

Kompenzacija visokonaponskog dalekovoda serijskim ili paralelnim komponentama

Majdančić, Petar

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:200:941774>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-21**

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

**KOMPENZACIJA VISOKONAPONSKOG DALEKOVODA
SERIJSKIM ILI PARALELNIM KOMPONENTAMA**

Završni rad

Petar Majdančić

Osijek, 2023.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Osijek, 01.09.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Ime i prezime Pristupnika:	Petar Majdančić
Studij, smjer:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	4847, 29.07.2020.
OIB Pristupnika:	49849114927
Mentor:	izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
Sumentor:	,
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Kompenzacija visokonaponskog dalekovoda serijskim ili paralelnim komponentama
Znanstvena grana rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rad:	Objasniti princip kompenzacije visokonaponskih dalekovoda serijskim i paralelnim komponentama. Ilustrirati primjenu serijskih i paralelnih elemenata na primjeru proračuna struja i napona pomoću nadomjesnih shema i računalnog programa. Tema rezervirana za: Petar Majdančić
Prijedlog ocjene završnog 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 od strane mentora:	01.09.2023.
Datum potvrde ocjene od strane Odbora:	08.09.2023.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

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

Osijek, 09.09.2023.

Ime i prezime studenta:

Petar Majdančić

Studij:

Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

Mat. br. studenta, godina upisa:

4847, 29.07.2020.

Turnitin podudaranje [%]:

9

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Kompencizacija visokonaponskog dalekovoda serijskim ili paralelnim komponentama**

izrađen pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete

i sumentora ,

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

Potpis studenta:

Sadržaj

1. UVOD	1
1.1. Zadatak završnog rada.....	2
2. PREGLED PODRUČJA TEME	3
3. ELEKTROENERGETSKI SUSTAV	5
3.1. Dijelovi EES-a.....	5
3.1.1. Proizvodnja električne energije.....	5
3.1.2. Prijenos električne energije.....	6
3.1.3. Distribucija električne energije	9
3.1.4. Potrošnja električne energije.....	9
3.2. Naponske prilike	10
3.2.1. Nazivni napon	10
3.2.2. Padovi napona.....	10
4. KOMPENZACIJA	15
4.1. Serijska kompenzacija.....	15
4.1.1. Serijski kondenzator	15
4.1.2. Serijski FACTS uređaji.....	19
4.2. Paralelna kompenzacija.....	20
4.2.1. Paralelna prigušnica	20
4.2.2. Paralelni FACTS uređaji.....	21
4.3. Kombinirana kompenzacija.....	24
4.3.1. Serijsko-paralelna kompenzacija	24
4.3.2. Serijsko-serijska kompenzacija.....	24
5. PRORAČUN STRUJNO-NAPONSKIH PRILIKA NA 400 kV VODU BEZ KOMPENZACIJE I SA KOMPENZACIJOM	26
5.1. Paralelna kompenzacija.....	26
5.2. Serijska kompenzacija.....	33
6. ZAKLJUČAK	37
LITERATURA	38
SAŽETAK	40
ABSTRACT	40

1. UVOD

Prijenosna mreža povezuje proizvodnju i distribuciju električne energije. Najčešće trošimo električnu energiju koja je proizvedena u elektranama udaljenim više stotina kilometara. S povećanjem zahtjeva za električnom energijom javlja se potreba za učinkovitijom prijenosnom mrežom. Cilj je prenijeti što veću količinu električne energije sa što manjim gubicima. Zbog toga se razvila potreba za kompenzacijskim uređajima koji već postojeću mrežu čine učinkovitijom.

Autor rada [1] analizira metodologiju regulacije napona u prijenosnoj mreži elektroenergetskog sustava u programskom paketu NEPLAN. Autor rada [2] daje pregled reaktivnih komponenti koje se koriste u distributivnoj mreži te radi proračun strujno-naponskih prilika na primjeru dijela distributivne mreže. Autor rada [3] provodi analizu mogućnosti primjene UPFC uređaja u prijenosnoj mreži u programskom paketu DIgSILENT Power Factory 2021. Autor rada [4] analizira točnost i pogreške pri korištenju različitih modela elektroenergetskih vodova. Autor rada [5] simulira utjecaje postavljanja tiristorski upravljive prigušnice i tiristorski uklopivih kondenzatora na prijenosnom području Osijek. Autor rada [6] izvršava proračun tokova snaga na primjeru IEEE testne mreže.

U ovom radu su na primjeru 400 kV voda prikazani utjecaji naknadnog spajanja kompenzacijskih komponenata. Za paralelnu kompenzaciju izvršena su mjerenja u laboratoriju, simulacija u programskom paketu Easy Power te ručni proračun za te slučajeve. Za serijsku kompenzaciju izvršen je proračun pomoću π sheme.

Završni rad započinje uvodom i pregledom područja teme. Pregled područja teme prolazi kroz radove sa sličnim i povezanim temama kako bi pojasnili kako se ovaj završni rad razlikuje od ostalih iz istog područja. Treće poglavlje naziva se Elektroenergetski sustav. Poglavlje opisuje sve dijelove elektroenergetskog sustava od proizvodnje, prijenosa, distribucije i potrošnje električne energije. Ukratko je analiziran svaki dio pojedinačno i pojašnjeni najvažniji aspekti svakog dijela, kod proizvodnje složenost izjednačavanja proizvodnje i potrošnje, kod prijenosa i distribucije učinkovitost i smanjenje gubitaka te su za kraj podijeljeni potrošači i opisana mjerila kvalitete električne energije koju zahtijevaju. Naglasak je stavljen na prijenos električne energije koji će se u dalje u radu detaljnije analizirati. Treće poglavlje nastavlja se naponskim prilikama, prvo općenito o naponu, zatim naponske prilike u visokonaponskom dalekovodu. Rad se nastavlja poglavljem nazvanim kompenzacija gdje se detaljnije ulazi u prijenos električne energije te uređaje za rješavanje problema stabilnosti, prijenosne moći, smanjenja oscilacija, osobina sustava u

prijelaznim stanjima te uravnoteženja jalove snage. Kompenzacijski uređaji se dijele na statičke i dinamičke te serijske i paralelne. Od statičkih uređaja opisani su kondenzator i prigušnica, a od dinamičkih FACTS (eng. flexible alternating current transmission system, hrv. fleksibilni izmjenični prijenosni sustavi) uređaji. Rad se završava analizom naponskih prilika za dva načina kompenzacije, serijske i paralelne. Za paralelnu kompenzaciju izvršena su mjerenja u laboratoriju, simulacija u programskom paketu EasyPower te ručni proračun pomoću π sheme. Kada je u pitanju serijska kompenzacija odrađena je simulacija u programskom paketu EasyPower te ručni proračun pomoću π sheme.

1.1. Zadatak završnog rada

Objasniti princip kompenzacije visokonaponskih dalekovoda serijskim i paralelnim komponentama. Ilustrirati primjenu serijskih i paralelnih elemenata na primjeru proračuna struja i napona pomoću nadomjesnih shema i računalnog programa.

2. PREGLED PODRUČJA TEME

Autor rada [1] analizira metodologiju regulacije napona u prijenosnoj mreži elektroenergetskog sustava. U radu su opisane vrste regulacije, primarna, sekundarne i tercijarna te uređaji poput regulacijske prigušnice, kondenzatorskih baterija i FACTS uređaja koji reguliraju napon. U programskom paketu NEPLAN prikazana je regulacija napona na prijenosnom dijelu mreže pri poremećenom stanju sa povećanim naponom iznad dozvoljenih vrijednosti. Visoki naponi iznad dozvoljenih vrijednosti regulirani su visokonaponskom prigušnicom. Pri simulaciji visokonaponska prigušnica vršila je kompenzaciju viška jalove snage u mreži i donijela željene razine napona na sabirnicama.

Autor rada [2] daje pregled reaktivnih komponenti koje se koriste u distributivnoj mreži te radi proračun strujno-naponskih prilika na primjeru dijela distributivne mreže. Rad započinje opisivanjem distributivnog sustava te usporedbom distributivnog sustava Europe i Sjeverne Amerike. Zatim autor opisuje kompenzaciju jalove snage sa kondenzatorom i definira načine spajanja kondenzatora te analizira način poboljšanja faktora snage. Nakon toga opisane su nadomjesne sheme voda, transformatora i potrošača te pomoću njih izveden proračun strujno-naponskih prilika dijela mreže.

Autor rada [3] provodi analizu mogućnosti primjene UPFC uređaja u prijenosnoj mreži. Cilj rada je odrediti optimalne veličine FACTS-UPFC uređaja u realnoj mreži sa naglaskom na regulaciju napona i jalove snage. U programskom paketu DIgSILENT Power Factory 2021 je modeliran UPFC uređaj te analizirana i tehnička i ekonomska strana takvog uređaja te na osnovu toga je donesen zaključak o isplativosti takvog uređaja.

Autor rada [4] analizira točnost i pogreške pri korištenju različitih modela elektroenergetskih vodova. Zaključuje da se kod vodova kraćih od 200km ne moraju računati korekcijski članovi što znatno pojednostavljuje račun jer se dobiju rezultati zadovoljavajuće točnosti. Za vodove duže od 200km potrebno je računati korekcijske članove. Također pri proračunu snage preferira se korištenje π modela zbog manje pogreške nego kod T modela. Proračuni su izvršeni pomoću modela na vrlo visokom naponu (400 kV).

Autor rada [5] rad počinje opsežnim teorijskim uvodom opisujući model mreže i svaki njen parametar, otpor, induktivitet, kapacitet te odvod. Zatim daje pregled analize tokova snage, kompenzacije jalove snage te FACTS uređaja i njihove implementacije. Rad završava eksperimentalnim dijelom gdje se promatra Prijenosno područje Osijek, dio prijenosne mreže

Republike Hrvatske. Simulirani su utjecaji postavljanja tiristorski upravljive prigušnice i tiristorskih uklopivih kondenzatora, analizirani njihovi utjecaji na gubitke te predloženo rješenje kojim se postižu manji gubici i osigurava kvalitetna opskrba električnom energijom.

Autor rada [6] rad započinje opisom tradicionalnog prijenosnog sustava te nastavlja sa hrvatskim prijenosnim sustavom u prošlosti i danas. Zatim daje uvid u budućnost prijenosnih mreža, primjenu poboljšanih vodiča te korištenje FACTS uređaja u postojećem prijenosnom sustavu. Proračun tokova snaga je izvršen na primjeru IEEE testne mreže. Simulirani su slučajevi bez kompenzacije, kompenzacija kondenzatorskim baterijama te kompenzacija SVC-om. Zaključak je da kondenzatorske baterije daju povoljne rezultate i odrađuju posao, ali FACTS uređaji podižu kompenzaciju na novu razinu.

3. ELEKTROENERGETSKI SUSTAV

Prema literaturi [8] elektroenergetski sustav je složeni sustav koji dostavlja električnu energiju u domove, tvornice i svugdje gdje je ona potrebna. Osnovna zadaća elektroenergetskog sustava je da poveže proizvođača i potrošača električne energije [8]. Grana znanosti koja se bavi elektroenergetskim sustavima naziva se elektroenergetika. Prema [8] elektroenergetika je područje elektrotehnike čiji je cilj unaprjeđenje područja proizvodnje, prijenosa, distribucije i korištenja te rješavanje problema gospodarenjem električnom energijom. Privredna grana koja se bavi kontrolom električne energije, u što spada proizvodnja, prijenos i distribucija, naziva se elektroprivreda. Hrvatska elektroprivreda organizirana je kao grupacija povezanih društava u HEP grupu. Cilj elektroprivrede je omogućiti krajnjim potrošačima električnu energiju željenih karakteristika, određene kvalitete, pouzdanosti i sigurnosti. Kako bi to ostvarili, elektrane, rasklopna postrojenja za razvod i transformaciju električne energije, vodovi za prijenos i potrošači se udružuju u elektroenergetski sustav [8]. Elektroenergetski sustav se sastoji od 4 dijela:

- Proizvodnja električne energije
- Prijenos električne energije
- Distribucija električne energije
- Potrošnja električne energije

3.1. Dijelovi EES-a

3.1.1. Proizvodnja električne energije

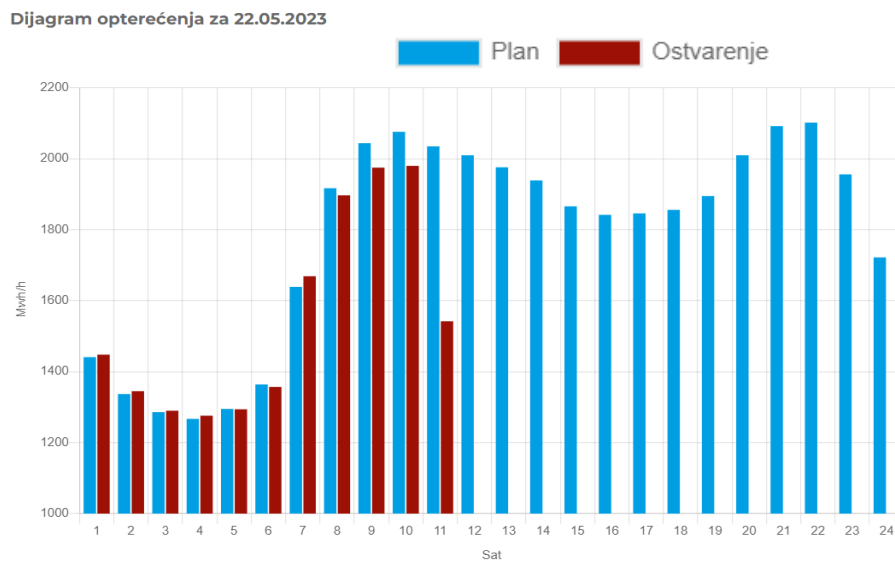
Postrojenja za proizvodnju električne energije nazivaju se elektrane. S obzirom na to da se električna energija ne može uskladištiti proizvodnja u svakom trenutku mora biti jednaka potrošnji uvećanoj za neizbježne gubitke [8].

$$\sum \text{PROIZVODNJE} = \sum \text{POTROŠNJE} + \sum \text{GUBITAKA}$$

Vrlo je važno za frekvenciju da proizvodnja bude jednaka potrošnji uvećanoj za gubitke. Ako je proizvodnja jednaka potrošnji uvećanoj za gubitke frekvencija je 50 Hz. Uređaji u elektroenergetskom sustavu, kao i potrošači, napravljeni su za rad na frekvenciji od 50 Hz. Svako značajnije odstupanje znači smanjenje učinkovitosti uređaja, smanjenje životnog vijeka i

eventualni kvar. Ako je proizvodnja veća od potrošnje frekvencija će rasti iznad željenih 50 Hz, a ako je proizvodnja manja od potrošnje frekvencija će pasti ispod željenih 50 Hz. Prema [8] za pogon generatora koji proizvode električnu energiju u elektranama se koriste pogonski strojevi, u hidroelektranama su to vodne turbine, u termoelektranama i nuklearnim elektranama parne i plinske turbine, a u vjetroelektranama vjetroturbine.

S obzirom na to da se potrošnja ne može kontrolirati proizvodnja električne energije u elektranama mora se stalno prilagođavati.



Slika 3.1. Dijagram opterećenja hrvatskog elektroenergetskog sustava za 22.5.2023. [10]

Slika 3.1. [10] predstavlja dijagram opterećenja hrvatskog elektroenergetskog sustava za 22.5.2023. u ovisnosti o doba dana. Iz dijagrama se može vidjeti da opterećenje varira ovisno o dijelu dana što predstavlja složen problem pri planiranju proizvodnje električne energije s obzirom na to da proizvodnja mora biti jednaka potrošnji. Pri proizvodnji se koriste temeljne i vršne elektrane. Temeljne elektrane su one koje pokrivaju stalnu potražnju i prilagođene su stalnom opterećenju, dok se vršne koriste za pokrivanje opterećenja koja variraju.

3.1.2. Prijenos električne energije

Prema [8] visokonaponskim prijenosnim vodovima, naponskih razina 110kV i više, električna energija se od izvora prenosi do visokonaponskih transformatora u kojima se transformira na niže naponske razine. Najviša naponska razina u Hrvatskoj je 400kV. Visoki naponi u prijenosu električne energije su poželjni s obzirom na to da gubici uzrokovani zagrijavanjem vodiča rastu s kvadratom struje prema Jouleovom zakonu [8]:

$$Q = U * I * t = I^2 * R * t \quad [J] \quad (3-1)$$

gdje je:

Q [J] – energija disipirana zagrijavanjem vodiča

U [V] - napon

I [A] - struja

R [Ω] - otpor

t [s] – vrijeme

Prijenosne mreže omogućuju korištenje proizvodnje velikih elektrana u udaljenim potrošačkim centrima. Prema [9] iz sigurnosnih razloga stupovi u prijenosnim mrežama su visoki, a vodovi međusobno udaljeni. Izolacija vodova bi bila predebela i preskupa pa se za izolaciju koristi zrak. Vodovi su povezani sa stupovima pomoću izolatora kako bi se spriječio proboj struje na uzemljene stupove [9].

Slika 3.2. predstavlja EES Republike Hrvatske sa istaknutom prijenosnom mrežom. Prijenosna mreža hrvatskog elektroenergetskog sustava sastoji se od naponskih razina od 400 kV, 220 kV te 110 kV.

VODOVI [km]	
Napon	Ukupno
400 kV	1246.28
220 kV	1268.02
110 kV	5249.23
UKUPNO	7763.53

Tablica 3.1. Duljina visokonaponskih vodova u Republici hrvatskog za svaku naponsku razinu prijenosnog sustava [10]

Podaci iz tablice 3.1. su preuzeti sa službene stranice HOPS-a i predstavljaju stanje na dan 31. prosinca 2022. godine.



Legenda:

- 400 kV dvostruki nadzemni vod
- 400 kV nadzemni vod
- 220 kV dvostruki nadzemni vod
- 220 kV nadzemni vod
- - - 220 kV kabelski vod
- 110 kV nadzemni vod
- 110 kV kabelski vod
- 110 kV podmorski kabel

- ⊙ TS 400/220/110 kV
- ⊙ TS 400/220/110 kV
- TS 400/110 kV
- ⊙ TS 220/110 kV
- ⊙ TS 220/35 kV
- TS 110/x kV
- TS (RP) 110 kV + EVP
- TS 110/x kV U IZGRADNJI
- TS 35/x kV

- TS (RP) 220 kV + TE
- TS (RP) 220 kV + HE
- ⊙ TS (RP) 110 kV + VE
- ⊙ TS (RP) 110 kV + HE
- ⊙ TS (RP) 110 kV + TE
- ⊙ TS (RP) 110 kV kupca
- ⊙ 110 kV Kabelsko postrojenje
- ▲ EVP
- TE
- ⚡ HE
- ⚡ VE

Slika 3.2. Shema EES-a Republike Hrvatske [10]

3.1.3. Distribucija električne energije

Distribucijske mreže povezuju prijenosne mreže i potrošače. Nakon što se transformatorima napon smanji na željeni iznos distribucijskim vodovima električna energija se dovodi do distribucijskih transformatorskih stanica koje se nalaze blizu potrošača. Transformatorske stanice transformiraju napone na naponske razine koje se koriste u kućanstvima i industriji. Distribucijske mreže se sastoje od vodova sa naponom do 35 kV . Planiranje distribucijske mreže je složen zadatak jer treba dovesti električnu energiju do svih potrošača te biti spremna na nove potrošače i proširenja. S obzirom na to da se distribucijskom mrežom prenose niže naponske razine nego sa prijenosnom mrežom stupovi su niži i manji od stupova u prijenosnoj mreži. U prošlosti su se iz ekonomskih razloga koristili drveni stupovi. Prema literaturi [9] danas se koriste čelični stupovi koji su, ukoliko se ispravno zaštite, vrlo trajni te stupovi od armiranog betona koji ne zahtijevaju održavanje. U distribucijskim mrežama se uz nadzemne vodove često koriste i podzemni kabeli iz logističkih razloga. U gradovima je teko osigurati slobodnu trasu za nadzemne vodove te se često pristupa korištenju podzemnih kabela [9]. Također se u distribucijskim mrežama koriste dosta jednostavniji kabeli i vodovi sa manjim izolacijama nego u prijenosnim mrežama.

3.1.4. Potrošnja električne energije

Potrošačima se smatraju uređaji koji električnu energiju pretvaraju u drugi korisni oblik energije poput toplinske, svjetlosne energije i mehaničkog rada [8]. Potrošači plaćaju električnu energiju na temelju količine potrošene energije. Kako bi mogli izmjeriti potrošenu energiju koriste se brojila kroz koja električna energija prolazi te brojilo bilježi potrošene kWh električne energije. Potrošači se dijele na:

- Male
- Srednje
- Velike

Mjerila kvalitete električne energije su:

- Frekvencija
- Napon
- Trajna raspoloživost

Frekvencija bi trebala biti konstantna uz neznatna odstupanja. Ukoliko dođe do odstupanja ona moraju biti kompenzirana kako bi srednja vrijednost frekvencije u nekom vremenu bila točno 50 Hz.

Potrošačima treba osigurati napon što bliži nazivnom naponu. Zbog padova napona kroz mrežu taj zadatak je uvelike otežan, ali se sa planiranjem mreže te uz korištenje alata za regulaciju napona pokušava približiti nazivnoj vrijednosti napona kod potrošača.

Trajna raspoloživost pokazuje sposobnost EES-a da potrošaču u svakom trenutku omogući potrebnu energiju po količini i po snazi.

3.2. Naponske prilike

Prema literaturi [11]: „Nazivni napon je napon za koji je element mreže u širem smislu (generator, transformator, vod, kondenzator, trošilo...) konstruiran i građen.“ Pri nazivnim naponima elementi imaju optimalne uvjete za rad i dulji životni vijek.

3.2.1. Nazivni napon

Uz frekvenciju jednaku nazivnoj i konstantnu opskrbu električnom energijom možda i najvažniji zadatak opskrbe električne energije je održavanje napona što bliže nazivnoj vrijednosti. Svaki element mreže, stroj, aparat ima nazivni napon pri kojem radi s najvećom učinkovitosti, najduže i bez kvarova [11]. Nazivni napon osigurava optimalan rad elemenata mreže i trošila priključenih na tu mrežu. Ako napon odstupa od nazivnog dolazi do smanjenja životnog vijeka elementa i trošila, smanjuje se radni učinak i povećavaju se troškovi operiranja. Iz toga slijedi da bi napon u svim točkama elektroenergetskog sustava trebao biti jednak nazivnom. „Iako je teoretski moguće imati konstantan napon jednak nazivnom u svakoj točki to je ekonomski ne isplativo. Također često nazivni naponi pojedinih elemenata nisu jednaki konstrukcijski optimalnim naponima kako bi se izbjeglo previše različitih naponskih razina i preveliki troškovi osiguravanja istih. Zato se uvode naponske razine kako bi se standardizirali naponi [11].“

3.2.2. Padovi napona

Prema literaturi [11] prolaz snage izaziva padove napona u uzdužnim impedancijama elemenata mreže. Promjena snage izaziva promjenu padova napona i tako dolazi do kolebanja napona u mreži. Radi lakšeg prikaza koji čimbenici utječu na padove napona dan je računski primjer: Trofaznu snagu na kraju uzdužne impedancije definiramo kao [11]:

$$\overline{S}_2 = P_2 + jQ_2 = \overline{U}_2 * \overline{I}_2 * \sqrt{3} \quad (3-2)$$

Struja kroz impedanciju je [11]:

$$\bar{I}_2 = \frac{P_2 - jQ_2}{\sqrt{3} * \bar{U}_2} \quad (3-3)$$

a pad napona će biti [11]:

$$\overline{\Delta U} = \bar{Z} * \bar{I} * \sqrt{3} = \frac{RP_2 + XQ_2}{\bar{U}_2} + j \frac{XP_2 - RQ_2}{\bar{U}_2} \quad (3-4)$$

Uz pretpostavku da je [11]:

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2 = \bar{U} \quad (3-5)$$

$$P_1 = P_2 = P \quad (3-6)$$

$$Q_1 = Q_2 = Q \quad (3-7)$$

Relativni uzdužni pad napona će biti [11]:

$$\frac{\overline{\Delta U}}{\bar{U}} = \frac{RP + XQ}{\bar{U}^2} \quad (3-8)$$

a relativni poprečni pad napona je kut fazne razlike [11]:

$$\delta = \sin \delta = \frac{XP - RQ}{\bar{U}^2} \quad (3-9)$$

U visokonaponskoj mreži otpor vodova je malen, pa ako još k tome uzmemo da struja teče i kroz transformator gdje je R praktički nula za relativni uzdužni pad napona vrijedi jednačba [11]:

$$\frac{\overline{\Delta U}}{\bar{U}} = \frac{XQ}{\bar{U}^2} \quad (3-10)$$

$$\delta = \frac{XP}{U^2} \text{ [rad]} \quad (3-11)$$

Iz prethodnih izraza može se zaključiti da [11]:

- tokovi jalovih snaga izazivaju padove napona u mreži odnosno promjene jalovih snaga izazivaju kolebanje napona
- tokovi djelatnih snaga izazivaju fazne razlike napona u mreži odnosno promjene djelatne snage izazivaju kolebanje faznih kutova

To znači da se u visokonaponskim mrežama problem održavanja napona svodi na problem regulacije jalovih snaga.

Iz izraza (3-10) vidimo koje sve veličine trebamo kontrolirati kako bi se smanjili padovi napona u mreži.

Pad napona smanjiti će se ako se:

- poveća napon U
- smanji reaktancija X
- smanji jalova snaga Q

Naravno vremenski promjenjivi padovi napona neće u potpunosti biti eliminirani, ali će biti uvelike smanjeni i kontrolirani.

Prema [11] prva stavka izraza (3-10) je povećanje napona U, odnosno izbor više naponske razine.

Ova mjera se provodi na dva načina:

- vođenje napona na već izgrađenoj mreži na gornjoj dopuštenoj razini, tj. u blizini maksimalnog pogonskog napona
- izgradnjom mreže višeg iz niza normiranih napona

Vođenje napona na već izgrađenoj mreži na najvećoj dopuštenoj razini dovodi do naprezanja mreže, nestabilnosti i raznih opasnosti. Izgradnja nove mreže zahtjeva opsežne analize kada su u pitanju financije i ne isplati se ako nema i drugih razloga za gradnju poput zastarjelosti cijele mreže, novih velikih izvora, novih potrošača na većim udaljenostima, itd.

Sljedeća stavka izraza (3-10) je smanjenje reaktancije. Prema [11] kod vodova smanjenje reaktancije može se postići:

- izgradnjom voda paralelnog postojećem
- izgradnjom dvostrukog voda umjesto jednostrukog
- primjenom vodiča u snopu umjesto s jednostrukim vodičima
- postavljanjem kabela umjesto zračnog voda
- kompenzacijom reaktancije X djelomično ili u cjelini

Prva 3 načina smanjenja reaktancije zahtijevaju značajne investicije i primjenjuju se kao i izgradnje mreže višeg napona samo ako postoje i drugi razlozi. Postavljanje kabela umjesto zračnog voda provodi se zbog ograničene dužine kabela visokog napona i velikog poprečnog kapaciteta[11]. Posljednji način smanjenja reaktancije, kompenzacije reaktancije, je najrazumnija mjera za smanjenje reaktancije voda i koristi već postojeću infrastrukturu.

Iz izraza (3-10) vidimo da će i smanjenje jalove snage u mreži izazvati manje padove napona. Cilj je siguran prijenos maksimalne količine djelatne snage uz što manje gubitke i manji tok jalove snage kroz pojedine elemente mreže. Potrošnja jalove snage smanjuje napon na čvorištima, a proizvodnja jalove snage povećava napon. To znači da upravljanjem tokova jalove snage izravno djelujemo i na iznose napona u pojedinim elementima mreže. Kompenzacijom jalove snage mreža se rasterećuje od tokova jalovih snaga, pri čemu se smanjuju prividna opterećenja elemenata mreže (generatora, transformatora i vodova) [11]. Posljedica toga su smanjeni gubici. Smanjenjem opterećenja elemenata mreže također se ostavlja i prostor za dodatni porast opterećenja.

Problemi vezani uz stabilnost napona u elektroenergetskog sustava uglavnom se javljaju kod pod opterećenih prijenosnih vodova, ali moguće je da se pojave i kod preopterećenja. Kako bi održali stabilnost i spriječili povećanje napona ugrađuju se kompenzacijski uređaji.

Normalni pogonski uvjeti	Interval napona
Mreža 400 kV	360-420 kV
Mreža 220 kV	198-242 kV
Mreža 110 kV	99-121 kV

Tablica 3.1. Normalni pogonski uvjeti prema Mrežnim pravilima (točka 4.1.6.5.) [12]

Poremećeni pogon	Interval napona
Mreža 400 kV	340-460 kV
Mreža 220 kV	187-253 kV
Mreža 110 kV	94-127 kV

Tablica 3.1. Poremećeni pogonski uvjeti prema Mrežnim pravilima (točka 4.1.6.5.) [12]

4. KOMPENZACIJA

Kompensacijski uređaji omogućuju operatorima prijenosnog sustava da izvuku najviše iz postojeće infrastrukture. U prošlosti su to bili samo visokonaponski kondenzatori u različitim konfiguracijama i visokonaponske prigušnice, a danas se primjenjuje i energetska elektronika u obliku FACTS uređaja.

S obzirom na način priključivanja na vod kompensacijski uređaji se dijele na:

- Serijske
- Paralelne

FACTS uređaji su uređaji zasnovani na energetskej elektronici koji se ugrađuju na već postojeća postrojenja te tako ekonomično maksimalno iskorištavaju mogućnosti postojeće infrastrukture [14]. Mogućnost kontroliranja parametara FACTS uređaja znači lakše održavanje stabilnosti sustava i upravljanja prijenosom snage.

Prema literaturi [14] FACTS uređaji odnosno fleksibilni izmjenični prijenosni sustavi imaju zadatak da:

- Kontroliraju napon pri različitim opterećenjima
- Uravnoteže jalovu snagu
- Povećaju stabilnost prijenosa pri većim udaljenostima
- Povećaju prijenosnu moć dalekovoda
- Poboljšaju osobine sustava u prijelaznim stanjima
- Priguše oscilacije

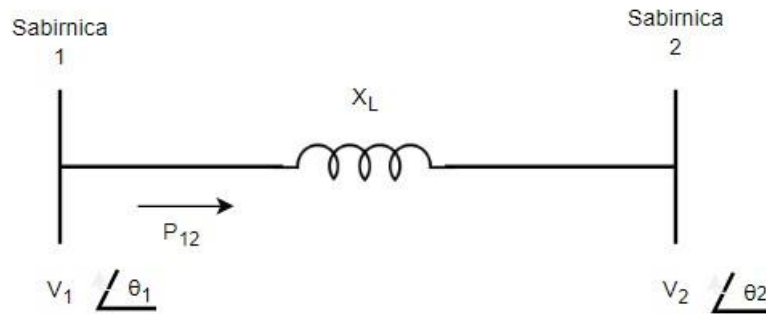
4.1. Serijska kompenzacija

Prema [13] serijska kompenzacija je primjena serijskih kompenzatora na prijenosnom vodu. Serijski kompenzatori poboljšavaju stabilnost i kapacitet prijenosnog voda tako što poništavaju dio induktivne reaktancije voda [13]. Koliki dio induktivne reaktancije poništavaju ovisi o stupnju kompenzacije.

4.1.1. Serijski kondenzator

Serijski kondenzator se primjenjuje kod vodova najviših napona pri prijenosu na velike udaljenosti. Prema [11] ako je poznata nazivna struja dalekovoda, njegova induktivna reaktancija i poželjni stupanj kompenzacije reaktancije moguće je odrediti parametre serijskog kondenzatora:

kapacitet, nazivni napon koji odgovara padu napona na njemu kod nazivne struje. Nazivnu struju nije moguće definirati jer ona ovisi o tome koliko želimo opteretiti dalekovod i dopustiti gubitke. Ako smo spremni podnijeti veće gubitke nazivna struja će biti veća i to će utjecati na sve ostale parametre, opremu u krajnjim postrojenjima i parametre serijskog kondenzatora [11]. Također je strujno opterećenje ograničeno i udaljenošću voda od tla jer veće strujno opterećenje povećava provjes voda [11].



Slika 4.1. Prijenosni vod bez kompenzacije [13]

U daljnjem tekstu $X_L = X$.

Snaga prenesena prijenosnim vodom dana je izrazom [13]:

$$P = \frac{V_2 * V_1 * \sin \delta}{X} \quad (4-1)$$

gdje je:

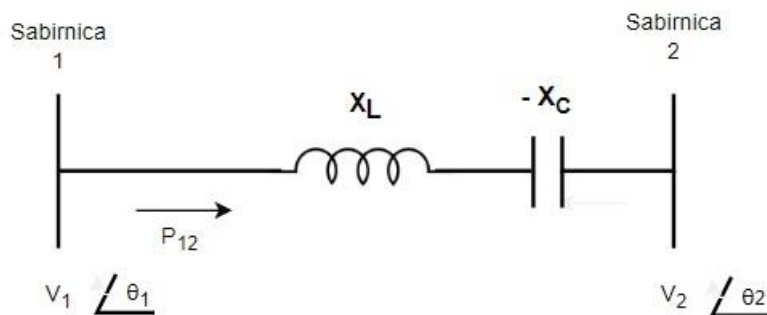
P – snaga

δ – kut između V_2 i V_1

V_1 – napon na početku voda

V_2 – napon na kraju voda

X – reaktancija prijenosnog voda



Slika 4.2. Prijenosni vod sa kondenzatorom u seriji [13]

Snaga prenesena prienosnim vodom sa kondenzatorom u seriji dana je izrazom [13]:

$$P = \frac{V_2 \cdot V_1 \cdot \sin \delta}{(X - X_C)} \quad (4-2)$$

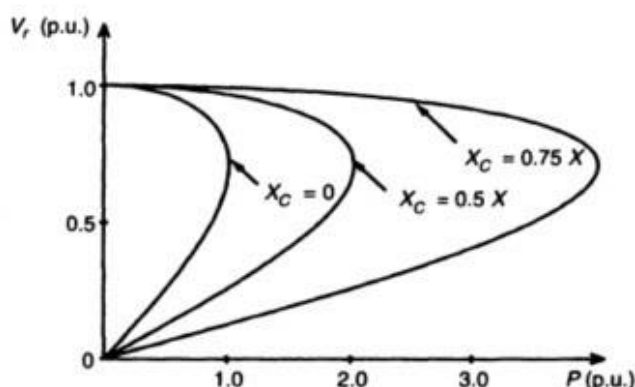
Iz izraza (4-2) se vidi da je kapacitet snage koja se može prenijeti vodom veći kada u seriji imamo kondenzator. S obzirom na to da je povećana prijenosna moć povećana je i stabilnost sustava.

Također izraz (4-2) može poprimiti oblik [13]:

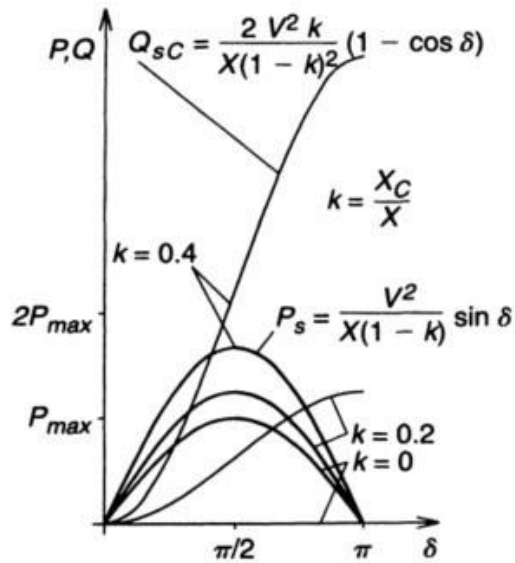
$$P = \frac{V_2 \cdot V_1 \cdot \sin \delta}{X(1-k)} \quad (4-3)$$

gdje je $k = (X_C/X)$ odnosno stupanj kompenzacije.

Prema [13] stupanj kompenzacije k je obično izražen u postocima. Ako je $k = 60\%$ to znači da je vrijednost serijskog kondenzatora u ohmima jednaka 60% vrijednosti reaktancije voda.



Slika 4.3. Ovisnost napona i prenesene snage o stupnju serijske kompenzacije [14]



Slika 4.4. Prikaz prenesene djelatne snage i reaktivne snage kompenzacijskog kondenzatora za različite kutove i stupnjeve kompenzacije [14]

Na slikama 4.4. i 4.3. i izrazu (4-4) pretpostavljeno je da vrijedi $V_1 = V_2 = V$.

Jalova snaga serijskog kondenzatora dana je izrazom [14]:

$$Q_C = I^2 * X_C = \frac{2 * V^2 * k}{X * (1 - k)^2} * (1 - \cos\delta) \quad (4-4)$$

gdje je

V – napon

k – stupanj kompenzacije

X – reaktancija voda

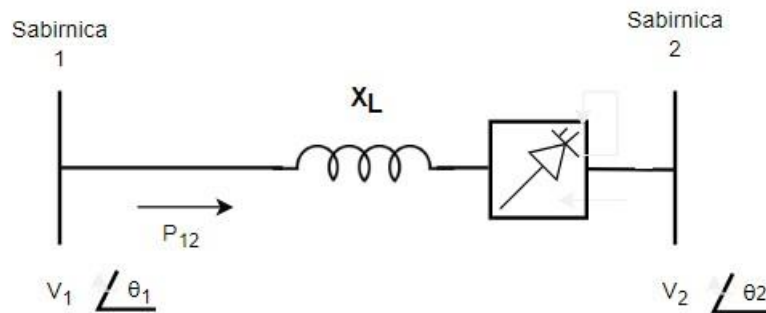
I – struja voda

X_C – reaktancija kompenzatora

δ – kut napona

Iz slika 4.3. i 4.4. zaključujemo da prenesena radna snaga P i jalova snaga kompenzatora Q_C naglo rastu sa povećanjem stupnja kompenzacije i variraju ovisno o kutu δ .

4.1.2. Serijski FACTS uređaji



Slika 4.5. Prijenosni vod sa FACTS uređajem spojenim u seriju [14]

FACTS uređaji spojeni u seriju mogu biti izvedeni kao promjenjiva impedancija, poput kondenzatora i prigušnice ili varijabilni izvori napona temeljeni na energetskej elektronici koji služe određenoj svrsi [14]. Generalno, svi serijski uređaji injektiraju napon u seriju sa vodom. Promjenjiva impedancija pomnožena sa strujom koja teče kroz nju predstavlja napon dodan u seriju sa vodom. Sve dok su napon i struja voda pod faznim kutom od 90° serijski uređaji će proizvoditi ili trošiti samo jalovu snagu. Korištenjem energetske elektronike dolazi se do serijskih uređaja koji se mogu kontrolirati i upravljati tokom snage te uz brze odzive FACTS uređaja i učinkovito održavati stabilnost sustava. Smanjivanje reaktancije voda serijskim kondenzatorom može se predočiti i kao skraćivanje voda.

Prema [15], ukoliko su serijski uređaji pravilno izvedeni nema problema sa:

- Ferorezonancijom
- Subsinkronom rezonancijom
- Spontanim osciliranjem

Prema literaturi [14] uređaji za serijsku kompenzaciju su:

- Statički sinkroni serijski kompenzator (eng. Static Synchronous Series Compenzator, SSSC)
- Tiristorski upravljivi serijski kondenzator (eng. Thyristor Controled Series Capacitor, TCSC)
- Tiristorski uklopivi serijski kondenzator (eng. Thyristor Swiched Series Capacitor, TSSC)

- Tiristorski upravljiva serijska prigušnica (eng. Thyristor Controlled Series Reactor, TCSR)
- Tiristorski uklopiva serijska prigušnica (eng. Thyristor Swiched Series Reactor, TSSC)

4.2. Paralelna kompenzacija

Paralelna kompenzacije može biti realizirana kao paralelno spojena prigušnica ili kondenzator sa fiksnim parametrima ili paralelno spojeni FACTS uređaji.

4.2.1. Paralelna prigušnica

Visokonaponske prigušnice su elementi elektroenergetskog sustava koji, za razliku od kondenzatora koji generira jalovu snagu, troše jalovu snagu i tako snižavaju napon [11]. Mogu se spajati na visokonaponske sabirnice u transformatorskim stanicama, tercijare mrežnih transformatora i krajeve prijenosnih vodova. [11]

Paralelne prigušnice prema izvedbi mogu biti [16]:

- Jednofazne ili trofazne
- Sa ili bez magnetskog štita
- Uljne ili suhe
- Za unutarnju ili vanjsku ugradnju
- Sa zračnom jezgrom ili jezgra s rasporem

Parametri kompenzacijske prigušnice [16] :

- Nazivni napon
- Nazivna snaga
- Nazivna struja
- Nazivna reaktancija

Princip rada [17]:

S obzirom na to da je impedancija prigušnice induktivnog karaktera i struja, snaga je induktivnog karaktera. Kod voda koji je neopterećen na krajevima se zbog Ferrantijevog efekta povećava napon i raste kapacitivna jalova snaga. Ta kapacitivna jalova snaga je kompenzirana induktivnom snagom prigušnice.

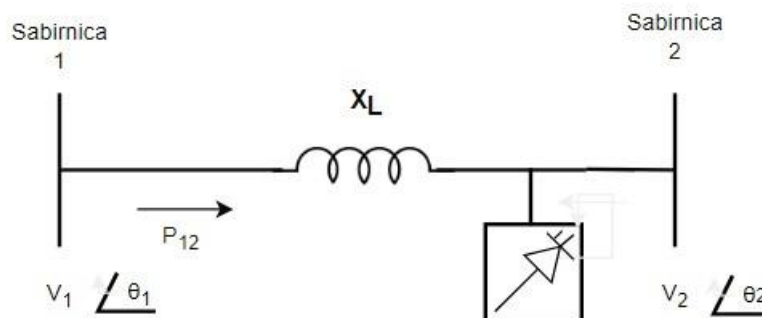


Slika 4.9. Paralelna prigušnica spojena na kraj voda [11]



Slika 4.5. Paralelna prigušnica spojena na tercijar transformatora [11]

4.2.2. Paralelni FACTS uređaji

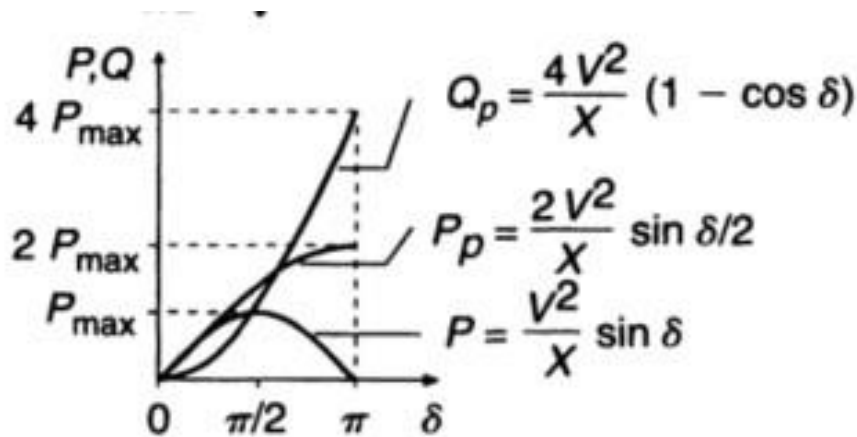


Slika 4.10. Prijenosni vod sa paralelno spojenim FACTS uređajem [14]

Prema [14] uređaji za paralelnu kompenzaciju mogu biti izvedeni kao promjenjiva impedancija, promjenjivi izvori napona ili kombinacija to dvoje. Paralelni uređaji u točki spajanja injektiraju struju. Sve dok su injektirana struja i napon voda u faznom odnosu od 90° paralelni uređaji će proizvoditi ili trošiti samo jalovu snagu [14]. Tijekom male potrošnje napon u sustavu raste te kako bi se snizio koriste se paralelne prigušnice, dok se tijekom velike potrošnje za povećanje napona koriste paralelni kondenzatori. Kao i kod svih FACTS uređaja cilj paralelne kompenzacije je povećati prijenosnu moć i stabilnost prijenosa.

Paralelna kompenzacija FACTS uređajima može se izvesti ili na sredini voda ili na kraju voda. Paralelna kompenzacija na sredini voda se izvodi kako bi se povećala prijenosna moć, a na krajevima kako bi se povećala naponska stabilnost i prigušile oscilacije.

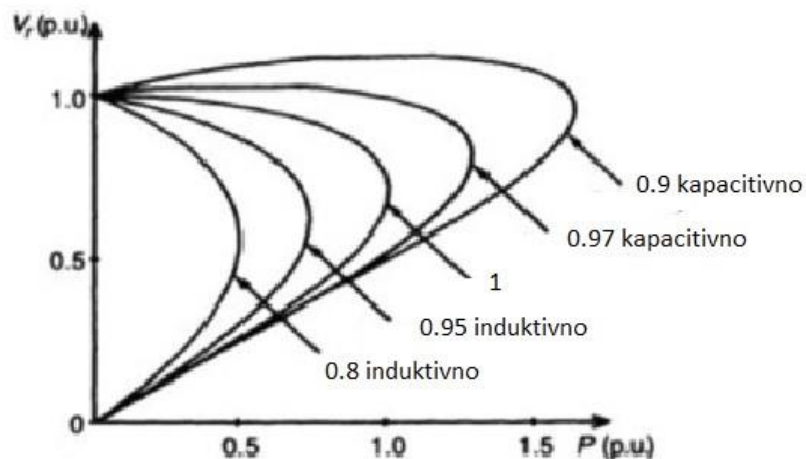
Paralelna kompenzacija na sredini voda: Postavljanje kompenzatora na sredinu voda rastavlja vod na dva dijela od kojih svaki pojedinačno ima impedanciju $X/2$ [14]. Prvi dio snagu prenosi od izvora do sredine voda, a drugi prenosi snagu od sredine voda do potrošača. Kompenzator sa vodom izmjenjuje samo jalovu snagu. Kompenzacija voda na sredini je idealna jer je pad napona na sredini voda najveći. Također koncept dijeljenja voda na dijelove može se proširiti i postavljati kompenzatore na četvrtine voda i tako vod podijeliti na 4 dijela te dodatno povećati prijenosnu moć voda [14].



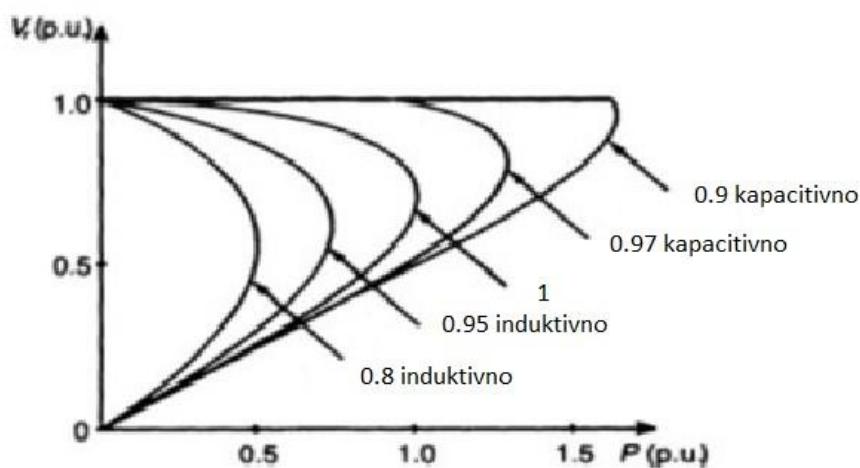
Slika 4.6. Prikaz povećanja prenesene radne snage paralelnom kompenzacijom na sredini voda [14]

Slika (4.6.) prikazuje kako se prijenosna moć voda povećava sa reaktivnom snagom kompenzatora.

Paralelna kompenzacija na kraju voda: Kompenzatori se spajaju na kraj voda kako bi se postigla naponska stabilnost i prigušile oscilacije.



Slika 4.7. Naponska stabilnost i prenesena snage ovisno o faktoru snage bez kompenzacije [14]



Slika 4.8. Naponska stabilnost i prenesena snage ovisno o faktoru snage sa kompenzacijom [14]

Prema literaturi [14] uređaji za paralelnu kompenzaciju su:

- Statički sinkroni kompenzator (eng. Static Synchronous Compensator, STATCOM)
- Statički sinkroni generator (eng. Static Synchronous Generator, SSG)
- Statički var kompenzator (eng. Static Var Compenzator, SVC)
- Tiristoski upravljiva prigušnica (eng. Thyristor Controlled Reactor, TCR)
- Tiristoski uklopiva prigušnica (eng. Thyristor Switched Reactor, TSR)
- Tiristoski uklopivi kondenzator (eng. Thyristor Switched Capacitor, TSC)
- Statički var generator ili apsorber (eng. Static Var Generator or Absorber, SVG)

4.3. Kombinirana kompenzacija

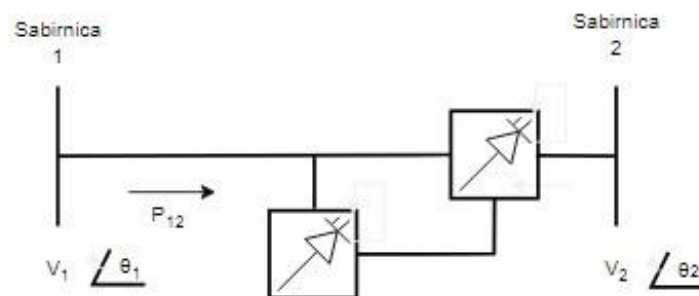
4.3.1. Serijsko-paralelna kompenzacija

Prema [14] serijsko-paralelna kompenzacija može biti realizirana kao kombinacija razdvojenih paralelnih i serijskih uređaja koji su planski i koordinirano kontrolirani ili serijski i paralelni uređaji koji su povezani istosmjernom vezom koja služi za prijenos radne snage. Paralelni uređaj injektira struju u vod, dok serijski uređaj injektira napon u vod.

Serijsko-paralelnom kompenzacijom se uzima najbolje od svakog načina kompenzacije te se tako nalazi najbolje i najekonomičnije rješenje kompenzacije.

UPFC

Unified Power Flow Controller ili objedinjeni regulator toka snage je kombinacija statičkog sinkronog kompenzatora i statičkog serijskog kompenzatora koji su povezani istosmjernom vezom kako bi se omogućio prijenos djelatne snage između statičkog serijskog kompenzatora (SSSC) i statičkog sinkronog kompenzatora [14]. Regulirajući ih pravilno omogućuje se kontrola napona, impedancije, faze te toka djelatne i jalove snage.[14]



Slika 4.11. Prijenosni vod sa serijsko-paralelnom kompenzacijom [14]

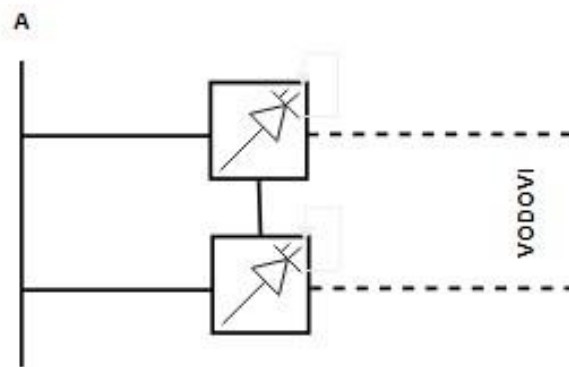
4.3.2. Serijsko-serijska kompenzacija

Prema [14] serijsko-serijska kompenzacija može predstavljati kombinaciju više razdvojenih serijskih uređaja koji su kontrolirani planski i koordinirano. Također realizacija serijsko-serijske kompenzacije može biti jedinstveni uređaj koji se sastoji od dva serijska uređaja. Dva uređaja u seriju spojena sa različitim vodovima i međusobno povezana istosmjernom vezom omogućavaju zasebnu serijsku kompenzaciju jalove snage za svaki vod, ali i prijenos radne snage među linijama

kroz istosmjernu vezu i tako još više povećati korisnost voda [14]. Mogućnost prijenosa radne snage jedinstvenog uređaja omogućava kontrolu i radne i jalove snage.

IPFC

Interline Power Flow Controller odnosno regulator tokova snage među vodovima je primjer serijsko-serijskog uređaja koji kompenzira veći broj vodova istovremeno. Sustav se sastoji od TCSC-a ili SSSC-a koji su spojeni na svaki vod te preko istosmjerne veze mogu izmjenjivati radnu snagu. Prema [14] mogućnost prijenosa snage među vodovima znači mogućnost izjednačavanja snage što smanjuje mogućnost preopterećenja voda te povećava učinkovitost kompenzacije u prijelaznim stanjima.



Slika 4.12. Prijenosni vod sa serijsko-serijskom kompenzacijom [14]

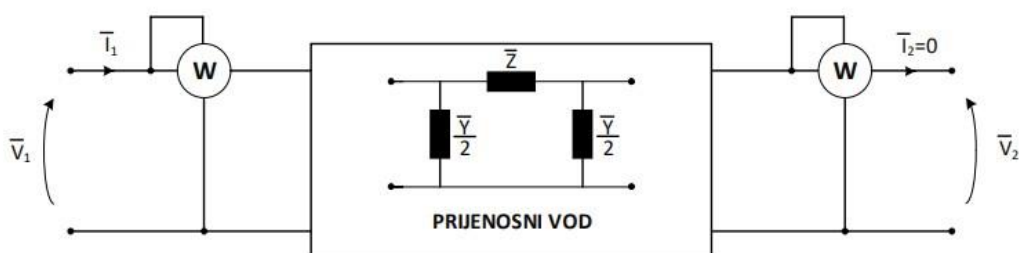
5. PRORAČUN STRUJNO-NAPONSKIH PRILIKA NA 400 kV VODU BEZ KOMPENZACIJE I SA KOMPENZACIJOM

U proračunskom dijelu za paralelnu kompenzaciju je odrađen pokus praznog hoda u laboratoriju na simulatoru voda, odrađena simulacija u programskom paket Easy Power te je izvršen ručni proračun pomoću π sheme. Nakon što se na kraju voda spojenog u prazan hod podigao napon mi smo ga kompenzirali paralelno spojenom prigušnicom. Nakon svakog pokusa dana je tablica sa usporedbom rezultata prije i poslije kompenzacije. Za serijsku kompenzaciju je izvršen proračun pomoću π sheme bez kompenzacije, odnosno kondenzatora u seriji, i sa kondenzatorom spojenim u seriju sa vodom koji je opterećen trošilom od 500 MW i faktorom snage $\cos\varphi_2 = 0.9$ induktivno.

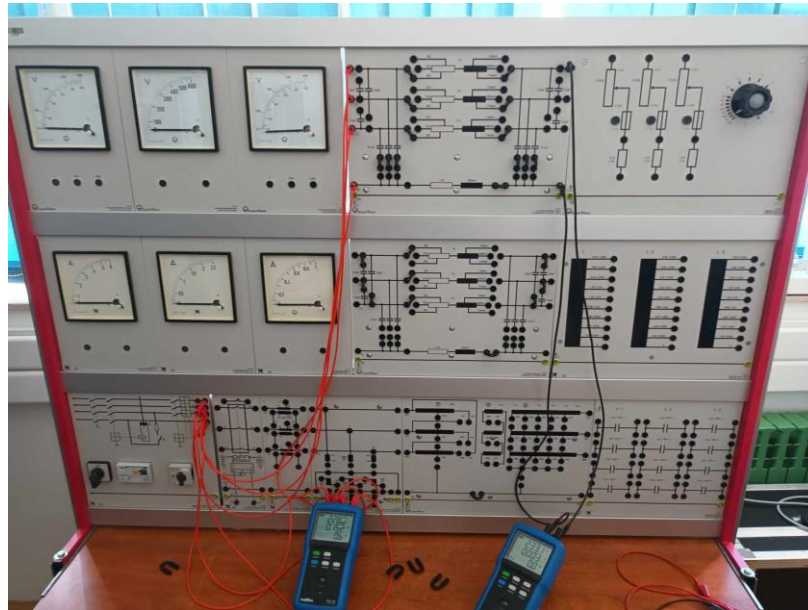
5.1. Paralelna kompenzacija

Mjerenje

U laboratoriju je pomoću simulatora EES-a odrađen eksperimentalni dio rada. Simulator je umanjena verzija prijenosnog dalekovoda napona 400 kV, a veličine struja i napona su skalirane da budu 1000 puta manje. Elementi su spojeni prema shemi sa slike 5.1. U pokusu je korišten dalekovod spojen u prazni hod za koji je specifično to što je struja na kraju voda jednaka nuli. Zbog Ferantijevog efekta napon na kraju voda se podigao te smo ga mi kasnije spustili korištenjem paralelne kompenzacije. Prema [9] Ferantijev efekt nastaje jer vodom u praznom hodu (ili slabo opterećenim vodom) teku male kapacitivne struje koje stvaraju padove napona na uzdužnoj impedanciji i tako povećavaju napon na kraju voda (jer je pad napona na impedanciji u protufazi s naponom na kraju voda).

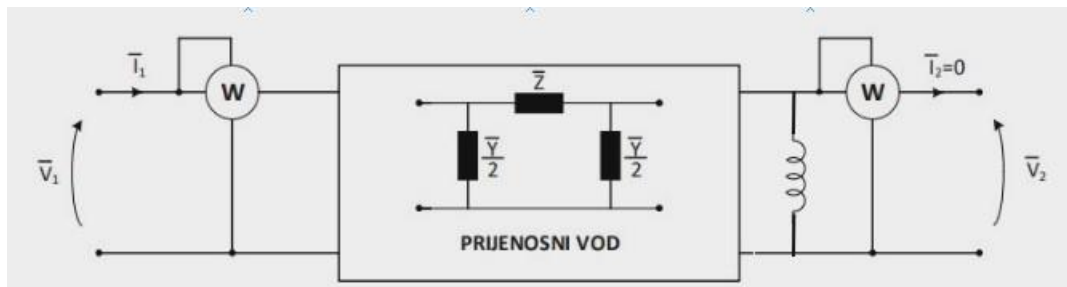


Slika 5.1. Pokus praznog hoda dalekovoda [18]

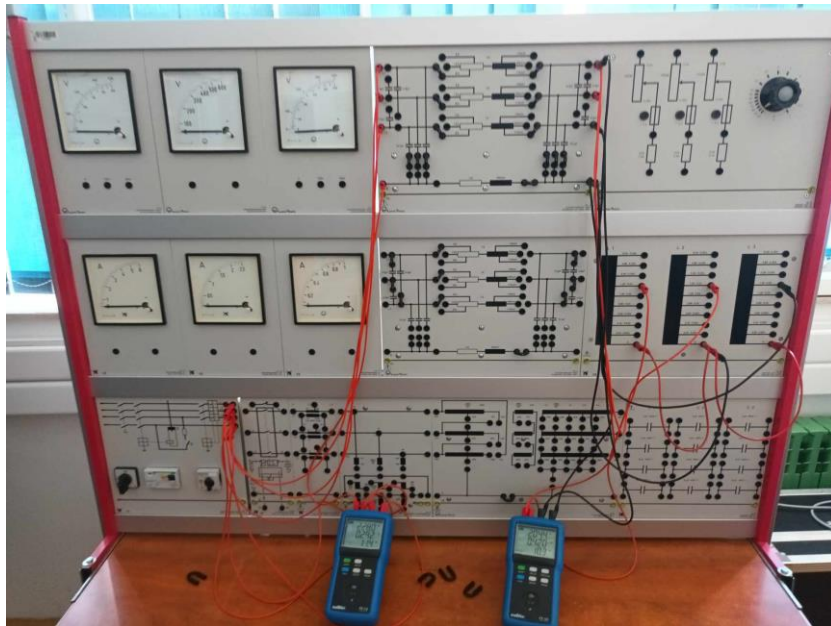


Slika 5.2. Simulator EES-a u praznom hodu

Pri pokusu napon na početku voda je polako povećavan dok nije dosegao vrijednost od 228 V. Očitana vrijednost napona sa mjernog instrumenta na kraju voda je 233.1 V. Cilj sljedećeg pokusa je taj napon spustiti pomoću kompenzacijske komponente, U ovom pokusu to je bila prigušnica paralelno spojena na vod. Induktivitet prigušnice je 1.2 H. Pokus je proveden prema shemi sa slike 5.3.



Slika 5.3. Pokus praznog hoda dalekovoda [18]



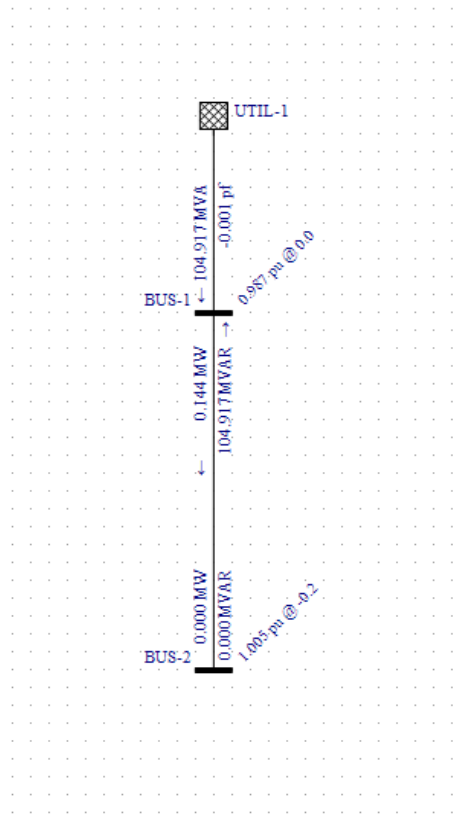
Slika 5.4. Simulator EES-a u praznom hodu sa paralelnom kompenzacijom na kraju
 Nakon kompenzacije napon izmjeren na kraju voda je 204.4 V.

Simulator EES-a	Bez kompenzacije	Sa kompenzacijom
\bar{V}_1	228 V	228 V
\bar{V}_2	233.1 V	204.4 V

Tablica 5.1. Rezultati mjerenja sa i bez paralelne kompenzacije

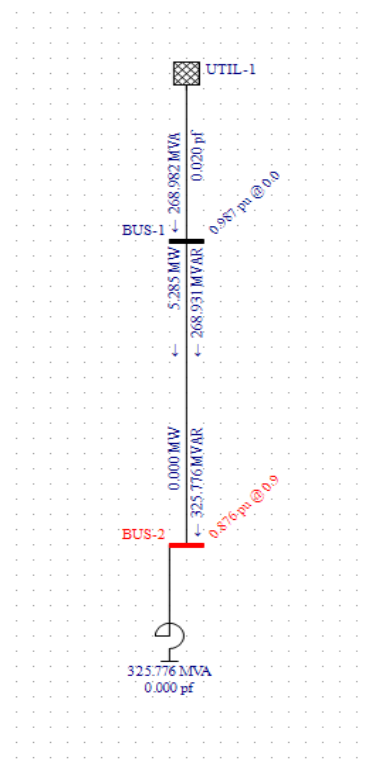
Simulacija

U programskom paketu Easy Power provedena je simulacija na vodu bez opterećenja tako što je na početku voda namješten napon od 228 kV te je promatran napon na kraju voda.



Slika 5.5. Simulacija prilika na jednom vodu u praznom hodu pomoću programskog paketa Easy Power bez kompenzacije

U prvoj simulaciji praznog hoda na kraju voda je izmjereno napon 232.094 kV. Zatim je na kraj voda paralelno spojena prigušnica sa parametrima kao i kod mjerenja u laboratoriju.



Slika 5.6. Simulacija prilika na jednom vodu u praznom hodu pomoću programskog paketa EasyPower sa kompenzacijom

Prigušnica je uspješno spustila napon na 202.303 kV.

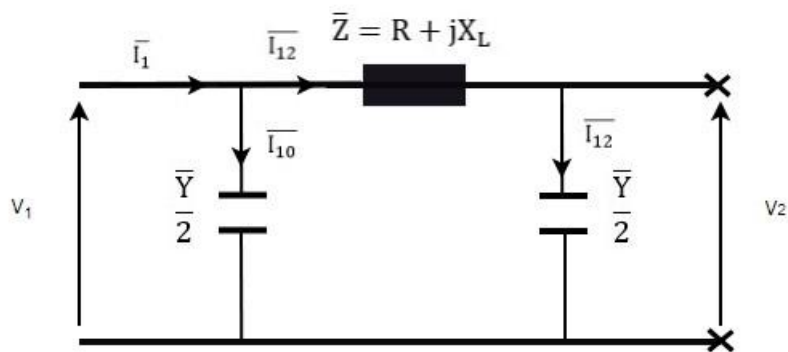
EasyPower	Bez kompenzacije	Sa kompenzacijom
\bar{V}_1	228 kV	228 kV
\bar{V}_2	232.094 kV	202.303 kV

Tablica 5.2. Rezultati simulacije sa i bez paralelne kompenzacije

Proračun

Sa istim parametrima kao i u simulaciji te mjerenju u laboratoriju izveden je ručni proračun. Pomoću nadomjesne π za pokus praznog hoda sa naponom $\bar{V}_1 = 228 * 10^3 \angle 0^\circ$ V izračunat je napon na kraju voda za slučaj bez kompenzacije i sa kompenzacijom.

a) prazan hod bez kompenzacije



Slika 5.7. π shema korištena pri proračunu

$$C = 1 \mu\text{F}$$

$$R = 8 \Omega$$

$$L = 174 \text{ mH}$$

$$\bar{V}_1 = 228 * 10^3 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$\frac{\bar{Y}}{2} = \frac{G_1}{2} + j \frac{B_1}{2} = 0 + j \frac{2 * \pi * f * C}{2} = 1.5708 * 10^{-4} \angle 90^\circ \text{ S}$$

$$X_L = 2 * \pi * 50 * 0.174 = 54.6637 \Omega$$

$$\bar{Z} = R + jX_L = 8 + j54.6637 = 55.245996 \angle 81.6739^\circ \Omega$$

$$\bar{I}_2 = 0 \text{ A}$$

$$\bar{V}_2 = \bar{V}_1 - \Delta\bar{V} = \bar{V}_1 - \bar{I}_{12} * \bar{Z}$$

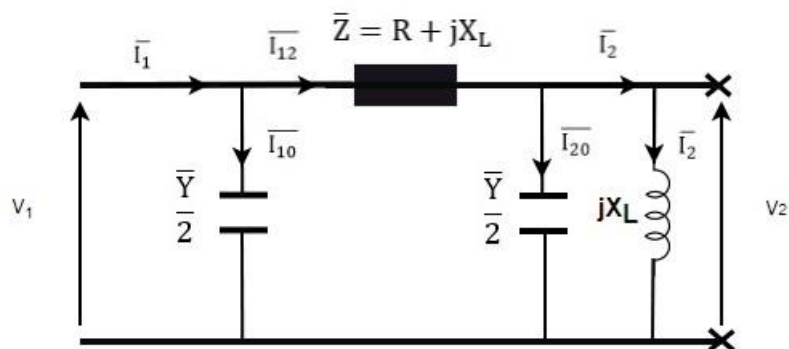
$$\bar{I}_{12} = \frac{\bar{V}_1}{\bar{Z} + \frac{1}{\frac{\bar{Y}}{2}}} = \frac{228 * 10^3 \angle 0^\circ}{55.245996 \angle 81.6739^\circ + \frac{1}{1.5708 * 10^{-4} \angle 90^\circ}} = 36.1244 \angle 89.9274^\circ \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_2 &= 228 * 10^3 \angle 0^\circ - 36.1244 \angle 89.9274^\circ * 55.245996 \angle 81.6739^\circ \\ &= 229974.4967 \angle -0.0726^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

$$\bar{I}_{10} = \bar{V}_1 * \frac{\bar{Y}}{2} = 228 * 10^3 \angle 0^\circ * 1.5708 * 10^{-4} \angle 90^\circ = 35.8142 \angle 90^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{10} + \bar{I}_{12} = 35.8142 \angle 90^\circ + 36.1244 \angle 89.9274^\circ = 71.9386 \angle 89.9635^\circ \text{ A}$$

b) prazan hod sa kompenzacijom



Slika 5.8. π shema korištena pri proračunu

$$C = 1 \mu\text{F}$$

$$R = 8 \Omega$$

$$L = 174 \text{ mH}$$

$$L_k = 1.2 \text{ H}$$

$$\bar{V}_1 = 228 * 10^3 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$\frac{\bar{Y}}{2} = \frac{G_1}{2} + j \frac{B_1}{2} = 0 + j \frac{2 * \pi * f * C}{2} = 1.5708 * 10^{-4} \angle 90^\circ \text{ S}$$

$$X_L = 2 * \pi * 50 * 0.174 = 54.6637 \Omega$$

$$\bar{Z} = R + jX_L = 8 + j54.6637 = 55.245996 \angle 81.6739^\circ \Omega$$

$$X_{L_k} = 2 * \pi * f * L_k = 2 * 50 * \pi * 1.2 = 376.9911 \Omega$$

$$\bar{V}_2 = \bar{V}_1 - \Delta \bar{V} = \bar{V}_1 - \bar{I}_{12} * \bar{Z}$$

$$\bar{I}_{12} = \frac{\bar{V}_1}{\bar{Z} + \frac{1}{\frac{1}{\bar{Y}} * jX_{L_k}} + \frac{1}{\bar{Z}}}} = \frac{228 * 10^3 \angle 0^\circ}{55.245996 \angle 81.6739^\circ + \frac{1}{\frac{1}{1.5708 * 10^{-4} \angle 90^\circ} * j376.9911} + \frac{1}{1.5708 * 10^{-4} \angle 90^\circ} + j376.9911}} = 500.5998 \angle -88.994^\circ \text{ A}$$

$$\bar{V}_2 = 228 * 10^3 \angle 0^\circ - 500.5998 \angle -88.994^\circ * 55.245996 \angle 81.6739^\circ = 200.6002 \angle 1.0065^\circ \text{ V}$$

$$\bar{I}_{10} = \bar{V}_1 * \frac{\bar{Y}}{2} = 228 * 10^3 \angle 0^\circ * 1.5708 * 10^{-4} \angle 90^\circ = 35.8142 \angle 90^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{10} + \bar{I}_{12} = 35.8142 \angle 90^\circ + 500.5998 \angle -88.994^\circ = 464.7915 \angle -88.9165^\circ \text{ A}$$

Proračun	Bez kompenzacije	Sa kompenzacijom
\bar{V}_1	228 kV	228 kV
\bar{V}_2	229.974 kV	200.6 kV

Tablica 5.3. Rezultati proračuna sa i bez paralelne kompenzacije

Iako napon od 232 kV na kraju voda nije potrebno kompenzirati jer je u granicama normalnih pogonskih uvjeta, cilj je prikazati mogućnost mijenjanja iznosa napona priključivanjem komponenti na postojeći vod. Neki ekstremniji naponi nisu se mogli postići zbog ograničenosti simulatora EES-a, a simulacija i proračun su bazirani na mjerenjima obavljenim na simulatoru EES-a.

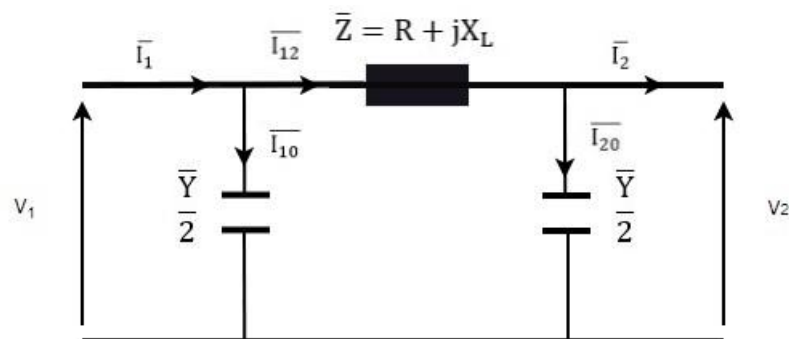
Pri pokusu praznog hoda napon na kraju je bio veći od nazivnog za 2.2368%, a nakon kompenzacije bio je 89.6491% nazivnog napona. Simulacijom istog pokusa u Easy Poweru bez kompenzacije dobiven je napon veći od nazivnog za 1.7956%, a sa kompenzacijom napon je pao

na 88.729% nazivnog. Pri proračunu napon bez kompenzacije je bio veći za 0.8658% od nazivnog, a nakon kompenzacije napon je spušten na 87.9824% nazivnog. Pokus u laboratoriju, simulacija u programskom paketu i proračun prikazuju da je moguće manipulirati naponom na već postojećemvodu naknadnim priključivanjem paralelne prigušnice.

5.2. Serijska kompenzacija

Serijskom kompenzacijom povećava se prijenosna moć i stabilnost voda. Ideja kompenzacije je smanjiti reaktanciju voda spajanjem kondenzatora u seriju sa vodom. Smanjenje reaktancije može se predočiti i kao skraćivanje voda. Pomoću π sheme je izvršen proračun bez kompenzacije i sa kompenzacijom te su na kraju analizirane dobivene vrijednosti. Kao referentni napon odabran je \bar{V}_2 . Zadan je djelatno-induktivno opterećen vod sa faznim naponom $\bar{V}_2 = 230\angle 0^\circ$ kV na kraju, otpor voda je $R=8 \Omega$, induktivitet voda $L=174$ mH, kapacitet $C=1 \mu\text{F}$. Potrebno je izračunati napon na početku:

- a) bez kompenzacije
 - b) sa kompenzacijom
- a) bez kompenzacije:



Slika 5.9. π shema korištena pri izračunu

$$\bar{V}_2 = 230\angle 0^\circ \text{ kV}$$

$$P_2 = 500 \text{ MW}$$

$$\cos\varphi_2 = 0.9 \text{ induktivno}$$

$$C = 1 \mu\text{F}$$

$$R = 8 \Omega$$

$$L = 174 \text{ mH} \rightarrow X_L = 2 * \pi * 50 * 0.174 = 54.6637 \Omega$$

$$\varphi_2 = \cos^{-1}(0.9) = 25.8419^\circ$$

$$Q_2 = P_2 * \operatorname{tg}\varphi_2 = 242.1607 \text{ MVAR}$$

$$\overline{S}_2 = P_2 + jQ_2 = 5000000000 + j242160700 = 555.5554 \angle 25.8419^\circ \text{ MVA}$$

$$\overline{S}_2 = 3 * \overline{V}_2 * \overline{I}_2^*$$

$$\overline{I}_2 = \frac{\overline{S}_2}{3 * \overline{V}_2} = 805.1528 \angle -25.8419^\circ \text{ A}$$

$$\overline{Z} = R + jX_L = 8 + j54.6637 = 55.245996 \angle 81.6739^\circ \Omega$$

$$\frac{\overline{Y}}{2} = \frac{G_1}{2} + j \frac{B_1}{2} = 0 + j \frac{2 * \pi * f * C}{2} = 1.5708 * 10^{-4} \angle 90^\circ \text{ S}$$

$$\overline{I}_{20} = \overline{V}_2 * \frac{\overline{Y}}{2} = 230 * 10^3 \angle 0^\circ * 1.5708 * 10^{-4} \angle 90^\circ = 36.1284 \angle 90^\circ \text{ A}$$

$$\overline{I}_{12} = \overline{I}_{20} + \overline{I}_2 = 805.1528 \angle -25.8419^\circ + 36.1284 \angle 90^\circ = 790.0742 \angle -23.4832^\circ \text{ A}$$

$$\overline{\Delta V} = \overline{I}_{12} * \overline{Z} = 790.0741 \angle -23.4832^\circ * 55.245996 \angle 81.6739^\circ = 43648.435 \angle 58.1907^\circ \text{ V}$$

$$\overline{V}_1 = \overline{V}_2 + \overline{\Delta V} = 230 * 10^3 \angle 0^\circ + 43648.435 \angle 58.1907^\circ = 255711.403 \angle 8.3406^\circ \text{ V}$$

$$\overline{I}_{10} = \overline{V}_1 * \frac{\overline{Y}}{2} = 255711.403 \angle 8.3406^\circ * 1.5708 * 10^{-4} \angle 90^\circ = 40.1671 \angle 98.3406^\circ \text{ A}$$

$$\overline{I}_1 = \overline{I}_{10} + \overline{I}_{12} = 40.1671 \angle 98.3406^\circ + 790.0741 \angle -23.4832^\circ = 769.6507 \angle -20.9417^\circ \text{ A}$$

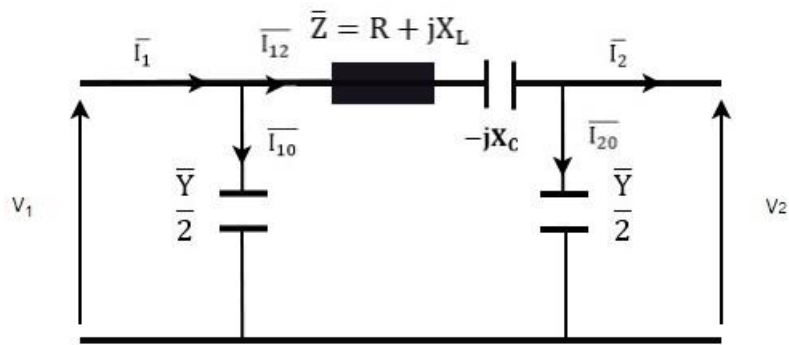
$$\begin{aligned} \overline{S}_1 &= 3 * \overline{V}_1 * \overline{I}_1^* = 3 * 255711.403 \angle 8.3406^\circ * 769.6507 \angle -20.9417^\circ \\ &= 590.4254 \angle 29.2463^\circ = 515.1624 + j288.4611 \text{ MVA} \end{aligned}$$

$$\varphi_1 = 29.2463^\circ$$

$$Q_1 = 288.4611 \text{ MVAR}$$

$$P_1 = 515.1624 \text{ MW}$$

b) s kompenzacijom



Slika 5.10. π shema korištena pri izračunu

$$\bar{V}_2 = 230 \angle 0^\circ \text{ kV}$$

$$P_2 = 500 \text{ MW}$$

$$\cos \varphi_2 = 0.9 \text{ induktivno}$$

$$C = 1 \mu\text{F}$$

$$R = 8 \Omega$$

$$L = 174 \text{ mH} \rightarrow X_L = 2 * \pi * 50 * 0.174 = 54.6637 \Omega$$

$$k = 0.6$$

$$\varphi_2 = \cos^{-1}(0.9) = 25.8419^\circ$$

$$Q_2 = P_2 * \text{tg} \varphi_2 = 242.1607 \text{ MVAR}$$

$$\bar{S}_2 = P_2 + jQ_2 = 500000000 + j242160700 = 555.5554 \angle 25.8419^\circ \text{ MVA}$$

$$\bar{S}_2 = 3 * \bar{V}_2 * \bar{I}_2^*$$

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{S}_2^*}{3 * \bar{V}_2^*} = 805.1528 \angle -25.8419^\circ \text{ A}$$

$$X_C = 32.7982 \Omega$$

$$\bar{Z} = R + jX_L - jX_C = 8 + j * (54.6637 - 32.7982) = 23.2830 \angle 69.9038^\circ \Omega$$

$$\frac{\bar{Y}}{2} = \frac{G_1}{2} + j \frac{B_1}{2} = 0 + j \frac{2 * \pi * f * C}{2} = 1.5708 * 10^{-4} \angle 90^\circ \text{ S}$$

$$\bar{I}_{20} = \bar{V}_2 * \frac{\bar{Y}}{2} = 230 * 10^3 \angle 0^\circ * 1.5708 * 10^{-4} \angle 90^\circ = 36.1284 \angle 90^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_{20} + \bar{I}_2 = 1207.7291 \angle -25.8419^\circ + 36.1284 \angle 90^\circ = 790.0741 \angle -23.4832^\circ \text{ A}$$

$$\Delta \bar{V} = \bar{I}_{12} * \bar{Z} = 790.0741 \angle -23.4832^\circ * 23.2830 \angle 69.9038^\circ = 18395.2953 \angle 46.4206^\circ \text{ V}$$

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 + \Delta \bar{V} = 230 * 10^3 \angle 0^\circ + 18395.2953 \angle 46.4206^\circ = 243046.5607 \angle 3.1430^\circ \text{ V}$$

$$\bar{I}_{10} = \bar{V}_1 * \frac{\bar{Y}}{2} = 2430465607 \angle 3.1430^\circ * 1.5708 * 10^{-4} \angle 90^\circ = 38.1778 \angle 93.1430^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{10} + \bar{I}_{12} = 38.1778 \angle 93.1430^\circ + 790.0741 \angle -23.4832^\circ = 773.7171 \angle -20.9550^\circ \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \bar{S}_1 &= 3 * \bar{V}_1 * \bar{I}_1^* = 3 * 243046.5607 \angle 3.1430^\circ * 773.7171 \angle 20.9550^\circ = 564.1478 \angle 24.098^\circ \\ &= 514.9815 + j230.3408 \text{ MVA} \end{aligned}$$

$$\varphi_1 = 24.24.098^\circ$$

$$Q_1 = 230.3408 \text{ MVAR}$$

$$P_1 = 514.9815 \text{ MW}$$

Proračun	Bez kompenzacije	Sa kompenzacijom
\bar{V}_1	255.711 kV	243.046 kV
\bar{V}_2	230 kV	230 kV
\bar{S}_1	515.1624 + j288.4611 MVA	514.9815 + j230.3408 MVA
Q_1	288.4611 MVAR	230.3408 MVAR
P_1	515.1624 MW	514.9815 MW

Tablica 5.4. Rezultati proračuna sa i bez serijske kompenzacije

Kod serijske kompenzacije sa stupnjem kompenzacije od 0.6 napon izvora je smanjen je za 10.037%. Pad napona na vodu smanjen je za 57.681%, odnosno pao je sa 43.648 kV na 18.395 kV nakon kompenzacije. Smanjenje pada napona na vodu znači da je potreban manji napon izvora, točnije manji za 4.952%. Jalova snaga izvora značajno je smanjena, za 20.15%, sa 288.461 MVAR-a na 230.241 MVAR. Da bi se zadovoljilo opterećenje od 500 MW bez kompenzacije potrebna djelatna snaga izvora je 515.162 MW, a sa kompenzacijom 514.982 MW.

6. ZAKLJUČAK

Razvoj industrije te poboljšanje životnog standarda potrošača dovodi do veće potrošnje odnosno zahtijeva za električnom energijom što dovodi do naprezanja mreže i potrebe za većim kapacitetima pri prijenosu električne energije. Također potrošnja koja konstantno varira komplicira planiranje proizvodnje te otežava kontrolu napona unutar željenih intervala. To stavlja dodatan pritisak na operatore prijenosnog sustava jer izgradnja novih prijenosnih mreža iz ekonomskih i ekoloških razloga često nije moguća što znači da moraju izvući maksimum iz postojeće infrastrukture. U tome im pomažu kompenzacijski uređaji koji povećavaju kapacitet prijenosa, omogućavaju regulaciju napona i poboljšavaju stabilnost. Kompenzacijski uređaji ovisno o potrebama proizvode ili troše jalovu snagu te povišuju ili snižavaju napon.

Mjerenjima u laboratoriju, simulacijom u programskom paketu Easy Power te ručnim proračunom prikazano je kako je moguće manipulirati naponskim prilikama paralelnom kompenzacijom. Prigušnice paralelno spojene potrošaču kompenziraju kapacitivnu jalovu snagu neopterećenog ili slabo opterećenog voda te tako snižavaju napon.

Kapacitivna reaktancija kondenzatora spojenog u seriju sa vodom smanjuje ukupnu reaktanciju voda te tako utječe na naponske prilike na krajevima voda. U proračunu sa serijskom kompenzacijom pokazano je da je sa kompenzacijom potrebno manje djelatne snage nego u slučaju bez kompenzacije kako bi se zadovoljio isti potrošač. Također je u tablici 5.4. prikazano i značajno smanjenje jalove snage nakon kompenzacije što rasterećuje mrežu i ostavlja prostor za dodatna opterećenja. Zahvaljujući serijskoj kompenzaciji povećana je prijenosna moć voda, povećana stabilnost prijenosa te životni vijek opreme koja se koristi pri prijenosu.

LITERATURA

- [1] Čehok, Stjepan. "Metodologija regulacije napona prijenosne mreže." Završni rad, Sveučilište Sjever, 2022. <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:585564>
- [2] Ružić, Mislav. "Upotreba reaktivnih komponenti u distributivnom sustavu." Završni rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2017. <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:899143>
- [3] Bunčić, Ivan. "Analiza mogućnosti primjene UPFC-FACTS uređaja." Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2021. <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:370286>
- [4] Diklić, Toni. "NADOMJESNI MODELI ELEKTROENEGRETSKIH VODOVA S KONCENTRIRANIM PARAMETRIMA." Završni rad, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, 2016. <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:190:429026>
- [5] Relić, Filip. "Mogućnosti primjene FACTS uređaja za kompenzaciju u prijenosnoj mreži EES-a Hrvatske." Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2017. <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:807625>
- [6] Đurin, Leo. "Trendovi razvoja prijenosnih mreža u budućnosti." Završni rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2020. <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:769612>
- [8] element.hr: Elektroenergetski sustav, <https://element.hr/wp-content/uploads/2020/06/unutra-52133.pdf>, stranica posjećena: 29.5.2023.
- [9] Marko Delimar: Prijenos i razdjela električne energije, Zapisi s predavanja: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/PRIJENOS_I_RAZDJELA_ELEKTRICNE_ENERGIJE.pdf, stranica posjećena: 5.8.2023.
- [10] Službena stranica Hrvatskog operatora prijenosnog sustava: <https://www.hops.hr/shema-ees-a>, stranica posjećena: 22.5.2023.
- [11] M. Ožegović, K. Ožegović, Električne energetske mreže IV, FESB Split, OPAL COMPUTING d.o.o., Split, 1999.

- [12] G. Levačić, A. Župan, I. Uglešič, B. Filipović-Grčić, Problematika ugradnje kompenzacijskih uređaja u prijenosnoj elektroenergetskoj mreži, 13. savjetovanje HRO CIGRE, Šibenik, 5.-8. studenog, 2017.
- [13] T. Gonen, Electrical power transmission system engineering analysis and design, Third Edition, Taylor & Francis Group, 2014.
- [14] N. Hingorani, L. Gyugyl, Understanding FACTS, IEEE press, 2000.
- [15] R. Natarajan, Power system capacitors, Taylor & Francis group, 2005.
- [16] IEC 60076-6 Power transformers - part 6 Reactors, prosinac 2007.
- [17] M. Jurković, S. Grdinić, Kompenzacijska prigušnica s funkcijom Petersenove prigušnice, 7. savjetovanje Hrvatskog ogranka Međunarodne elektrodistribucijske konferencije, Šibenik, 24.-27. lipnja, 2021.
- [18] Laboratorijske vježbe iz kolegija Osnove elektroenergetskog sustava, FERIT, Osijek, 2020.

SAŽETAK

Cilj rada je objasniti princip kompenzacije visokonaponskih dalekovoda serijskim i paralelnim komponentama. U uvodu rada dan je kratak pregled područja teme kako bi se prikazalo kako se ovaj rad razlikuje od ostalih iz istog područja. Zatim je objašnjen svaki dio elektroenergetskog sustava pojedinačno i dan uvod u naponske prilike na vodu. Zatim slijedi teoretski uvod u kompenzacijske uređaje. Prema načinu spajanja na vod kompenzacija je podijeljena na serijsku i paralelnu. Nakon teorijskog uvoda izvršena su mjerenja u laboratoriju, simulacija u programskom paketu Easy Power te ručni proračun primjene paralelne kompenzacije. Za serijsku kompenzaciju izvršen je proračun pomoću π sheme. Rezultati mjerenje, simulacije i proračuna su prikazani u tablicama i interpretirani, Kompenzacija je smanjila gubitke, povećala prijenosnu moć voda te povećala životni vijek opreme koja se koristi pri prijenosu.

Ključne riječi: elektroenergetski sustav, kompenzacijski uređaji, prijenosna mreža, visokonaponski dalekovod

ABSTRACT

The goal of this paper is to explain the principle of compensation for high-voltage transmission lines using series and parallel components. In the introduction of the paper, a brief overview of the topic area is provided to demonstrate how this work differs from others in the same field. Each part of the electrical power system is then explained individually, along with an introduction to voltage conditions on the line. A theoretical introduction to compensation devices follows. According to the connection method to the line, compensation is divided into series and parallel. After the theoretical introduction, measurements were conducted in the laboratory, simulations were performed using the Easy Power software package, and manual calculations were carried out for the application of parallel compensation. For series compensation, calculations were performed using the π scheme. The results of measurements, simulations, and calculations are presented in tables and interpreted. Compensation has reduced losses, increased the transmission capacity of the lines, and extended the lifespan of the equipment used in transmission.

Key words: compensating devices, high-voltage transmission line, power system, transmission network