

Strujno-naponske prilike spoja dalekovod-transformator

Torma, Matej

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:200:764314>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-17**

Repository / Repozitorij:

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



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

Sveučilišni studij

Strujno-naponske prilike spoja dalekovod-transformator

Završni rad

Matej Torma

Osijek, 2023.

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

Osijek, 14.09.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Ime i prezime Pristupnika:	Matej Torma
Studij, smjer:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	4896, 30.07.2020.
OIB Pristupnika:	99424903623
Mentor:	izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
Sumentor:	Ružica Kljajić, mag. ing. el.
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Strujno-naponske prilike spoja dalekovod-transformator
Znanstvena grana rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rad:	Koristeći se nadomjesnim shemama prikazati izračun strujno-naponskih prilika za malu elektroenergetsku mrežu koja sadrži transformator i dalekovod. Mijenjati duljinu dalekovoda i opterećenje mreže. Rezultate provjeriti simulacijski u računalnom programu i laboratorijski na simulatoru voda. Tema rezervirana za: Matej Torma
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: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	14.09.2023.
Datum potvrde ocjene od strane Odbora:	
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, 14.09.2023.

Ime i prezime studenta:

Matej Torma

Studij:

Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

Mat. br. studenta, godina upisa:

4896, 30.07.2020.

Turnitin podudaranje [%]:

2

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Strujno-naponske prilike spoja dalekovod-transformator**

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

i sumentora Ružica Kljajić, mag. ing. el.

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.TRANSFORMATORI I VODOVI	5
3.1.Transformator	5
3.2.Vodovi	7
3.3 Nadomjesna sheme transformatora	10
3.4 Nadomjesna shema voda	12
4.MJERENJA NA SIMULATORU VODA	15
4.1. Prazan hod jednostrukog voda	16
4.2.Prazan hod dva paralelna voda	18
4.3. Podopterećenje jednostrukog voda	21
4.4. Podopterećenje dva paralelna voda	23
4.5. Jako opterećenje jednostrukog voda	25
4.6. Jako opterećenje dva paralelna voda	28
5.PRORAČUN POMOĆU NADOMJESNIH SHEMA	30
5.1. Određivanje parametara transformatora	30
5.2.Određivanje parametara voda	32
5.3.Prazan hod jednostrukog voda	33
5.4.Prazan hod dva paralelna voda	40
5.5.Podopterećenje jednostrukog voda	47
5.6.Podopterećenje dva paralelna voda	54
5.7.Jako opterećenje jednostrukog voda	61
5.8.Jako opterećenje dva paralelna voda	68
6.SIMULACIJA U RAČUNALNOM PROGRAMU POWER WORLD	76
6.1.Prazan hod jednostrukog voda	76
6.2.Prazni hod dva paralelna voda	78
6.3.Podopterećenje jednostrukog voda	80
6.4.Podopterećenje dva paralelna voda	82
5.5.Jako opterećenje jednostrukog voda	84
6.6.Jako opterećenje dva paralelna voda	86
7.GRAFIČKA USPOREDBA REZULTATA	89
7.1.Prazan hod jednostrukog voda	89
7.2.Prazan hod dva paralelna voda	90
7.3.Podopterećenje jednostrukog voda	91

7.4.Podopterećenje dva paralelna voda	94
7.5.Jako opterećenje jednostrukog voda	97
7.6.Jako opterećenje dva paralelna voda	100
8.ZAKLJUČAK.....	102
LITERATURA.....	103
SAŽETAK.....	104

1.UVOD

Električna energije predstavlja jedan od najkorištenijih oblika energije u svijetu i iz tog razloga važno je osigurati siguran i pouzdan način prijenosa električne energije od samih elektrana do krajnjih potrošača. U tom procesu ključnu ulogu imaju transformatori i dalekovodi. Ovaj rad bavi se promatranjem i proučavanjem pojava koje nastaju prilikom prijenosa električne energije pomoću transformatora i dalekovoda. Kako je elektroenergetski sustav jako velik i kompleksan, te iz tog razloga sve pojave promatramo na jednostavnoj mreži koja se sastoji od jednog energetskog transformatora, dalekovoda i opterećenja koje predstavlja potrošače. Promatraju se strujno-naponske pojave koje nastaju prilikom promjene opterećenja dalekovoda, promjene duljine dalekovoda i promjenom konfiguracije vodova dalekovoda. Analiza se provodi u tri dijela, a to su mjerenje na simulatoru voda, proračun i simulacija u računalnom programu Power World. Sva saznanja i zaključke koji su dobijena na jednostavnoj mreži mogu se iskoristiti i primijeniti na cijeli elektroenergetski sustav u vidu poboljšanja i prevencije kvarova.

Ovaj završni rad sastoji se od deset poglavlja. Prvo poglavlje je uvod u završni rad. U drugom poglavlju dan je pregled područja teme u kojem je ovaj završni rad uspoređen sa ostalim završnim radovima koji su obrađivali sličnu tematiku. U trećem poglavlju dan je teorijski uvod o transformatorima i vodovima i pojavama koje nastaju u njihovom radu, te su prikazane nadomjesne sheme transformatora i voda. U četvrtom poglavlju odrađeno je mjerenje na simulatoru voda. Rezultati su prikazani tablično i svako mjerenje je dodatno prokomentirano. U petom poglavlju odrađen je proračun pomoću nadomjesnih shema transformatora i voda. Rezultati su prikazani tablično i uspoređeni su sa rezultatima mjerenja na simulatoru voda. U šestom poglavlju odrađena je simulacija u računalnom programu Power World, te su rezultati također prokomentirani i uspoređeni sa rezultatima mjerenja. U sedmom poglavlju odrađena je grafička usporedba rezultata dobijenih mjerenjima, proračunom i simulacijom, te su prokomentirani odstupanja pojedinih rezultata. Osmo poglavlje je zaključak završnog rada. Deveto poglavlje je sažetak završnog rada. Deseto poglavlje je popis literature korištene za izradu završnog rada.

1.1.Zadatak završnog rada

Koristeći se nadomjesnim shemama prikazati izračun strujno-naponskih prilika za malu elektroenergetsku mrežu koja sadrži transformator i dalekovod. Mijenjati duljinu dalekovoda i opterećenje mreže. Rezultate provjeriti simulacijski u računalnom programu i laboratorijski na simulatoru voda.

2.PREGLED PODRUČJA TEME

[1] Modeli prijenosnih dalekovoda za različite duljine

U literaturi [1] opisuju se različiti modeli dalekovoda s obzirom na duljinu, te je dan detaljan opis parametara samog dalekovoda, te je na kraju riješeno je nekoliko primjera u kojima su izračunate strujno-naponske prilike na početku dalekovoda ako su poznati uvjeti na kraju dalekovoda.

U ovom završnom radu pored dalekovoda u obzir je uzet i transformator i za razliku od prethodno spomenutog rada korišten je simulator voda na kojem je odrađen niz mjerenja, te su rezultati provjereni pomoću računalnog programa Power World.

[2] Analiza strujno-naponskih prilika nesimetrično opterećenog voda

U literaturi [2] opisane su strujno-naponske prilike simetrično i nesimetrično opterećenog dalekovoda, te se cijeli koncept zasniva na opterećenju dalekovoda. Odrađen je niz mjerenja na simulatrou voda i rezultati su dodatno provjereni pomoću računalnog programa DIgSILENT Power Factory.

U ovom završnom radu naglasak nije stavljen na simetriju i nesimetriju. Glavni cilj je prikazati strujno-naponske prilike duž voda prilikom promjene opterećenja i duljine voda. Svi izmjereni podaci dodatno su provjereni u računalnom programu Power World.

[3] Nadomjesni modeli energetskih transformatora

U literaturi [3] glavni objekt analize je energetski transformator, te je provedena detaljna analiza različitih modela transformatora. Korištene su nadomjesne sheme transformatora za proračun strujno-naponskih prilika između sekundara i primara transformatora.

Prednost ovog završnog rada je u tome što pored transformatora bitnu ulogu ima i dalekovod. Prikazan je način prijenosa električne energije putem dalekovoda te su analizirana gotovo sva stanja u kojima se dalekovod i transformator mogu naći.

[4] Proračun elektroenergetskih mreža sa više naponskih razina

U literaturi [4] u uvodnom dijelu opisane su osnovne značajke elektroenergetskog sustava, povijesni razvoj i proizvodnja električne energije u Hrvatskoj. Dan je opis osnovnih elemenata elektroenergetskog sustava i pripadajućih nadomjesnih shema koje se koriste i u ovom završnom radu. Glavni cilj literature [4] je provesti proračun elektroenergetskih mreža sa više naponskih razina korištenjem različitih metoda.

Glavna razlika između literature [4] i ovog završnog rada je u tome što se ovaj rad fokusira na strujno-naponske pojave koje nastaju na samomvodu prilikom promjene opterećenja i duljine voda. Dodatna razlika je u tome što su se u literaturi [4] zanemarile popriječne admitancije transformatora i voda, a poznato je da dozemni i međufazni kapaciteti voda uvelike utječu na strujno-naponske prilike.

3.TRANSFORMATORI I VODOVI

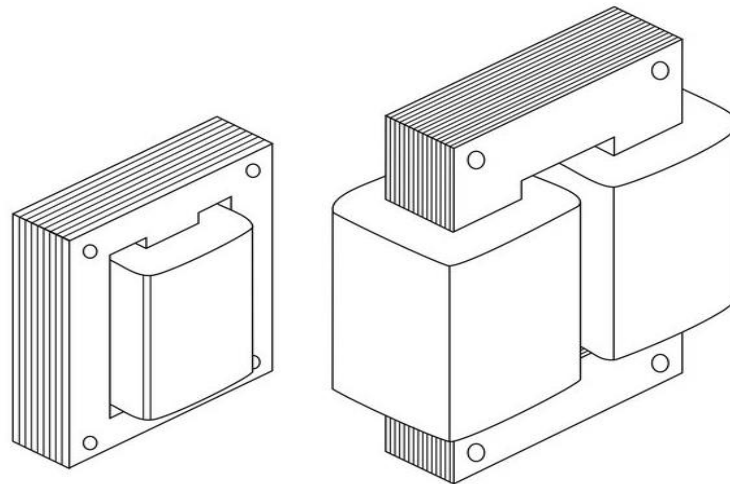
3.1.Transformator

Kada govorimo o prijenosu električne energije transformator pored vodova ima jako veliku važnost. Uređaj koji je konstrukcijski jako jednostavan omogućava kvalitetan, a na kraju i ekonomičan prijenos električne energije. Glavna zadaća transformatora je spajanje mreža različitih naponskih razina, te on predstavlja jedini uređaj koji ima tu mogućnost. Daje mogućnost podizanja ili spuštanja naponskih razina ovisno o potrebi. Kada se govori o prijenosu električne energije glavni cilj je da imamo što manje gubitaka prilikom prijenosa. Sami gubici ovise o kvadratu struje koja protječe kroz vod i samom otporu voda. Smanjenjem struje dolazi do smanjenja Jouleovih gubitaka, a smanjenje struje jedino se može postići podizanjem naponske razine pomoću transformatora. Transformator nije u potpunosti idealan element mreže tj. dio energije koji prenosi korisit kako bi podmorio svoje gubitke. Gubici se dijele u dvije grupe i to na gubitke u bakru i gubitke u željezu. Gubitke u bakru vežu se uz sami otpor bakra primarnog i sekundarog namota i struje koja protječe tim namotima dok se gubici u željezu vežu uz vrtložne stuje koje nastaju kao posljedica prolaska magnetskog toka kroz samu željznu jezgru transformatora i gubitke nastale zbog petlje histereze. Na slici 3.1. prikazani su energetske transformatori tvrtke Končar.



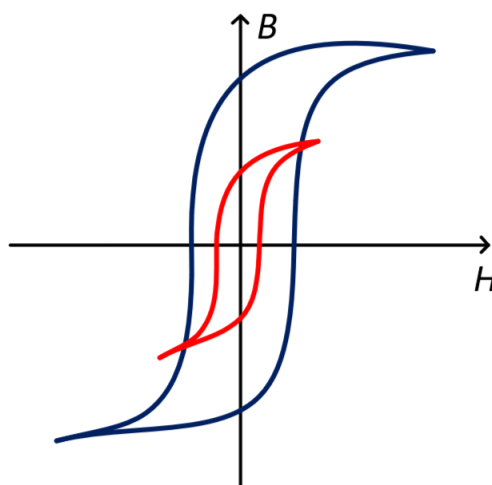
Slika 3.1. Energetske transformator [8].

Jedna od osnovnih ciljeva prilikom konstrukcije transformatora je da ima što veću iskoristivost, a to zahtjeva smanjenje gubitaka. Gubici nastali zbog vrtložnih struja smanjuju se tako da se željezna jezgra izradi od transformatorskih limova. Oblikovani transformatorski limovi slažu se u jezgru i međusobno su izolirani. Neke od osnovnih debljina limova su 0.27,0.3,0.35 ili 0.5 mm. Na slici 3.2. prikazane su izvedbe jezgre sa transformatorskim limovima.



Slika 3.2. Transformatorska jezgra izrađena od transformatorskih limova [7].

Odabir materijala od kojeg se izvodi jezgra transformatora je bitan zbog gubitaka histereze. Sama površina petlje histereze predstavlja gubitke koji nastaju pri radu transformatora. Materijali od kojih se proizvode transformatorski limovi nazivaju se feromagnetski materijali. Petlja histereze manja je za meke feromagnetske materijale kao što je slitina FeNi, a veća odnosno šira za tvrde feromagnetske materijale kao što je ugljični čelik. Na slici 3.3. prikazane su petlje histereze za tvrde i meke feromagnetske materijale.



Slika 3.3. Petlja histereze za tvrde i meke feromagnetske materijale.

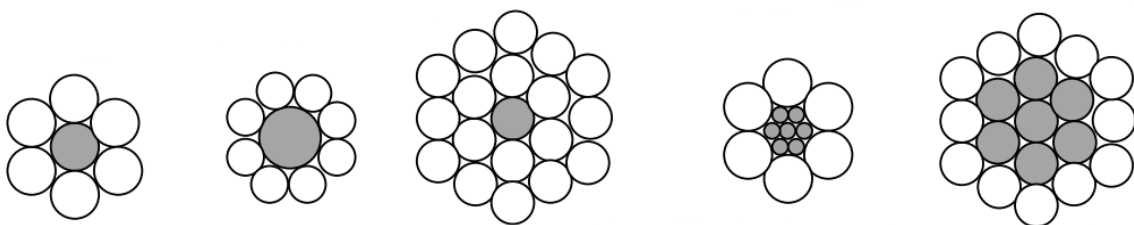
Pored gubitaka u željezu postoje i gubici u bakru. Gubici u bakru javljaju se u obliku disipacije snage odnosno zagrijavanja samih vodiča primarnog i sekundarnog namota. Zagrijavanje vodiča je nepoželjna pojava iz razloga što porastom temperature raste i otpor bakra, te iz tog razloga potrebno je osigurati hlađenje transformatora kako bi se izbjeglo pregrijavanje namota, a na poslijetku i uništenje transformatora. U tablici 3.1. dani su izrazi za izračun gubitaka transformatora.

Gubici zbog vrtložnih struja [W]	Gubici histereze [W]	Gubici u bakru [W]
$P_v = v \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot m$	$P_h = h \cdot f \cdot B_m^2 \cdot m$	$P_{Cu1} = I_1^2 \cdot R_1$ $P_{Cu2} = I_2^2 \cdot R_2$
v-jedinični gubici [W/kg] f-frekvencija [Hz] B_m -magnetska indukcija [T] m-masa jezgre [kg]	h-jedinični gubici [W/kg] f-frekvencija [Hz] B_m -magnetska indukcija [T] m-masa jezgre [kg]	I_1 -struja primara [A] I_2 -struja sekundara [A] R_1 -otpor primarnog namota [Ω] R_2 -otpor sekundarnog namota [Ω]

Tablica 3.1. Gubici tranformatora.

3.2. Vodovi

Za prijenos električne energije na velike udaljenosti najčešće se koriste dalekovodi koji se sastoje od vodiča koji služi za prijenos električne energije i izloatora koji osigurava međusobno odvajanje dijelova pod naponom. Materijali od kojih se izrađuju vodovi su legure aluminija, te sam aluminij. Najpoznatija izvedba dalekovodnog užeta je tzv. alučel vodič koji ima puno bolja mehanička svojstva u odnosu na ostale izvedbe dalekovodnog užeta. Radi se o čeličnom užetu oko kojeg se nalazi aluminij koji je zaslužan za vođenje električne struje dok čelično uže preuzima sva mehanička naprezanja[5]. Na slici 3.4. prikazane su razne izvedbe alučel užeta.



Slika 3.4. Različiti presjeci alučel vodiča [7].

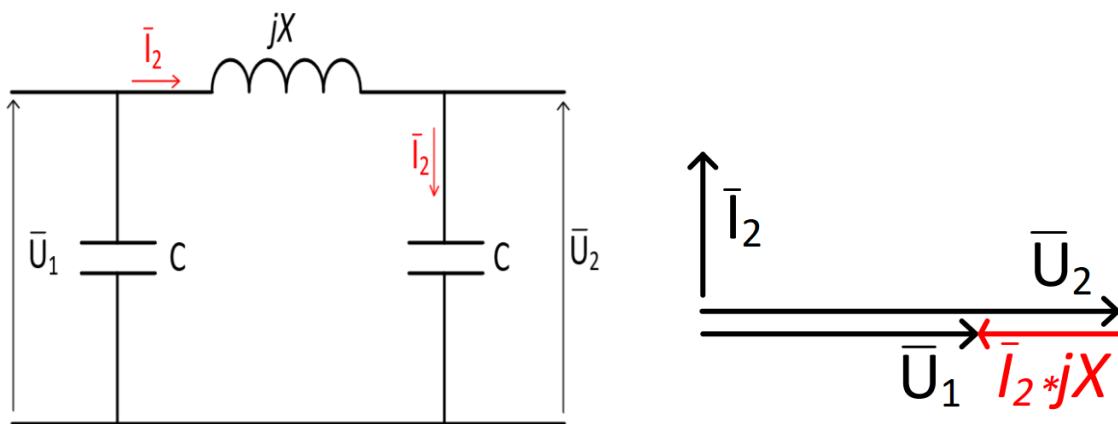
Razlog korištenja alučel dalekovodnog užeta je i pojava skin efekta. Skin efekt je pojava vezana uz površinsko protjecanje struje tj. gustoća struje raste prema rubu samog vodiča zbog manjeg induktivnog otpora. Prema [7] skin efekt ovisi o presjeku vodiča, frekvenciji struje, te permeabilnosti i otpornosti materijala vodiča. Što je veći presjek skin efekt je izraženiji, isto vrijedi i za frekvenciju struje jer je tada induktivni otpor, tj. reaktancija veća.

Pored skin efekta postoji niz pojava koje se javljaju duž voda, te izazivaju niz problema prilikom prijenosa električne energije. Proučavanjem takvih pojava došlo se do relativno jednostavnih rješenja koja utjecaj takvih pojava svode na najnižu moguću razinu. Jedna od takvih pojava naziva se korona. Korona efekt nastaje kada jakost električnog polja oko vodiča prekorači dielektričnu čvrstoću izolatora koji je u ovom slučaju zrak. Prema [7] ukoliko je jakost električnog polja oko vodiča manja od električne čvrstoće zraka nema pojave korone, a ukoliko je veća nastupa korona. Pojavu korone prati tinjavo izbijanje oko vodiča plavičaste (modre) boje, čuje se pucketanje i osjeti se miris ozona. Kako bi spriječili pojavu korona efekta potrebno je raširiti električno polje oko vodiča kako bi ono zahvaćalo što veću površinu dielektrika. Najlakši način je upotreba paralelnih vodiča koji omogućavaju širenje električnog polja. Na slici 3.5. prikazan je korona efekt.



Slika 3.5. Prikaz korona efekta.[9]

Efekt koji je zaslužan za jednu neobičnu pojavu koja se javlja na kraju voda naziva se Ferantijev efekt, a ta pojava se javlja u obliku povišenja napona na kraju voda u odnosu na početak voda. Ova pojava izraženija je kod jako dugačkih prijenosnih vodova, a posebno kod kabela iz razloga što kabele imaju izraženiji kapacitet već pri malim duljinama. Javalja se u samo dva slučaja i to kad je vod u praznom hodu ili kada je slabo opterećen. Prema literaturi [7] Ferantijev efekt javlja se samo u ova dva slučaja iz razloga što tada vodom teku male kapacitivne struje koje stvaraju pad napona na uzdužnoj impedanciji koji je u protufazi sa naponom na kraju voda, te iz tog razloga imamo veći napon na kraju voda nego na početku. Na slici 3.6. prikazan je shematski prikaz i fazorski diagram ferantijevog efekta. Zbog jednostavnosti zanemeren su otpor i odvod voda.



Slika 3.6. Shematski i fazorski prikaz Ferantijevog efekta.[7]

3.3 Nadomjesna shema transformatora

Prilikom analize rada transformatora kreće se od najdetaljnijeg matematičkog modela koji se naziva T-shema. T-shema transformatora je sama po sebi jako detaljna i zbog toga proračune čini složenijima, te iz tog razloga nastoji se pojednostaviti samu shemu, a samim time i proračun. U tablici 3.2. prikazan je postupak pomoću kojeg je pojednostavljena T-shema transformatora. Novonastala nadomjesna shema naziva se Γ -shema (gama-shema) transformatora i gotovo se uvijek koristi u proračunima zbog jednostavnosti.

Transformator	
T-shema	
Parametri T-sheme	R_1, R_2' - Otpori primarnog i sekundarnog namota X_1, X_2' - Modeli rasipnih magnetskih tokova primarnog i sekundarnog namota R_0 - Otpor kojim modelirano gubitke u željezu. X_0 - Reaktancija koja predstavlja glavni magnetski tok.
Matematički izrazi	$\bar{Z}_1 = R_1 + jX_1$ $\bar{Z}_2' = R_2' + jX_2'$ $\bar{Y}_{T0} = \frac{1}{R_0} - j\frac{1}{X_0}$
Γ -shema	

Tablica 3.2. Nadomjesna shema transformator

Najveći problem kod T-sheme transformatora su parametri od kojih je izrađena iz razloga što su u većini slučajeva nepoznati i ne mogu se pronaći na natpisnoj pločici transformatora. To je još jedan razlog zašto se izbjegava T-shemu za analizu rada transformatora. Model koji se najčešće koristi je Γ -shema iz razloga što je jednostavna i jako lako se mogu izračunati svi potrebni parametri. Podaci koji su potrebni za izračun svih parametara Γ -sheme uglavnom su poznati i nalaze se na natpisnoj pločici transformatora, a navedeni su u tablici 3.3.

Naziv podatka	Oznaka
Nazivni linijski napon primara	U_{n1} [V]
Nazivni linijski napon sekundara	U_{n2} [V]
Trofazna prividna snaga	S_n [VA]
Gubici u praznom hodu	P_0 [W]
Gubici u kratkom spoju	P_k [W]
Relativni napon kratkog spoja	u_k [%]
Relativna struja magnetiziranja	i_0 [%]

Tablica 3.3. Podaci transformatora potrebni za izračun parametara Γ -sheme.

Poznavanjem podataka iz tablice 3.3. i korištenjem slijedećih matematičkih izraza mogu se izračunati svi potrebni parametri Γ -sheme transformatora.

$$Z_T = \frac{u_k(\%)}{100} \cdot \frac{U_B^2}{S_n} \quad (3-1)$$

$$R_T = \left(\frac{U_B}{S_n}\right)^2 \cdot P_k \quad (3-2)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (3-3)$$

$$\bar{Z}_T = R_T + jX_T \quad (3-4)$$

$$Y_{T0} = \frac{i_0(\%)}{100} \cdot \frac{S_n}{U_B^2} \quad (3-5)$$

$$G_{T0} = \frac{P_0}{U_B^2} \quad (3-6)$$

$$B_{T0} = \sqrt{Y_{T0}^2 - G_{T0}^2} \quad (3-7)$$

$$\bar{Y}_{T0} = G_{T0} - jB_{T0} \quad (3-8)$$

3.4 Nadomjesna shema voda

Prema[7] vrijednosti osnovnih konstanti voda ovisi o materijalu od kojih je vod načinjen, svojstvima okoline te o geometrijskom rasporedu voda. Dijele se na tople (otpor i odvod) i hladne (induktivitet i kapacitet) jer prolaskom struje otpor i odvod izazivaju toplinske gubitke. Prema položaju na vodu dijele se na uzdužne (otpor i induktivitet) i popriječne (odvod i kapacitet). U tablici 3.4. dan je opis nadomjesne sheme voda sa pripadajućim parametrima.

Vod	
Π-shema	
Matematički izrazi	$\bar{Z} = R_1 \cdot l + jX_1 \cdot l$ $\frac{\bar{Y}}{2} = \frac{G_1}{2} \cdot l + j \cdot \frac{B_1}{2} \cdot l$ $X_1 = \omega \cdot L_1$ $B_1 = \omega \cdot C_1$ $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$
Parametri Π-sheme	<p>R_1-jedinični otpor voda [Ω/km].</p> <p>L_1-jedinični induktivitet voda [H/km].</p> <p>G_1- jedinični odvod voda [S/km].</p> <p>C_1-jedinični kapacitet voda [F/km].</p> <p>X_1-jednični induktivni otpor[Ω/km].</p> <p>B_1-jedinična kapacitivna vodljivost[S/km].</p> <p>ω-kutna frekvecnija [rad/s].</p>

Tablica 3.4. Nadomjesna shema voda.

Prema [7] jedinični otpor voda definiran je kao pad napona ΔU ili gubitak snage ΔP po jedinici duljine voda ako vodom teče istosmjerna struja vrijednost 1 A :

$$R_1 = \frac{\Delta U}{I} = \frac{\Delta P}{I^2} = \frac{\rho}{A} [\Omega/\text{km}] \quad (3-9)$$

gdje je:

- I - struja [A]
- ρ - specifični otpor vodiča [Ωm]
- A-površina popriječnog presjeka vodiča [m^2]

Prema [7] odvod voda definiramo kao omjer gubitaka po jedinici duljine i kvadrata napona, odnosno kao omjer djelatne komponente popriječne struje i napona, te nastaje zbog nesavršenosti izolacije.

$$G_1 = \frac{\Delta I_r}{U} = \frac{\Delta P}{U^2} [\text{S}/\text{km}] \quad (3-10)$$

gdje je :

- ΔI_r – djelatna komponenta popriječne struje [A]
- U – napon [V].
- ΔP – gubici po jedinici duljine [W].

Jedinični odvod voda sastoji se od dva dijela i to od strujnog vođenja izolacije i gubitaka u izolaciji zbog izmjenične polarizacije.

$$G_1 = G_0 + G_d \quad (3-11)$$

gdje je:

- G_0 – strujno vođenje izolacije
- G_d – gubici u uzolaciji

U većini slučajeva za nadzemne vodove vrijedi da je $G_1=0.1\mu\text{S}/\text{km}$ te se uglavnom ne uzima u obzor prilikom proračuna.

Prema [7] Induktivitet predstavlja svojstvo petlje da se opire promijeni struje kroz petlju. Vodič protjecan električnom strujom oko sebe stvara magnetsko polje čija je snaga proporcionalana struji. Svakom promjenom struje mijenja se i magnetsko polje oko vodiča. Prema Faradayevom

zakonu vidimo da svaka promjena magnetskog polja u okolini vodiča inducira elektromotornu silu u vodiči te ta inducirana elektromotorna sila opire se promjeni struje:

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} \quad (3-12)$$

gdje je:

- Ψ – ulančani magnetski tok [Wb]

Uvođenjem induktivitea kao omjer ulančanog magnetskog toka i struje te uvštavanjem u izraz (3-12) slijedi:

$$L = \frac{\Psi}{I} \quad (3-13)$$

$$e = -L \frac{di(t)}{dt} \quad (3-14)$$

gdje je:

- L – induktivitet [H]

Prema [7] kapacitet je svojstvo voda da uz određeni napon na sebe može primiti određenu količinu električnog naboja. Također ga možemo definirati kao sposobnost materijala da skladišti elektrostatsku energiju:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta U} \quad (3-15)$$

4.MJERENJA NA SIMULATORU VODA

Za simulaciju elektroenergetke mreže koristi se laboratorijski simulator voda pod nazivom Leybold Didactic [10] pomoću kojeg se mogu simulirati sva pogonska stanja elektroenergetske mreže kao što su: prazni hod, kratki spoj te postoji mogućnost priključivanja različitih vrsta opterećenja kao što su: djelatna, induktivna i kapacitivna opterećenja te njihove kombinacije. Dodatne mogućnosti koje pruža Leybold Didactic su odabir između 3 različite duljine dalekovoda, a to su 144 km, 216 km i 360 km. Dijelovi od kojih se sastoji simulator voda su:

- Zaštitni uređaji
- Trofazni transformator
- Dalekovod
- Mjerni instrumenti
- Toršila

Kao izvor napajanja simulatora voda korišten je trofazni regulacijski izvor napajanja. Bitno je napomenuti da je cijela simulacija odrađena trofazno, ali sve pojave mjerene su samo na jednoj fazi zbog jednostavnosti i zbog simetričnog opterećenja sustava te da je mjerilo 1:1000 tj. 1V na simulatoru odgovara 1000V u stvarnosti. Na slikama 4.1. i 4.2. prikazani su simulator voda i trofazni izvod napajanja



Slika 4.1. Leybold Didactic simulator voda



Slika 4.2. Trofazni izvor napajanja

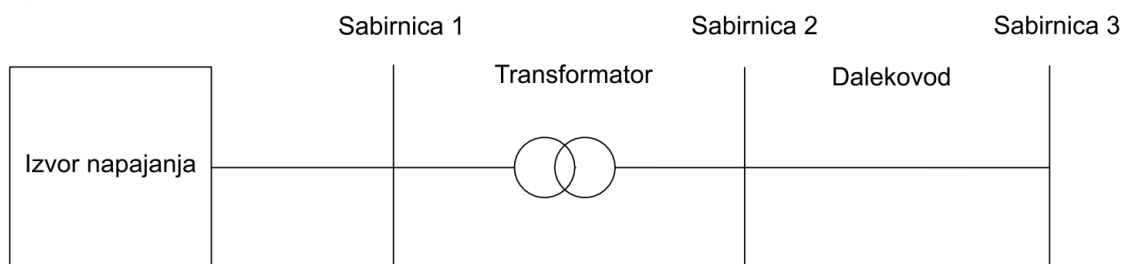
Simulacije koje se provode na simulatoru voda su:

- Prazan hod jednostrukog voda
- Prazan hod dva paralelna voda
- Podopterećenje jednostrukog voda
- Podopterećenje dva paralelna voda
- Jako opterećenje jednostrukog voda
- Jako opterećenje dva paralelna voda

Sve gore navedene simulacije odrađene su za tri već spomenute duljine voda.

4.1. Prazan hod jednostrukog voda

Prazan hod dalekovoda je jedno od realnih stanja u kojemu se dalekovod može naći te je cilj ove simulacije izmjeriti i prikazati strujno-naponske prilike koje vladaju duž dalekovoda. Točke u kojima su mjerene struje, naponi i snage su sabirnice prikazane na slici 4.3 koja predstavlja načelnu shemu spoja jednostrukog voda u praznom hodu.



Slika 4.3. Načelna shema spoja.

Promatranjem izmjerenih rezultata primjećuje se Ferantijev efekt koji se javlja u obliku porasta napona na kraju voda kojeg uzrokuju male kapacitivne struje koje tekü vodom u praznom hodu.

Izmjerena djelatna snaga sabirnici 1 u sva 3 slučaja odgovara gubicima transformatora u praznom hodu. Jalova kapacitivna snaga izmjerena na sabirnici 1 je negativna što nam govori da se cijeli sustav ponaša kao kapacitivno trošilo.

Duljina voda		144 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Vrsta opterećenja		Prazan hod			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	230	U_{v1} [V]	232.2	U_{v2} [V]	235.3
I_1 [A]	0.06	I_{v1} [A]	0.07	I_{v2} [A]	0.002
P_1 [W]	14.4	P_{v1} [W]	0.33	P_{v2} [W]	0
Q_1 [VAr]	-2.3	Q_{v1} [VAr]	-33.82	Q_{v2} [VAr]	0.4
S_1 [VA]	14.58	S_{v1} [VA]	33.82	S_{v2} [VA]	0.4
$\cos_1 \varphi$	0.98	$\cos_{v1} \varphi$	0.02	$\cos_{v2} \varphi$	---

Tablica 4.1. Izmjereni podaci za vod duljine 144 km.

Povećanjem duljine na 216 km povećava se i kapacitet voda pa je Fernatijev efekt izraženiji u odnosu na prethodni slučaj. Povećanje kapaciteta rezultiralo je i povećanju kapacitivne jalove snage koja se uzima iz mreže.

Duljina voda		216 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Vrsta opterećenja		Prazan hod			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	230	U_{v1} [V]	234.6	U_{v2} [V]	238.7
I_1 [A]	0.109	I_{v1} [A]	0.217	I_{v2} [A]	0.002
P_1 [W]	14.7	P_{v1} [W]	1.18	P_{v2} [W]	0
Q_1 [VAr]	-20.3	Q_{v1} [VAr]	-50.88	Q_{v2} [VAr]	0.4
S_1 [VA]	25.06	S_{v1} [VA]	50.9	S_{v2} [VA]	0.4
$\cos_1 \varphi$	0.58	$\cos_{v1} \varphi$	0.02	$\cos_{v2} \varphi$	---

Tablica 4.2. Izmjereni podaci za vod duljine 216 km.

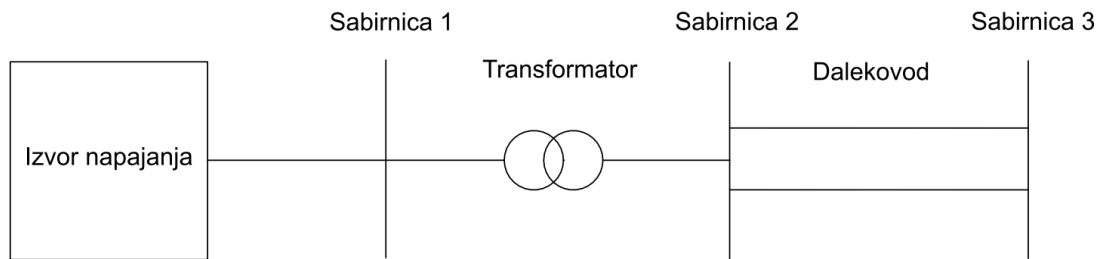
Svakim povećanjem duljine voda kapacitet je izraženiji te samim time i porast napona. Može se primjetiti da svakim povećanjem duljine voda faktor snage izmjeren na sabirnici 1 opada iz razloga što je djelatna snaga gotovo konstantna, ali jalova kapacitivna snaga se povećava što rezultira povećanjem kuta između struje i napona odnosno smanjenjm faktora snage.

Duljina voda		360 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Vrsta opterećenja		Prazan hod			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	230	U_{v1} [V]	232,6	U_{v2} [V]	241,7
I_1 [A]	0,135	I_{v1} [A]	0,229	I_{v2} [A]	0,002
P_1 [W]	15,7	P_{v1} [W]	1,2	P_{v2} [W]	0
Q_1 [VAr]	-26,8	Q_{v1} [VAr]	-54	Q_{v2} [VAr]	0,4
S_1 [VA]	31,1	S_{v1} [VA]	54	S_{v2} [VA]	0,4
$\cos_1 \varphi$	0,50	$\cos_{v1} \varphi$	0,02	$\cos_{v2} \varphi$	---

Tablica 4.3. Izmjereni podaci za vod duljine 360 km.

4.2. Prazan hod dva paralelna voda

Ne toliko rijedak slučaj da se na stupovima dalekovoda vide dva paralelna vodiča koja su spojena na istu fazu sustava. Takvim spajanjem vodova znatno utječemo na parametre voda, posljedično i na strujno-naponske prilike duž voda. Uzdužne impedancije dva paralelna voda će se zbrojiti po pravilu paralelnog spoja otpornika te će ukupna impedancija iznositi pola vrijednosti impedancije pojedinačnog voda, a što se tiče popriječne admitancije tj. popriječnih kapaciteta oni će se zbrojiti po pravilu paralelnog spoja kapaciteta te će ukupna vrijednost biti dva puta veća od jednog pojedinačnog kapaciteta voda ako su vodovi istih karakteristika. Na slici 4.4. prikazana je načelna shem spoja praznog hoda dva paralelna voda.



Slika 4.4. Načelna shema spoja dva paralelna voda.

Ovakvom konfiguracijom vodova u praznom hodu primjećuje se da je Ferantijev efekt izraženiji u odnosi na prethodni slučaj što je i očekivano iz razloga što je kapacitet sada dvostruko veći te je samim time i porast napona izraženiji. Najizraženiji porast napona vidljiv je pri najvećoj duljini voda. Osim povećanja napona vidljiv je i značajan porast jalove kapacitivne snage izmjerene na sabirnicama 1 i 2.

Duljina voda	144 km					
Tip voda	Paralelni vod					
Vrsta opterećenja	Prazan hod					
	Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	230,05	U_{v1} [V]	234,9	U_{v2} [V]	242,2	
I_1 [A]	0,107	I_{v1} [A]	0,163	I_{v2} [A]	0,002	
P_1 [W]	15	P_{v1} [W]	1,1	P_{v2} [W]	0	
Q_1 [VAr]	-19,5	Q_{v1} [VAr]	-38,2	Q_{v2} [VAr]	0,4	
S_1 [VA]	24	S_{v1} [VA]	38,2	S_{v2} [VA]	0,4	
$\cos_1 \varphi$	0,61	$\cos_{v1} \varphi$	0,03	$\cos_{v2} \varphi$	---	

Tablica 4.4. Izmjereni podaci za dva paralelna voda duljine 144 km.

Duljina voda		216 km			
Tip voda		Paralelni			
Vrsta opterećenja		Prazan hod			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	229,8	U_{v1} [V]	240,4	U_{v2} [V]	248,2
I_1 [A]	0,347	I_{v1} [A]	0,458	I_{v2} [A]	0,002
P_1 [W]	17,2	P_{v1} [W]	2,1	P_{v2} [W]	0
Q_1 [VAr]	-77,8	Q_{v1} [VAr]	-110,07	Q_{v2} [VAr]	0,4
S_1 [VA]	79,7	S_{v1} [VA]	110,2	S_{v2} [VA]	0,4
$\cos_1 \varphi$	0,27	$\cos_{v1} \varphi$	0,02	$\cos_{v2} \varphi$	---

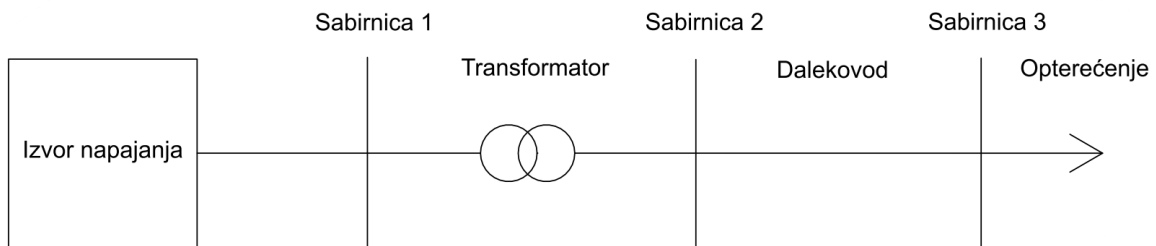
Tablica 4.5. Izmjereni podaci za dva paralelna voda duljine 216 km.

Duljina voda		360 km			
Tip voda		Paralelni vod			
Vrsta opterećenja		Prazan hod			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	230	U_{v1} [V]	240,0	U_{v2} [V]	252,6
I_1 [A]	0,344	I_{v1} [A]	0,457	I_{v2} [A]	0,002
P_1 [W]	17,1	P_{v1} [W]	2,00	P_{v2} [W]	0
Q_1 [VAr]	-76,9	Q_{v1} [VAr]	-109,6	Q_{v2} [VAr]	0,4
S_1 [VA]	78,8	S_{v1} [VA]	109,6	S_{v2} [VA]	0,4
$\cos_1 \varphi$	0,22	$\cos_{v1} \varphi$	0,02	$\cos_{v2} \varphi$	---

Tablica 4.6. Izmjereni podaci za dva paralelna voda duljine 360 km

4.3. Podopterećenje jednostrukog voda

Svaki dalekvod koji prenosi električnu energiju je opterećen. Neki dalekovodi jače, a neki slabije te su iz tog razloga simulirane dvije vrste opterećenja s ciljem prikazivanja strujno-naponskih prilika za oba opterećenja. Slika 4.5. prikazuje načelnu shemu spoja opterećenja jednostrukog voda.



Slika 4.5. Načelna shema spoja.

Teret koji je priključen je djelatno-induktivan, a to se postiglo serijskim spajanjem otpornika otpornosti $R=1050 \Omega$ i zavojnice induktiviteta $L=1.2 \text{ H}$. Važno je naglasiti da su sve 3 faze jednako opterećenje kako bi se utjecaj nesimetrije sveo na minimum. U tablici 4.7. prikazano je opterećenje sva faze.

Opterećenje			
$R_1[\Omega]$	1050	$L_1[\text{H}]$	1,2
$R_2[\Omega]$	1050	$L_2[\text{H}]$	1,2
$R_3[\Omega]$	1050	$L_3[\text{H}]$	1,2

Tablica 4.7. Opterećenje voda

Analizom izmjerenih rezultata za vod duljine 144 km ponovno primjećuje se porast napona na kraju voda što je i očekivana pojava za vodove koji su u praznom hodu, ali i za vodove koji su slabo opterećeni.

Djelatna snaga ostaje gotovo ista duž voda za sve 3 duljine dok je najveća promjena vidljiva u jalovoj kapacitivnoj snazi na početku voda koja se povećava sa povećanjem duljine voda što je i očekivano jer je izraženije kapacitivno svojstvo voda u odnosu na induktivno.

Duljina voda		144 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Vrsta opterećenja		Opterećenje prema tablici 4.8.			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	230,5	U_{v1} [V]	229,8	U_{v2} [V]	233,8
I_1 [A]	0,276	I_{v1} [A]	0,169	I_{v2} [A]	0,186
P_1 [W]	52,9	P_{v1} [W]	38,4	P_{v2} [W]	37,6
Q_1 [VAr]	35,5	Q_{v1} [VAr]	3,45	Q_{v2} [VAr]	34,65
S_1 [VA]	63,7	S_{v1} [VA]	38,9	S_{v2} [VA]	49,51
$\cos_1 \varphi$	0,83	$\cos_{v1} \varphi$	0,99	$\cos_{v2} \varphi$	0,72

Tablica 4.8. Izmjereni podaci za vod duljine 144 km.

Duljina voda		216 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Vrsta opterećenja		Opterećenje prema tablici 4.8.			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	228,5	U_{v1} [V]	231,5	U_{v2} [V]	232,2
I_1 [A]	0,26	I_{v1} [A]	0,298	I_{v2} [A]	0,273
P_1 [W]	55	P_{v1} [W]	40,7	P_{v2} [W]	39,9
Q_1 [VAr]	-22,8	Q_{v1} [VAr]	-57,55	Q_{v2} [VAr]	48,16
S_1 [VA]	59,6	S_{v1} [VA]	69,25	S_{v2} [VA]	63,4
$\cos_1 \varphi$	0,92	$\cos_{v1} \varphi$	0,57	$\cos_{v2} \varphi$	0,62

Tablica 4.9. Izmjereni podaci za vod duljine 216 km.

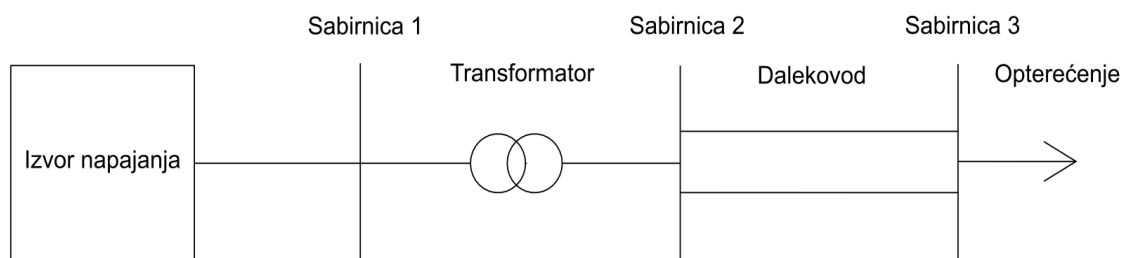
Ono što je očekivano za vod duljine 360 km je da Ferantijev efekt bude najizraženiji, ali vidimo da je napon na kraju voda manji nego na početku. Razlog je u tome što za vod duljine 216 km i za vod duljine 360 km ukupni kapacitet iznosi $3\mu\text{F}$ te iz tog razloga povećanjem duljine voda na 360 km dolazi do promjene samo na uzdužnoj impedanciji voda koja se povećava što rezultira većem padu napona na uzdužnoj impedanciji voda što za posljednicu ima smanjenje napona na kraju voda u odnosu na početak.

Duljina voda		360 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Vrsta opterećenja		Opterećenje prema tablici 4.8.			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	230.2	U_{v1} [V]	229.6	U_{v2} [V]	228.8
I_1 [A]	0.25	I_{v1} [A]	0.291	I_{v2} [A]	0.282
P_1 [W]	54.6	P_{v1} [W]	40.66	P_{v2} [W]	40.01
Q_1 [VAr]	-21.4	Q_{v1} [VAr]	-53,85	Q_{v2} [VAr]	19.7
S_1 [VA]	58.2	S_{v1} [VA]	66,92	S_{v2} [VA]	64,5
$\cos_1 \varphi$	0.93	$\cos_{v1} \varphi$	0.6	$\cos_{v2} \varphi$	0.62

Tablica 4.10. Izmjereni podaci za vod duljine 360 km.

4.4. Podopterećenje dva paralelna voda

Slika 4.6. prikazuje načelnu shemu spoja opterećenja dva paralelna voda.



Slika 4.6. Načelna shema spoja.

Promatranjem slijedećeg slučaja primjećuje se najveći porast napona do sada za sve duljine voda što rezultira najvećim smanjenjem struje na kraju voda. U sva tri slučaja pored djelatne snage iz mreže se uzima i jalova kapacitivna snaga jer su kapacitivna svojstva voda veća svakim povećanjem duljine voda

Duljina voda		144 km			
Tip voda		Paralelni vod			
Vrsta opterećenja		Opterećenje prema tablici 4.8.			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	229,8	U_{v1} [V]	230,6	U_{v2} [V]	239,4
I_1 [A]	0,255	I_{v1} [A]	0,248	I_{v2} [A]	0,194
P_1 [W]	52,7	P_{v1} [W]	38,5	P_{v2} [W]	38,4
Q_1 [VAr]	-23,8	Q_{v1} [VAr]	-42,4	Q_{v2} [VAr]	24,8
S_1 [VA]	57,9	S_{v1} [VA]	57,1	S_{v2} [VA]	45,6
$\cos_1 \varphi$	0,91	$\cos_{v1} \varphi$	0,67	$\cos_{v2} \varphi$	0,84

Tablica 4.11. Izmjereni podaci za dva paralelna vod duljine 144 km

Duljina voda		216 km			
Tip voda		Paralelni vod			
Vrsta opterećenja		Opterećenje prema tablici 4.8.			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	229,1	U_{v1} [V]	235,8	U_{v2} [V]	239,4
I_1 [A]	0,342	I_{v1} [A]	0,393	I_{v2} [A]	0,224
P_1 [W]	57	P_{v1} [W]	42,1	P_{v2} [W]	46,6
Q_1 [VAr]	-53,7	Q_{v1} [VAr]	-82,6	Q_{v2} [VAr]	26,5
S_1 [VA]	78,3	S_{v1} [VA]	92,7	S_{v2} [VA]	53,6
$\cos_1 \varphi$	0,73	$\cos_{v1} \varphi$	0,45	$\cos_{v2} \varphi$	0,85

Tablica 4.12. Izmjereni podaci za dva paralelna vod duljine 216 km.

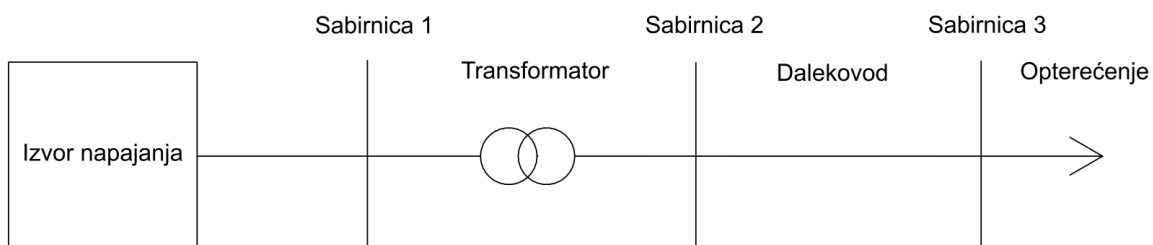
Primjećuje se drastičan porast jalove kapacitivne snage, a samim time i smanjenje faktora snage promjenom duljine voda sa 144 km na 216 km zbog povećanja kapaciteta voda. Pri duljini od 360 km na sabirnici 2 primjećuje se blago popravljavanje faktora snage, a samim time i smanjenje jalove kapacitivne snage iz razloga što vodovi duljine 216 km i 360 km imaju jednake kapacitete te samim porastom duljine dolazi do promjene uzdužnih parametrima voda. Za ovaj konkretan slučaj povećava se induktivitet voda pa samim time dolazi i do povećanog generiranja jalove induktivne snage koja kompenzira jalovu kapacitivnu snagu voda te je zabilježen pad iste.

Duljina voda		360 km			
Tip voda		Paralelni vod			
Vrsta opterećenja		Opterećenje prema tablici 4.8.			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	229,6	U_{v1} [V]	236,1	U_{v2} [V]	241
I_1 [A]	0,32	I_{v1} [A]	0,370	I_{v2} [A]	0,234
P_1 [W]	56,9	P_{v1} [W]	41,2	P_{v2} [W]	48,4
Q_1 [VAr]	-46,6	Q_{v1} [VAr]	-76,6	Q_{v2} [VAr]	28,8
S_1 [VA]	73,5	S_{v1} [VA]	87,3	S_{v2} [VA]	56,39
$\cos_1 \varphi$	0,77	$\cos_{v1} \varphi$	0.47	$\cos_{v2} \varphi$	0,86

Tablica 4.13. Izmjereni podaci za dva paralelna vod duljine 360 km

4.5. Jako opterećenje jednostrukog voda

Slijedeće dvije simulacije predstavljaju najčešće stanje u kojem se nalaze dalekovodi kojima prenosimo električnu energiju. Slika 4.5. prikazuje načelnu shemu spoja opterećenja jednostrukog voda.



Slika 4.7. Načelna shema spoja.

U tablici 4.14. prikazano je opterećenje svake faze simulatora voda.

Opterećenje			
$R_1[\Omega]$	200,8	$L_1[H]$	0,4
$R_2[\Omega]$	201,2	$L_2[H]$	0,4
$R_3[\Omega]$	202,1	$L_3[H]$	0,4

Tablica 4.14. Opterećenje voda.

Opterećenje ostaje djelatno-induktivno kao i u svim mjerenjima do sada. Primjećuje se kako vodom teku 2-3 puta veće struje nego u prethodnim slučajevima te samim time dolazi i do značajnijeg pada napona na uzdužnoj impedanciji voda što rezultira pojavom manjeg napona na kraju voda u odnosu na početak. Također vidi se kako više ne postoji kapacitivna jalova snaga u sustavu jer su jalove induktivne snage voda i tereta nadomjestila kapacitivnu snagu voda.

Najznačajniji pad napona javlja se kod voda duljine 360 km što je i očekivano s tim da pri toj duljini vod ima najveći otpor te samim time zabilježena je i najmanja struja kroz vod.

Duljina voda		144 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Vrsta opterećenja		Opterećenje prema tablici 4.12.			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
$U_1 [V]$	230,03	$U_{v1} [V]$	217,8	$U_{v2} [V]$	203,7
$I_1 [A]$	0,807	$I_{v1} [A]$	0,678	$I_{v2} [A]$	0,713
$P_1 [W]$	131,8	$P_{v1} [W]$	113,9	$P_{v2} [W]$	111,6
$Q_1 [VAr]$	131,1	$Q_{v1} [VAr]$	92,8	$Q_{v2} [VAr]$	92,8
$S_1 [VA]$	185,90	$S_{v1} [VA]$	146,9	$S_{v2} [VA]$	145,1
$\cos_1 \varphi$	0,77	$\cos_{v1} \varphi$	0,78	$\cos_{v2} \varphi$	0,77

Tablica 4.15. Izmjereni podaci za jednostruki vod duljine 144 km

Duljina voda		216 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Vrsta opterećenja		Opterećenje prema tablici 4.12.			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	231,1	U_{v1} [V]	221,3	U_{v2} [V]	195,9
I_1 [A]	0,720	I_{v1} [A]	0,591	I_{v2} [A]	0,7
P_1 [W]	128,3	P_{v1} [W]	111,3	P_{v2} [W]	107,9
Q_1 [VAr]	105,9	Q_{v1} [VAr]	68,9	Q_{v2} [VAr]	84,6
S_1 [VA]	166,4	S_{v1} [VA]	130,9	S_{v2} [VA]	137,1
$\cos_1 \varphi$	0,77	$\cos_{v1} \varphi$	0,85	$\cos_{v2} \varphi$	0,79

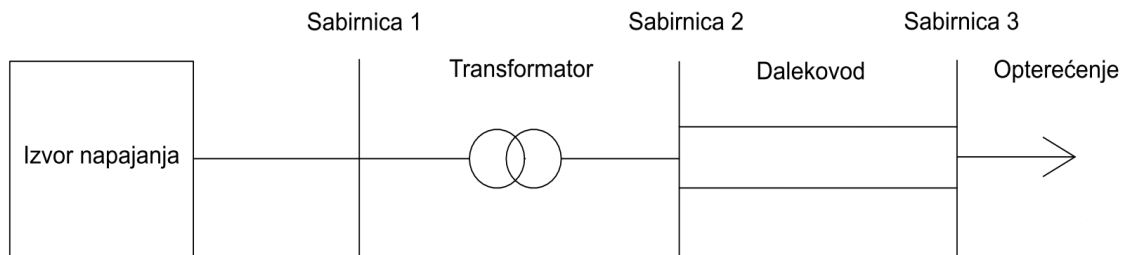
Tablica 4.16. Izmjereni podaci za jednostruki vod duljine 216 km

Duljina voda		360 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Vrsta opterećenja		Opterećenje prema tablici 4.12.			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	230,3	U_{v1} [V]	220,8	U_{v2} [V]	178,1
I_1 [A]	0,663	I_{v1} [A]	0,530	I_{v2} [A]	0,642
P_1 [W]	112	P_{v1} [W]	95,1	P_{v2} [W]	89,3
Q_1 [VAr]	103,7	Q_{v1} [VAr]	68,2	Q_{v2} [VAr]	71,2
S_1 [VA]	152,7	S_{v1} [VA]	117	S_{v2} [VA]	114,3
$\cos_1 \varphi$	0,73	$\cos_{v1} \varphi$	0,81	$\cos_{v2} \varphi$	0,78

Tablica 4.17. Izmjereni podaci za jednostruki vod duljine 360 km

4.6. Jako opterećenje dva paralelna voda

Dolazimo i do posljednjeg mjerenja kod kojeg promatramo strujno-naponske prilike dva paralelno spojena voda. Opterećenje je isto kao i prethodnom slučaju. Slika 4.8. prikazuje načelnu shemu spoja opterećenja dva paralelna voda.



Slika 4.8. Načelna shema spoja.

Ono što je očekivano vezano za vrijednosti napona na kraju voda je da budu veće nego u prethodnom slučaju jer u sustavu sada imamo dva paralelna voda što znači da su kapaciteti duplo veći. Kapaciteti će uvijek nastojati podići napon što možemo zaključiti iz prethodnih mjerenja.

Duljina voda	144 km					
Tip voda	Paralelni vod					
Vrsta opterećenja	Opterećenje prema tablici 4.12.					
	Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	230,4	U_{v1} [V]	217,1	U_{v2} [V]	211,5	
I_1 [A]	0,811	I_{v1} [A]	0,676	I_{v2} [A]	0,768	
P_1 [W]	123,7	P_{v1} [W]	104,9	P_{v2} [W]	103,8	
Q_1 [VAr]	140,2	Q_{v1} [VAr]	102,4	Q_{v2} [VAr]	125,2	
S_1 [VA]	186,9	S_{v1} [VA]	146,6	S_{v2} [VA]	162,5	
$\cos \varphi_1$	0,66	$\cos \varphi_{v1}$	0,72	$\cos \varphi_{v2}$	0,64	

Tablica 4.18. Izmjereni podaci za dva paralelna voda duljine 144 km

Duljina voda		216 km			
Tip voda		Paralelni vod			
Vrsta opterećenja		Opterećenje prema tablici 4.2.			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	229,4	U_{v1} [V]	220,9	U_{v2} [V]	207,3
I_1 [A]	0,741	I_{v1} [A]	0,626	I_{v2} [A]	0,790
P_1 [W]	143,3	P_{v1} [W]	125,5	P_{v2} [W]	104,3
Q_1 [VAr]	91,5	Q_{v1} [VAr]	58	Q_{v2} [VAr]	126,3
S_1 [VA]	170,1	S_{v1} [VA]	138,3	S_{v2} [VA]	163,8
$\cos_1 \varphi$	0,84	$\cos_{v1} \varphi$	0,91	$\cos_{v2} \varphi$	0,64

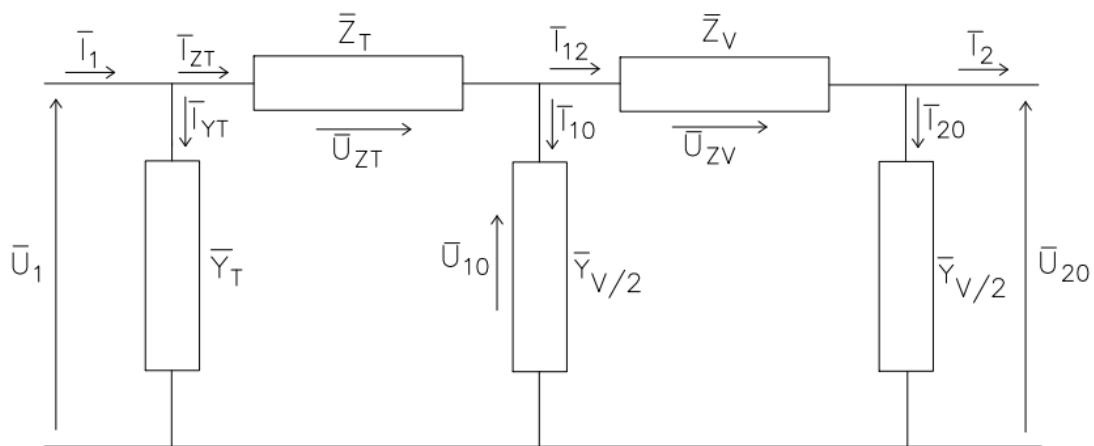
Tablica 4.19. Izmjereni podaci za dva paralelna voda duljine 216 km

Duljina voda		360 km			
Tip voda		Paralelni vod			
Vrsta opterećenja		Opterećenje prema tablici 4.2.			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	230,6	U_{v1} [V]	224,3	U_{v2} [V]	205,7
I_1 [A]	0,675	I_{v1} [A]	0,571	I_{v2} [A]	0,742
P_1 [W]	141,4	P_{v1} [W]	123,9	P_{v2} [W]	120,6
Q_1 [VAr]	65,6	Q_{v1} [VAr]	32,2	Q_{v2} [VAr]	93,4
S_1 [VA]	155,8	S_{v1} [VA]	128,1	S_{v2} [VA]	152,4
$\cos_1 \varphi$	0,91	$\cos_{v1} \varphi$	0,97	$\cos_{v2} \varphi$	0,79

Tablica 4.20. Izmjereni podaci za dva paralelna voda duljine 360 km

5. PRORAČUN POMOĆU NADOMJESNIH SHEMA

Proračun pomoću nadomjesnih shema predstavlja jedan od načina analize strujno-naponskih prilika transformatora i voda. Proračun je proveden tako da su referentne veličine podaci izmjereni na sabirnici 1 u poglavlju četiri. Cilj je izračunati strujno-naponske prilike na kraju voda te usporediti rezultate sa izmjerenim vrijednostima. Na slici 5.1. prikazana je shema spoja koja je temeljni dio u analizi i koja se koristi kroz cijelu analizu.



Slika 5.1. Nadomjesna shema spoja transformatora i voda.

5.1. Određivanje parametara transformatora

Prvi korak u mjerenju je izmjeriti sve potrebne podatke transformatora, a to znači provesti dva osnovna pokusa transformatora, a to su pokus kratkog spoja i pokus praznog hoda. U tablici 5.1. nalaze se izmjereni podaci transformatora koje je nužno poznavati prilikom proračuna osnovnih parametara transformatora.

Transformator			
Kratki spoj		Prazan hod	
u_k [V]	27,7	I_0 [mA]	151
$u_{k\%}$ [%]	12	i_0 [%]	12,5
I_k [A]	1,2	U_1 [V]	230
P_k [W]	11,8	P_0 [W]	14,2

Tablica 5.1. Izmjereni podaci transformatora

Korištenjem prethodno spomenutih podataka možemo izračunati sve potrebne parametre transformatora koji će biti od velike važnosti prilikom simulacije u računalnom programu Power World, ali i u proračunima pomoću nadomjesnih shema.

Pomoću podataka izmjerenih u pokusu kratkog spoja i matematičkih izraza (3-1)-(3-4) možemo izračunati i formirati impedanciju uzdužne grane Γ -sheme transformatora.

$$Z_T = \frac{u_k(\%)}{100} \cdot \frac{U_B^2}{S_n} = \frac{12}{100} \cdot \frac{230}{1.2 \cdot 230} = 23 \Omega$$

$$R_T = \left(\frac{U_B}{S_n} \right)^2 \cdot P_k = \left(\frac{230}{1.2 \cdot 230} \right)^2 \cdot 11.8 = 8.2 \Omega$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{23^2 - 8.2^2} = 21.5 \Omega$$

$$\overline{Z_T} = R_T + jX_T = 8.2 + j21.5 \Omega$$

Zadnji korak u proračunu parametara transformatora je izračunati parametre popriječne grane Γ -sheme transformatora korištenjem matematičkih izraza (3-5)-(3-8).

$$Y_{T0} = \frac{i_0(\%)}{100} \cdot \frac{S_n}{U_B^2} = \frac{12.5}{100} \cdot \frac{1.2 \cdot 230}{230^2} = 6.52 \cdot 10^{-4} S$$

$$G_{T0} = \frac{P_0}{U_B^2} = \frac{14.2}{100} = 2.68 \cdot 10^{-4} S$$

$$B_{T0} = \sqrt{Y_{T0}^2 - G_{T0}^2} = \sqrt{(6.52 \cdot 10^{-4})^2 - (2.68 \cdot 10^{-4})^2} = 5.94 \cdot 10^{-4} S$$

$$\overline{Y_{T0}} = G_{T0} - jB_{T0} = 2.68 \cdot 10^{-4} - j5.94 \cdot 10^{-4} S$$

5.2. Određivanje parametara voda

Pored parametara transformatora bitno je odrediti i parametre samog voda. Za razliku od transformatora određivanje parametara voda je znatno jednostavnije iz razloga što su svi parametri zadani kao tablične vrijednosti te nije potrebno provoditi nikakve dodatne pokuse. U tablici 5.2. prikazani su parametri voda.

Parametri voda			
Duljina [km]	144	216	360
Otpor R [Ω /km]	0.035	0.037	0.036
Jedinični induktivitet H_1 [mH/km]	0.805	0.805	0.805
Jedinični kapacitet C_1 [μ F/km]	0.014	0.014	0.0083

Tablica 5.2. Parametri voda

Kao kod transformatora tako i kod voda potrebno je odrediti parametre nadomjesne sheme, a to su uzdužna impedancija i popriječna admitancija te kako bi ih formirali potrebno je pomoću tablice 3.4. izračunati jediničnu induktivnu reaktanciju i jediničnu kapacitivnu susceptanciju dok jedinični otpor voda ostaje nepromjenjen. Kao što je ranije spomenuto odvod voda se uglavnom zanemaruje pa je i u ovom slučaju zanemaren.

$$\text{Induktivna reaktancija- } X_1 = \omega \cdot L_1 \quad (5-1)$$

$$\text{Kapacitivna susceptancija- } B_1 = \omega \cdot C_1 \quad (5-2)$$

$$\text{Kutna frekvencija- } \omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (5-3)$$

Prema (5-1) i (5-3):

$$X_1 = \omega \cdot L_1 = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0.805 \cdot 10^{-3} = 0.253 \Omega/\text{km}$$

Može se primjetiti kako je jedinični induktivitet jednak za sve 3 duljine voda pa prema tome i jedinične induktivne reaktancije su jednake za sve 3 duljine voda.

Prema (5-1) i (5-3):

$$B_1 = \omega \cdot C_1 = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0.014 \cdot 10^{-6} = 4.4 \mu\text{S}/\text{km}$$

Prethodno izračunata jedinična kapacitivna susceptancija B_1 vrijedi samo za duljine voda od 144 km i 216 km iz razloga što su prema tablici 5.2. jedinični kapacitet za te dvije duljine jednaki te nam preostaje da ponovimo prethodni izračun, ali za duljinu voda od 360 km. U tablici 5.3. prikazani su izračunati parametri voda

Prema (5-1) i (5-3):

$$B_1 = \omega \cdot C_1 = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0.00833 \cdot 10^{-6} = 2.62 \mu\text{S}/\text{km}$$

Parametri voda			
Duljina [km]	144	216	360
Otpor R_1 [Ω/km]	0.035	0.037	0.036
Induktivna reaktancija X_1 [Ω/km]	0.253	0.253	0.253
Kapacitivna susceptancija B_1 [$\mu\text{S}/\text{km}$]	4.4	4.4	2.62

Tablica 5.3. Parametri za formiranje impedancije i admitancije vod

5.3. Prazan hod jednostrukog voda

Kod proračuna strujno-naponskih prilika pomoću nadomjesnih shema transformatora i voda uzeti su izmjereni podaci na primatru transformatora, a to su prividna snaga S_1 , faktor snage $\cos\varphi_1$ i napon U_1 . Cilj je izračunati strujno-naponske prilike na kraju voda.

$$S_1 = 14.58 \text{ VA}$$

$$\cos\varphi_1 = 0.98 \text{ (Kapacitivno)}$$

$$\bar{U}_1 = 230 < 0^\circ$$

$$l = 144 \text{ km}$$

Parametri transformatora izračunati su u potpoglavlju 5.1. te su ostaju nepromjenjeni kroz cijeli proračun, ali parametri voda se mijenjaju s promjenom duljine voda.

$$\bar{Z}_T = 8,2 + j21,5 \Omega$$

$$\bar{Y}_T = 2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\bar{Z}_V = R_1 \cdot l + X_1 \cdot l = 0,035 \cdot 144 + 0,253 \cdot 144 = 5 + j36,43 \Omega$$

$$\frac{\bar{Y}_V}{2} = j3,17 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

Napon na primaru transformatora je referentna vrijednost kod koje je kut nula stupnjeva. Upotrebom Ohmovih i Kirchhoffovih za shemu na slici 5.1. možemo izračunati sve potrebne veličine.

$$\varphi_1 = \arccos(0,98) = 11,47^\circ$$

$$\bar{S}_1 = 14,58 \angle -11,47^\circ \text{ VA}$$

Struja I_1 , snaga P_1 , i jalova snaga Q_1 odgovaraju izmjerenim vrijednostima na sabirnici 1.

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{S}_1^*}{\bar{U}_1} = \frac{14,58 \angle 11,47^\circ}{230 \angle 0^\circ} = 0,06 \angle 11,47^\circ \text{ A}$$

$$P_1 = S_1 \cdot \cos\varphi_1 = 14,58 \cdot 0,98 = 14,3 \text{ W}$$

$$Q_2 = S_1 \cdot \sin\varphi_1 = 14,58 \cdot (-0,2) = -2,9 \text{ VAR}$$

$$\bar{I}_{YT} = \bar{U}_1 \cdot \bar{Y}_T = 230 \angle 0^\circ \cdot (2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4}) = 0,15 \angle -65,7^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{ZT} = \bar{I}_1 - \bar{I}_{YT} = 0,06 \angle 11,47^\circ - 0,15 \angle -65,7^\circ = 0,15 \angle 91,13^\circ \text{ A}$$

Djelatna snaga P_{V1} , napon U_{10} , jalova snaga Q_{V1} , prividna snaga S_{V1} , faktor snage $\cos_{V1}\varphi$ i struja I_{ZT} predstavljaju parametre sabirnice 2.

$$\bar{I}_{ZT} = \bar{I}_1 - \bar{I}_{YT} = 0,06 \angle 11,47^\circ - 0,15 \angle -65,7^\circ = 0,15 \angle 91,13^\circ \text{ A}$$

$$P_{V1} = I_{ZT}^2 \cdot R_T = 0,15^2 \cdot 8,2 = 0,18 \text{ W}$$

$$\bar{U}_{ZT} = \bar{I}_{ZT} \cdot \bar{Z}_T = 0,15 \angle 91,13^\circ \cdot (8,2 + j21,5) = 3,45 \angle 160,25^\circ \text{ V}$$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} - \bar{U}_{10} = 0$$

$$\bar{U}_{10} = \bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} = 230 \angle 0^\circ - 3,45 \angle 160,25^\circ = 233,25 \angle -0,28^\circ \text{ V}$$

$$Q_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 233,25 \cdot 0,15 \cdot \sin(-0,28^\circ - 91,13^\circ) = -34,97 \text{ VAR}$$

$$S_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} = 233,25 \cdot 0,15 = 34,97 \text{ VA}$$

$$\cos_{V1}\varphi = \frac{P_{V1}}{S_{V1}} = \frac{0,18}{34,97} = 0,005$$

$$\bar{I}_{10} = \bar{U}_{10} \cdot \frac{\bar{Y}_V}{2} = 233,25 \angle -0,28^\circ \cdot (j3,17 \cdot 10^{-4}) = 0,07 \angle 89,72^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_{ZT} - \bar{I}_{10} = 0,15 < 91,13^\circ - 0,07 < 89,72^\circ = 0,08 < 92,36^\circ \text{A}$$

$$\bar{U}_{12} = \bar{I}_{12} \cdot \bar{Z}_V = 0,08 < 92,36^\circ \cdot (5 + j36,43) = 2,94 < 174,54^\circ \text{V}$$

$$\bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} - \bar{U}_{20} = 0$$

Napon U_{20} i struja I_2 predstavljaju parametre na sabirnici 3.

$$\bar{U}_{20} = \bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} = 233,25 < -0,28^\circ - 2,94 < 174,54^\circ = 236,17 < 0,20 \text{V}$$

$$\bar{I}_{20} = \bar{U}_{20} \cdot \frac{\bar{Y}_V}{2} = 236,17 < 0,20 \cdot j3,17 \cdot 10^{-4} = 0,078 < 90^\circ \text{A}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{12} - \bar{I}_{20} = 0,08 < 92,36^\circ - 0,078 < 90^\circ = 0,0038 < 149,6^\circ \text{A}$$

Proračun se ponavlja za sve slučajeve po analognom postupku uz promjenu parametara voda.

Usporedbom rezultata mjerenja i rezultata dobijenih proračunom pomoću nadomjesnih shema vidi se blago odstupanje, ali ta odstupana su zanemariva za sve tri duljine voda.

Duljina voda		144 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Vrsta opterećenja		Prazan hod			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	230	U_{v1} [V]	233,25	U_{v2} [V]	236,17
I_1 [A]	0,06	I_{v1} [A]	0,15	I_{v2} [A]	0,0038
P_1 [W]	14,3	P_{v1} [W]	0,18	P_{v2} [W]	0
Q_1 [VAr]	-2,9	Q_{v1} [VAr]	-34,97	Q_{v2} [VAr]	0
S_1 [VA]	14,58	S_{v1} [VA]	34,97	S_{v2} [VA]	0
$\cos_1 \varphi$	0,98	$\cos_{v1} \varphi$	0,005	$\cos_{v2} \varphi$	---

Tablica 5.4. Rezultati proračuna pomoću nadomjesne sheme za prazan hod jednostrukog voda duljine 144 km.

$$S_1 = 25,06 \text{ VA}$$

$$\cos\varphi_1 = 0.58 \text{ (Kapacitivno)}$$

$$\bar{U}_1 = 230 < 0^\circ \text{ V}$$

$$l=216 \text{ km}$$

$$\bar{Z}_T = 8,2 + j21,5 \Omega$$

$$\bar{Y}_T = 2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\bar{Z}_V = R_1 \cdot l + X_1 \cdot l = 0,037 \cdot 216 + 0,253 \cdot 216 = 8 + j54,64 \Omega$$

$$\frac{\bar{Y}_V}{2} = j4,75 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

$$\varphi_1 = \arccos(0.58) = -54,54^\circ \text{ (kapacitivno)}$$

$$\bar{S}_1 = 25,06 < -54,54^\circ \text{ VA}$$

Struja I_1 , snaga P_1 , i jalova snaga Q_1 odgovaraju izmjerenim vrijednostima na sabirnici 1.

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{S}_1^*}{\bar{U}_1^*} = \frac{25,06 < 54,54^\circ}{230 < 0^\circ} = 0,109 < 54,54^\circ \text{ A}$$

$$P_1 = S_1 \cdot \cos\varphi_1 = 25,06 \cdot 0,58 = 14,53 \text{ W}$$

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin\varphi_1 = 25,06 \cdot (-0,81) = -20,41 \text{ VAR}$$

$$\bar{I}_{YT} = \bar{U}_1 \cdot \bar{Y}_T = 230 < 0^\circ \cdot (2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4}) = 0,15 < -65,7^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{ZT} = \bar{I}_1 - \bar{I}_{YT} = 0,109 < 54,54^\circ - 0,15 < -65,7^\circ = 0,22 < 89,62^\circ \text{ A}$$

Djelatna snaga P_{V1} , napon U_{10} , jalova snaga Q_{V1} , prividna snaga S_{V1} , faktor snage $\cos_{V1}\varphi$ i struja I_{ZT} predstavljaju parametre sabirnice 2.

$$\bar{I}_{ZT} = \bar{I}_1 - \bar{I}_{YT} = 0,109 < 54,54^\circ - 0,15 < -65,7^\circ = 0,22 < 89,62^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{ZT} = \bar{I}_{ZT} \cdot \bar{Z}_T = 0,22 < 89,62^\circ \cdot (8,2 + j21,5) = 5,06 < 158,7^\circ \text{ V}$$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} - \bar{U}_{10} = 0$$

$$\bar{U}_{10} = \bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} = 230 < 0^\circ - 5,06 < 158,7^\circ = 234,72 < -0,44^\circ \text{ V}$$

$$P_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 234,72 \cdot 0,22 \cdot \cos(-0,44^\circ - 89,62^\circ) = 0,4W$$

$$Q_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 234,72 \cdot 0,22 \cdot \sin(-0,44^\circ - 89,62^\circ) = -51,63 \text{ VAr}$$

$$S_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} = 234,72 \cdot 0,22 = 51,64 \text{ VA}$$

$$\cos_{S_{V1}} \varphi = \frac{P_{V1}}{S_{V1}} = \frac{0,4}{51,64} = 0,007$$

$$\bar{I}_{10} = \bar{U}_{10} \cdot \frac{\bar{Y}_V}{2} = 234,72 \angle -0,44^\circ \cdot (j4,75 \cdot 10^{-4}) = 0,11 \angle 90,44^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_{ZT} - \bar{I}_{10} = 0,22 \angle 89,62^\circ - 0,11 \angle 90,44^\circ = 0,11 \angle 88,8^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{12} = \bar{I}_{12} \cdot \bar{Z}_V = 0,11 \angle 88,8^\circ \cdot (8 + j54,64) = 6,07 \angle 170,47^\circ \text{ V}$$

Napon U_{20} i struja I_2 predstavljaju parametre na sabirnici 3.

$$\bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} - \bar{U}_{20} = 0$$

$$\bar{U}_{20} = \bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} = 234,72 \angle -0,44^\circ - 6,07 \angle 170,47^\circ = 240,71 \angle -0,66^\circ \text{ V}$$

$$\bar{I}_{20} = \bar{U}_{20} \cdot \frac{\bar{Y}_V}{2} = 240,71 \angle -0,66^\circ \cdot j4,75 \cdot 10^{-4} = 0,11 \angle 89,34^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{12} - \bar{I}_{20} = 0,11 \angle 88,8^\circ - 0,11 \angle 89,34^\circ = 0,0010 \angle -0,93^\circ \text{ A}$$

Duljina voda		216 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Vrsta opterećenja		Prazan hod			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	230	U_{v1} [V]	234,72	U_{v2} [V]	240,71
I_1 [A]	0,109	I_{v1} [A]	0,22	I_{v2} [A]	0,0010
P_1 [W]	14,53	P_{v1} [W]	0,4	P_{v2} [W]	0
Q_1 [VAr]	-20,41	Q_{v1} [VAr]	-51,63	Q_{v2} [VAr]	0
S_1 [VA]	25,06	S_{v1} [VA]	51,64	S_{v2} [VA]	0
$\cos_{S_1} \varphi$	0,58	$\cos_{S_{v1}} \varphi$	0,007	$\cos_{S_{v2}} \varphi$	---

Tablica 5.5. Rezultati proračuna pomoću nadomjesne sheme za prazan hod jednostrukog voda duljine 216 km.

$$S_1 = 25,06 \text{ VA}$$

$$\cos\varphi_1 = 0.58 \text{ (Kapacitivno)}$$

$$\bar{U}_1 = 230 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$l=360 \text{ km}$$

$$\bar{Z}_T = 8,2 + j21,5 \Omega$$

$$\bar{Y}_T = 2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\bar{Z}_V = R_1 \cdot l + X_1 \cdot l = 0,036 \cdot 360 + 0,253 \cdot 360 = 13 + j91,08 \Omega$$

$$\frac{\bar{Y}_V}{2} = j4,75 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\varphi_1 = \arccos(0.50) = -60^\circ \text{ (kapacitivno)}$$

$$\bar{S}_1 = 31,1 \angle -60^\circ \text{ VA}$$

Struja I_1 , snaga P_1 , i jalova snaga Q_1 odgovaraju izmjerenim vrijednostima na sabirnici 1.

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{S}_1^*}{\bar{U}_1^*} = \frac{31,1 \angle 60^\circ}{230 \angle 0^\circ} = 0,135 \angle 60^\circ \text{ A}$$

$$P_1 = S_1 \cdot \cos\varphi_1 = 31,1 \cdot 0,5 = 15,55 \text{ W}$$

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin\varphi_1 = 31,1 \cdot (-0,86) = -26,74 \text{ VAr}$$

$$\bar{I}_{YT} = \bar{U}_1 \cdot \bar{Y}_T = 230 \angle 0^\circ \cdot (2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4}) = 0,15 \angle -65,7^\circ \text{ A}$$

Djelatna snaga P_{V1} , napon U_{10} , jalova snaga Q_{V1} , prividna snaga S_{V1} , faktor snage $\cos\varphi_{V1}$ i struja I_{ZT} predstavljaju parametre sabirnice 2.

$$\bar{I}_{ZT} = \bar{I}_1 - \bar{I}_{YT} = 0,135 \angle 60^\circ - 0,15 \angle -65,7^\circ = 0,253 \angle 88,7^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{ZT} = \bar{I}_{ZT} \cdot \bar{Z}_T = 0,253 \angle 88,7^\circ \cdot (8,2 + j21,5) = 5,82 \angle 157,82^\circ \text{ V}$$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} - \bar{U}_{10} = 0$$

$$\bar{U}_{10} = \bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} = 230 \angle 0^\circ - 5,82 \angle 157,82^\circ = 235,4 \angle -0,53^\circ \text{ V}$$

$$P_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 235,4 \cdot 0,253 \cdot \cos(-0,53^\circ - 88,7^\circ) = 0,8 \text{ W}$$

$$Q_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 235,4 \cdot 0,253 \cdot \sin(-0,53^\circ - 88,7^\circ) = -59,55 \text{ VAr}$$

$$S_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} = 235,4 \cdot 0,253 = 59,55 \text{ VA}$$

$$\cos_{V1} \varphi = \frac{P_{V1}}{S_{V1}} = \frac{0,8}{59,55} = 0,013$$

$$\bar{I}_{10} = \bar{U}_{10} \cdot \frac{\bar{Y}_V}{2} = 235,4 \angle -0,53^\circ \cdot (j4,75 \cdot 10^{-4}) = 0,11 \angle 89,47^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_{ZT} - \bar{I}_{10} = 0,253 \angle 88,7^\circ - 0,11 \angle 89,47^\circ = 0,14 \angle 88,1^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{12} = \bar{I}_{12} \cdot \bar{Z}_V = 0,14 \angle 88,1^\circ \cdot (13 + j91,08) = 12,88 \angle 169,97^\circ \text{ V}$$

Napon U_{20} i struja I_2 predstavljaju parametre na sabirnici 3.

$$\bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} - \bar{U}_{20} = 0$$

$$\bar{U}_{20} = \bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} = 235,4 \angle -0,53^\circ - 12,88 \angle 169,97^\circ = 248,11 \angle -1,52^\circ \text{ V}$$

$$\bar{I}_{20} = \bar{U}_{20} \cdot \frac{\bar{Y}_V}{2} = 248,11 \angle -1,52^\circ \cdot j4,75 \cdot 10^{-4} = 0,11 \angle 88,48^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{12} - \bar{I}_{20} = 0,14 \angle 88,1^\circ - 0,11 \angle 88,48^\circ = 0,03 \angle 86,9^\circ \text{ A}$$

Duljina voda		316 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Vrsta opterećenja		Prazan hod			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	230	U_{v1} [V]	235,4	U_{v2} [V]	248,11
I_1 [A]	0,135	I_{v1} [A]	0,253	I_{v2} [A]	0,03
P_1 [W]	15,55	P_{v1} [W]	0,52	P_{v2} [W]	0
Q_1 [VAr]	-26,74	Q_{v1} [VAr]	-59,55	Q_{v2} [VAr]	0
S_1 [VA]	31,1	S_{v1} [VA]	59,55	S_{v2} [VA]	0
$\cos_1 \varphi$	0,50	$\cos_{v1} \varphi$	0,013	$\cos_{v2} \varphi$	---

Tablica 5.6. Rezultati proračuna pomoću nadomjesne sheme za prazan hod jednostrukog voda duljine 360 km.

5.4. Prazan hod dva paralelna voda

$$S_1 = 24 \text{ VA}$$

$$\cos\varphi_1 = 0.61 \text{ (Kapacitivno)}$$

$$\bar{U}_1 = 230,05 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$l = 144 \text{ km}$$

$$\bar{Z}_T = 8,2 + j21,5 \ \Omega$$

$$\bar{Y}_T = 2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\bar{Z}_V = R_1 \cdot l + X_1 \cdot l = 0,034 \cdot 144 + 0,253 \cdot 144 = 5 + j36,43 \ \Omega$$

$$\bar{Z}_{VP} = \frac{\bar{Z}_V \cdot \bar{Z}_V}{\bar{Z}_V + \bar{Z}_V} = \frac{(5 + j36,43)^2}{2 \cdot (5 + j36,43)} = 2,5 + j18,22$$

$$\frac{\bar{Y}_V}{2} = j3,17 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 2 \cdot j3,17 \cdot 10^{-4} = j6,34 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\varphi_1 = \arccos(0.61) = -52,41^\circ \text{ (kapacitivno)}$$

$$\bar{S}_1 = 24 \angle -52,41^\circ \text{ VA}$$

Struja I_1 , snaga P_1 , i jalova snaga Q_1 odgovaraju izmjerenim vrijednostima na sabirnici 1.

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{S}_1^*}{\bar{U}_1^*} = \frac{24 \angle 52,41^\circ}{230,05 \angle 0^\circ} = 0,104 \angle 52,41^\circ \text{ A}$$

$$P_1 = S_1 \cdot \cos\varphi_1 = 24 \cdot 0,61 = 14,64 \text{ W}$$

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin\varphi_1 = 24 \cdot (-0,79) = -18,96 \text{ VAr}$$

$$\bar{I}_{YT} = \bar{U}_1 \cdot \bar{Y}_T = 230,05 \angle 0^\circ \cdot (2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4}) = 0,15 \angle -65,7^\circ \text{ A}$$

Djelatna snaga P_{V1} , napon U_{10} , jalova snaga Q_{V1} , prividna snaga S_{V1} , faktor snage $\cos_{V1}\varphi$ i struja I_{ZT} predstavljaju parametre sabirnice 2.

$$\bar{I}_{ZT} = \bar{I}_1 - \bar{I}_{YT} = 0,104 \angle 52,41^\circ - 0,15 \angle -65,7^\circ = 0,219 \angle 89,55^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{ZT} = \bar{I}_{ZT} \cdot \bar{Z}_T = 0,22 \angle 89,55^\circ \cdot (8,2 + j21,5) = 5,06 \angle 158,67^\circ \text{ V}$$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} - \bar{U}_{10} = 0$$

$$\bar{U}_{10} = \bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} = 230,05 \angle 0^\circ - 5,06 \angle 158,67^\circ = 234,77 \angle -0,45^\circ \text{ V}$$

$$P_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 234,77 \cdot 0,22 \cdot \cos(-0,45^\circ - 89,55^\circ) = 0,4 \text{ W}$$

$$Q_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 234,77 \cdot 0,22 \cdot \sin(-0,45^\circ - 89,55^\circ) = -51,65 \text{ VAR}$$

$$S_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} = 234,77 \cdot 0,22 = 51,65 \text{ VA}$$

$$\cos_{V1} \varphi = \frac{P_{V1}}{S_{V1}} = \frac{0,4}{51,65} = 0,0077$$

$$\bar{I}_{10} = \bar{U}_{10} \cdot \frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 234,77 \angle -0,45^\circ \cdot (j6,34 \cdot 10^{-4}) = 0,14 \angle 89,55^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_{ZT} - \bar{I}_{10} = 0,22 \angle 89,55^\circ - 0,14 \angle 89,55^\circ = 0,08 \angle 89,55^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{12} = \bar{I}_{12} \cdot \bar{Z}_{VP} = 0,08 \angle 89,55^\circ \cdot (2,5 + j18,22) = 1,47 \angle 171,74^\circ \text{ V}$$

Napon U_{20} i struja I_2 predstavljaju parametre na sabirnici 3.

$$\bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} - \bar{U}_{20} = 0$$

$$\bar{U}_{20} = \bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} = 234,77 \angle -0,45^\circ - 1,47 \angle 171,74^\circ = 236,22 \angle -0,45^\circ \text{ V}$$

$$\bar{I}_{20} = \bar{U}_{20} \cdot \frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 234,75 \angle -0,45^\circ \cdot j6,34 \cdot 10^{-4} = 0,148 \angle 89,55^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{12} - \bar{I}_{20} = 0,08 \angle 89,55^\circ - 0,223 \angle 89,55^\circ = 0,143 \angle -90,45^\circ \text{ A}$$

Promatranjem rezultata za duljinu 144 km vidi se značajnije odstupanje u odnosu na izmjerene vrijednosti na simulatoru voda. Kao razlog može se navesti izraženije svojstvo kapaciteta samomg simulatora voda koje uzrokuje znatno povećanje napona na kraju voda i pogreška mjernih instrumenata.

Duljina voda		144 km			
Tip voda		Dva paralelna voda			
Vrsta opterećenja		Prazan hod			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	230,05	U_{v1} [V]	234,77	U_{v2} [V]	236
I_1 [A]	0,104	I_{v1} [A]	0,219	I_{v2} [A]	0,143
P_1 [W]	14,64	P_{v1} [W]	0,4	P_{v2} [W]	0
Q_1 [VAr]	-18,96	Q_{v1} [VAr]	-51,65	Q_{v2} [VAr]	0
S_1 [VA]	24	S_{v1} [VA]	51,65	S_{v2} [VA]	0
$\cos_1 \varphi$	0,61	$\cos_{v1} \varphi$	0,0077	$\cos_{v2} \varphi$	---

Tablica 5.7. Rezultati proračuna pomoću nadomjesne sheme za prazan hod dva paralelna voda duljine 144 km.

$$S_1 = 79,7 \text{ VA}$$

$$\cos \varphi_1 = 0,27 (\text{Kapacitivno})$$

$$\bar{U}_1 = 229,8 < 0^\circ \text{V}$$

$$l = 216 \text{ km}$$

$$\bar{Z}_T = 8,2 + j21,5 \Omega$$

$$\bar{Y}_T = 2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\bar{Z}_V = R_1 \cdot l + X_1 \cdot l = 0,037 \cdot 216 + 0,253 \cdot 216 = 8 + j54,64 \Omega$$

$$\bar{Z}_{VP} = \frac{\bar{Z}_V \cdot \bar{Z}_V}{\bar{Z}_V + \bar{Z}_V} = \frac{(8 + j54,64)^2}{2 \cdot (8 + j54,64)} = 4 + j27,32 \Omega$$

$$\frac{\bar{Y}_V}{2} = j4,75 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

$$\frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 2 \cdot j4,75 \cdot 10^{-4} = j \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\varphi_1 = \arccos(0.27) = -74,33^\circ (\text{kapacitivno})$$

$$\bar{S}_1 = 79,7 < -74,33^\circ \text{ VA}$$

Struja I_1 , snaga P_1 , i jalova snaga Q_1 odgovaraju izmjerenim vrijednostima na sabirnici 1.

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{S}_1^*}{\bar{U}_1^*} = \frac{79,7 < 74,33^\circ}{229,8 < 0^\circ} = 0,346 < 74,33^\circ \text{ A}$$

$$P_1 = S_1 \cdot \cos\varphi_1 = 79,7 \cdot 0,27 = 21,51 \text{ W}$$

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin\varphi_1 = 79,7 \cdot (-0,96) = -76,51 \text{ VAR}$$

$$\bar{I}_{YT} = \bar{U}_1 \cdot \bar{Y}_T = 229,8 < 0^\circ \cdot (2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4}) = 0,15 < -65,7^\circ \text{ A}$$

Djelatna snaga P_{V1} , napon U_{10} , jalova snaga Q_{V1} , prividna snaga S_{V1} , faktor snage $\cos_{V1}\varphi$ i struja I_{ZT} predstavljaju parametre sabirnice 2.

$$\bar{I}_{ZT} = \bar{I}_1 - \bar{I}_{YT} = 0,346 < 74,33^\circ - 0,15 < -65,7^\circ = 0,47 < 86,13^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{ZT} = \bar{I}_{ZT} \cdot \bar{Z}_T = 0,47 < 86,13^\circ \cdot (8,2 + j21,5) = 10,8 < 155,25^\circ \text{ V}$$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} - \bar{U}_{10} = 0$$

$$\bar{U}_{10} = \bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} = 229,8 < 0^\circ - 10,8 < 155,25^\circ = 239,65 < -1,08^\circ \text{ V}$$

$$P_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 239,85 \cdot 0,47 \cdot \cos(-1,08 - 86,04) = 5,66 \text{ W}$$

$$Q_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 239,65 \cdot 0,47 \cdot \sin(-1,08^\circ - 86,13^\circ) = -112,49 \text{ VAR}$$

$$S_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} = 239,65 \cdot 0,47 = 112,63 \text{ VA}$$

$$\cos_{V1}\varphi = \frac{P_{V1}}{S_{V1}} = \frac{5,66}{112,63} = 0,05$$

$$\bar{I}_{10} = \bar{U}_{10} \cdot \frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 239,65 < -1,08^\circ \cdot (j9,5 \cdot 10^{-4}) = 0,227 < 88,92^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_{ZT} - \bar{I}_{10} = 0,47 < 86,13^\circ - 0,227 < 88,92^\circ = 0,24 < 83,53^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{12} = \bar{I}_{12} \cdot \bar{Z}_{VP} = 0,24 < 83,53^\circ \cdot (4 + j27,32) = 6,62 < 165,2^\circ \text{ V}$$

Napon U_{20} i struja I_2 predstavljaju parametre na sabirnici 3.

$$\bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} - \bar{U}_{20} = 0$$

$$\bar{U}_{20} = \bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} = 239,65 < -1,08^\circ - 6,62 < 165,2^\circ = 246,08 < -1,44^\circ \text{ V}$$

$$\bar{I}_{20} = \bar{U}_{20} \cdot \frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 246,08 < -1,44^\circ \cdot j9,5 \cdot 10^{-4} = 0,233 < 91,44^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{12} - \bar{I}_{20} = 0,24 < 83,53^\circ - 0,233 < 91,44^\circ = 0,033 < -9,56^\circ \text{ A}$$

Rezultati dobijeni za duljine 216 i 360 km gotovo su identični kao rezultati dobijeni mjerenjem na simulatoru voda.

Duljina voda		216 km			
Tip voda		Dva paralelna voda			
Vrsta opterećenja		Prazan hod			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U ₁ [V]	229,8	U _{v1} [V]	239,65	U _{v2} [V]	246,08
I ₁ [A]	0,346	I _{v1} [A]	0,47	I _{v2} [A]	0,033
P ₁ [W]	21,51	P _{v1} [W]	1,8	P _{v2} [W]	0
Q ₁ [VAr]	-76,51	Q _{v1} [VAr]	-112,49	Q _{v2} [VAr]	0
S ₁ [VA]	79,7	S _{v1} [VA]	112,63	S _{v2} [VA]	0
cos ₁ φ	0,27	cos _{v1} φ	0,05	cos _{v2} φ	---

Tablica 5.8. Rezultati proračuna pomoću nadomjesne sheme za prazan hod dva paralelna voda duljine 216 km.

$$S_1 = 78,8 \text{ VA}$$

$$\cos \varphi_1 = 0,22 (\text{Kapacitivno})$$

$$\bar{U}_1 = 230 < 0^\circ \text{ V}$$

$$l=360 \text{ km}$$

$$\bar{Z}_T = 8,2 + j21,5 \Omega$$

$$\bar{Y}_T = 2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\bar{Z}_V = R_1 \cdot I + X_1 \cdot I = 0,036 \cdot 360 + 0,253 \cdot 360 = 13 + j91,08 \Omega$$

$$\bar{Z}_{VP} = \frac{\bar{Z}_V \cdot \bar{Z}_V}{\bar{Z}_V + \bar{Z}_V} = \frac{(13 + j91,08)^2}{2 \cdot (13 + j91,08)} = 6,5 + j45,54 \Omega$$

$$\frac{\bar{Y}_V}{2} = j4,75 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

$$\frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 2 \cdot j4,71 \cdot 10^{-4} = j9,5 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\varphi_1 = \arccos(0,22) = -77,3^\circ (\text{kapacitivno})$$

$$\bar{S}_1 = 78,8 < -77,3^\circ \text{ VA}$$

Struja I_1 , snaga P_1 , i jalova snaga Q_1 odgovaraju izmjerenim vrijednostima na sabirnici 1.

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{S}_1^*}{\bar{U}_1^*} = \frac{78,8 < 77,3^\circ}{230 < 0^\circ} = 0,343 < 77,3^\circ \text{ A}$$

$$P_1 = S_1 \cdot \cos\varphi_1 = 78,8 \cdot 0,22 = 17,33 \text{ W}$$

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin\varphi_1 = 79,7 \cdot (-0,97) = -76,43 \text{ VAr}$$

$$\bar{I}_{YT} = \bar{U}_1 \cdot \bar{Y}_T = 230 < 0^\circ \cdot (2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4}) = 0,15 < -65,7^\circ \text{ A}$$

Djelatna snaga P_{V1} , napon U_{10} , jalova snaga Q_{V1} , prividna snaga S_{V1} , faktor snage $\cos_{V1}\varphi$ i struja I_{ZT} predstavljaju parametre sabirnice 2.

$$\bar{I}_{ZT} = \bar{I}_1 - \bar{I}_{YT} = 0,343 < 77,3^\circ - 0,15 < -65,7^\circ = 0,47 < 86,04^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{ZT} = \bar{I}_{ZT} \cdot \bar{Z}_T = 0,47 < 86,13^\circ \cdot (8,2 + j21,5) = 10,8 < 155,25^\circ \text{ V}$$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} - \bar{U}_{10} = 0$$

$$\bar{U}_{10} = \bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} = 230 < 0^\circ - 10,8 < 155,25^\circ = 239,85 < -1,08^\circ \text{ V}$$

$$P_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 239,85 \cdot 0,47 \cdot \cos(-1,08 - 86,04) = 5,66 \text{ W}$$

$$Q_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 239,85 \cdot 0,47 \cdot \sin(-1,08^\circ - 86,04^\circ) = -112,58 \text{ VAr}$$

$$S_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} = 239,85 \cdot 0,47 = 112,72 \text{ VA}$$

$$\cos_{V1}\varphi = \frac{P_{V1}}{S_{V1}} = \frac{5,66}{112,72} = 0,05$$

$$\bar{I}_{10} = \bar{U}_{10} \cdot \frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 239,85 < -1,08^\circ \cdot (j9,5 \cdot 10^{-4}) = 0,227 < 88,92^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_{ZT} - \bar{I}_{10} = 0,47 < 86,04^\circ - 0,227 < 88,92^\circ = 0,24 < 83,33^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{12} = \bar{I}_{12} \cdot \bar{Z}_{VP} = 0,24 < 83,33^\circ \cdot (6,5 + j45,54) = 11,04 < 165,2^\circ \text{ V}$$

Napon U_{20} i struja I_2 predstavljaju parametre na sabirnici 3.

$$\bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} - \bar{U}_{20} = 0$$

$$\bar{U}_{20} = \bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} = 239,85 < -1,08^\circ - 11,04 < 165,2^\circ = 250,58 < -1,67^\circ \text{ V}$$

$$\bar{I}_{20} = \bar{U}_{20} \cdot \frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 250,58 < -1,67^\circ \cdot j9,5 \cdot 10^{-4} = 0,238 < 88,33^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{12} - \bar{I}_{20} = 0,24 < 83,33^\circ - 0,238 < 88,33^\circ = 0,02 < -1,32^\circ \text{ A}$$

Duljina voda		360 km			
Tip voda		Dva paralelna voda			
Vrsta opterećenja		Prazan hod			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	230	U_{v1} [V]	239,85	U_{v2} [V]	250,58
I_1 [A]	0,343	I_{v1} [A]	0,47	I_{v2} [A]	0,02
P_1 [W]	17,33	P_{v1} [W]	5,66	P_{v2} [W]	0
Q_1 [VAr]	-76,43	Q_{v1} [VAr]	-112,58	Q_{v2} [VAr]	0
S_1 [VA]	78,8	S_{v1} [VA]	112,72	S_{v2} [VA]	0
$\cos_1 \varphi$	0,22	$\cos_{v1} \varphi$	0,05	$\cos_{v2} \varphi$	---

Tablica 5.9. Rezultati proračuna pomoću nadomjesne sheme za prazan hod dva paralelna voda duljine 360 km.

5.5. Podopterećenje jednostrukog voda

$$S_1 = 63,7 \text{ VA}$$

$$\cos\varphi_1 = 0,83 \text{ (Induktivno)}$$

$$\bar{U}_1 = 230,5 \angle 0^\circ$$

$$l = 144 \text{ km}$$

$$\bar{Z}_T = 8,2 + j21,5 \Omega$$

$$\bar{Y}_T = 2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\bar{Z}_V = R_1 \cdot l + X_1 \cdot l = 0,035 \cdot 144 + 0,253 \cdot 144 = 5 + j36,43 \Omega$$

$$\frac{\bar{Y}_V}{2} = j3,17 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

$$\varphi_1 = \arccos(0,83) = 33,9^\circ$$

$$\bar{S}_1 = 63,7 \angle 33,9^\circ \text{ VA}$$

Struja I_1 , snaga P_1 , i jalova snaga Q_1 odgovaraju izmjerenim vrijednostima na sabirnici 1.

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{S}_1^*}{\bar{U}_1^*} = \frac{63,7 \angle -33,9^\circ}{230,5 \angle 0^\circ} = 0,276 \angle -33,9^\circ \text{ A}$$

$$P_1 = S_1 \cdot \cos\varphi_1 = 63,7 \cdot 0,83 = 52,87 \text{ W}$$

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin\varphi_1 = 63,7 \cdot 0,55 = 35,03 \text{ VAR}$$

$$\bar{I}_{YT} = \bar{U}_1 \cdot \bar{Y}_T = 230,5 \angle 0^\circ \cdot (2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4}) = 0,15 \angle -65,7^\circ \text{ A}$$

Djelatna snaga P_{V1} , napon U_{10} , jalova snaga Q_{V1} , prividna snaga S_{V1} , faktor snage $\cos\varphi_{V1}$ i struja I_{ZT} predstavljaju parametre sabirnice 2.

$$\bar{I}_{ZT} = \bar{I}_1 - \bar{I}_{YT} = 0,276 \angle -33,9^\circ - 0,15 \angle -65,7^\circ = 0,168 \angle -5,87^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{ZT} = \bar{I}_{ZT} \cdot \bar{Z}_T = 0,168 \angle -5,87^\circ \cdot (8,2 + j21,5) = 3,86 \angle 63,25^\circ \text{ V}$$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} - \bar{U}_{10} = 0$$

$$\bar{U}_{10} = \bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} = 230,5 \angle 0^\circ - 3,86 \angle 63,25^\circ = 228,78 \angle -0,86^\circ \text{ V}$$

$$P_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 228,78 \cdot 0,168 \cdot \cos(-0,86 + 5,87) = 38,28 \text{ W}$$

$$Q_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 228,78 \cdot 0,168 \cdot \sin(-0,86^\circ + 5,87^\circ) = +3,35\text{VAR}$$

$$S_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} = 228,78 \cdot 0,168 = 38,43 \text{ VA}$$

$$\cos_{V1}\varphi = \frac{P_{V1}}{S_{V1}} = \frac{38,28}{38,43} = 0,99$$

$$\bar{I}_{10} = \bar{U}_{10} \cdot \frac{\bar{Y}_V}{2} = 228,78 \angle -0,86^\circ \cdot (j3,17 \cdot 10^{-4}) = 0,07 \angle 89,14^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_{ZT} - \bar{I}_{10} = 0,168 \angle -5,87^\circ - 0,07 \angle 89,14^\circ = 0,18 \angle -27,69^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{12} = \bar{I}_{12} \cdot \bar{Z}_V = 0,18 \angle -27,69^\circ \cdot (5 + j36,43) = 6,61 \angle 54,49^\circ \text{ V}$$

Napon U_{20} i struja I_2 predstavljaju parametre na sabirnici 3.

$$\bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} - \bar{U}_{20} = 0$$

$$\bar{U}_{20} = \bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} = 228,78 \angle -0,86^\circ - 6,61 \angle 54,49^\circ = 225,08 \angle -2,24^\circ \text{ V}$$

$$\bar{I}_{20} = \bar{U}_{20} \cdot \frac{\bar{Y}_V}{2} = 225,08 \angle -2,24^\circ \cdot j3,17 \cdot 10^{-4} = 0,071 \angle 87,76^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{12} - \bar{I}_{20} = 0,18 \angle -27,69^\circ - 0,071 \angle 87,76^\circ = 0,22 \angle -44,62^\circ \text{ A}$$

$$P_{V2} = U_{20} \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 225,08 \cdot 0,22 \cdot \cos(-2,24^\circ + 44,62^\circ) = 36,57 \text{ W}$$

$$Q_{V2} = U_{20} \cdot I_2 \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 225,08 \cdot 0,22 \cdot \sin(-2,24^\circ + 44,62^\circ) = 33,37\text{VAR}$$

$$S_{V1} = U_{20} \cdot I_2 = 225,08 \cdot 0,22 = 49,51 \text{ VA}$$

$$\cos_{V1}\varphi = \frac{P_{V1}}{S_{V1}} = \frac{36,57}{49,51} = 0,73$$

Najznačajnije odstupanje vidi se kod podopterećenog jednostukog voda i to za sve 3 duljine voda. Rezultati dobijeni proračunom približno su jednaki rezultatima simulacije u Power World-u. To je jedan od dokaza da simulator voda sa izraženim kapacitivnim svojstvom unosi znatnu pogrešku pogotovo u slučajevima u kojima je Ferantijev efekt izraženiji, a jedan od tih slučajeva je i podopterećenje voda.

Duljina voda		144 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Vrsta opterećenja		Podopterećenje			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	230	U_{v1} [V]	228,78	U_{v2} [V]	225,08
I_1 [A]	0,267	I_{v1} [A]	0,168	I_{v2} [A]	0,22
P_1 [W]	52,87	P_{v1} [W]	38,28	P_{v2} [W]	36,57
Q_1 [VAr]	35,03	Q_{v1} [VAr]	3,35	Q_{v2} [VAr]	33,37
S_1 [VA]	63,7	S_{v1} [VA]	38,43	S_{v2} [VA]	49,51
$\cos_1 \varphi$	0,83	$\cos_{v1} \varphi$	0,99	$\cos_{v2} \varphi$	0,73

Tablica 5.10. Rezultati proračuna pomoću nadomjesne sheme podopterećenog voda duljine 144 km.

$$S_1 = 59,6 \text{ VA}$$

$$\cos \varphi_1 = 0,92 \text{ (Kapacitivno)}$$

$$\bar{U}_1 = 228,5 < 0^\circ$$

$$l=216 \text{ km}$$

$$\bar{Z}_T = 8,2 + j21,5 \Omega$$

$$\bar{Y}_T = 2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\bar{Z}_V = R_1 \cdot l + X_1 \cdot l = 0,037 \cdot 216 + 0,253 \cdot 216 = 8 + j54,64 \Omega$$

$$\frac{\bar{Y}_V}{2} = j4,75 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

$$\varphi_1 = \arccos(0.92) = 23,07^\circ$$

$$\bar{S}_1 = 59,6 < -23,07^\circ \text{ VA}$$

Struja I_1 , snaga P_1 , i jalova snaga Q_1 odgovaraju izmjerenim vrijednostima na sabirnici 1.

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{S}_1^*}{\bar{U}_1^*} = \frac{59,6 \angle 23,07^\circ}{228,5 \angle 0^\circ} = 0,260 \angle 23,07^\circ \text{ A}$$

$$P_1 = S_1 \cdot \cos\varphi_1 = 59,6 \cdot 0,92 = 54,83 \text{ W}$$

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin\varphi_1 = 59,6 \cdot (-0,39) = -23,24 \text{ VAR}$$

$$\bar{I}_{YT} = \bar{U}_1 \cdot \bar{Y}_T = 228,5 \angle 0^\circ \cdot (2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4}) = 0,15 \angle -65,7^\circ \text{ A}$$

Djelatna snaga P_{V1} , napon U_{10} , jalova snaga Q_{V1} , prividna snaga S_{V1} , faktor snage $\cos_{V1}\varphi$ i struja I_{ZT} predstavljaju parametre sabirnice 2.

$$\bar{I}_{ZT} = \bar{I}_1 - \bar{I}_{YT} = 0,260 \angle 23,07^\circ - 0,15 \angle -65,7^\circ = 0,297 \angle 53,35^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{ZT} = \bar{I}_{ZT} \cdot \bar{Z}_T = 0,297 \angle 53,35^\circ \cdot (8,2 + j21,5) = 6,83 \angle 122,47^\circ \text{ V}$$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} - \bar{U}_{10} = 0$$

$$\bar{U}_{10} = \bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} = 228,5 \angle 0^\circ - 6,83 \angle 122,47^\circ = 232,23 \angle -1,42^\circ \text{ V}$$

$$P_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 232,23 \cdot 0,297 \cdot \cos(-1,42 - 53,35) = 39,78 \text{ W}$$

$$Q_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 232,23 \cdot 0,297 \cdot \sin(-1,42 - 53,35) = -56,34 \text{ VAR}$$

$$S_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} = 232,23 \cdot 0,297 = 68,97 \text{ VA}$$

$$\cos_{V1}\varphi = \frac{P_{V1}}{S_{V1}} = \frac{39,78}{68,97} = 0,57$$

$$\bar{I}_{10} = \bar{U}_{10} \cdot \frac{\bar{Y}_V}{2} = 232,23 \angle -1,42^\circ \cdot (j4,75 \cdot 10^{-4}) = 0,11 \angle 88,58^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_{ZT} - \bar{I}_{10} = 0,297 \angle 53,35^\circ - 0,11 \angle 88,58^\circ = 0,21 \angle 36,31^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{12} = \bar{I}_{12} \cdot \bar{Z}_V = 0,21 \angle -36,31^\circ \cdot (8 + j54,64) = 11,6 \angle 45,36^\circ \text{ V}$$

Napon U_{20} i struja I_2 predstavljaju parametre na sabirnici 3.

$$\bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} - \bar{U}_{20} = 0$$

$$\bar{U}_{20} = \bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} = 232,23 \angle -1,42^\circ - 11,6 \angle 45,36^\circ = 224,44 \angle -3,57^\circ \text{ V}$$

$$\bar{I}_{20} = \bar{U}_{20} \cdot \frac{\bar{Y}_V}{2} = 224,44 \angle -3,57^\circ \cdot j4,75 \cdot 10^{-4} = 0,106 \angle 86,43^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{12} - \bar{I}_{20} = 0,21 \angle -36,31^\circ - 0,106 \angle 86,43^\circ = 0,281 \angle -54,75^\circ \text{ A}$$

$$P_{V2} = U_{20} \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 224,44 \cdot 0,281 \cdot \cos(-3,57 + 54,75^\circ) = 39,53 \text{ W}$$

$$Q_{V2} = U_{20} \cdot I_2 \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 224,44 \cdot 0,281 \cdot \sin(-3,57 + 54,75^\circ) = 49,13 \text{ VAR}$$

$$S_{V1} = U_{20} \cdot I_2 = 224,44 \cdot 0,281 = 63,06 \text{ VA}$$

$$\cos_{V2} \varphi = \frac{P_{V2}}{S_{V2}} = \frac{39,53}{63,06} = 0,62$$

Duljina voda		216 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Vrsta opterećenja		Podopterećenje			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U ₁ [V]	228,5	U _{v1} [V]	232,24	U _{v2} [V]	224,44
I ₁ [A]	0,26	I _{v1} [A]	0,297	I _{v2} [A]	0,281
P ₁ [W]	52,87	P _{v1} [W]	39,78	P _{v2} [W]	39,53
Q ₁ [VAr]	-23,24	Q _{v1} [VAr]	-56,37	Q _{v2} [VAr]	49,13
S ₁ [VA]	59,6	S _{v1} [VA]	68,97	S _{v2} [VA]	63,06
cos ₁ φ	0,92	cos _{v1} φ	0,57	cos _{v2} φ	0,62

Tablica 5.11. Rezultati proračuna pomoću nadomjesne sheme podopterećenog voda duljine 216 km.

$$S_1 = 58,2 \text{ VA}$$

$$\cos \varphi_1 = 0,93 \text{ (Kapacitivno)}$$

$$\bar{U}_1 = 230,2 < 0^\circ$$

$$l=360 \text{ km}$$

$$\bar{Z}_T = 8,2 + j21,5 \Omega$$

$$\bar{Y}_T = 2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\bar{Z}_V = R_1 \cdot l + X_1 \cdot l = 0,036 \cdot 360 + 0,253 \cdot 360 = 13 + j91,08 \Omega$$

$$\frac{\bar{Y}_V}{2} = j4,75 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

$$\varphi_1 = \arccos(0.93) = 21,56^\circ$$

$$\bar{S}_1 = 58,2 < -21,56^\circ \text{ VA}$$

Struja I_1 , snaga P_1 , i jalova snaga Q_1 odgovaraju izmjerenim vrijednostima na sabirnici 1.

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{S}_1^*}{\bar{U}_1^*} = \frac{58,2 < 21,56^\circ}{230,2 < 0^\circ} = 0,252 < 21,56^\circ \text{ A}$$

$$P_1 = S_1 \cdot \cos\varphi_1 = 58,2 \cdot 0.93 = 54,12 \text{ W}$$

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin\varphi_1 = 58,2 \cdot (-0,36) = -20,95 \text{ VAR}$$

$$\bar{I}_{YT} = \bar{U}_1 \cdot \bar{Y}_T = 230,2 < 0^\circ \cdot (2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4}) = 0,15 < -65,7^\circ \text{ A}$$

Djelatna snaga P_{V1} , napon U_{10} , jalova snaga Q_{V1} , prividna snaga S_{V1} , faktor snage $\cos_{V1}\varphi$ i struja I_{ZT} predstavljaju parametre sabirnice 2.

$$\bar{I}_{ZT} = \bar{I}_1 - \bar{I}_{YT} = 0,252 < 21,56^\circ - 0,15 < -65,7^\circ = 0,287 < 53,02^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{ZT} = \bar{I}_{ZT} \cdot \bar{Z}_T = 0,287 < 53,02^\circ \cdot (8,2 + j21,5) = 6,6 < 122,14^\circ \text{ V}$$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} - \bar{U}_{10} = 0$$

$$\bar{U}_{10} = \bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} = 230,2 < 0^\circ - 6,6 < 122,14^\circ = 233,7 < -1,36^\circ \text{ V}$$

$$P_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 233,7 \cdot 0,287 \cdot \cos(-1,36 - 53,02) = 39,06 \text{ W}$$

$$Q_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 233,7 \cdot 0,287 \cdot \sin(-1,36 - 53,02) = -54,22 \text{ VAR}$$

$$S_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} = 232,2 \cdot 0,297 = 67,07 \text{ VA}$$

$$\cos_{V1}\varphi = \frac{P_{V1}}{S_{V1}} = \frac{39,06}{67,07} = 0,58$$

$$\bar{I}_{10} = \bar{U}_{10} \cdot \frac{\bar{Y}_V}{2} = 232,23 < -1,42^\circ \cdot (j4,75 \cdot 10^{-4}) = 0,11 < 88,58^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_{ZT} - \bar{I}_{10} = 0,297 < 53,35^\circ - 0,11 < 88,58^\circ = 0,21 < -36,31^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{12} = \bar{I}_{12} \cdot \bar{Z}_V = 0,21 < -36,31^\circ \cdot (8 + j54,64) = 11,6 < 45,36^\circ \text{ V}$$

Napon U_{20} i struja I_2 predstavljaju parametre na sabirnici 3.

$$\bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} - \bar{U}_{20} = 0$$

$$\bar{U}_{20} = \bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} = 233,7 < -1,36^\circ - 11,6 < 45,36^\circ = 225,9 < -3,5^\circ \text{ V}$$

$$\bar{I}_{20} = \bar{U}_{20} \cdot \frac{\bar{Y}_V}{2} = 225,9 \angle -3,5^\circ \cdot j4,75 \cdot 10^{-4} = 0,107 \angle 86,5^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{12} - \bar{I}_{20} = 0,21 \angle -36,31^\circ - 0,107 \angle 86,5^\circ = 0,282 \angle -54,86^\circ \text{ A}$$

$$P_{V2} = U_{20} \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 225,9 \cdot 0,282 \cdot \cos(-3,5 + 54,86) = 39,77 \text{ W}$$

$$Q_{V2} = U_{20} \cdot I_2 \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 225,9 \cdot 0,282 \cdot \sin(-3,5 + 54,86) = 49,75 \text{ VAr}$$

$$S_{V1} = U_{20} \cdot I_2 = 225,9 \cdot 0,282 = 63,7 \text{ VA}$$

$$\cos_{V2} \varphi = \frac{P_{V2}}{S_{V2}} = \frac{39,53}{63,06} = 0,62$$

Duljina voda		360 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Vrsta opterećenja		Podopterećenje			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U ₁ [V]	230,2	U _{v1} [V]	232,24	U _{v2} [V]	225,9
I ₁ [A]	0,252	I _{v1} [A]	0,287	I _{v2} [A]	0,282
P ₁ [W]	54,12	P _{v1} [W]	39,06	P _{v2} [W]	39,7
Q ₁ [VAr]	-20,95	Q _{v1} [VAr]	-54,22	Q _{v2} [VAr]	49,75
S ₁ [VA]	58,2	S _{v1} [VA]	67,07	S _{v2} [VA]	63,7
cos ₁ φ	0,92	cos _{v1} φ	0,58	cos _{v2} φ	0,62

Tablica 5.12. Rezultati proračuna pomoću nadomjesne sheme podopterećenog voda duljine 360 km.

5.6. Podopterećenje dva paralelna voda

$$S_1 = 57,9 \text{ VA}$$

$$\cos\varphi_1 = 0,91 \text{ (Kapacitivno)}$$

$$\bar{U}_1 = 229,8 < 0^\circ$$

$$l = 144 \text{ km}$$

$$\bar{Z}_T = 8,2 + j21,5 \Omega$$

$$\bar{Y}_T = 2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\bar{Z}_V = R_1 \cdot l + X_1 \cdot l = 0,034 \cdot 144 + 0,253 \cdot 144 = 5 + j36,43 \Omega$$

$$\bar{Z}_{VP} = \frac{\bar{Z}_V \cdot \bar{Z}_V}{\bar{Z}_V + \bar{Z}_V} = \frac{(5 + j36,43)^2}{2 \cdot (5 + j36,43)} = 2,5 + j18,22$$

$$\frac{\bar{Y}_V}{2} = j3,17 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 2 \cdot j3,17 \cdot 10^{-4} = j6,34 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\varphi_1 = \arccos(0,91) = 24,49^\circ$$

$$\bar{S}_1 = 57,9 < -24,49^\circ \text{ VA}$$

Struja I_1 , snaga P_1 , i jalova snaga Q_1 odgovaraju izmjerenim vrijednostima na sabirnici 1.

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{S}_1^*}{\bar{U}_1^*} = \frac{57,9 < 24,49^\circ}{229,8 < 0^\circ} = 0,252 < 24,49^\circ \text{ A}$$

$$P_1 = S_1 \cdot \cos\varphi_1 = 57,9 \cdot 0,91 = 52,68 \text{ W}$$

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin\varphi_1 = 57,9 \cdot (-0,41) = -23,74 \text{ VAr}$$

$$\bar{I}_{YT} = \bar{U}_1 \cdot \bar{Y}_T = 229,8 < 0^\circ \cdot (2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4}) = 0,15 < -65,7^\circ \text{ A}$$

Djelatna snaga P_{V1} , napon U_{10} , jalova snaga Q_{V1} , prividna snaga S_{V1} , faktor snage $\cos_{V1}\varphi$ i struja I_{ZT} predstavljaju parametre sabirnice 2.

$$\bar{I}_{ZT} = \bar{I}_1 - \bar{I}_{YT} = 0,252 < 24,49^\circ - 0,15 < -65,7^\circ = 0,287 < 53,02^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{ZT} = \bar{I}_{ZT} \cdot \bar{Z}_T = 0,287 < 53,02^\circ \cdot (8,2 + j21,5) = 6,6 < 122,14^\circ \text{ V}$$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} - \bar{U}_{10} = 0$$

$$\bar{U}_{10} = \bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} = 229,8 \angle 0^\circ - 6,6 \angle 122,14^\circ = 233,37 \angle -1,37^\circ \text{ V}$$

$$P_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 233,37 \cdot 0,287 \cdot \cos(-1,37 - 53,02) = 38,99 \text{ W}$$

$$Q_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 233,37 \cdot 0,287 \cdot \sin(-1,37 - 53,02) = -54,45 \text{ VAR}$$

$$S_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} = 233,37 \cdot 0,287 = 66,97 \text{ VA}$$

$$\cos_{V1} \varphi = \frac{P_{V1}}{S_{V1}} = \frac{38,99}{66,97} = 0,58$$

$$\bar{I}_{10} = \bar{U}_{10} \cdot \frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 233,37 \angle -1,37^\circ \cdot (j6,34 \cdot 10^{-4}) = 0,147 \angle 88,63^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_{ZT} - \bar{I}_{10} = 0,287 \angle 53,02^\circ - 0,147 \angle 88,63^\circ = 0,188 \angle 25,59^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{12} = \bar{I}_{12} \cdot \bar{Z}_{VP} = 0,188 \angle 25,59^\circ \cdot (2,5 + j18,22) = 3,45 \angle 107,76^\circ \text{ V}$$

Napon U_{20} i struja I_2 predstavljaju parametre na sabirnici 3.

$$\bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} - \bar{U}_{20} = 0$$

$$\bar{U}_{20} = \bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} = 233,37 \angle -1,37^\circ - 3,45 \angle 107,76^\circ = 234,52 \angle -2,16^\circ \text{ V}$$

$$\bar{I}_{20} = \bar{U}_{20} \cdot \frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 234,52 \angle -2,16^\circ \cdot j6,34 \cdot 10^{-4} = 0,148 \angle 87,84^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{12} - \bar{I}_{20} = 0,188 \angle 25,59^\circ - 0,148 \angle 87,84^\circ = 0,177 \angle -22,13^\circ \text{ A}$$

$$P_{V2} = U_{20} \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 234,52 \cdot 0,177 \cdot \cos(-2,16 + 22,13) = 39,01 \text{ W}$$

$$Q_{V2} = U_{20} \cdot I_2 \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 234,52 \cdot 0,177 \cdot \sin(-2,16 + 22,13) = 14,17 \text{ VAR}$$

$$S_{V2} = U_{20} \cdot I_2 = 234,52 \cdot 0,177 = 41,51 \text{ VA}$$

$$\cos_{V2} \varphi = \frac{P_{V2}}{S_{V2}} = \frac{39,01}{41,51} = 0,93$$

Kao i u slučaju kod praznog hoda dva paralelna voda najznačajnija odstupanja su vod duljine 144 km, a za duljine 216 i 360 ta odstupanja su značajno manja i gotovo zanemariva.

Duljina voda		144 km			
Tip voda		Dva paralelna voda			
Vrsta opterećenja		Podopterećenje			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	229,8	U_{v1} [V]	233,37	U_{v2} [V]	234,52
I_1 [A]	0,252	I_{v1} [A]	0,287	I_{v2} [A]	0,177
P_1 [W]	52,68	P_{v1} [W]	38,99	P_{v2} [W]	39,07
Q_1 [VAr]	-23,74	Q_{v1} [VAr]	-54,45	Q_{v2} [VAr]	14,17
S_1 [VA]	57,9	S_{v1} [VA]	66,97	S_{v2} [VA]	41,51
$\cos_1 \varphi$	0,91	$\cos_{v1} \varphi$	0,58	$\cos_{v2} \varphi$	0,93

Tablica 5.13. Rezultati proračuna pomoću nadomjesne sheme podopterećenog paralelnog voda duljine 144 km.

$$S_1 = 78,3 \text{ VA}$$

$$\cos \varphi_1 = 0,73 \text{ (Kapacitivno)}$$

$$\bar{U}_1 = 229,1 \angle 0^\circ$$

$$l = 216 \text{ km}$$

$$\bar{Z}_T = 8,2 + j21,5 \Omega$$

$$\bar{Y}_T = 2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\bar{Z}_V = R_1 \cdot l + X_1 \cdot l = 0,037 \cdot 216 + 0,253 \cdot 216 = 8 + j54,64 \Omega$$

$$\bar{Z}_{VP} = \frac{\bar{Z}_V \cdot \bar{Z}_V}{\bar{Z}_V + \bar{Z}_V} = \frac{(8 + j54,64)^2}{2 \cdot (8 + j54,64)} = 4 + j27,32 \Omega$$

$$\frac{\bar{Y}_V}{2} = j4,75 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 2 \cdot j4,75 \cdot 10^{-4} = j9,5 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\varphi_1 = \arccos(0.73) = 43,11^\circ$$

$$\bar{S}_1 = 78,3 < -43,11^\circ \text{ VA}$$

Struja I_1 , snaga P_1 , i jalova snaga Q_1 odgovaraju izmjerenim vrijednostima na sabirnici 1.

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{S}_1^*}{\bar{U}_1^*} = \frac{78,3 < 43,11^\circ}{229,1 < 0^\circ} = 0,341 < 43,11^\circ \text{ A}$$

$$P_1 = S_1 \cdot \cos\varphi_1 = 78,3 \cdot 0.73 = 57,16 \text{ W}$$

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin\varphi_1 = 78,3 \cdot (-0,68) = -53,24 \text{ VAr}$$

$$\bar{I}_{YT} = \bar{U}_1 \cdot \bar{Y}_T = 229,1 < 0^\circ \cdot (2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4}) = 0,15 < -65,7^\circ \text{ A}$$

Djelatna snaga P_{V1} , napon U_{10} , jalova snaga Q_{V1} , prividna snaga S_{V1} , faktor snage $\cos_{V1}\varphi$ i struja I_{ZT} predstavljaju parametre sabirnice 2.

$$\bar{I}_{ZT} = \bar{I}_1 - \bar{I}_{YT} = 0,341 < 43,11^\circ - 0,15 < -65,7^\circ = 0,414 < 63,14^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{ZT} = \bar{I}_{ZT} \cdot \bar{Z}_T = 0,414 < 63,14^\circ \cdot (8,2 + j21,5) = 9,53 < 132,26^\circ \text{ V}$$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} - \bar{U}_{10} = 0$$

$$\bar{U}_{10} = \bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} = 229,1 < 0^\circ - 9,53 < 132,26^\circ = 235,61 < -1,71^\circ \text{ V}$$

$$P_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 235,61 \cdot 0,414 \cdot \cos(-1,71 - 63,14) = 41,45 \text{ W}$$

$$Q_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 235,61 \cdot 0,414 \cdot \sin(-1,37 - 53,02) = -88,28 \text{ VAr}$$

$$S_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} = 235,61 \cdot 0,414 = 97,54 \text{ VA}$$

$$\cos_{V1}\varphi = \frac{P_{V1}}{S_{V1}} = \frac{41,45}{97,54} = 0,42$$

$$\bar{I}_{10} = \bar{U}_{10} \cdot \frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 235,61 < -1,71^\circ \cdot (j9,5 \cdot 10^{-4}) = 0,223 < 88,28^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_{ZT} - \bar{I}_{10} = 0,414 < 63,14^\circ - 0,223 < 88,28^\circ = 0,232 < 39,07^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{12} = \bar{I}_{12} \cdot \bar{Z}_{VP} = 0,232 < 39,07^\circ \cdot (4 + j27,32) = 6,4 < 120,74^\circ \text{ V}$$

Napon U_{20} i struja I_2 predstavljaju parametre na sabirnici 3.

$$\bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} - \bar{U}_{20} = 0$$

$$\bar{U}_{20} = \bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} = 235,61 < -1,71^\circ - 6,4 < 120,74^\circ = 239,10 < -2,16^\circ \text{ V}$$

$$\bar{I}_{20} = \bar{U}_{20} \cdot \frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 239,10 < -2,16^\circ \cdot j9,5 \cdot 10^{-4} = 0,227 < 87,84^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{12} - \bar{I}_{20} = 0,232 < 39,07^\circ - 0,227 < 87,84^\circ = 0,189 < -25,16^\circ \text{ A}$$

$$P_{V2} = U_{20} \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 239,10 \cdot 0,189 \cdot \cos(-2,16 + 25,16^\circ) = 41,59 \text{ W}$$

$$Q_{V2} = U_{20} \cdot I_2 \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 239,10 \cdot 0,189 \cdot \sin(-2,16 + 25,16^\circ) = 17,65 \text{ VAr}$$

$$S_{V2} = U_{20} \cdot I_2 = 234,52 \cdot 0,177 = 45,18 \text{ VA}$$

$$\cos_{V2} \varphi = \frac{P_{V2}}{S_{V2}} = \frac{41,59}{45,18} = 0,92$$

Duljina voda		216 km			
Tip voda		Dva paralelna voda			
Vrsta opterećenja		Podopterećenje			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U ₁ [V]	229,1	U _{v1} [V]	235,16	U _{v2} [V]	239,1
I ₁ [A]	0,341	I _{v1} [A]	0,414	I _{v2} [A]	0,189
P ₁ [W]	57,16	P _{v1} [W]	41,45	P _{v2} [W]	41,59
Q ₁ [VAr]	-53,24	Q _{v1} [VAr]	-88,28	Q _{v2} [VAr]	17,65
S ₁ [VA]	78,3	S _{v1} [VA]	97,54	S _{v2} [VA]	45,18
cos ₁ φ	0,73	cos _{v1} φ	0,42	cos _{v2} φ	0,92

Tablica 5.14. Rezultati proračuna pomoću nadomjesne sheme podopterećenog paralelnog voda duljine 216 km.

$$S_1 = 73,5 \text{ VA}$$

$$\cos\varphi_1 = 0,77 \text{ (Kapacitivno)}$$

$$\bar{U}_1 = 229,6 < 0^\circ$$

$$l=360 \text{ km}$$

$$\bar{Z}_T = 8,2 + j21,5 \Omega$$

$$\bar{Y}_T = 2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\bar{Z}_V = R_1 \cdot l + X_1 \cdot l = 0,036 \cdot 360 + 0,253 \cdot 360 = 13 + j91,08 \Omega$$

$$\bar{Z}_{VP} = \frac{\bar{Z}_V \cdot \bar{Z}_V}{\bar{Z}_V + \bar{Z}_V} = \frac{(13 + j91,08)^2}{2 \cdot (13 + j91,08)} = 6,5 + j45,54 \Omega$$

$$\frac{\bar{Y}_V}{2} = j4,75 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 2 \cdot j4,71 \cdot 10^{-4} = j9,5 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\varphi_1 = \arccos(0,77) = 39,64^\circ$$

$$\bar{S}_1 = 73,5 < -39,64^\circ \text{ VA}$$

Struja I_1 , snaga P_1 , i jalova snaga Q_1 odgovaraju izmjerenim vrijednostima na sabirnici 1.

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{S}_1^*}{\bar{U}_1^*} = \frac{73,5 < 39,64^\circ}{229,6 < 0^\circ} = 0,320 < 39,64^\circ \text{ A}$$

$$P_1 = S_1 \cdot \cos\varphi_1 = 73,5 \cdot 0,77 = 56,59 \text{ W}$$

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin\varphi_1 = 73,5 \cdot (-0,63) = -46,3 \text{ VAR}$$

$$\bar{I}_{YT} = \bar{U}_1 \cdot \bar{Y}_T = 229,6 < 0^\circ \cdot (2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4}) = 0,15 < -65,7^\circ \text{ A}$$

Djelatna snaga P_{V1} , napon U_{10} , jalova snaga Q_{V1} , prividna snaga S_{V1} , faktor snage $\cos\varphi_{V1}$ i struja I_{ZT} predstavljaju parametre sabirnice 2.

$$\bar{I}_{ZT} = \bar{I}_1 - \bar{I}_{YT} = 0,320 < 39,64^\circ - 0,15 < -65,7^\circ = 0,387 < 61,54^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{ZT} = \bar{I}_{ZT} \cdot \bar{Z}_T = 0,387 < 61,54^\circ \cdot (8,2 + j21,5) = 8,9 < 130,66^\circ \text{ V}$$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} - \bar{U}_{10} = 0$$

$$\bar{U}_{10} = \bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} = 229,6 \angle 0^\circ - 8,9 \angle 130,66^\circ = 235,49 \angle -1,64^\circ \text{ V}$$

$$P_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 235,49 \cdot 0,387 \cdot \cos(-1,64 - 61,54) = 41,11 \text{ W}$$

$$Q_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 235,49 \cdot 0,387 \cdot \sin(-1,64 - 61,54) = -81,33 \text{ VAR}$$

$$S_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} = 235,49 \cdot 0,387 = 91,13 \text{ VA}$$

$$\cos_{V1} \varphi = \frac{P_{V1}}{S_{V1}} = \frac{41,11}{91,13} = 0,45$$

$$\bar{I}_{10} = \bar{U}_{10} \cdot \frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 235,49 \angle -1,64^\circ \cdot (j9,5 \cdot 10^{-4}) = 0,223 \angle 88,36^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_{ZT} - \bar{I}_{10} = 0,387 \angle 61,54^\circ - 0,223 \angle 88,36^\circ = 0,213 \angle 33,38^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{12} = \bar{I}_{12} \cdot \bar{Z}_{VP} = 0,213 \angle 33,38^\circ \cdot (6,5 + j45,54) = 9,79 \angle 115,25^\circ \text{ V}$$

Napon U_{20} i struja I_2 predstavljaju parametre na sabirnici 3.

$$\bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} - \bar{U}_{20} = 0$$

$$\bar{U}_{20} = \bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} = 235,49 \angle -1,64^\circ - 9,79 \angle 115,25^\circ = 240,07 \angle -3,72^\circ \text{ V}$$

$$\bar{I}_{20} = \bar{U}_{20} \cdot \frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 240,07 \angle -3,72^\circ \cdot j9,5 \cdot 10^{-4} = 0,228 \angle 86,27^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{12} - \bar{I}_{20} = 0,213 \angle 33,38^\circ - 0,228 \angle 86,27^\circ = 0,196 \angle -34,08^\circ \text{ A}$$

$$P_{V2} = U_{20} \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 240,07 \cdot 0,196 \cdot \cos(-3,72^\circ + 34,08^\circ) = 40,6 \text{ W}$$

$$Q_{V2} = U_{20} \cdot I_2 \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 240,07 \cdot 0,196 \cdot \sin(-3,72^\circ + 34,08^\circ) = 23,78 \text{ VAR}$$

$$S_{V2} = U_{20} \cdot I_2 = 240,07 \cdot 0,196 = 47,05 \text{ VA}$$

$$\cos_{V2} \varphi = \frac{P_{V2}}{S_{V2}} = \frac{44,6}{47,05} = 0,94$$

Duljina voda		360 km			
Tip voda		Dva paralelna voda			
Vrsta opterećenja		Podopterećenje			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	229,6	U_{v1} [V]	235,49	U_{v2} [V]	240,07
I_1 [A]	0,320	I_{v1} [A]	0,387	I_{v2} [A]	0,196
P_1 [W]	56,59	P_{v1} [W]	41,11	P_{v2} [W]	40,6
Q_1 [VAr]	-46,3	Q_{v1} [VAr]	-81,33	Q_{v2} [VAr]	23,78
S_1 [VA]	73,5	S_{v1} [VA]	91,13	S_{v2} [VA]	47,05
$\cos_1 \varphi$	0,77	$\cos_{v1} \varphi$	0,45	$\cos_{v2} \varphi$	0,94

Tablica 5.15. Rezultati proračuna pomoću nadomjesne sheme podopterećenog paralelnog voda duljine 360 km.

5.7. Jako opterećenje jednostrukog voda

$$S_1 = 185,9 \text{ VA}$$

$$\cos \varphi_1 = 0,77 \text{ (Induktivno)}$$

$$\bar{U}_1 = 230,03 < 0^\circ$$

$$l = 144 \text{ km}$$

$$\bar{Z}_T = 8,2 + j21,5 \Omega$$

$$\bar{Y}_T = 2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\bar{Z}_V = R_1 \cdot l + X_1 \cdot l = 0,035 \cdot 144 + 0,253 \cdot 144 = 5 + j36,43 \Omega$$

$$\frac{\bar{Y}_V}{2} = j3,17 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\varphi_1 = \arccos(0,77) = 39,64^\circ$$

$$\bar{S}_1 = 185,9 < 39,64^\circ \text{ VA}$$

Struja I_1 , snaga P_1 , i jalova snaga Q_1 odgovaraju izmjerenim vrijednostima na sabirnici 1.

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{S}_1^*}{\bar{U}_1^*} = \frac{185,9 \angle -39,64^\circ}{230,03 \angle 0^\circ} = 0,808 \angle -39,64^\circ \text{ A}$$

$$P_1 = S_1 \cdot \cos\varphi_1 = 185,9 \cdot 0,77 = 143,143 \text{ W}$$

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin\varphi_1 = 185,9 \cdot (0,63) = 117,117 \text{ VAr}$$

$$\bar{I}_{YT} = \bar{U}_1 \cdot \bar{Y}_T = 230,03 \angle 0^\circ \cdot (2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4}) = 0,15 \angle -65,7^\circ \text{ A}$$

Djelatna snaga P_{V1} , napon U_{10} , jalova snaga Q_{V1} , prividna snaga S_{V1} , faktor snage $\cos_{V1}\varphi$ i struja I_{ZT} predstavljaju parametre sabirnice 2.

$$\bar{I}_{ZT} = \bar{I}_1 - \bar{I}_{YT} = 0,808 \angle -39,64^\circ - 0,15 \angle -65,7^\circ = 0,676 \angle -34,05^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{ZT} = \bar{I}_{ZT} \cdot \bar{Z}_T = 0,676 \angle -34,05^\circ \cdot (8,2 + j21,5) = 15,56 \angle 35,07^\circ \text{ V}$$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} - \bar{U}_{10} = 0$$

$$\bar{U}_{10} = \bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} = 230,03 \angle 0^\circ - 15,56 \angle 35,07^\circ = 217,47 \angle -2,35^\circ \text{ V}$$

$$P_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 217,47 \cdot 0,676 \cdot \cos(-2,35 + 34,05) = 125,07 \text{ W}$$

$$Q_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 217,47 \cdot 0,676 \cdot \sin(-2,35 + 34,05) = 77,25 \text{ VAr}$$

$$S_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} = 217,47 \cdot 0,676 = 147 \text{ VA}$$

$$\cos_{V1}\varphi = \frac{P_{V1}}{S_{V1}} = \frac{125,07}{147} = 0,85$$

$$\bar{I}_{10} = \bar{U}_{10} \cdot \frac{\bar{Y}_V}{2} = 217,47 \angle -2,35^\circ \cdot (j3,17 \cdot 10^{-4}) = 0,069 \angle 87,65^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_{ZT} - \bar{I}_{10} = 0,676 \angle -34,05^\circ - 0,069 \angle 87,65^\circ = 0,714 \angle -38,76^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{12} = \bar{I}_{12} \cdot \bar{Z}_V = 0,714 \angle -38,76^\circ \cdot (5 + j36,43) = 26,25 \angle 43,42^\circ \text{ V}$$

Napon U_{20} i struja I_2 predstavljaju parametre na sabirnici 3.

$$\bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} - \bar{U}_{20} = 0$$

$$\bar{U}_{20} = \bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} = 217,47 \angle -2,35^\circ - 26,25 \angle 43,42^\circ = 200,04 \angle -7,75^\circ \text{ V}$$

$$\bar{I}_{20} = \bar{U}_{20} \cdot \frac{\bar{Y}_V}{2} = 200,04 \angle -7,75^\circ \cdot j3,17 \cdot 10^{-4} = 0,063 \angle 82,25^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{12} - \bar{I}_{20} = 0,714 \angle -38,76^\circ - 0,063 \angle 82,25^\circ = 0,748 \angle -42,89^\circ \text{ A}$$

$$P_{V2} = U_{20} \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 200,04 \cdot 0,748 \cdot \cos(-7,75^\circ + 42,89^\circ) = 122,8W$$

$$Q_{V2} = U_{20} \cdot I_2 \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 200,04 \cdot 0,748 \cdot \sin(-7,75^\circ + 42,89^\circ) = 85,48VAr$$

$$S_{V2} = U_{20} \cdot I_2 = 200,04 \cdot 0,748 = 149,62 VA$$

$$\cos_{S_{V2}} \varphi = \frac{P_{V2}}{S_{V2}} = \frac{122,8}{149,62} = 0,82$$

Rezultati slijedeća 3 proračuna su gotovo identični kao rezultati mjerenja te možemo zaključiti da što je više opterećen simulator voda tada su odstupanja najmanja tj. utjecaj kapaciteta se smanjuje i ne stvaraju se velike pogreške.

Duljina voda		144 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Vrsta opterećenja		Jako opterećenje			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U ₁ [V]	230,03	U _{v1} [V]	217,47	U _{v2} [V]	200,04
I ₁ [A]	0,808	I _{v1} [A]	0,676	I _{v2} [A]	0,748
P ₁ [W]	143,143	P _{v1} [W]	125,07	P _{v2} [W]	122,8
Q ₁ [VAr]	117,117	Q _{v1} [VAr]	77,25	Q _{v2} [VAr]	85,48
S ₁ [VA]	185,9	S _{v1} [VA]	147	S _{v2} [VA]	149,62
Cos ₁ φ	0,77	Cos _{v1} φ	0,85	Cos _{v2} φ	0,82

Tablica 5.16. Rezultati proračuna pomoću nadomjesne sheme opterećenog jednostrukog voda duljine 144 km.

$$S_1 = 166,4 \text{ VA}$$

$$\cos\varphi_1 = 0,77 \text{ (Induktivno)}$$

$$\bar{U}_1 = 231,1 < 0^\circ$$

$$l=216 \text{ km}$$

$$\bar{Z}_T = 8,2 + j21,5 \Omega$$

$$\bar{Y}_T = 2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\bar{Z}_V = R_1 \cdot l + X_1 \cdot l = 0,037 \cdot 216 + 0,253 \cdot 216 = 8 + j54,64 \Omega$$

$$\frac{\bar{Y}_V}{2} = j4,75 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\varphi_1 = \arccos(0,77) = 39,64^\circ$$

$$\bar{S}_1 = 166,4 < 39,64^\circ \text{ VA}$$

Struja I_1 , snaga P_1 , i jalova snaga Q_1 odgovaraju izmjerenim vrijednostima na sabirnici 1.

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{S}_1^*}{\bar{U}_1^*} = \frac{166,4 < -39,64^\circ}{231,1 < 0^\circ} = 0,720 < -39,64^\circ \text{ A}$$

$$P_1 = S_1 \cdot \cos\varphi_1 = 166,4 \cdot 0,77 = 128,128 \text{ W}$$

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin\varphi_1 = 166,4 \cdot (0,63) = 104,83 \text{ VAR}$$

$$\bar{I}_{YT} = \bar{U}_1 \cdot \bar{Y}_T = 231,1 < 0^\circ \cdot (2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4}) = 0,15 < -65,7^\circ \text{ A}$$

Djelatna snaga P_{V1} , napon U_{10} , jalova snaga Q_{V1} , prividna snaga S_{V1} , faktor snage $\cos_{V1}\varphi$ i struja I_{ZT} predstavljaju parametre sabirnice 2.

$$\bar{I}_{ZT} = \bar{I}_1 - \bar{I}_{YT} = 0,720 < -39,64^\circ - 0,15 < -65,7^\circ = 0,589 < -33,21^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{ZT} = \bar{I}_{ZT} \cdot \bar{Z}_T = 0,589 < -33,21^\circ \cdot (8,2 + j21,5) = 13,55 < 35,91^\circ \text{ V}$$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} - \bar{U}_{10} = 0$$

$$\bar{U}_{10} = \bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} = 231,1 < 0^\circ - 13,55 < 35,91^\circ = 220,3 < -2,05^\circ \text{ V}$$

$$P_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 220,3 \cdot 0,589 \cdot \cos(-2,05 + 33,21) = 111,03 \text{ W}$$

$$Q_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 220,3 \cdot 0,589 \cdot \sin(-2,05 + 33,21) = 67,14 \text{ VAR}$$

$$S_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} = 217,47 \cdot 0,676 = 129,75 \text{ VA}$$

$$\cos_{V1} \varphi = \frac{P_{V1}}{S_{V1}} = \frac{111,03}{129,75} = 0,85$$

$$\bar{I}_{10} = \bar{U}_{10} \cdot \frac{\bar{Y}_V}{2} = 220,3 \angle -2,05^\circ \cdot (j4,75 \cdot 10^{-4}) = 0,104 \angle 87,95^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_{ZT} - \bar{I}_{10} = 0,589 \angle -33,21^\circ - 0,104 \angle 87,95^\circ = 0,649 \angle -41,09^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{12} = \bar{I}_{12} \cdot \bar{Z}_V = 0,649 \angle -41,09^\circ \cdot (8 + j54,64) = 35,84 \angle 40,58^\circ \text{ V}$$

Napon U_{20} i struja I_2 predstavljaju parametre na sabirnici 3.

$$\bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} - \bar{U}_{20} = 0$$

$$\bar{U}_{20} = \bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} = 220,3 \angle -2,05^\circ - 35,84 \angle 40,58^\circ = 195,44 \angle -9,18^\circ \text{ V}$$

$$\bar{I}_{20} = \bar{U}_{20} \cdot \frac{\bar{Y}_V}{2} = 195,44 \angle -9,18^\circ \cdot j4,75 \cdot 10^{-4} = 0,092 \angle 80,82^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{12} - \bar{I}_{20} = 0,649 \angle -41,09^\circ - 0,092 \angle 80,82^\circ = 0,701 \angle -47,47^\circ \text{ A}$$

$$P_{V2} = U_{20} \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 195,44 \cdot 0,701 \cdot \cos(-9,18^\circ + 47,47^\circ) = 107,53 \text{ W}$$

$$Q_{V2} = U_{20} \cdot I_2 \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 200,04 \cdot 0,748 \cdot \sin(-7,75^\circ + 42,89^\circ) = 84,89 \text{ VAr}$$

$$S_{V2} = U_{20} \cdot I_2 = 200,04 \cdot 0,748 = 137 \text{ VA}$$

$$\cos_{V2} \varphi = \frac{P_{V2}}{S_{V2}} = \frac{107,53}{137} = 0,78$$

Duljina voda		216 km			
Tip voda		jednostruki			
Vrsta opterećenja		Jako opterećenje			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	2301,1	U_{v1} [V]	220,3	U_{v2} [V]	195,44
I_1 [A]	0,720	I_{v1} [A]	0,589	I_{v2} [A]	0,701
P_1 [W]	111,03	P_{v1} [W]	111,3	P_{v2} [W]	107,53
Q_1 [VAr]	104,83	Q_{v1} [VAr]	67,14	Q_{v2} [VAr]	84,89
S_1 [VA]	166,4	S_{v1} [VA]	129,75	S_{v2} [VA]	137
$\cos_1 \varphi$	0,77	$\cos_{v1} \varphi$	0,85	$\cos_{v2} \varphi$	0,78

Tablica 5.17. Rezultati proračuna pomoću nadomjesne sheme opterećenog jednostrukog voda
duljine 216 km.

$$S_1 = 152,7 \text{ VA}$$

$$\cos\varphi_1 = 0,73 \text{ (Induktivno)}$$

$$\bar{U}_1 = 230,3 < 0^\circ$$

$$l=360 \text{ km}$$

$$\bar{Z}_T = 8,2 + j21,5 \Omega$$

$$\bar{Y}_T = 2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\bar{Z}_V = R_1 \cdot l + X_1 \cdot l = 0,036 \cdot 360 + 0,253 \cdot 360 = 13 + j91,08 \Omega$$

$$\frac{\bar{Y}_V}{2} = j4,75 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

$$\varphi_1 = \arccos(0.73) = 43,11^\circ$$

$$\bar{S}_1 = 152,7 < 43,11^\circ \text{ VA}$$

Struja I_1 , snaga P_1 , i jalova snaga Q_1 odgovaraju izmjerenim vrijednostima na sabirnici 1.

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{S}_1^*}{\bar{U}_1^*} = \frac{152,7 < -43,11^\circ}{230,3 < 0^\circ} = 0,663 < -43,11^\circ \text{ A}$$

$$P_1 = S_1 \cdot \cos\varphi_1 = 152,7 \cdot 0.73 = 111,47 \text{ W}$$

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin\varphi_1 = 152,7 \cdot (0,68) = 103,83 \text{ VAR}$$

$$\bar{I}_{YT} = \bar{U}_1 \cdot \bar{Y}_T = 230,3 < 0^\circ \cdot (2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4}) = 0,15 < -65,7^\circ \text{ A}$$

Djelatna snaga P_{V1} , napon U_{10} , jalova snaga Q_{V1} , prividna snaga S_{V1} , faktor snage $\cos_{V1}\varphi$ i struja I_{ZT} predstavljaju parametre sabirnice 2.

$$\bar{I}_{ZT} = \bar{I}_1 - \bar{I}_{YT} = 0,663 < -43,11^\circ - 0,15 < -65,7^\circ = 0,527 < -36,84^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{ZT} = \bar{I}_{ZT} \cdot \bar{Z}_T = 0,527 < -36,84^\circ \cdot (8,2 + j21,5) = 12,12 < 32,28^\circ \text{ V}$$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} - \bar{U}_{10} = 0$$

$$\bar{U}_{10} = \bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} = 230,3 \angle 0^\circ - 12,12 \angle 32,28^\circ = 220,14 \angle -1,68^\circ \text{ V}$$

$$P_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 220,14 \cdot 0,527 \cdot \cos(-1,68 + 36,84) = 94,84 \text{ W}$$

$$Q_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 220,14 \cdot 0,527 \cdot \sin(-1,68 + 36,84) = 66,80 \text{ VAR}$$

$$S_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} = 220,14 \cdot 0,527 = 116,01 \text{ VA}$$

$$\cos_{V1} \varphi = \frac{P_{V1}}{S_{V1}} = \frac{94,84}{116,01} = 0,82$$

$$\bar{I}_{10} = \bar{U}_{10} \cdot \frac{\bar{Y}_V}{2} = 220,14 \angle -1,68^\circ \cdot (j4,75 \cdot 10^{-4}) = 0,104 \angle 88,32^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_{ZT} - \bar{I}_{10} = 0,527 \angle -36,84^\circ - 0,104 \angle 88,32^\circ = 0,593 \angle -45,08^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{12} = \bar{I}_{12} \cdot \bar{Z}_V = 0,593 \angle -45,08^\circ \cdot (13 + j91,08) = 54,55 \angle 36,79^\circ \text{ V}$$

Napon U_{20} i struja I_2 predstavljaju parametre na sabirnici 3.

$$\bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} - \bar{U}_{20} = 0$$

$$\bar{U}_{20} = \bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} = 220,14 \angle -1,68^\circ - 54,55 \angle 36,79^\circ = 180,64 \angle -12,5^\circ \text{ V}$$

$$\bar{I}_{20} = \bar{U}_{20} \cdot \frac{\bar{Y}_V}{2} = 180,64 \angle -12,5^\circ \cdot j4,75 \cdot 10^{-4} = 0,085 \angle 77,5^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{12} - \bar{I}_{20} = 0,593 \angle -45,08^\circ - 0,085 \angle 77,5^\circ = 0,642 \angle -51,47^\circ \text{ A}$$

$$P_{V2} = U_{20} \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 180,64 \cdot 0,642 \cdot \cos(-12,5^\circ + 51,47^\circ) = 90,16 \text{ W}$$

$$Q_{V2} = U_{20} \cdot I_2 \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 180,64 \cdot 0,642 \cdot \sin(-7,75^\circ + 42,89^\circ) = 72,93 \text{ VAR}$$

$$S_{V2} = U_{20} \cdot I_2 = 180,64 \cdot 0,642 = 115,97 \text{ VA}$$

$$\cos_{V2} \varphi = \frac{P_{V2}}{S_{V2}} = \frac{90,16}{115,97} = 0,77$$

Duljina voda		360 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Vrsta opterećenja		Jako opterećenje			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [V]	230,3	U_{v1} [V]	220,14	U_{v2} [V]	180,64
I_1 [A]	0,663	I_{v1} [A]	0,527	I_{v2} [A]	0,642
P_1 [W]	94,84	P_{v1} [W]	94,84	P_{v2} [W]	90,16
Q_1 [VAr]	66,80	Q_{v1} [VAr]	66,8	Q_{v2} [VAr]	72,93
S_1 [VA]	152,7	S_{v1} [VA]	116,01	S_{v2} [VA]	115,97
$\cos \varphi$	0,73	$\cos_{v1} \varphi$	0,82	$\cos_{v2} \varphi$	0,77

Tablica 5.18. Rezultati proračuna pomoću nadomjesne sheme opterećenog jednostrukog voda duljine 316 km.

5.8. Jako opterećenje dva paralelna voda

$$S_1 = 186,9 \text{ VA}$$

$$\cos \varphi_1 = 0,66 \text{ (Induktivno)}$$

$$\bar{U}_1 = 230,4 \angle 0^\circ$$

$$l = 144 \text{ km}$$

$$\bar{Z}_T = 8,2 + j21,5 \Omega$$

$$\bar{Y}_T = 2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\bar{Z}_V = R_1 \cdot l + X_1 \cdot l = 0,034 \cdot 144 + 0,253 \cdot 144 = 5 + j36,43 \Omega$$

$$\bar{Z}_{VP} = \frac{\bar{Z}_V \cdot \bar{Z}_V}{\bar{Z}_V + \bar{Z}_V} = \frac{(5 + j36,43)^2}{2 \cdot (5 + j36,43)} = 2,5 + j18,22$$

$$\frac{\bar{Y}_V}{2} = j3,17 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 2 \cdot j3,17 \cdot 10^{-4} = j6,34 \cdot 10^{-4} S$$

$$\varphi_1 = \arccos(0.66) = 48,7^\circ$$

$$\bar{S}_1 = 186,9 < 48,7^\circ VA$$

Struja I_1 , snaga P_1 , i jalova snaga Q_1 odgovaraju izmjerenim vrijednostima na sabirnici 1.

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{S}_1^*}{\bar{U}_1^*} = \frac{186,9 < -48,7^\circ}{230,4 < 0^\circ} = 0,811 < -48,7^\circ A$$

$$P_1 = S_1 \cdot \cos\varphi_1 = 186,9 \cdot 0.66 = 123,35 W$$

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin\varphi_1 = 186,9 \cdot (0,75) = 140,175 VAr$$

$$\bar{I}_{YT} = \bar{U}_1 \cdot \bar{Y}_T = 230,4 < 0^\circ \cdot (2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4}) = 0,15 < -65,7^\circ A$$

Djelatna snaga P_{V1} , napon U_{10} , jalova snaga Q_{V1} , prividna snaga S_{V1} , faktor snage $\cos_{V1}\varphi$ i struja I_{ZT} predstavljaju parametre sabirnice 2.

$$\bar{I}_{ZT} = \bar{I}_1 - \bar{I}_{YT} = 0,811 < -48,7^\circ - 0,15 < -65,7^\circ = 0,669 < -45,02^\circ A$$

$$\bar{U}_{ZT} = \bar{I}_{ZT} \cdot \bar{Z}_T = 0,669 < -45,02^\circ \cdot (8,2 + j21,5) = 15,39 < 24,1^\circ V$$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} - \bar{U}_{10} = 0$$

$$\bar{U}_{10} = \bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} = 230,4 < 0^\circ - 15,39 < 24,1^\circ = 216,44 < -1,66^\circ V$$

$$P_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 216,44 \cdot 0,669 \cdot \cos(-1,66 + 45,02) = 105,27 W$$

$$Q_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 220,14 \cdot 0,527 \cdot \sin(-1,68 + 36,84) = 99,41 VAr$$

$$S_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} = 220,14 \cdot 0,527 = 144,8 VA$$

$$\cos_{V1}\varphi = \frac{P_{V1}}{S_{V1}} = \frac{105,27}{144,8} = 0,72$$

$$\bar{I}_{10} = \bar{U}_{10} \cdot \frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 216,44 < -1,66^\circ \cdot (j6,34 \cdot 10^{-4}) = 0,137 < 88,34^\circ A$$

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_{ZT} - \bar{I}_{10} = 0,669 < -45,02^\circ - 0,137 < 88,34^\circ = 0,769 < -52,45^\circ A$$

$$\bar{U}_{12} = \bar{I}_{12} \cdot \bar{Z}_{VP} = 0,769 < -52,45^\circ \cdot (2,5 + j18,22) = 14,14 < 29,73^\circ V$$

Napon U_{20} i struja I_2 predstavljaju parametre na sabirnici 3.

$$\bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} - \bar{U}_{20} = 0$$

$$\bar{U}_{20} = \bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} = 216,44 \angle -1,66^\circ - 14,14 \angle 29,73^\circ = 204,5 \angle -3,72^\circ \text{ V}$$

$$\bar{I}_{20} = \bar{U}_{20} \cdot \frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 204,5 \angle -3,72^\circ \cdot j6,34 \cdot 10^{-4} = 0,129 \angle 86,28^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{12} - \bar{I}_{20} = 0,769 \angle -52,45^\circ - 0,129 \angle 86,28^\circ = 0,870 \angle -58,06^\circ \text{ A}$$

$$P_{V2} = U_{20} \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 204,5 \cdot 0,870 \cdot \cos(-3,72^\circ + 58,06^\circ) = 91,03 \text{ W}$$

$$Q_{V2} = U_{20} \cdot I_2 \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 200,04 \cdot 0,748 \cdot \sin(-7,75^\circ + 42,89^\circ) = 144,55 \text{ VAr}$$

$$S_{V2} = U_{20} \cdot I_2 = 200,04 \cdot 0,748 = 177,915 \text{ VA}$$

$$\cos_{V2} \varphi = \frac{P_{V2}}{S_{V2}} = \frac{91,03}{177,91} = 0,51$$

Kao i u prošlom slučaju rezultati dobijeni proračunom i mjerenjem su gotovo identični te su odstupanja minimalna.

Duljina voda		144 km			
Tip voda		Dva paralelna voda			
Vrsta opterećenja		Jako opterećenje			
Sabirница 1		Sabirница 2		Sabirница 3	
U_1 [V]	230,4	U_{v1} [V]	216,4	U_{v2} [V]	204,5
I_1 [A]	0,811	I_{v1} [A]	0,669	I_{v2} [A]	0,870
P_1 [W]	105,27	P_{v1} [W]	105,27	P_{v2} [W]	91,3
Q_1 [VAr]	99,41	Q_{v1} [VAr]	99,41	Q_{v2} [VAr]	144,55
S_1 [VA]	186,9	S_{v1} [VA]	144,8	S_{v2} [VA]	177,91
$\cos_1 \varphi$	0,72	$\cos_{v1} \varphi$	0,72	$\cos_{v2} \varphi$	0,51

Tablica 5.19. Rezultati proračuna pomoću nadomjesne sheme opterećenog paralelnog voda duljine 144 km.

$$S_1 = 170,1 \text{ VA}$$

$$\cos\varphi_1 = 0,84 \text{ (Induktivno)}$$

$$\bar{U}_1 = 229,4 < 0^\circ$$

$$l=216 \text{ km}$$

$$\bar{Z}_T = 8,2 + j21,5 \Omega$$

$$\bar{Y}_T = 2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\bar{Z}_V = R_1 \cdot l + X_1 \cdot l = 0,037 \cdot 216 + 0,253 \cdot 216 = 8 + j54,64 \Omega$$

$$\bar{Z}_{VP} = \frac{\bar{Z}_V \cdot \bar{Z}_V}{\bar{Z}_V + \bar{Z}_V} = \frac{(8 + j54,64)^2}{2 \cdot (8 + j54,64)} = 4 + j27,32 \Omega$$

$$\frac{\bar{Y}_V}{2} = j4,75 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 2 \cdot j4,75 \cdot 10^{-4} = j9,5 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\varphi_1 = \arccos(0.84) = 32,85^\circ$$

$$\bar{S}_1 = 170,1 < 32,85^\circ \text{ VA}$$

Struja I_1 , snaga P_1 , i jalova snaga Q_1 odgovaraju izmjerenim vrijednostima na sabirnici 1.

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{S}_1^*}{\bar{U}_1} = \frac{170,1 < -32,85^\circ}{229,4 < 0^\circ} = 0,741 < -32,85^\circ \text{ A}$$

$$P_1 = S_1 \cdot \cos\varphi_1 = 170,1 \cdot 0,84 = 142,88 \text{ W}$$

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin\varphi_1 = 170,1 \cdot (0,54) = 91,85 \text{ VAR}$$

$$\bar{I}_{YT} = \bar{U}_1 \cdot \bar{Y}_T = 229,4 < 0^\circ \cdot (2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4}) = 0,15 < -65,7^\circ \text{ A}$$

Djelatna snaga P_{V1} , napon U_{10} , jalova snaga Q_{V1} , prividna snaga S_{V1} , faktor snage $\cos\varphi_{V1}$ i struja I_{ZT} predstavljaju parametre sabirnice 2.

$$\bar{I}_{ZT} = \bar{I}_1 - \bar{I}_{YT} = 0,741 < -32,85^\circ - 0,15 < -65,7^\circ = 0,620 < -25,31^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{ZT} = \bar{I}_{ZT} \cdot \bar{Z}_T = 0,620 < -25,31^\circ \cdot (8,2 + j21,5) = 14,26 < 43,81^\circ \text{ V}$$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} - \bar{U}_{10} = 0$$

$$\bar{U}_{10} = \bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} = 229,4 \angle 0^\circ - 14,26 \angle 43,81^\circ = 219,33 \angle -2,57^\circ \text{ V}$$

$$P_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 219,33 \cdot 0,620 \cdot \cos(-2,57 + 25,31) = 125,41 \text{ W}$$

$$Q_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 220,14 \cdot 0,527 \cdot \sin(-1,68 + 36,84) = 52,56 \text{ VAR}$$

$$S_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} = 220,14 \cdot 0,527 = 135,98 \text{ VA}$$

$$\cos_{V1} \varphi = \frac{P_{V1}}{S_{V1}} = \frac{125,41}{135,98} = 0,92$$

$$\bar{I}_{10} = \bar{U}_{10} \cdot \frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 219,33 \angle -2,57^\circ \cdot (j9,5 \cdot 10^{-4}) = 0,208 \angle 87,43^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_{ZT} - \bar{I}_{10} = 0,620 \angle -25,31^\circ - 0,208 \angle 87,43^\circ = 0,726 \angle -40,63^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{12} = \bar{I}_{12} \cdot \bar{Z}_{VP} = 0,726 \angle -40,63^\circ \cdot (4 + j27,32) = 20,04 \angle 41,04^\circ \text{ V}$$

Napon U_{20} i struja I_2 predstavljaju parametre na sabirnici 3.

$$\bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} - \bar{U}_{20} = 0$$

$$\bar{U}_{20} = \bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} = 219,33 \angle -2,57^\circ - 20,04 \angle 41,04^\circ = 205,28 \angle -6,43^\circ \text{ V}$$

$$\bar{I}_{20} = \bar{U}_{20} \cdot \frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 205,28 \angle -6,43^\circ \cdot j9,5 \cdot 10^{-4} = 0,195 \angle 83,57^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{12} - \bar{I}_{20} = 0,726 \angle -40,63^\circ - 0,195 \angle 83,57^\circ = 0,851 \angle -51,55^\circ \text{ A}$$

$$P_{V2} = U_{20} \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 205,28 \cdot 0,851 \cdot \cos(-6,43^\circ + 51,55^\circ) = 123,07 \text{ W}$$

$$Q_{V2} = U_{20} \cdot I_2 \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 200,04 \cdot 0,748 \cdot \sin(-7,75^\circ + 42,89^\circ) = 123,97 \text{ VAR}$$

$$S_{V2} = U_{20} \cdot I_2 = 200,04 \cdot 0,748 = 174,69 \text{ VA}$$

$$\cos_{V2} \varphi = \frac{P_{V2}}{S_{V2}} = \frac{123,07}{174,69} = 0,7$$

Duljina voda		216 km			
Tip voda		Dva paralelna voda			
Vrsta opterećenja		Jako opterećenje			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U ₁ [V]	229,4	U _{v1} [V]	219,33	U _{v2} [V]	205,28
I ₁ [A]	0,741	I _{v1} [A]	0,620	I _{v2} [A]	0,851
P ₁ [W]	142,88	P _{v1} [W]	125,41	P _{v2} [W]	123,07
Q ₁ [VAr]	91,85	Q _{v1} [VAr]	52,56	Q _{v2} [VAr]	123,97
S ₁ [VA]	170,1	S _{v1} [VA]	135,98	S _{v2} [VA]	174,69
cos ₁ φ	0,84	cos _{v1} φ	0,92	cos _{v2} φ	0,7

Tablica 5.20. Rezultati proračuna pomoću nadomjesne sheme opterećenog paralelnog voda duljine 216 km.

$$S_1 = 155,8 \text{ VA}$$

$$\cos\varphi_1 = 0,91 \text{ (Induktivno)}$$

$$\bar{U}_1 = 230,6 < 0^\circ$$

$$l=360 \text{ km}$$

$$\bar{Z}_T = 8,2 + j21,5 \Omega$$

$$\bar{Y}_T = 2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\bar{Z}_V = R_1 \cdot l + X_1 \cdot l = 0,036 \cdot 360 + 0,253 \cdot 360 = 13 + j91,08 \Omega$$

$$\bar{Z}_{VP} = \frac{\bar{Z}_V \cdot \bar{Z}_V}{\bar{Z}_V + \bar{Z}_V} = \frac{(13 + j91,08)^2}{2 \cdot (13 + j91,08)} = 6,5 + j45,54 \Omega$$

$$\frac{\bar{Y}_V}{2} = j4,75 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

$$\frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 2 \cdot j4,71 \cdot 10^{-4} = j9,5 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

$$\varphi_1 = \arccos(0.91) = 24,49^\circ$$

$$\bar{S}_1 = 155,8 \angle 24,49^\circ \text{VA}$$

Struja I_1 , snaga P_1 , i jalova snaga Q_1 odgovaraju izmjerenim vrijednostima na sabirnici 1.

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{S}_1^*}{\bar{U}_1^*} = \frac{155,8 \angle -24,49^\circ}{230,6 \angle 0^\circ} = 0,675 \angle -24,49^\circ \text{ A}$$

$$P_1 = S_1 \cdot \cos\varphi_1 = 155,8 \cdot 0,91 = 141,77 \text{ W}$$

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin\varphi_1 = 155,8 \cdot (0,41) = 63,87 \text{ VAR}$$

$$\bar{I}_{YT} = \bar{U}_1 \cdot \bar{Y}_T = 230,6 \angle 0^\circ \cdot (2,68 \cdot 10^{-4} - j5,94 \cdot 10^{-4}) = 0,15 \angle -65,7^\circ \text{A}$$

Djelatna snaga P_{V1} , napon U_{10} , jalova snaga Q_{V1} , prividna snaga S_{V1} , faktor snage $\cos_{V1}\varphi$ i struja I_{ZT} predstavljaju parametre sabirnice 2.

$$\bar{I}_{ZT} = \bar{I}_1 - \bar{I}_{YT} = 0,675 \angle -24,49^\circ - 0,15 \angle -65,7^\circ = 0,570 \angle -14,52^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_{ZT} = \bar{I}_{ZT} \cdot \bar{Z}_T = 0,570 \angle -14,52^\circ \cdot (8,2 + j21,5) = 13,11 \angle 54,60^\circ \text{ V}$$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} - \bar{U}_{10} = 0$$

$$\bar{U}_{10} = \bar{U}_1 - \bar{U}_{ZT} = 230,6 \angle 0^\circ - 13,11 \angle 54,60^\circ = 223,26 \angle -2,74^\circ \text{ V}$$

$$P_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 223,26 \cdot 0,570 \cdot \cos(-2,74^\circ + 14,52^\circ) = 124,57 \text{ W}$$

$$Q_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 220,14 \cdot 0,527 \cdot \sin(-1,68 + 36,84) = 25,98 \text{ VAR}$$

$$S_{V1} = U_{10} \cdot I_{ZT} = 220,14 \cdot 0,527 = 127,25 \text{ VA}$$

$$\cos_{V1}\varphi = \frac{P_{V1}}{S_{V1}} = \frac{124,57}{127,25} = 0,97$$

$$\bar{I}_{10} = \bar{U}_{10} \cdot \frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 223,26 \angle -2,74^\circ \cdot (j9,5 \cdot 10^{-4}) = 0,212 \angle 87,26^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_{ZT} - \bar{I}_{10} = 0,570 \angle -14,52^\circ - 0,212 \angle 87,26^\circ = 0,647 \angle -33,21^\circ \text{A}$$

$$\bar{U}_{12} = \bar{I}_{12} \cdot \bar{Z}_{VP} = 0,647 \angle -33,21^\circ \cdot (6,5 + j45,54) = 29,76 \angle 48,66^\circ \text{ V}$$

Napon U_{20} i struja I_2 predstavljaju parametre na sabirnici 3.

$$\bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} - \bar{U}_{20} = 0$$

$$\bar{U}_{20} = \bar{U}_{10} - \bar{U}_{12} = 223,26 \angle -2,74^\circ - 29,76 \angle 48,66^\circ = 206,01 \angle -9,22^\circ \text{ V}$$

$$\bar{I}_{20} = \bar{U}_{20} \cdot \frac{\bar{Y}_{VP}}{2} = 206,01 < -9,22^\circ \cdot j9,5 \cdot 10^{-4} = 0,195 < 80,78^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{12} - \bar{I}_{20} = 0,647 < -33,21^\circ - 0,195 < 80,78^\circ = 0,747 < -46,99^\circ \text{ A}$$

$$P_{V2} = U_{20} \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) = 206,01 \cdot 0,747 \cdot \cos(-9,22^\circ + 46,99^\circ) = 121,65 \text{ W}$$

$$Q_{V2} = U_{20} \cdot I_2 \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) = 206,01 \cdot 0,747 \cdot \sin(-9,22^\circ + 46,99^\circ) = 94,25 \text{ VAr}$$

$$S_{V2} = U_{20} \cdot I_2 = 206,01 \cdot 0,747 = 153,88 \text{ VA}$$

$$\cos_{V2} \varphi = \frac{P_{V2}}{S_{V2}} = \frac{121,65}{153,88} = 0,79$$

Duljina voda		360 km			
Tip voda		Dva paralelna voda			
Vrsta opterećenja		Jako opterećenje			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U ₁ [V]	230,6	U _{v1} [V]	223,26	U _{v2} [V]	206,01
I ₁ [A]	0,675	I _{v1} [A]	0,570	I _{v2} [A]	0,747
P ₁ [W]	141,77	P _{v1} [W]	124,57	P _{v2} [W]	121,65
Q ₁ [VAr]	63,87	Q _{v1} [VAr]	25,98	Q _{v2} [VAr]	94,25
S ₁ [VA]	155,8	S _{v1} [VA]	127,25	S _{v2} [VA]	153,88
cos ₁ φ	0,91	cos _{v1} φ	0,97	cos _{v2} φ	0,79

Tablica 5.21. Rezultati proračuna pomoću nadomjesne sheme opterećenog paralelnog voda duljine 360 km.

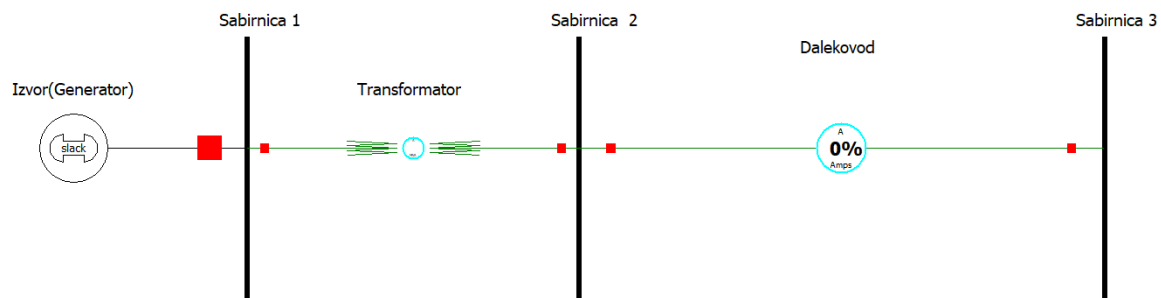
6.SIMULACIJA U RAČUNALNOM PROGRAMU POWER WORLD

Jedan od najboljih načina za provjeru rezultata mjerenja ili proračuna je korištenjem računalnih programa. U ovom slučaju korišten je računalni program Power World [11]. Cilj je ponovno simulirati svih 18 mjerenja koja su provedena u poglavlju 4 i usporediti dobijene rezultate.

Zbog same prirode računalnog programa bitno je naglasiti da neke veličine nisu istog reda. Naponi su izraženi u kV, a ne u V kao i snage MW, MVAR i MVA, ali to ne utječe na točnost podataka. Sve veličine bi trebale biti približno iste bez obzira na red veličine.

6.1.Prazan hod jednostrukog voda

Za simulaciju praznog hoda jednostrukog voda može se reći da je uspješno provedena. Rezultati dobijeni mjerenjama na simulatoru voda i rezultati dobijeni simulacijom u Power World-u su gotovo identični. Na slici 6.1. prikazana je shema spoja praznog hoda jednostrukog voda.



Slika 6.1. Prikaz sheme u Power World-u za simulaciju praznog hoda jednostrukog voda.

Duljina voda		144 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Opterećenje		Prazan hod			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U ₁ [kV]	230	U _{v1} [kV]	231,45	U _{v2} [kV]	234,14
I ₁ [A]	62,27	I _{v1} [A]	85,33	I _{v2} [A]	0,00
P ₁ [MW]	14,34	P _{v1} [MW]	0,04	P _{v2} [MW]	0
Q ₁ [MVar]	-2,91	Q _{v1} [MVar]	-34,2	Q _{v2} [MVar]	0
S ₁ [MVA]	14,55	S _{v1} [MVA]	34,21	S _{v2} [MVA]	0
Cos ₁ φ	0,98	Cos _{v1} φ	0,001	Cos _{v2} φ	---

Tablica 6.1. Podaci dobijeni simulacijom u Power World-u za jednostruki vod duljine 144 km.

Duljina voda		216 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Opterećenje		Prazan hod			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U ₁ [kV]	230	U _{v1} [kV]	233,1	U _{v2} [kV]	239,29
I ₁ [A]	108,27	I _{v1} [A]	225,47	I _{v2} [A]	0,00
P ₁ [MW]	14,61	P _{v1} [MW]	0,06	P _{v2} [MW]	0
Q ₁ [MVar]	-20,52	Q _{v1} [MVar]	-52,56	Q _{v2} [MVar]	0
S ₁ [MVA]	28,9	S _{v1} [MVA]	52,56	S _{v2} [MVA]	0
Cos ₁ φ	0,5	Cos _{v1} φ	0,001	Cos _{v2} φ	---

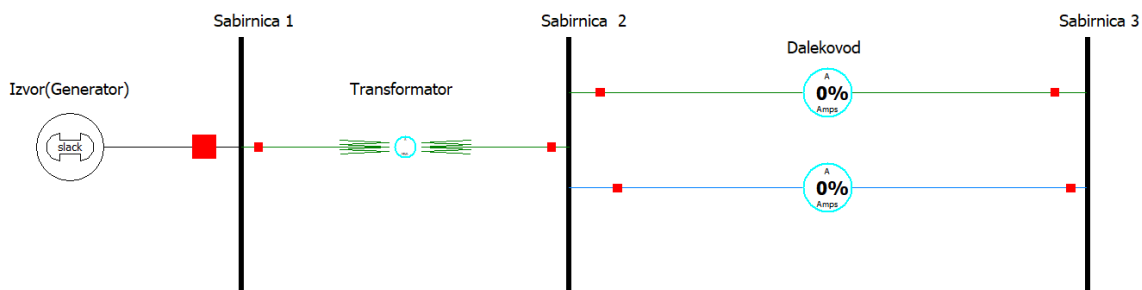
Tablica 6.2. Podaci dobijeni simulacijom u Power World-u za jednostruki vod duljine 216 km.

Duljina voda		360 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Opterećenje		Prazan hod			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [kV]	230	U_{v1} [kV]	233,14	U_{v2} [kV]	243,55
I_1 [A]	110,19	I_{v1} [A]	226,81	I_{v2} [A]	0,00
P_1 [MW]	14,77	P_{v1} [MW]	0,2	P_{v2} [MW]	0
Q_1 [MVar]	-25,58	Q_{v1} [MVar]	-52,88	Q_{v2} [MVar]	0
S_1 [MVA]	28,35	S_{v1} [MVA]	52,88	S_{v2} [MVA]	0
$\cos \varphi$	0,52	$\cos_{v1} \varphi$	0,002	$\cos_{v2} \varphi$	---

Tablica 6.3. Podaci dobijeni simulacijom u Power World-u za jednostruki vod duljine 360 km.

6.2. Prazni hod dva paralelna voda

Simulacija praznog hoda dva paralelna voda također je uspješno provedena s minimalnim odstupanjima za sve 3 duljine voda. Djelatna snaga očitana na sabirnici 1 doista odgovara gubicima transformatora u praznom hodu koji su izmjereni na simulatoru voda u laboratoriju. Sama točnost tog podatka nam potvrđuje točnost izračunatih parametara transformatora. Na slici 6.2. prikazan je shematski izgled modela praznog hoda dva paralelna voda.



Slika 6.2. Prikaz sheme u Power World-u za simulaciju praznog hoda dva paralelna voda.

Duljina voda		144 km			
Tip voda		Dva paralelna voda			
Opterećenje		Prazan hod			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U ₁ [kV]	230	U _{v1} [kV]	234,14	U _{v2} [kV]	237,42
I ₁ [A]	100,52	I _{v1} [A]	173,03	I _{v2} [A]	0,00
P ₁ [MW]	14,97	P _{v1} [MW]	0,08	P _{v2} [MW]	0
Q ₁ [MVar]	-19,45	Q _{v1} [MVar]	-40,34	Q _{v2} [MVar]	0
S ₁ [MVA]	24,54	S _{v1} [MVA]	40,34	S _{v2} [MVA]	0
Cos ₁ φ	0,61	Cos _{v1} φ	0,002	Cos _{v2} φ	---

Tablica 6.4. Podaci dobijeni simulacijom u Power World-u za dva paralelna voda duljine 144 km.

Duljina voda		216 km			
Tip voda		Dva paralelna voda			
Opterećenje		Prazan hod			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U ₁ [kV]	230	U _{v1} [kV]	238,1	U _{v2} [kV]	244,42
I ₁ [A]	328,74	I _{v1} [A]	445	I _{v2} [A]	0,00
P ₁ [MW]	16,2	P _{v1} [MW]	0,28	P _{v2} [MW]	0
Q ₁ [MVar]	-57,8	Q _{v1} [MVar]	-109,66	Q _{v2} [MVar]	0
S ₁ [MVA]	60,1	S _{v1} [MVA]	109,66	S _{v2} [MVA]	0
Cos ₁ φ	0,32	Cos _{v1} φ	0,002	Cos _{v2} φ	---

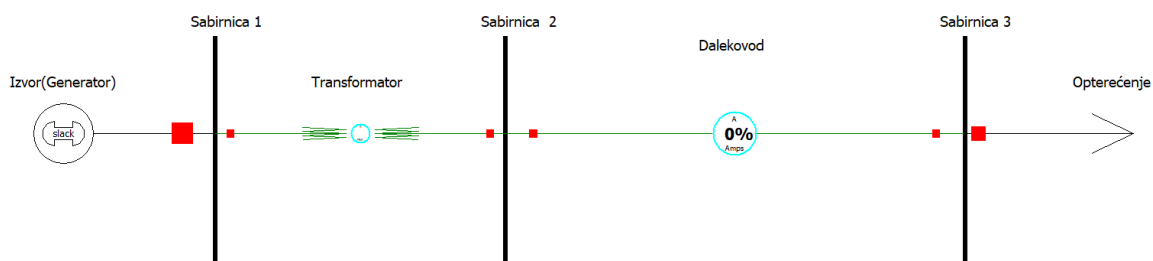
Tablica 6.5. Podaci dobijeni simulacijom u Power World-u za dva paralelna voda duljine 216 km.

Duljina voda		360 km			
Tip voda		Dva paralelna vod			
Opterećenje		Prazan hod			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U_1 [kV]	230	U_{v1} [kV]	238,13	U_{v2} [kV]	248,74
I_1 [A]	330,82	I_{v1} [A]	462,52	I_{v2} [A]	0,00
P_1 [MW]	16,42	P_{v1} [MW]	0,48	P_{v2} [MW]	0
Q_1 [MVar]	-72,8	Q_{v1} [MVar]	-110,14	Q_{v2} [MVar]	0
S_1 [MVA]	76,02	S_{v1} [MVA]	110,15	S_{v2} [MVA]	0
$\cos_1 \varphi$	0,22	$\cos_{v1} \varphi$	0,002	$\cos_{v2} \varphi$	---

Tablica 6.6. Podaci dobijeni simulacijom u Power World-u za dva paralelna voda duljine 360 km.

6.3. Podopterećenje jednostrukog voda

U simulaciji jednostrukog podopterećenog voda vide se blaga odstupanja napona. Prema izmjerenim podacima na simulatoru voda vidljiv je porast napona na kraju voda u odnosu na početak za duljine 144 km i 216 km dok u simulaciji vidimo kako je napon manji na kraju voda u odnosu na početak. Ta odstupanja nastala su zbog nesavršenosti samog simulatora voda koji ima izraženija kapacitivna svojstva i nepreciznosti mjernih instrumenata. Kao opterećenje uzete su izmjerene vrijednosti djelatne i jalove snage na sabirnici 3 u poglavlju 5. Na slici 6.3. prikazan je shematski izgled modela opterećenja jednostrukog voda.



Slika 6.3. Prikaz sheme u Power World-u za simulaciju opterećenja jednostrukog voda.

Duljina voda		144 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Opterećenje		P=38,60 MW, Q=28,68MVA _r			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U ₁ [kV]	230	U _{v1} [kV]	227,95	U _{v2} [kV]	226,35
I ₁ [A]	315,3	I _{v1} [A]	177,5	I _{v2} [A]	192,18
P ₁ [MW]	63,13	P _{v1} [MW]	38,76	P _{v2} [MW]	38,60
Q ₁ [MVA _r]	35,7	Q _{v1} [MVA _r]	4,65	Q _{v2} [MVA _r]	28,68
S ₁ [MVA]	72,52	S _{v1} [MVA]	40,46	S _{v2} [MVA]	43,52
Cos ₁ φ	0,87	Cos _{v1} φ	0,95	Cos _{v2} φ	0,88

Tablica 6.7. Podaci dobijeni simulacijom u Power World-u za jednostruki vod duljine 144 km.

Duljina voda		216 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Opterećenje		P=39,9MW, Q=50,22MVA _r			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U ₁ [kV]	230	U _{v1} [kV]	229.53	U _{v2} [kV]	229,31
I ₁ [A]	258,4	I _{v1} [A]	300,2	I _{v2} [A]	278,85
P ₁ [MW]	54,68	P _{v1} [MW]	40,17	P _{v2} [MW]	39,9
Q ₁ [MVA _r]	-23,29	Q _{v1} [MVA _r]	-56,5	Q _{v2} [MVA _r]	50,22
S ₁ [MVA]	59,43	S _{v1} [MVA]	68,88	S _{v2} [MVA]	63,88
Cos ₁ φ	0,92	Cos _{v1} φ	0,57	Cos _{v2} φ	0,89

Tablica 6.8. Podaci dobijeni simulacijom u Power World-u za jednostruki vod duljine 216 km.

Duljina voda		360 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Opterećenje		P=40,01MW, Q=50,22MVA			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U ₁ [kV]	230	U _{v1} [kV]	229,34	U _{v2} [kV]	228,52
I ₁ [A]	256,56	I _{v1} [A]	294,84	I _{v2} [A]	280,93
P ₁ [MW]	54,96	P _{v1} [MW]	40,47	P _{v2} [MW]	40,01
Q ₁ [MVA]	-21,72	Q _{v1} [MVA]	-55,96	Q _{v2} [MVA]	50,22
S ₁ [MVA]	59,01	S _{v1} [MVA]	67,62	S _{v2} [MVA]	64,2
Cos ₁ φ	0,93	Cos _{v1} φ	0,58	Cos _{v2} φ	0,62

Tablica 6.9. Podaci dobijeni simulacijom u Power World-u za jednostruki vod duljine 360 km.

6.4. Podopterećenje dva paralelna voda

Usporedbom izmjerenih podataka na simulatoru voda u laboratoriju i podataka dobijenih simulacijom najveće odstupanje je vidljivo kod napona. Naponi izmjereni na simulatoru voda znatno su veći nego naponi dobijeni simulacijom. Najveće odstupanje zabilježeno je na sabirnici 3 koja predstavlja kraj voda. Kao što je ranije pretpostavljeno razlog tomu je prenaplašeno kapacitivno svojstvo simulatora voda koje uzrokuje izraženiji porast napona na kraju voda u odnosu na početak voda. Sve ostale veličine kao što su struje, snage i faktori snage se podudaraju u oba slučaja. Na slici 6.4. prikazan je shematski izgled modela opterećenja dva paralelna voda



Slika 6.4. Prikaz sheme u Power World-u za simulaciju opterećenja dva paralelna voda.

Duljina voda		144 km			
Tip voda		Dva paralelna voda			
Opterećenje		P=38,4MW, Q=24,8MVar			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U ₁ [kV]	230	U _{v1} [kV]	230,8	U _{v2} [kV]	231,6
I ₁ [A]	258,39	I _{v1} [A]	248,05	I _{v2} [A]	197,32
P ₁ [MW]	54,68	P _{v1} [MW]	38,49	P _{v2} [MW]	38,4
Q ₁ [MVar]	-23,29	Q _{v1} [MVar]	-42,38	Q _{v2} [MVar]	24,8
S ₁ [MVA]	59,43	S _{v1} [MVA]	57,25	S _{v2} [MVA]	45,7
Cos ₁ φ	0,92	Cos _{v1} φ	0,67	Cos _{v2} φ	0,84

Tablica 6.10. Podaci dobijeni simulacijom u Power World-u za dva paralelna voda duljine 144 km.

Duljina voda		216 km			
Tip voda		Dva paralelna voda			
Opterećenje		P=46,6MW, Q=26,5MVar			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U ₁ [kV]	230	U _{v1} [kV]	233,62	U _{v2} [kV]	235,85
I ₁ [A]	341,13	I _{v1} [A]	395,47	I _{v2} [A]	227,26
P ₁ [MW]	57,6	P _{v1} [MW]	42,86	P _{v2} [MW]	46,6
Q ₁ [MVar]	-53,28	Q _{v1} [MVar]	-83,1	Q _{v2} [MVar]	26,5
S ₁ [MVA]	78,56	S _{v1} [MVA]	92,39	S _{v2} [MVA]	53,6
Cos ₁ φ	0,73	Cos _{v1} φ	0,46	Cos _{v2} φ	0,87

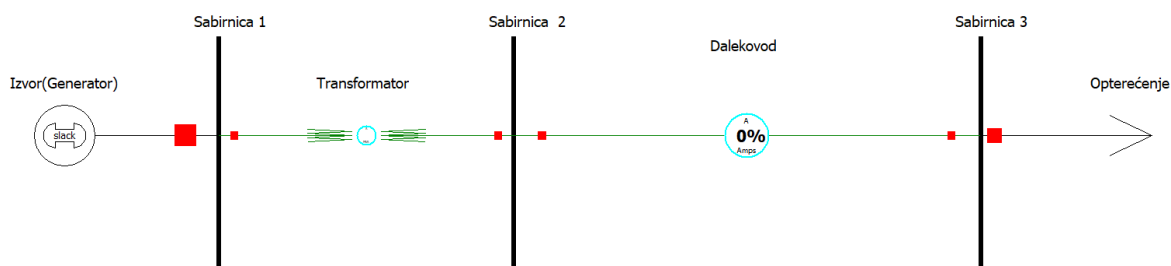
Tablica 6.11. Podaci dobijeni simulacijom u Power World-u za dva paralelna voda duljine 216 km.

Duljina voda		360 km			
Tip voda		Dva paralelna voda voda			
Opterećenje		P=48,4MW, Q=28,8MVA _r			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U ₁ [kV]	230	U _{v1} [kV]	233,22	U _{v2} [kV]	236,33
I ₁ [A]	323,3	I _{v1} [A]	369,5	I _{v2} [A]	235,7
P ₁ [MW]	54,17	P _{v1} [MW]	48,84	P _{v2} [MW]	48,4
Q ₁ [MVA _r]	-47,4	Q _{v1} [MVA _r]	-73,57	Q _{v2} [MVA _r]	28,8
S ₁ [MVA]	73,33	S _{v1} [MVA]	88,13	S _{v2} [MVA]	56,32
Cos ₁ φ	0,77	Cos _{v1} φ	0,47	Cos _{v2} φ	0,86

Tablica 6.12. Podaci dobijeni simulacijom u Power World-u za dva paralelna voda duljine 360 km.

5.5. Jako opterećenje jednostrukog voda

Usporedbom rezultata vidi se da se izmjereni i simulirani podaci podudaraju uz manja odstupanja koja su zanemariva. Prema tome zaključujemo da je proračun parametara voda također točan. Na slici 6.5. prikazan je shematski izgled modela opterećenja jednostrukog voda.



Slika 6.5. Prikaz sheme u Power World-u za simulaciju opterećenja jednostrukog voda.

Duljina voda		144 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Opterećenje		P=111,59MW, Q=92,79MVA			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U ₁ [kV]	230	U _{v1} [kV]	215,67	U _{v2} [kV]	197,07
I ₁ [A]	743,9	I _{v1} [A]	655,5	I _{v2} [A]	735,7
P ₁ [MW]	131,68	P _{v1} [MW]	114,18	P _{v2} [MW]	111,59
Q ₁ [MVA]	109,11	Q _{v1} [MVA]	83,39	Q _{v2} [MVA]	92,79
S ₁ [MVA]	171,01	S _{v1} [MVA]	141,39	S _{v2} [MVA]	145,13
Cos ₁ φ	0,77	Cos _{v1} φ	0,80	Cos _{v2} φ	0,77

Tablica 6.13. Podaci dobijeni simulacijom u Power World-u za jednostruki vod duljine 144 km.

Duljina voda		216 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Opterećenje		P=107,9MW, Q=84,6MVA			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U ₁ [kV]	230	U _{v1} [kV]	217,3	U _{v2} [kV]	192,33
I ₁ [A]	724,4	I _{v1} [A]	600,4	I _{v2} [A]	712,8
P ₁ [MW]	128,3	P _{v1} [MW]	111,35	P _{v2} [MW]	107,9
Q ₁ [MVA]	106,32	Q _{v1} [MVA]	68,2	Q _{v2} [MVA]	84,6
S ₁ [MVA]	166,62	S _{v1} [MVA]	130,48	S _{v2} [MVA]	137,1
Cos ₁ φ	0,77	Cos _{v1} φ	0,85	Cos _{v2} φ	0,78

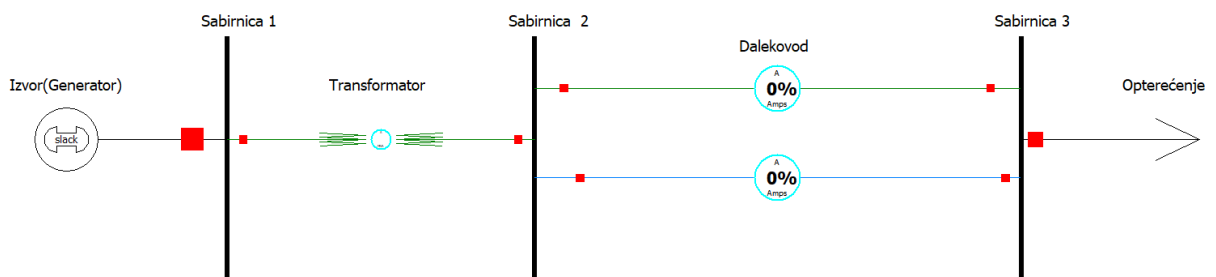
Tablica 6.14. Podaci dobijeni simulacijom u Power World-u za jednostruki vod duljine 216 km.

Duljina voda		360 km			
Tip voda		Jednostruki vod			
Opterećenje		P=89,3 MW, Q=71,2 MVA _r			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U ₁ [kV]	230	U _{v1} [kV]	218,57	U _{v2} [kV]	180,79
I ₁ [A]	654,7	I _{v1} [A]	517,8	I _{v2} [A]	632,2
P ₁ [MW]	109,94	P _{v1} [MW]	93,73	P _{v2} [MW]	89,3
Q ₁ [MVA _r]	102,93	Q _{v1} [MVA _r]	63,44	Q _{v2} [MVA _r]	71,2
S ₁ [MVA]	150,6	S _{v1} [MVA]	113,18	S _{v2} [MVA]	114,3
Cos ₁ φ	0,73	Cos _{v1} φ	0,83	Cos _{v2} φ	0,78

Tablica 6.15. Podaci dobijeni simulacijom u Power World-u za jednostruki vod duljine 360 km.

6.6. Jako opterećenje dva paralelna voda

U ovoj simulaciji također postoji podudaranje rezultata uz mala odstupanja koja se nalaze u granicama tolerancije te možemo zaključiti da je izrađeni model za analizu strujno-naponskih prilika ostao dosljedan kroz cijelu simulaciju što bez točnog proračuna parametara transformatora i voda ne bi bilo moguće. Na slici 6.6. prikazan je shematski izgled modela opterećenja dva paralelna voda.



Slika 6.6. Prikaz sheme u Power World-u za simulaciju opterećenja dva paralelna voda.

Duljina voda		144 km			
Tip voda		Dva paralelna voda			
Opterećenje		P=103,8MW, Q=125,2MVA _r			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U ₁ [kV]	230	U _{v1} [kV]	216,73	U _{v2} [kV]	206,64
I ₁ [A]	803,9	I _{v1} [A]	600,91	I _{v2} [A]	787
P ₁ [MW]	122,03	P _{v1} [MW]	105,08	P _{v2} [MW]	103,8
Q ₁ [MVA _r]	138,9	Q _{v1} [MVA _r]	76,94	Q _{v2} [MVA _r]	125,2
S ₁ [MVA]	184,9	S _{v1} [MVA]	130,24	S _{v2} [MVA]	162,5
Cos ₁ φ	0,66	Cos _{v1} φ	0,80	Cos _{v2} φ	0,64

Tablica 6.16. Podaci dobijeni simulacijom u Power World-u za dva paralelna voda duljine 144 km.

Duljina voda		216 km			
Tip voda		Dva paralelna voda			
Opterećenje		P=104,3 MW, Q=126,3 MVA _r			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U ₁ [kV]	230	U _{v1} [kV]	219,23	U _{v2} [kV]	205,58
I ₁ [A]	659,4	I _{v1} [A]	538,11	I _{v2} [A]	796,77
P ₁ [MW]	122,4	P _{v1} [MW]	106,01	P _{v2} [MW]	104,3
Q ₁ [MVA _r]	79,06	Q _{v1} [MVA _r]	51,76	Q _{v2} [MVA _r]	126,3
S ₁ [MVA]	145,71	S _{v1} [MVA]	117,97	S _{v2} [MVA]	163,8
Cos ₁ φ	0,84	Cos _{v1} φ	0,89	Cos _{v2} φ	0,63

Tablica 6.17. Podaci dobijeni simulacijom u Power World-u za dva paralelna voda duljine 216 km.

Duljina voda		360 km			
Tip voda		Dva paralelna voda			
Opterećenje		P=120,6 MW, Q=93,4 MVar			
Sabirnica 1		Sabirnica 2		Sabirnica 3	
U ₁ [kV]	230	U _{v1} [kV]	220,99	U _{v2} [kV]	203,89
I ₁ [A]	632,26	I _{v1} [A]	570,9	I _{v2} [A]	748,11
P ₁ [MW]	140,1	P _{v1} [MW]	123,39	P _{v2} [MW]	120,6
Q ₁ [MVar]	63,83	Q _{v1} [MVar]	26,36	Q _{v2} [MVar]	93,4
S ₁ [MVA]	154,42	S _{v1} [MVA]	126,18	S _{v2} [MVA]	152,54
Cos ₁ φ	0,91	Cos _{v1} φ	0,97	Cos _{v2} φ	0,79

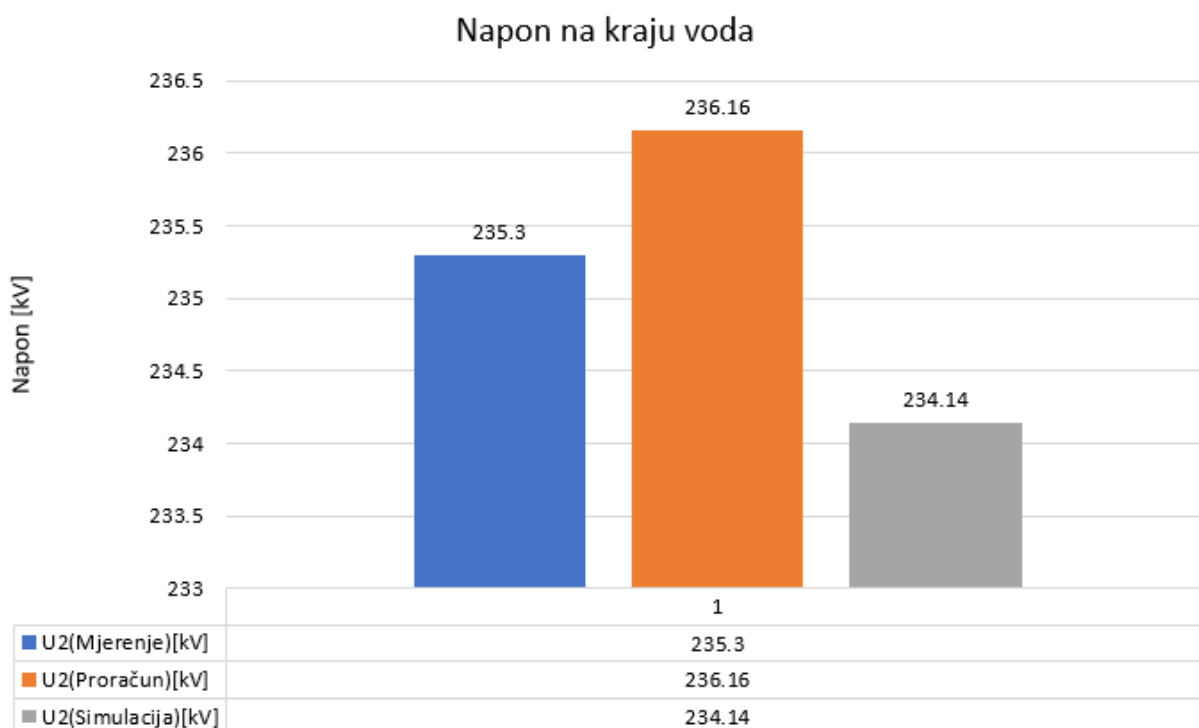
Tablica 6.12. Podaci dobijeni simulacijom u Power World-u za dva paralelna voda duljine 360 km.

7.GRAFIČKA USPOREDBA REZULTATA

U ovom dijelu izvršena je grafička usporedba rezultata sve 3 metode. Zbog same opsežnosti i velikog broja mjerenja za svaku duljinu uspoređene su neke od osnovnih veličina i to samo na kraju voda. Veličine koje su uspoređene su naponi, struje i prividne snage. Za svaki od 6 pokusa odabrana je jedna duljina dalekovoda i uspoređeni su naponi, struje i prividne snage na kraju dalekovoda dobijeni mjerenjem na simulatoru voda, proračunom i simulacijom u programu Power World. Sve veličine dobijene mjerenjem na simulatoru voda i proračunom preračunate su u stvarne vrijednosti tj. mjerilo simulatora voda je 1:1000 pa su iz tog razloga snaponi i struje pomnožene sa 1000.

7.1.Prazan hod jednostrukog voda

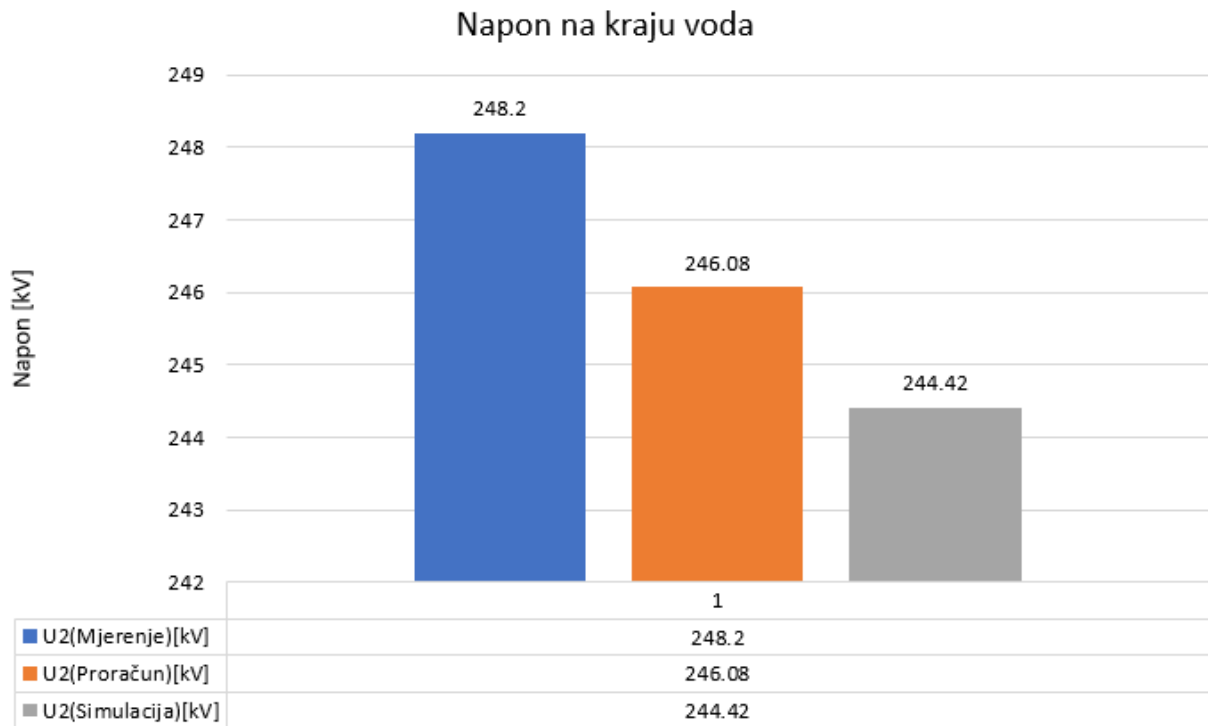
S obzorom da se radi o praznom hodu jedina veličina koja se uspoređuje je napon na kraju voda jer na kraju voda ne postoji tok struje, a samim time ne postoji ni prijenos snage. Promatranjem rezultata vidi se jako malo odstupanje. Referentna vrijednost napona na početku voda iznosi 230 kV. Dozvoljeno odstupanje je 10% od referentne vrijednosti. Gornja granica tolerancije iznosi 253 kV dok donja granica tolerancije iznosi 207 kV. Na osnovu priloženih rezultata može se reći da su sva tri pokusa uspješno provedena i svi rezultati nalaze se u granicama tolerancije.



Slika 7.1. Rezultati napona na kraju voda duljine 144 km u praznom hodu.

7.2. Prazan hod dva paralelna voda

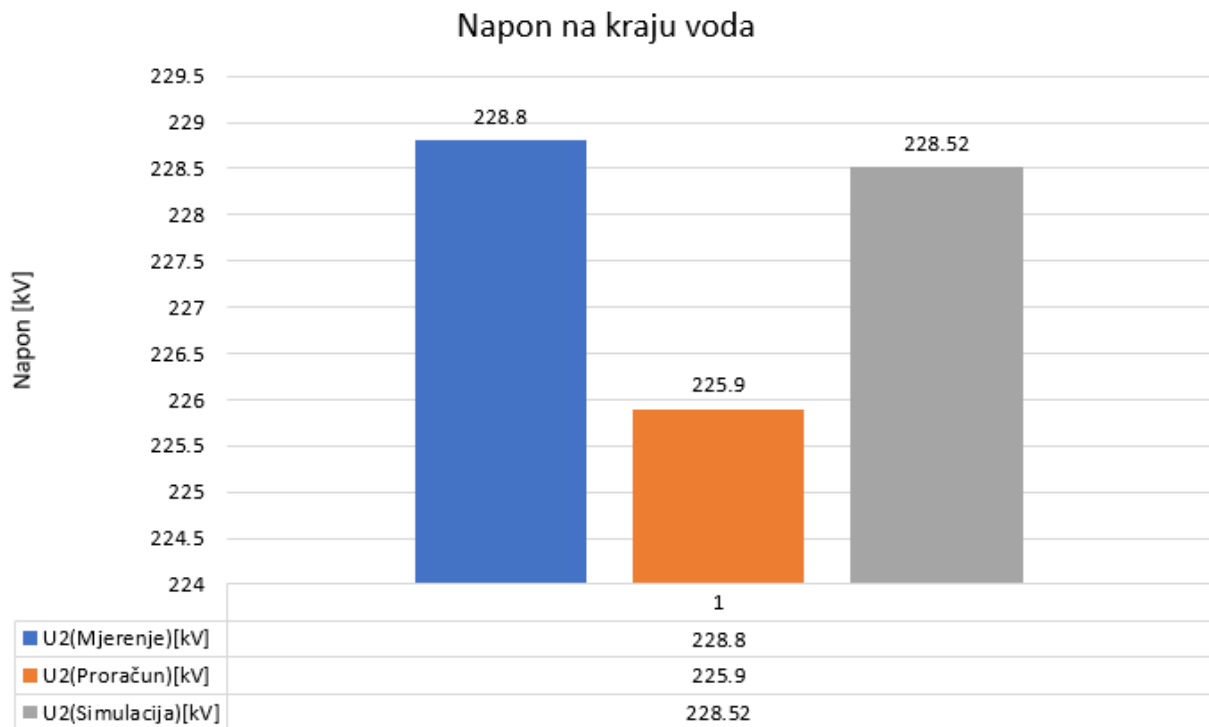
Kao i u prethodnom slučaju iz razloga što se radi o praznom hodu analiziran je samo napon na kraju voda. Kod paralelnog voda vidi se značajan porast napona i sve vrijednosti su bliže gornjoj granici tolerancije. Samo odstupanje između rezultata je prihvatljivo.



Slika 7.2. Rezultati napona na kraju dva paralelna voda duljine 216 km u praznom hodu.

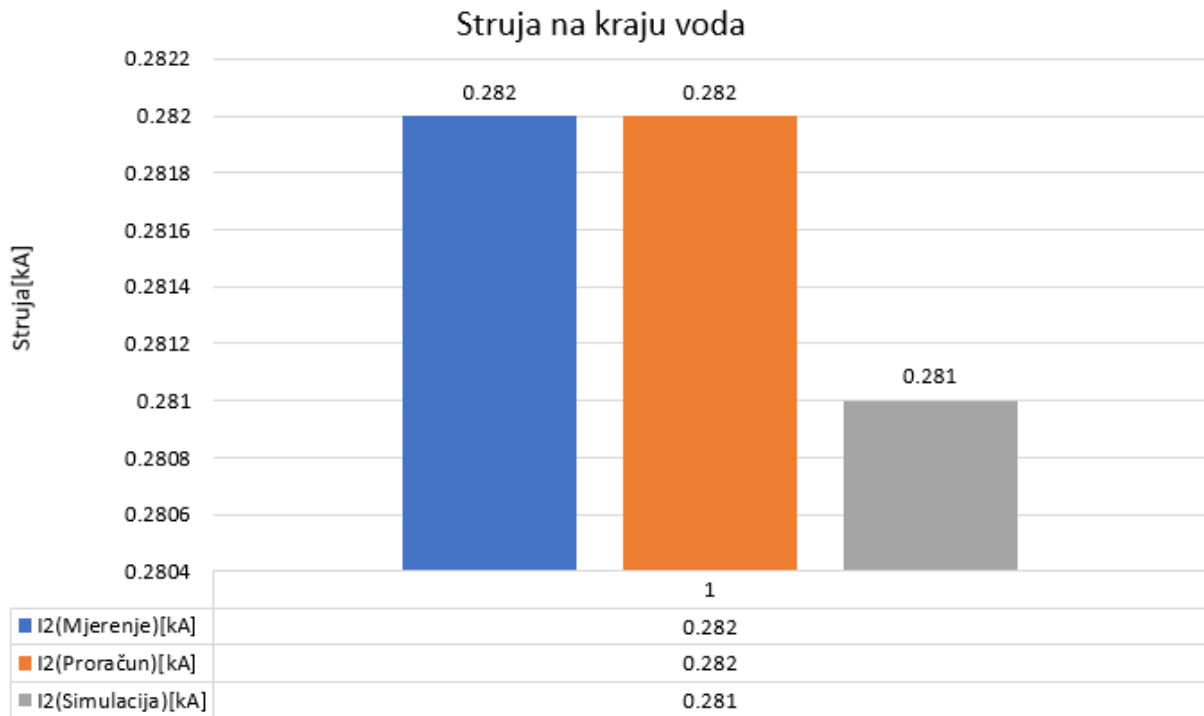
7.3. Podopterećenje jednostrukog voda

Prema priloženim rezultatima izmjeren napon na kraju voda i napon dobijen simulacijom u računalnom programu Power World imaju gotovo iste vrijednosti. Nešto manja vrijednost napona dobijena je proračunom pomoću nadomjesnih shema transformatora i voda, ali razlika između simulacije tj. mjerenja i proračuna je zanemariva. S obzorom da je referentna vrijednost napona 230 kV u ovom slučaju vidi se minimalno odstupanje od referentne vrijednosti.



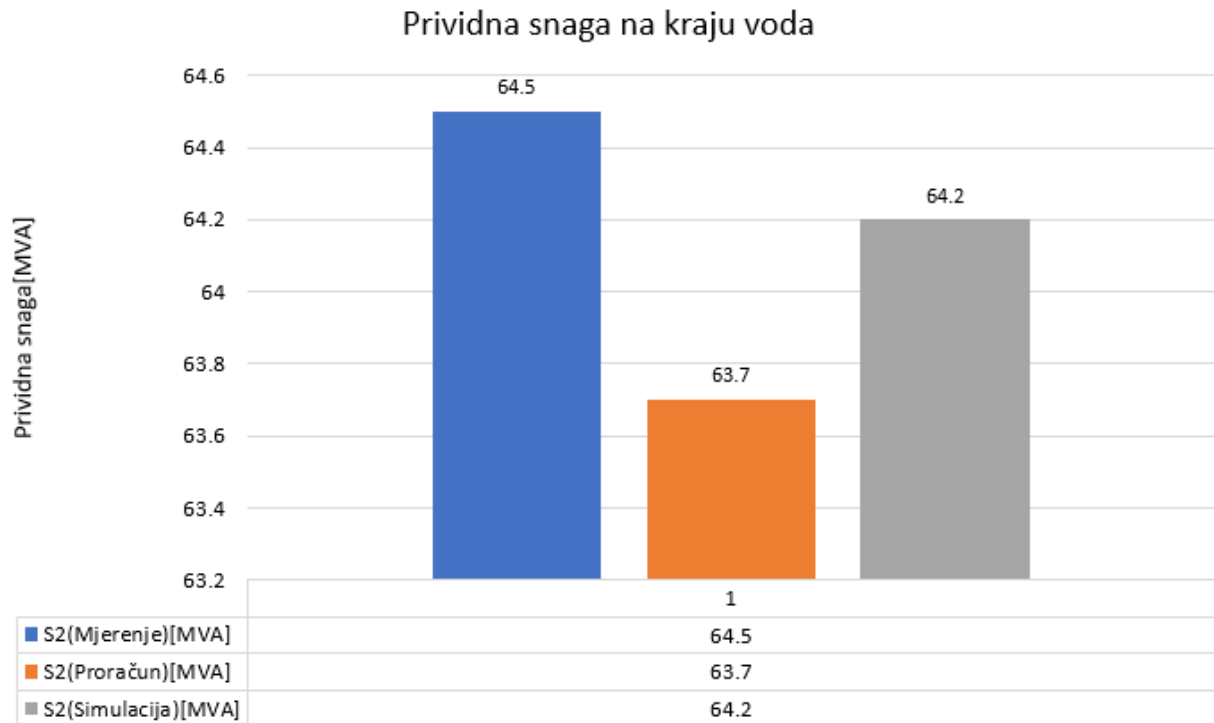
Slika 7.3. Rezultati napona na kraju podopterećenog voda duljine 360 km.

Struje na kraju voda su gotovo iste u sva 3 slučaja. Struje u pravilu i nisu toliko bitan parametar. Najbitniji parametri su napon i snaga koja se prenosi, a struja se lako izračuna poznavanjem napona i snage.



Slika 7.4. Rezultati struja na kraju podopterećenog voda duljine 360 km.

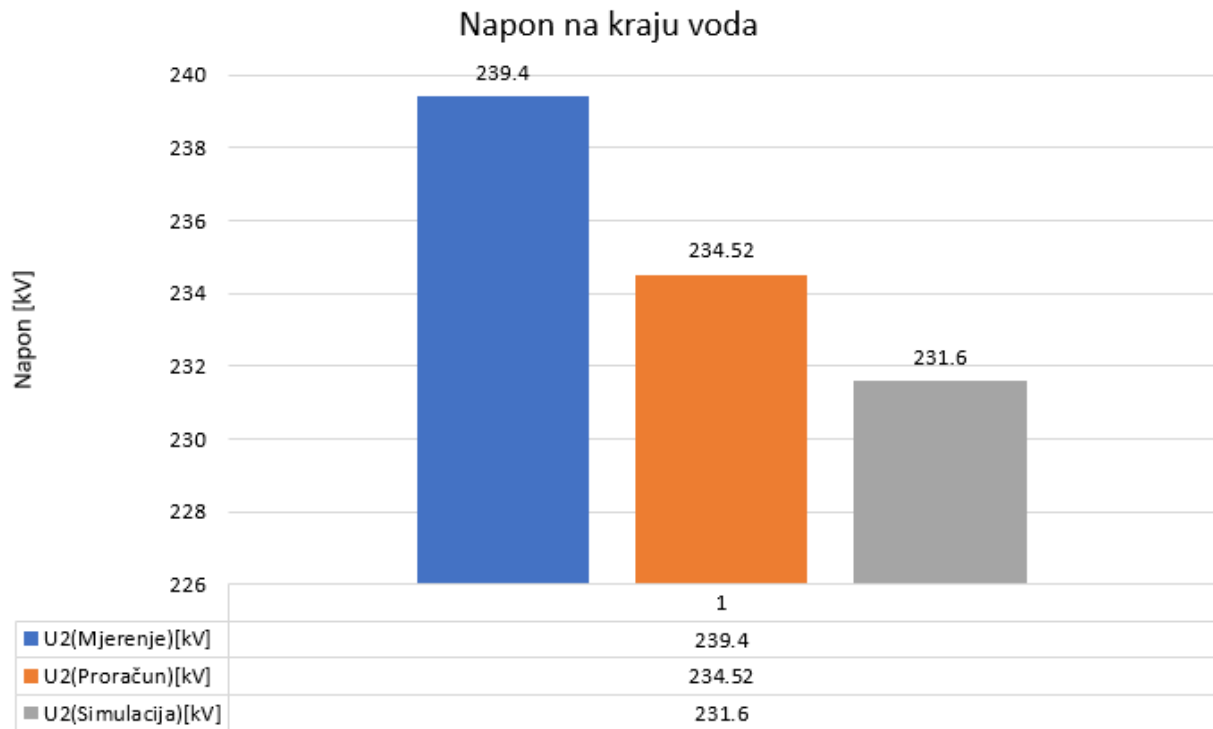
Pored napona bitan parametar je i snaga koja se prenosi duž voda. Prmatranjem rezultata vidi se da su odstupanja minimalna kroz sva 3 pokusa. Samim time zaključuje se da su modeli izrađeni za proračun i simulaciju u računalnom programu ispravni zbog minimalnih odstupanja rezultata.



Slika 7.5. Rezultati prividnih snaga na kraju podopterećenog voda duljine 360 km.

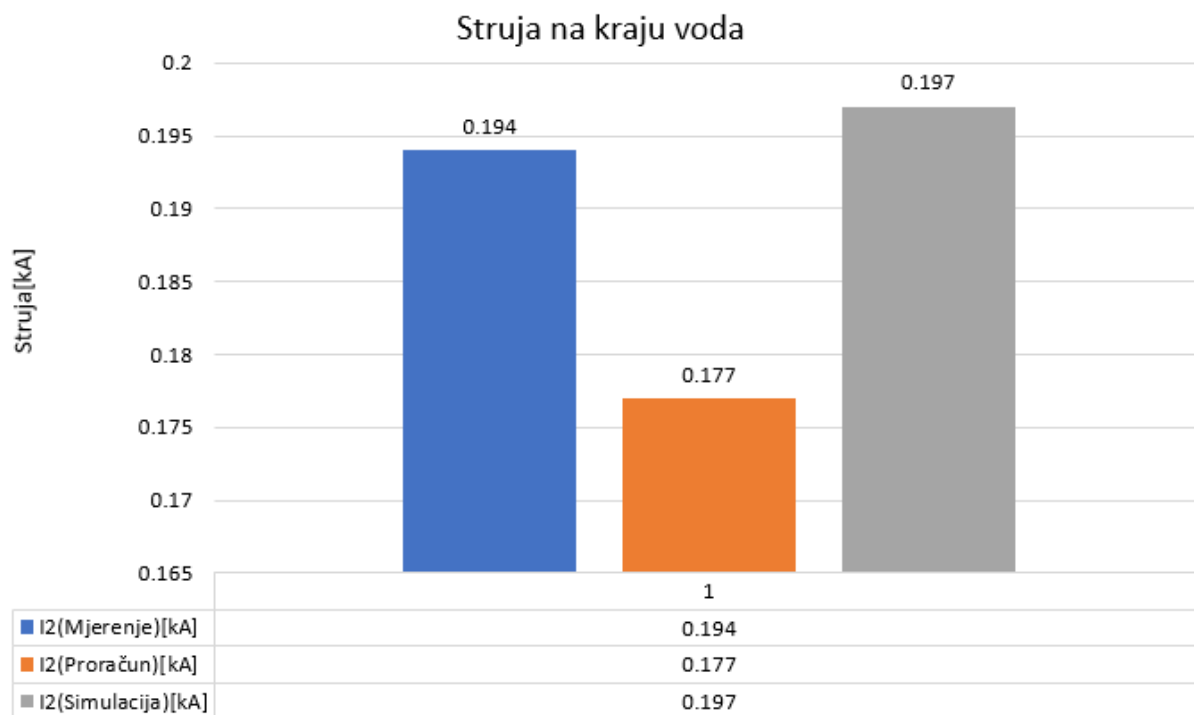
7.4. Podopterećenje dva paralelna voda

Najveće odstupanje rezultata zabilježeno je upravo u slijedećem slučaju. Realnost je da u nekim slučajevima izrađeni modeli ne daju točne rezultate pa su samim time i odstupanja veća, ali sva odstupanja nalaze se u granicama tolerancije.



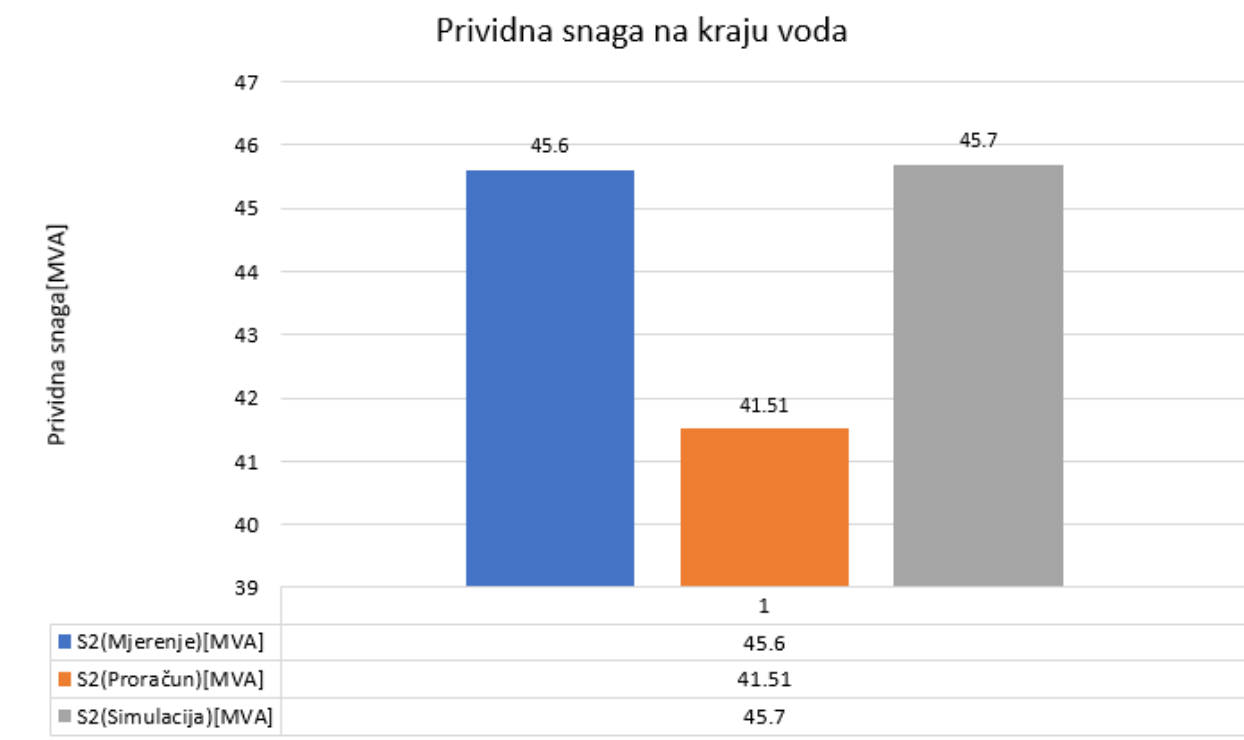
Slika 7.6. Rezultati napona na kraju podopterećenog paralelnog voda duljine 144 km.

Za razliku od napona kod kojih je zabilježena najveća razlika između rezultata dobijenih mjerenjem i rezultata dobijenih simulacijom kod struja vidimo da su rezultati dobijeni mjerenjem i simulacijom gotovo identični, a najveće odstupanje vidljivo je kod struje dobijene proračunom pomoću nadomjesnih shema.



Slika 7.7. Rezultati struja na kraju podopterećenog paralelnog voda duljine 144 km.

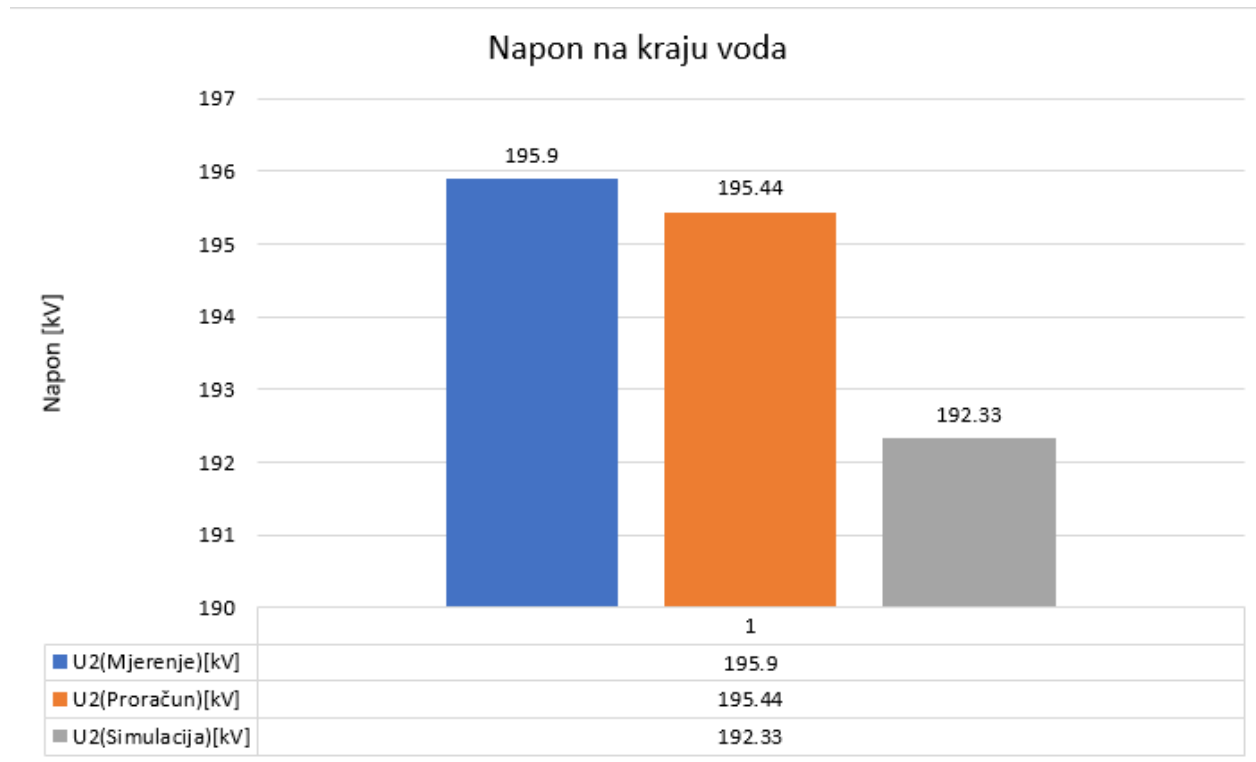
Zbog većih odstupanja napona i struja posljedično je vidljivo i odstupanje prividnih snaga na kraju voda.



Slika 7.8. Rezultati prividnih snaga na kraju podopterećenog paralelnog voda duljine 144 km.

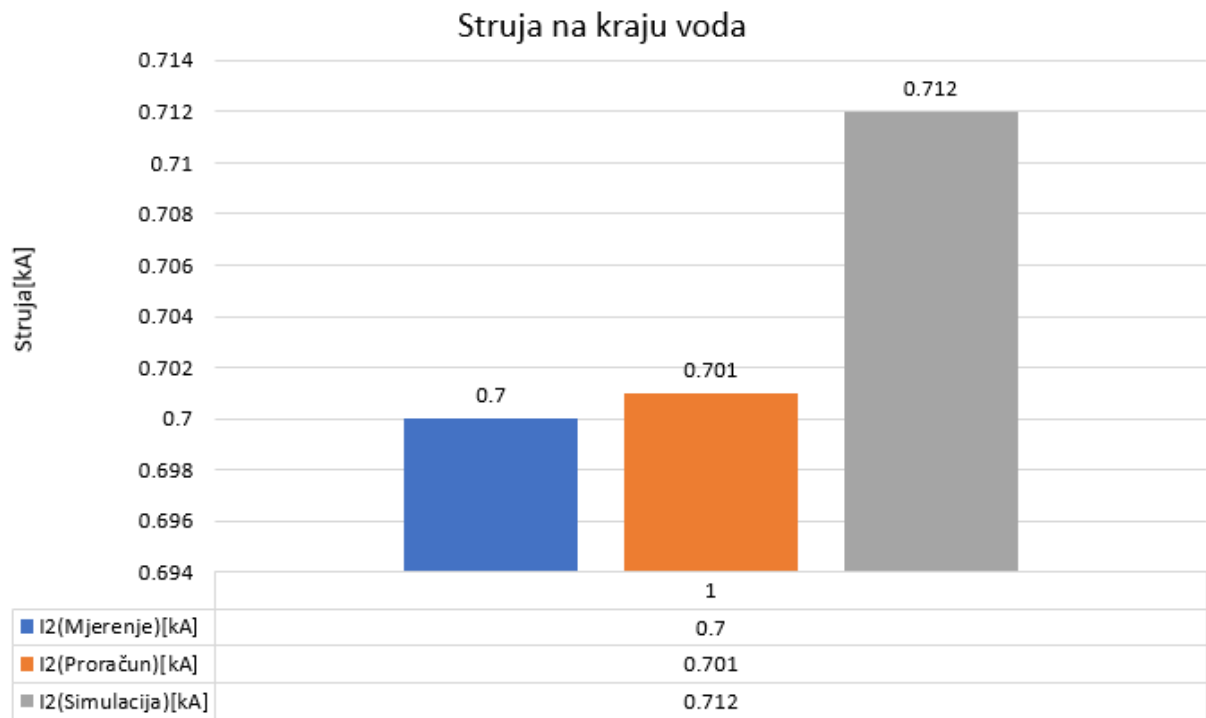
7.5. Jako opterećenje jednostrukog voda

Prema priloženim rezultatima vidi se da naponi na kraju voda imaju približno jednake vrijednosti u sva 3 slučaja, ali sve vrijednosti nalaze se izvan granica tolerancije pa bi u ovom slučaju zaštitna oprema trebala odreagirati i odspojiti potrošače sa mreže.



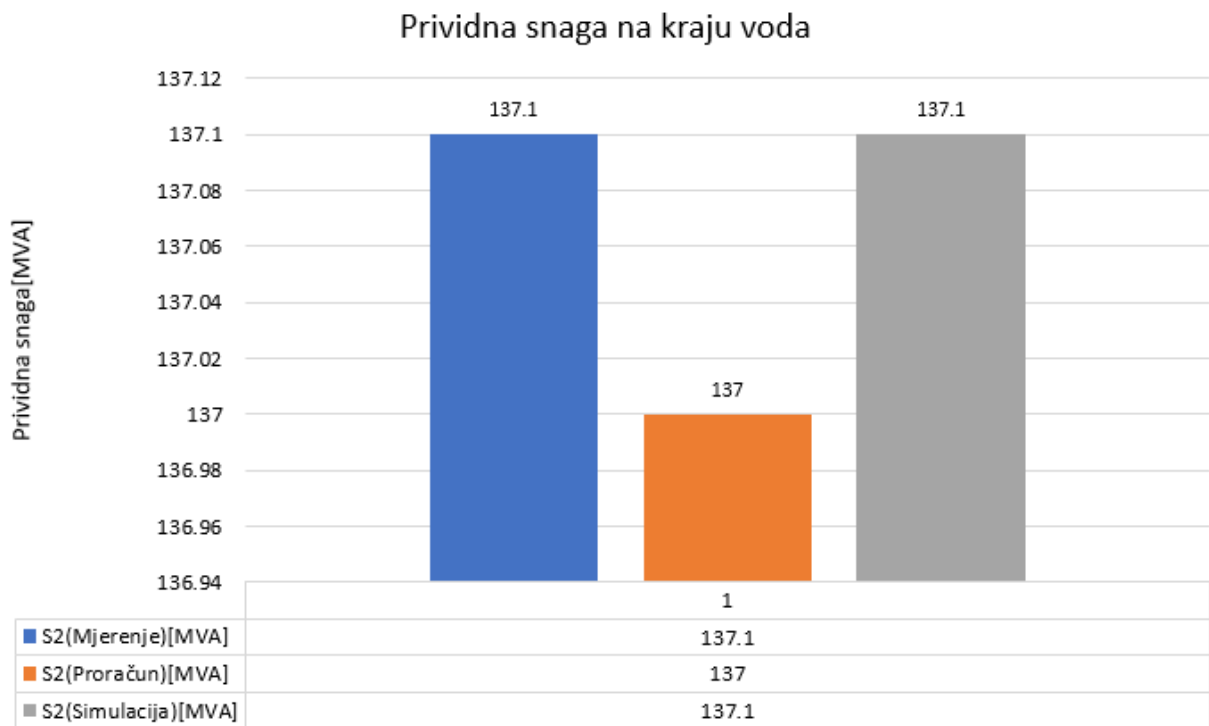
Slika 7.9. Rezultati napona na kraju opterećenog voda duljine 216 km.

Kako naponi tako su i struje konzistentne u sva 3 slučaja.



Slika 7.10. Rezultati struja na kraju opterećenog voda duljine 216 km.

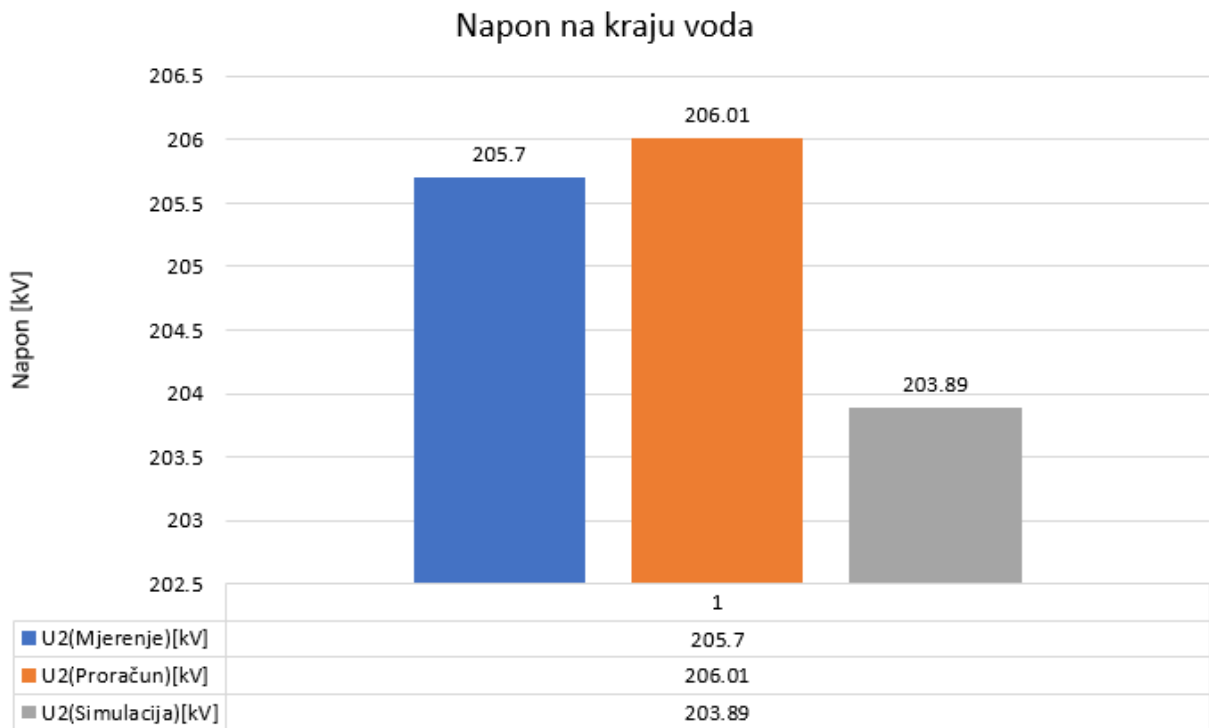
Kao posljedica minimalnog odstupanja napona i struja odstupanje prividnih snaga također je minimalno.



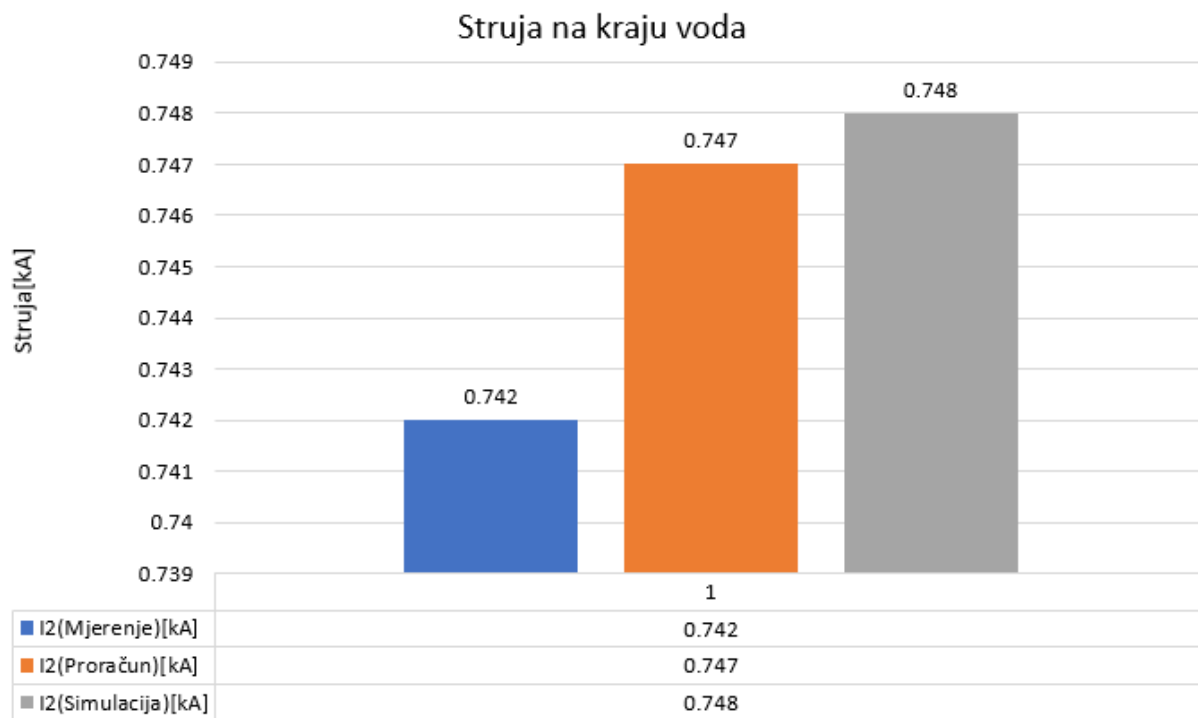
Slika 7.11. Rezultati prividnih snaga na kraju opterećenog voda duljine 216 km.

7.6. Jako opterećenje dva paralelna voda

Za posljednji set rezultata vidljiva je jako velika točnost i dosljednost rezultata dobijenih mjerenjem, proračunom i simulacijom što nam govori da su izrađeni modeli vrlo točni za pojedine slučajeve, ali svi rezultati nalaze se na donjoj granici tolerancije i jako mala promjena opterećenja mogla bi izazvati pad napona ispod granica tolerancije.



Slika 7.12. Rezultati napona na kraju opterećenog voda duljine 360 km.



Slika 7.13. Rezultati struja na kraju opterećenog voda duljine 360 km.

Zbog iznimne podudarnosti napona i struja očekivana je velika točnost rezultata prividnih snaga što se vidi iz priloženog.



Slika 7.14. Rezultati prividnih snaga na kraju opterećenog voda duljine 360 km.

8.ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu odrađena je analiza strujno-naponskih prilika spoja transformatora i dalekovoda. Analiza je provedena na tri načina, a to su mjerenje na simulaotru voda, proračun pomoću nadomjesnih shema transformatora i voda i na kraju je odrađena simulacija u računalnom programu Power World. Glavni zadatak je bio usporediti rezultate dobijene svakom od metoda. Kao što je i očekivano utvrđena su pojedina odstupanja usporedbom rezultata, ali u većini slučajeva vidljiva je izuzetna podudarnost rezultata dobijenih mjerenjem, proračunom i simulacijom. Pored usporedbe rezultata cilj je bio uočiti promjene koje se događaju duž voda prilikom promjene opterećenja i promjene parametara prilikom paralelnog spoja dva voda. Najčešća promjena javljala se u obliku pomjene napona na kraju voda. Ako govorimo o praznom hodu ili podopterećenjem voda tada je vidljiv Ferantijev efekt koji se javlja u obliku većeg napona na kraju voda u odnosu na početak voda. Razlog tomu su male kapacitivne struje koje teku vodom i rezultiraju povećanju napona na kraju voda. Dok sa druge strane povećanjem opterećenja vodom teku veće struje, a samim time dolazi i do većeg pada napona na uzdužnoj impedanciji voda što na poslijetku rezultira smanjenju napona na kraju voda. Prilikom puštanja dalekovoda u pogon potrebno je uzeti u obzir što više parametara i napraviti kvalitetan proračun, a na kraju i simulaciju u računalnom programu kako bi se izbjegle neželjene situacije kao što su uništenje dalekovoda, transformatora i na samom kraju oštećenja potrošača.

LITERATURA

- [1] Delalić Dora, Modeli prijenosnih dalekovoda za različite duljine, FERIT, Osijek 2016-Završni rad.
- [2] Stjepan Pavelka, Analiza strujno-naponskih prilika nesimetrično opterećenog voda, FERIT, Osijek 2021-Završni rad.
- [3] Andirja Pečarić, Nadomjesni modeli energetske transformatora, Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka 2017-završni rad.
- [4] Božidar Horvatović, Proračun elektroenergetskih mreža sa više naponskih razina, FERIT, Osijek 2017-završni rad.
- [5] M. Ožegović, K. Ožegović, Električne energetske mreže I, Split 1997.
- [6] M. Ožegović, K. Ožegović, Električne energetske mreže II, Split 1997.
- [7] Marko Delimar, Prijenos i razdjela električne energije, Zagreb 2016.
- [8] Prijenosni transformator <https://www.koncar-institut.hr/wp-content/uploads/2017/03/Additional-Losses-in-Transformers.jpg> (29.06.2023).
- [9] Korona efekt <https://www.tecsagro.com.mx/wp-content/uploads/2018/07/efecto-corona.jpg> (29.06.2023).
- [10] Simulator voda Leybold Didactic <https://www.ld-didactic.de/en.html> (12.09.2023).
- [11] Računalni program Power World <https://www.powerworld.com/> (12.09.2023).

SAŽETAK

U ovom završnom radu odrađena je analiza strujno-naponskih prilika između transformatora i dalekovoda. Analiza je provedena u tri dijela, a to su mjerenje, proračun i simulacija u računalnom programu Power World. Cilj je bio usporediti dobijene rezultate različitim metodama. Parametri koji su se mjenjali su: duljina voda, konfiguracija voda i opterećenje te su analizirane pojave koje se javljaju za svaku promjenu parametara. Rezultati su prikazani tablično dok je analiza odrađena grafički.

Ključne riječi: transformator, dalekovod, Power World , opterećenje.

ABSTRACT

In this paper, an analysis of the current-voltage situation between the transformer and the transmission line was performed. The analysis was carried out in three parts, measurement, calculation and simulation in the computer program Power World. The goal was to compare the results obtained by different methods. The parameters that were changed were: the length of the lines, the configuration of the lines and the load and the phenomena that occur for each parameter change were analyzed. The results are presented tabularly, while the analysis is done graphically.

Keywords: transformer, transmission line, Power World, load.