i dijelovi kao što su distributivni transformatori, nadzemni vodovi i kabeli te potrošači. Cilj diplomskog rada je utvrditi koja metoda nudi najbolje rješenje za smanjenje gubitaka distributivne mreže pomoću tehnno-ekonomske analize. Metode obrađene u radu su: dodavanje distribuirane proizvodnje, kompenzacija jalove snage, povećanje presjeka vodova, prelazak na višu naponsku razinu te metoda upravljanja potrošnjom koja još nije u upotrebi, ali ima veliki potencijal u smanjenju gubitaka. Sve metode osim upravljanja potrošnjom simulirane su u programskom paketu DIgSILENT PowerFactory te su sve metode ostvarile određeno smanjenje gubitaka. Za svaku metodu određen je period povrata investicije kako bi se odredila najisplativija metoda.

**Ključne riječi:** DIgSILENT PowerFactory, distributivna mreža, ekonomska analiza, smanjenje gubitaka distributivne mreže

## **ABSTRACT**

This thesis describes the distribution network, its basic structures, and parts such as distribution transformers, overhead lines, cables, and consumers. The aim of the thesis is to determine which method offers the best solution for reducing the losses of distribution networks using techno-economic analysis. The methods covered in this paper are addition of distributed generation, reactive power compensation, increase the cross section of the lines, transition to a higher voltage level and energy management method that is not yet in use, but has great potential in loss reduction. All methods except energy management were simulated in the DIgSILENT PowerFactory software package and all methods achieved a certain loss reduction. For each method, a payback period is determined to determine the most cost-effective method.

**Key words:** DIgSILENT PowerFactory, distribution network, economic analysis, reduction of distribution network losses

## **TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF LOSS REDUCTION MEASURES IN THE DISTRIBUTION NETWORK**