

ANALIZA STRUJNO-NAPONSKIH PRILIKA NESIMETRIČNO OPTEREĆENOG VODA

Pavelka, Stjepan

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:654348>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-27**

Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU FAKUL-
TET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEH-
NOLOGIJA**

Sveučilišni studij

**ANALIZA STRUJNO-NAPONSKIH PRILIKA
NESIMETRIČNO OPTEREĆENOG VODA**

Završni rad

Stjepan Pavelka

Osijek, 2021.

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

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

Osijek, 21.09.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na
preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Ime i prezime studenta:	Stjepan Pavelka
Studij, smjer:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. studenta, godina upisa:	4159b, 25.07.2016.
OIB studenta:	89657055701
Mentor:	Izv. prof. dr. sc. Predrag Marić
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Analiza strujno-naponskih prilika nesimetrično opterećenog voda
Znanstvena grana rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Predložena ocjena završnog rada:	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	21.09.2021.
Datum potvrde ocjene Odbora:	22.09.2021.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

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

Osijek, 28.09.2021.

Ime i prezime studenta:

Stjepan Pavelka

Studij:

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

Mat. br. studenta, godina upisa:

4159b, 25.07.2016.

Turnitin podudaranje [%]:

16

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Analiza strujno-naponskih prilika nesimetrično opterećenog voda**

izrađen pod vodstvom mentora Izv. prof. dr. sc. Predrag Marić

i sumentora

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

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. OPĆENITO O ELEKTRIČNIM VODOVIMA I KABELIMA	3
2.1 Izvedba nadzemnih vodova	3
2.2 Parametri vodova	3
2.3 Kabeli	4
3. NESIMETRIJA	6
3.1 Nesimetrija napona i struje	6
3.2 Sustav simetričnih komponenti	7
3.3 Nesimetrija potrošača	8
3.4 Dopuštene vrijednosti nesimetrije	9
3.5 Posljedice nesimetrije u mreži	9
3.6 Smanjenje nesimetrije	10
4.1 Simulacija pomoću simulatora	11
4.2 Simulacija pomoću programa DIgSILENT Power Factory	15
4.3 Prijelazne pojave simetrije i nesimetrije	18
5. ZAKLJUČAK	27
SAŽETAK	28
ABSTRACT	28
LITERATURA	29

1. UVOD

Kod prijenosnih mreža na pojedine faze su priključena jednofazna trošila te zbog toga nije moguće računati na potpunu simetriju struja. Stoga će zbroj struja zvjezdišta sustava biti manji od zbroja struja u faznim vodičima, no nikada jednak nuli. Potrebno je koristiti povratni, odnosno neutralni vodič koji povezuje obje točke. Ukoliko trofazni sustav ne koristi povratni vodič, zbroj linijskih struja će biti nula neovisno o načinu spajanja trofaznog trošila i neovisno o tome radi li se o simetričnom ili nesimetričnom opterećenju. Nesimetriju u sustavu stvaraju potrošači neravnomjernim rasporedom opterećenja po fazama te neravnomjernim faktorom istodobnosti što uz ostale kvarove mreže stvara nesimetrični napon u točki zajedničkog spajanja. Struja dovedena u takvu mrežu razlikuje se od svog čistog sinusnog oblika. Sve to dovodi do nekontroliranih oscilacija u djelatnoj i jalovoj snazi sustava. Najznačajniji faktor koji uzrokuje nesimetriju izlaza u pretvaraču je nesimetrično opterećenje. Sve nesimetrične trofazne varijable moguće je podijeliti kao tri simetrične komponente, odnosno direktne, inverzne i nultog slijeda, a vrijedi i obrnuto [1][2][3][4].

Kroz ovaj završni rad prikazati će se analiza simetrično i nesimetrično opterećenog voda simuliranog preko laboratorijskog modela i preko modela izrađenog u programskom paketu. Napravit će se usporedba analize kojoj će rezultati biti prikazani tablicama i grafovima. Rad se sastoji od četiri poglavlja, gdje je uvod na prvom poglavlju. Nakon čega su u drugom poglavlju radu opisani kabeli i njihove karakteristike. Spomenut će se i izvedba nadzemnih vodova kao i njihovih parametara, koji služe za prijenos električne energije. U trećem dijelu bit će opisana nesimetrija. Opisati će se nesimetrija napona i struje te njihovi odnosi. Opisati će se nesimetrija potrošača kao i dopuštene vrijednosti nesimetrije te kako ostvariti smanjenje nesimetrije. Također će se reći nešto o sustavima simetričnih komponenti i njegovim značajkama. Analiza simetrično i nesimetrično opterećenog voda biti će prikazana u četvrtom poglavlju. Simulirana je na dva načina. Prvi način će biti simulatorom LEYBOLD DIDACTICS u laboratoriju, provesti će se analiza simetrično opterećenog voda, a zatim će se mijenjati opterećenja pojedinih faza kako bi se odradila analiza nesimetrično opterećenog voda. Drugi dio analize provesti će se u programskom paketu DIGSILENT, također za simetrično i nesimetrično opterećeni vod.

Zadatak završnog rada

Izvršiti analizu strujno-naponskih prilika na laboratorijskom, kao i računalnom modelu nesimetrično opterećenog voda promjenom iznosa i karaktera opterećenja, kao i parametara i duljine voda. Prikazati prijelazne pojave uključanja i isključenja opterećenja na kraju voda.

2. OPĆENITO O ELEKTRIČNIM VODOVIMA I KABELIMA

Za prijenos električne energije koriste se elektroenergetski vodovi koji se sastoje od dviju glavnih komponenata. Vodiča kojemu je zadatak vođenje struje i izolacije koja osigurava odvajanje dijelova pod naponom međusobno i od zemlje. Nadzemni vodovi i kabeli dvije su osnovne vrste vodova [5].

2.1 Izvedba nadzemnih vodova

Izolaciju nadzemnih vodova tvore izolatorski lanci smješteni na stupovima (mogu biti načinjeni od silikona, stakla, porculana i sl.) i, naravno, zrak oko samog vodiča. Da bi se osigurala električna čvrstoća, u ovisnosti o pogonskom naponu, važno je održavati minimum udaljenosti. Kada se govori o udaljenostima i pogonskom naponu, oni su značajni za konstrukciju stupova voda, tj. dimenzije glave stupa [5].

Unutar faza voda koji služi za prijenos električne energije nalazi se jedan ili više vodiča. Snop vodiča čini više vodiča za pojedinu fazu. Snop vodiča djeluje tako da smanjuje uzdužnu impedanciju voda, a samim time i električno polje koje se stvara na površini vodiča, a rezultira smanjenjem korona efekta. Tinjavo izbijanje oko vodiča se zove korona efekt. Aluminijske legure od aluminijske su materijali koji se koriste za izradu vodiča. Pored dobre mehaničke čvrstoće i vodljivosti dalekovodnog užeta koriste se još i aluželjni vodiči s jezgrom od čelika (ima zadaću preuzeti mehaničko naprezanje), oko kojih se slojevi žice od aluminijske sukaju (imaju zadaću preuzeti vođenje struje). U praksi korištenjem legura aluminijske s primjesama silicijuma i magnezijuma, kao materijala za uža, dostiže se bolja mehanička čvrstoća za razliku od aluželja, ali pri većoj cijeni i manjoj težini [5].

2.2 Parametri vodova

U literaturi [6] navodi se kako se: "Vodovi i kabeli se razlikuju po njihovoj duljini i po parametrima koji su izraženi po jedinici duljine. Ti parametri su:

- R_l [Ω/km] – jedinični djelatni otpor
- L_l [H/km] – jedinični induktivitet,
- C_l [F/km] – jedinični kapacitet,
- G_l [S/km] – jedinična vodljivost." [6]

Prema zakonima fizike vodič pod naponom provodi struju i generira magnetsko i električno polje. Razlika između silnica magnetskog polja i električnog je ta da se silnice magnetskog polja nalaze

oko vodiča, a silnice električnog polja okomito na vodič, što rezultira da se silnice oba polja nalaze u istoj ravnini. Suma svih struja je jednaka nuli u ravnini vodiča, analogno tome je i napon između vodiča jednak nuli. Gubitke imaju realni vodovi, a to je u obliku disipacije Jouleove energije i u samoj izolaciji zbog provodnih struja na površini izolatora [5].

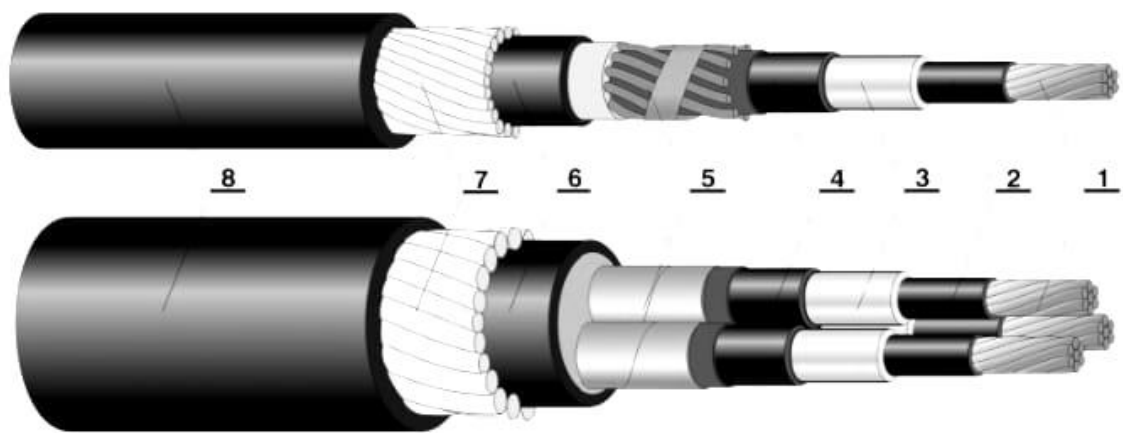
Kako bi se predočili gubitci, koristi se matematički model predstavljen radnim otporom i odvodom koji su proporcionalni duljinom voda. Ako se razmatra duljina voda, za radne gubitke u vodiču mjerodavni su sljedeći parametri: radni otpor po jedinici duljine voda R_l [Ω/km], odvod po jedinici duljine voda G_l [S/km]. [5]

Razlikuju se dvije vrste vodova, to su realni i idealni. Realni vod je predstavljen sa četiri parametra kojima je vrijednost različita od nule i idealni vod kojem je $R_l = 0$ i $G_l = 0$. Parametri koji su prethodno nabrojani, a izraženi su po jedinici duljine imaju značajnu ulogu kod postavljanja matematičkih prijenosnih jednadžbi, nazivaju se još i primarnim parametrima. Numerička vrijednost parametara ovisi o: o svojstvima materijala vodiča i dielektrika oko vodiča (specifični otpor vodiča, specifična vodljivost dielektrika, relativna permeabilnost i dielektričnost dielektrika) i o izvedbi voda (presjek vodiča, udaljenost pojedinih vodiča međusobno i prema zemlji) [5].

2.3 Kabeli

Kabeli su vodovi izolirani i zaštićeni od vanjskih utjecaja i namijenjeni su za polaganje u zemlju, točnije u posebne kabelske kanale sa zidanim stijenama, kabelsku kanalizaciju i na metalne profile. U zasebnim slučajevima kabel ima mogućnost da se polaže u vodu, okomito, nad zemljom i u mjestima gdje prevladava velika korozija, zapaljiva mjesta i na mjestima mehaničkih oštećenja. Prema vrsti izolacije se dijele na izolirane elastomerima, termoplastima, izoliran uljem impregiranim papirom, izoliran pomoću papira i ulja pod velikim tlakom i izoliran papirom i plinom pod tlakom. U praksi najčešća je uporaba izolacije od papira koji je natopljen izolacijskim uljem. Kabeli izolirani elastomerima i termoplastima su energetske kabeli dimenzionirani za napone do 110 kV, a kabeli sa izolacijom od papira impregniranog uljem za napone od 110 kV [6].

Kabeli se sastoje od vodiča, ekrana, plašta, armature i o izolacije. Ovisno o vrsti kabela neki dijelovi mogu izostati a to su armatura i ispuna. Energetske kabeli su najčešće načinjeni od aluminija ili bakra koji su izolirani te se presvlače slojem kositra [6]. Izvedba kabela prikazana je na slici 2.1. Energetske kabeli izrađuju se danas u velikom broju izvedbi koje zavise od nazivnog napona, uvjeta rada, smještajnih mogućnosti kabela i o ekonomskim okolnostima [6].



Slika 2.1 Prikaz izvedbe kabela [5]

Konstrukcija kabela sastoji se od:

- 1 - vodič,
- 2 - ekran vodiča,
3. izolacija,
- 4 - ekran izolacija,
- 5 - električna zaštita,
- 6 - unutarnji plašt,
- 7 - armatura,
- 8 - vanjski plašt [5]

3. NESIMETRIJA

Nesimetrija napona u trofaznim sustavima definirana je kao uvjet u kojem naponi u sve tri faze nisu jednaki i/ili su kutovi pomaka među njima različiti od 120° . Metoda simetričnih komponenti najčešće se koristi za analizu nesimetrije, a uvedena je u proračune elektroenergetskih sustava početkom prošlog stoljeća. Za izračun stupnja nesimetrije postoje dva načina:

- računanje odnosa inverzne (ili nulte) komponente sekvencije prema direktnoj komponenti
- dijeljenje maksimalnog odstupanja od prosjeka trofaznih napona na prosjek trofaznih napona [7].

3.1 Nesimetrija napona i struje

Autor u literaturi [7] navodi kako je: "Nesimetrija uobičajena vrsta problema kvalitete električne energije, a odnosi se na stanje u višefaznom sustavu u kojem efektivne vrijednosti linijskih napona ili fazni kutovi između slijednih linijskih napona nisu jednaki. Mjere za smanjivanje faktora nesimetrije su jednolika raspodjela jednofaznih opterećenja na sve tri faze, instalacija opreme za uravnoteženje opterećenja i odvajanje nesimetričnih opterećenja od mreže" [7].

U literaturi [7] autor navodi da je: "Potrebno napomenuti kako se karakterizacija nesimetrije u elektroenergetskom sustavu vrši korištenjem simetričnih komponenata. Stoga se nesimetrija u elektroenergetskom sustavu može izraziti kao postotna promjena struje ili napona u odnosu na nazivne vrijednosti. Za promjenu linijske struje u bilo kojoj fazi između tri faze, doći će do nesimetrije." [7]

"Postotna promjena struje:

$$i_{\%} = \frac{I-i}{I} \cdot 100\% \text{ [A]} \quad (3-1)$$

gdje je I -nazivna struja, a i -stvarna struja." kao što je navedeno u literaturi [7].

"Slično tome, u odnosu na napon nesimetrija napisati kao postotna promjena napona:

$$v_{\%} = \frac{V-v}{V} \cdot 100\% \text{ [V]} \quad (3-2)$$

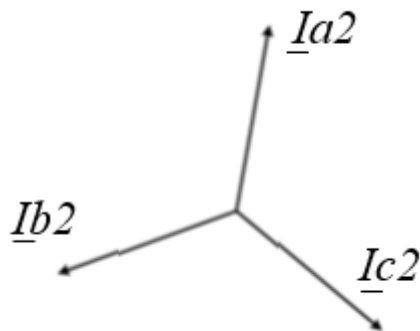
gdje je V -nazivni napon, a v -stvarni napon", kako je autor naveo u literaturi [7].

3.2 Sustav simetričnih komponenti

U literaturi [8] autor navodi da se: "Glavna ideja ove metode sastoji u zamjeni bilo kojeg trofaznog nesimetričnog vektorskog sustava struja ili napona sa zbrojem tri trofazna simetrična sustava s direktnim, inverznim ili nultim nizom. Simetrični trofazni sustav može se promatrati kao jednofazni sustav i tako pojednostaviti proračun."

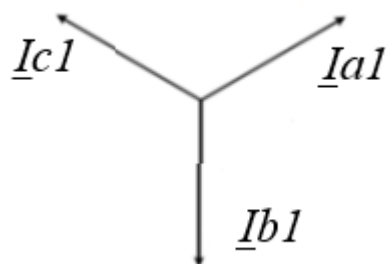
Također u literaturi [8] je navedeno: "Kada se u mreži pojavljuju nesimetrije primjenjuje se transformacija nesimetričnog sustava u sustave simetričnih komponentata. Transformacija originalnog sustava ima smisla ako se dobije shema prikladnija za proračun. Različiti tipovi nesimetričnih kvarova riješeni su konceptom metode simetričnih komponenti. Prema radu Charlesa L. Fortsecuea nesimetrični fazori trofaznog sustava mogu se pomoću metode simetričnih komponentata rastaviti na tri sustava:" [8]

1.) direktni sustav s jednakim redoslijedom faza kao i simetrični sustav



Slika 3.1 Direktni sustav

2.) inverzni sustav s obrnutim redoslijedom faza u odnosu na direktni sustav



Slika 3.2 Inverzni sustav

3.) nulti sustav s tri isto fazne komponente



Slika 3.3 Nulti sustav

Autor u literaturi [8] navodi da: "Oznake a, b, c predstavljaju faze originalnog nesimetričnog sustava koji se zbog nesimetrije ne može prikazati jednofazno te ga je potrebno rastaviti u sustav simetričnih komponenti. U direktnom sustavu redosljed je a, b, c, dok u inverznom je a, c, b." [8]

U literaturi [8] autor navodi da se: "Definicija nesimetrije napona temelji na zastupljenosti napona trofaznog sustava u obliku simetričnih komponenti. Prema pravilu transformacije, svaki trofazni sustav predstavljen je superponiranjem dva simetrična trofazna sustava i jednog izmjeničnog sustava. Trofazni sustav sastoji se od sustava direktnog slijeda i sustava inverznog slijeda, koji se okreće u smjeru suprotnom od kazaljke na satu." [8]

3.3 Nesimetrija potrošača

U mreži, nesimetrija napona i struje nije baš poželjna jer u slučaju nesimetrije, osim direktne komponente napona i struje, dolazi do pojavljivanja inverzne komponente, a ponekad i nulte komponente. Inverzna komponenta prouzrokuje neželjene poremećaje pri radu trošila i elemenata mreže, a nulta komponenta prouzrokuje poremećaje u metalnim materijalima koji su u neposrednoj blizini vodova. Jedni od uzroka nesimetrije u mreži su ujedno i nesimetrični elementi u mreži, kao što su neprepleteni vodovi i nesimetrično položene žile jednožilnih kabela. Preplitanjem voda može se otkloniti nesimetrija tako da mreža u užem smislu, odnosno bez potrošača, postaje simetrična. Poremećaji koji se javljaju u mreži, a pritom prouzrokuju nesimetriju mogu biti kratkotrajni ili prisutni neko duže vrijeme dok se kvar ne otkloni. Najznačajniji uzročnici nesimetrija su u pravilu jednofazni potrošači. To su najčešće jednofazne elektrolučne peći i električna vuča s jednofaznim napajanjem lokomotive [6].

3.4 Dopuštene vrijednosti nesimetrije

Autor u literaturi [9] navodi kako je: "Karakteristična veličina za proračun nesimetrije napona faktor nesimetrije. Faktor nesimetrije se računa kao omjer efektivnih vrijednosti inverzne i direktne komponente napona iz proračuna simetričnih komponenti." Faktor nesimetrije se računa prema formuli:[9]

$$U_{nes\%} = \frac{U_{inv}}{U_{dir}} \cdot 100\% \quad (3-3)$$

U literaturi [9] autor navodi i da se: "Ovaj parametar, definira na sljedeći način: Pri normalnim pogonskim uvjetima rada sve 10-minutne srednje vrijednosti efektivne vrijednosti inverzne komponente (negativne) napona ne smije kod 95 % srednjih vrijednosti svakog tjednog intervala prelaziti 2 % odgovarajuće direktne (pozitivne) komponente. Dopuštena vrijednost nesimetrije definirana je normom EN 50160. Europska norma za kvalitetu napona na mjestu predaje potrošaču u javnim distributivnim niskonaponskim i sredjonaponskim mrežama pri normalnim pogonskim uvjetima je EN 50160. Nazivna frekvencija opskrbnog napona je 50 Hz." [9]

Autor u literaturi [10] navodi da: "Razina kompatibilnosti za faktor nesimetrije je usvojena vrijednost zbog međudjelovanja svih instaliranih pogona na mreži." [10]

$$K_{nes} \leq 1,3\% \quad (3-4)$$

Kako je autor naveo u literaturi[10]: "Za instalacije individualnih korisnika, granični faktor nesimetrije je prihvaćen kao srednja vrijednost desetominutnog intervala koji iznosi:"

$$K_{nes} = 0,7\% \quad (3-5)$$

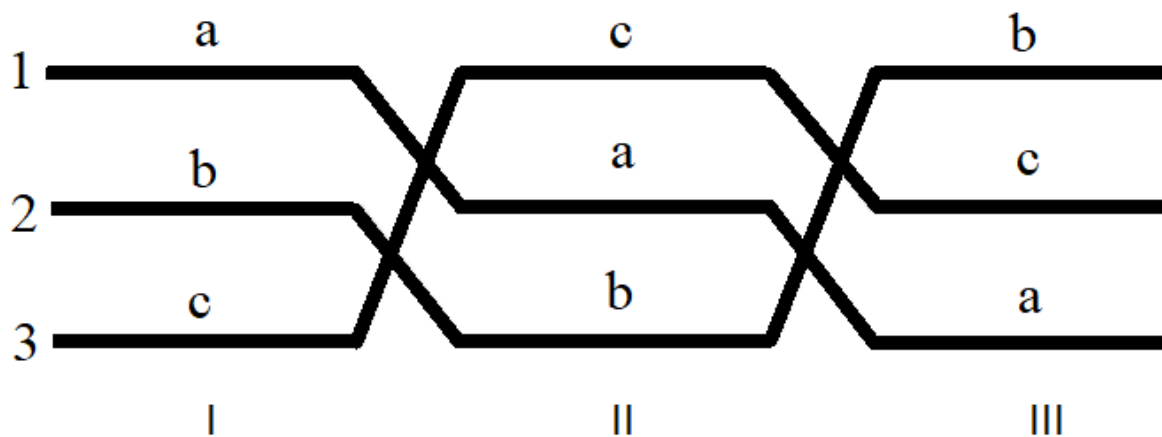
3.5 Posljedice nesimetrije u mreži

U mrežama sa kruto uzemljenim zvjezdishem tijekom nesimetrije dolazi do kruženja nulte i inverzne komponente struje koje prouzrokuju nesimetriju napona. Kod generatora, nulta komponenta struje se zanemaruje jer je njegov nulti sustav odvojen od nultog sustava ostale mreže, pa se nulta struja ne prenosi u generator. Dodatno zagrijavanje željeza, posebice u rotoru, izaziva inverzna komponenta struje jer magnetsko polje, uslijed inverzne struje, rotira dvostrukom sinkronom brzinom. Iz tog razloga se ograničava vrijednost inverzne struje kroz generator. U praksi je dopuštena inverzna struja obično između 6% i 12% nazivne struje [4].

Ako je riječ o transformatoru, inverzna komponenta struje djeluje kao i kod generatora, jer prouzrokuje povećanje gubitaka i dodatno zagrijava pojedine faze. Ako je riječ o nultoj komponenti struje transformatori su u stanju podnijeti tu struju na osnovu tercijarnog(dodatnog) namota. Asinkroni motori koji se spajaju na mrežu su kao elementi osjetljivi na nesimetriju. Posljedice su smanjenje zakretnog momenta tijekom suprotnog smjera vrtnje inverznog polja, povećanje gubitaka i zagrijavanje namota jedne faze [4].

3.6 Smanjenje nesimetrije

Autor u literaturi [4] navodi kako se: "Nesimetrija komponenta elektroenergetskog sustava uklanja odgovarajućim dizajnom. U slučaju nadzemnih vodova u tu se svrhu primjenjuje transpozicija (preplet) vodiča. Vod je podijeljen na sekcije kao što je prikazano na slici 3.4, čiji broj je djeljiv sa 3, a tri sekcije čine jedan ciklus transpozicije." [4]



Slika 3.4. Poremećaj ciklusa prepletanja voda[4]

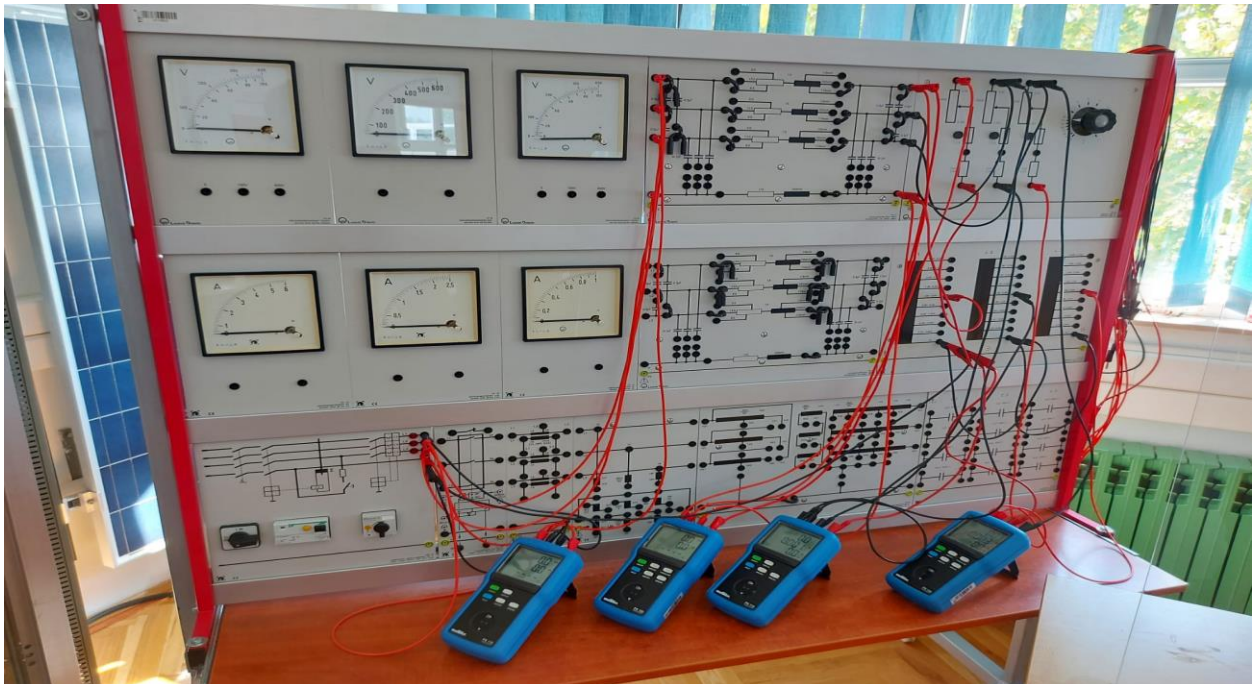
U literaturi [4] autor također navodi kako je: "Tradicionalni pristup izjednačavanja opterećenja ravnomjerno povezivanje nominalnih opterećenja s njihovim fazama. To je normalno dovoljno da se ne pojavi često veća nesimetrija napona. U slučaju da je značajna nesimetrija opterećenja neizbježna, osobito u slučaju velikih jednofaznih opterećenja, treba primjenjivati posebnu opremu za uravnoteženje. Svrha njegovog djelovanje je obično uklanjanje ili ograničavanje komponenti inverznih i nultih sljedova struje opterećenja, taj se proces naziva balansiranje." [4]

4. ANALIZA SIMETRIČNOG I NESIMETRIČNOG OPTEREĆENOG VODA

U svrhu analize simetričnog i nesimetričnog opterećenja provedeno je mjerenje na laboratorijskom modelu simulatora elektroenergetskog sustava LEYBOLD DIDACTICS i proveden je proračun na računalnom modelu programskim paketom DIgSILENT.

4.1 Simulacija pomoću simulatora

Prilikom analize korišten je simulator elektroenergetskog sustava, a omjer transformacije simulatora i stvarnih veličina je 1:1000, odnosno 1000V u prijenosnoj mreži predstavlja 1V na simulatoru. Simulator (slika 4.1.) je modularan i sadrži module za napajanje, mjerne instrumente, elemente prijenosnog voda kao i potrošača (djelatno trošilo, zavojnice, kondenzatore).



Slika 4.1 Prikaz simulatora elektroenergetskog sustava LEYBOLD DIDACTICS u laboratoriju
Na simulatoru je provedena je simulacija pri čemu se mjere napon, struja i snaga te faktor snage na početku i na kraju voda pomoću mjernih instrumenata. Analiza se provodi za simetrično i nesimetrično opterećenje voda.

Simetrično opterećenje

Tri različite duljine voda uzete su za analizu te su im faze opterećene simetrično . Opterećenje i pokus rađeni su trofazno, ali su uzeta mjerenja samo jedne faze. Kod potrošača je napravljeno

umjetno zvjezdište. Razlog takvom spajanju je što se dobiju isti rezultati i umjetnim zvjezdištem kao i spajanjem svih faza s nulom. Pretpostavka je simetrija, ali zbog nesavršenosti modela djelatnog potrošača kao i nemogućnosti preciznog ugađanja, djelatni otpor po fazama nije potpuno simetričan, ali su odstupanja gotovo zanemariva.

Duljine vodova iznosile su 144, 216 i 360 kilometara. Pri simetričnoj simulaciji otpor iznosa 450Ω i zavojnica induktiviteta 1 H spojeni su kao opterećenje voda. Na simulatoru priključenom na izvor postavljaju se vrijednosti parametara za duljinu voda. Tako se za vod duljine 144 kilometara postavljaju parametri djelatni otpor $R = 5 \Omega$ i induktivitet $L = 116 \text{ mH}$, za vod duljine 216 kilometara postavlja se djelatni otpor $R = 8 \Omega$ i induktivitet $L = 174 \text{ mH}$, a za vod duljine 360 kilometara parametri se postavljaju na djelatni otpor $R = 13 \Omega$ i induktivitet $L = 290 \text{ mH}$. Kapacitet voda je u sva tri slučaja iznosio $C = 3 \mu\text{F}$. Prema vrijednosti iz tablica (Tablica 4.1., Tablica 4.1., Tablica 4.3.) se vidi kako je naponu vrijednost pala zbog pada napona u vodu uzrokovan otporom voda.

Tablica 4.1. Prikaz vrijednosti za simetrično opterećen vod duljine 144 kilometara

144km	Početak voda	Kraj voda
U [V]	109,9	106,8
I [A]	0,13	0,165
P[W]	13,8	13,5
Q[VAr]	3,8	11,3
S[VA]	14,3	17,6
Cosφ	0,97	0,77

Tablica 4.2. Prikaz vrijednosti za simetrično opterećen vod duljine 216 kilometara

216km	Početak voda	Kraj voda
U[V]	109,8	105,9
I[A]	0,128	0,163
P[W]	13,5	13,2
Q[VAr]	4	11,1
S[VA]	14,1	17,2
Cosφ	0,96	0,77

Tablica 4.3. Prikaz vrijednosti za simetrično opterećen vod duljine 360 kilometara

360 km	Početak voda	Kraj voda
U[V]	110,3	102,4
I[A]	0,119	0,158
P[W]	12,8	12,3
Q[VAr]	3,2	10,4
S[VA]	13,2	16,2
Cosφ	0,97	0,76

Promjenom duljine voda, odnosno njegovih parametara, snage na vodu neće se znatno mijenjati za približno jednako postavljene napone i struje. Zbog pada napona u vodu i zbog gubitaka, napon na kraju voda manji je od napona na početku, kao i snaga voda. Sukladno tome, primijeti se porast struje u vodu zbog utjecaja kapaciteta u vodu. Porast jalove snage uzrokovan je reaktancijom i većim naponom na početku voda.

Nesimetrično opterećenje

Kako bi opterećenje bilo nesimetrično, fazama opterećenja dodaju se otpornici u krug i mijenjaju se vrijednosti induktiviteta. Kao i kod simetričnog opterećenja, pokus je proveden trofazno, ali je mjerenje na početku voda na jednoj fazi zbog tog što postoji ograničen broj vatmetara. Otpor opterećenja povećan je dodavanjem u seriju jednog ili dva dodatna klizna otpornika. Zbog nemogućnosti finog ugađanja postoje mala odstupanja otpora, kao i odstupanja zbog izvedbe otpornika.

Prva faza ostaje kao pri simetričnom mjerenju, dok se drugoj fazi dodaje 100Ω i smanjuje vrijednost induktiviteta, a trećoj fazi dodaje se 150Ω i smanjuje vrijednost induktiviteta. Tako vrijednosti opterećenja za prvu fazu iznose $R = 450 \Omega$ i $L = 1 \text{ H}$, za drugu $R = 550 \Omega$ i $L = 0,4 \text{ H}$ i za treću fazu $R = 600 \Omega$ i $L = 0,6 \text{ H}$. Opet je napravljeno umjetno zvjezdište na kraju pa se struja zatvara preko faza. Razlog takvom spajanju je što se dobiju isti rezultati i umjetnim zvjezdištem kao i spajanjem svih faza s nulom. Također, treba naglasiti da postoje odstupanja po pitanju zabilježenih vrijednosti zbog gubitaka simulatora, nesavršenosti izolacije, izvedbe pojedinog modula, gubitaka instrumenata, gubitaka na spojnim vodovima, itd.

U tablicama (Tablica 4.4., Tablica 4.5., Tablica 4.6.) prikazane su vrijednosti napona, struja i snaga na početku i na kraju voda za nesimetrično opterećene vodove.

Tablica 4.4. Prikaz vrijednosti za nesimetrično opterećen vod duljine 144 kilometara

144km	Početak voda	Kraj voda		
		I	II	III
U[V]	110,2	107,2	109	107,7
I[A]	0,131	0,166	0,174	0,157
P[W]	13,9	13,6	17,9	15,4
Q[VAr]	3,9	11,4	6	7,1
S[VA]	14,4	17,7	18,9	17
Cosφ	0,97	0,77	0,95	0,91

Tablica 4.5. Prikaz vrijednosti za nesimetrično opterećen vod duljine 216 kilometara

216km	Početak voda	Kraj voda		
		I	II	III
U[V]	110,1	106	107,6	107,3
I[A]	0,13	0,163	0,171	0,156
P[W]	13,6	13,2	17,4	15,2
Q[VAr]	4,3	11,2	6	7,1
S[VA]	14,3	17,3	18,4	16,8
Cosφ	0,95	0,76	0,95	0,9

Tablica 4.6. Prikaz vrijednosti za nesimetrično opterećen vod duljine 360 kilometara

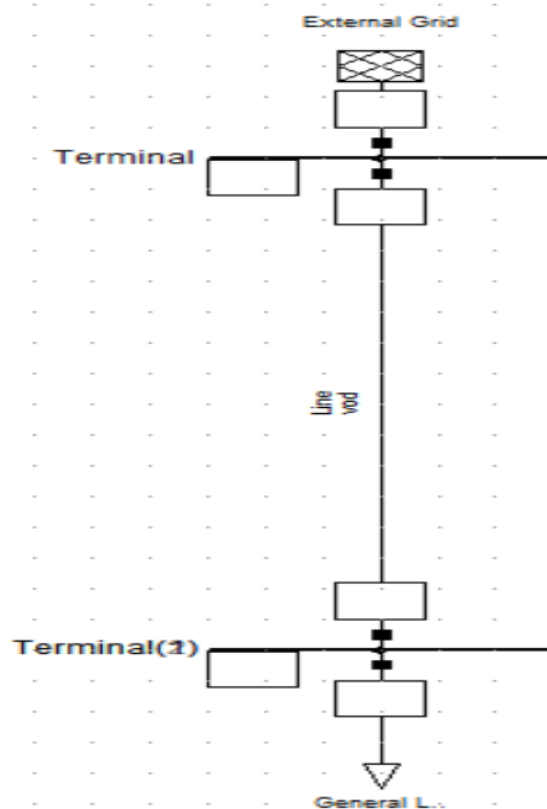
360km	Početak voda	Kraj voda		
		I	II	III
U[V]	110,5	102,4	106,6	104,7
I[A]	0,12	0,158	0,17	0,154
P[W]	12,9	12,4	17,2	14,5
Q[VAr]	2,6	10,4	5,7	6,9
S[VA]	13,2	16,2	18,1	16,1
Cosφ	0,98	0,77	0,95	0,9

Iz analize nesimetrično opterećenih vodova vidi se porast struja po fazama opterećenja u odnosu na početak voda, zbog utjecaja kapaciteta uvodu, gdje kod druge faze opterećenja možemo vidjeti da je struja za svaki parametar voda u toj fazi najveća.

4.2 Simulacija pomoću programa DIgSILENT Power Factory

Za usporedbu rezultata simulacije koristio se programski paket DIgSILENT, kojim se mogu izvršiti analize distribucijskih, prijenosnih, proizvodnih i industrijskih jedinica. Program objedinjuje mnogobrojne mogućnosti, a to je korištenje modernih aplikacija i sustava, jedinica za proizvodnju, izvedba analize i simulacija u stvarnom vremenu, testiranja i regulacije. Prilikom spremanja podataka programski paket nudi adekvatan ispis [11].

Prilikom provedbe analize u DIgSILENT-u korištena je shema sustava koja se sastoji od nadomjesne mreže (External grid), dvije sabirnice (Terminal 1, Terminal 2), voda (Line) i opterećenja (General Load).



Slika 4.2 Simulacijska shema u programskom paketu DIgSILENT

Nakon postavljene sheme koja se nalazi na slici 4.2 i unesenih parametara u elemente mreže provedena je simulacija simetrično i nesimetrično opterećenog voda. Parametri su usklađeni sa onima

koji su korišteni prilikom mjerenja na simulatoru pa se tako pretpostavljaju tri duljine voda kojemu jedinični parametri odgovaraju parametrima laboratorijskog modela voda.

Simetrično opterećenje

Parametri opterećenja postavljeni su kao i na simulaciji sa simulatorom u oba slučaja. Pri simetričnoj simulaciji otpor iznosa 450Ω i zavojnica induktiviteta 1 H spojeni su kao opterećenje voda, dok su duljine vodova iznosile su 144, 216 i 360 kilometara. U programskom paketu postavljaju se vrijednosti izračunatih (4-1) parametara za duljinu voda, postavljaju parametri $R_l = 0,03472 \Omega/\text{km}$ i $L_l = 0,116 \text{ H}/\text{km}$ za vod duljine 144 kilometara. Treba spomenuti da je opterećenje i pokus i u ovom slučaju rađeni trofazno, ali je uzeto mjerenje jedne faze, te da je napravljeno umjetno zvjezdište na kraju kod potrošača. Pretpostavka je simetrija, ali zbog nesavršenosti modela djelatnog potrošača kao i nemogućnosti preciznog ugađanja djelatni otpor po fazama nije potpuno simetričan, ali su odstupanja gotovo zanemariva.

U tablicama (Tablica 4.7., Tablica 4.8., Tablica 4.9.) prikazane su vrijednosti napona, struja i snaga na početku i na kraju voda za simetrično opterećene vodove.

Tablica 4.7. Prikaz vrijednosti za simetrično opterećen vod duljine 144 kilometara

144km	Početak voda	Kraj voda
U[kV]	110	107,43
I[kA]	0,069	0,092
P[MW]	13,09	13
Q[MVA _r]	0,49	11
S[MVA]	13,1	17,03
cosφ	1	0,8

Tablica 4.9. Prikaz vrijednosti za simetrično opterećen vod duljine 216 kilometara

216km	Početak voda	Kraj voda
U[kV]	110	105,89
I[kA]	0,069	0,093
P[MW]	13,14	13
Q[MVA _r]	1	11
S[MVA]	13,18	17,03

cosφ	1	-0,8
------	---	------

Tablica 4.8. Prikaz vrijednosti za simetrično opterećen vod duljine 360 kilometara

360km	Početak voda	Kraj voda
U[kV]	110	102,43
I[kA]	0,07	0,096
P[MW]	13,25	13
Q[MVA _r]	2,14	11
S[MVA]	13,43	17,03
cosφ	1	-0,8

Vrijednosti se razlikuju zbog toga što se kod simulacije pomoću simulatora ne može izmjeriti vrijednosti kao na programu. Struja na kraju voda veća je zbog kapaciteta na trošilu.

Nesimetrično opterećenje

U svrhu ponovnog postavljanja nesimetrije opterećenja, u programu DIgSILENT postavljaju se vrijednosti faza kao i u simulaciji pomoću panela. Potrošač se postavlja kao nesimetrični, a proračun tokova snaga se provodi za nesimetrični sustav. U tablicama (Tablica 4.10., Tablica 4.11., Tablica 4.12.) su prikazane dobivene vrijednosti napona, struja i snaga na početku i na kraju voda za nesimetrično opterećene vodove u programskom paketu DIgSILENT.

Tablica 4.12. Prikaz vrijednosti za nesimetrično opterećen vod duljine 144 kilometara

144km	Početak voda			Kraj voda		
	I	II	III	I	II	III
U[p.u.]	1	1	1	0,91	0,94	0,94
I[kA]	0,25	0,19	0,25	0,27	0,21	0,27
P[MW]	13,77	11,38	15,52	13,43	11,18	15,19
Q[MVA _r]	7,24	3,86	3,46	8,23	5,97	4,61
cosφ	0,89	0,95	0,98	0,85	0,88	0,96

Tablica 4.10. Prikaz vrijednosti za nesimetrično opterećen vod duljine 216 kilometara

216km	Početak voda			Kraj voda		
	I	II	III	I	II	III
U[p.u.]	1	1	1	0,79	0,85	0,87
I[kA]	0,34	0,24	0,32	0,37	0,27	0,34
P[MW]	16,71	12,92	19,03	15,7	12,38	18,14
Q[MVAr]	13,16	8,35	7,44	9,36	7,94	4,7
Cosφ	0,79	0,84	0,93	0,86	0,84	0,97

Tablica 4.11. Prikaz vrijednosti za nesimetrično opterećen vod duljine 360 kilometara

360km	Početak voda			Kraj voda		
	I	II	III	I	II	III
U[p.u.]	1	1	1	0,78	0,85	0,84
I[kA]	0,21	0,17	0,22	0,24	0,19	0,24
P[MW]	10,58	9,58	12,76	9,92	9,15	12,07
Q[MVAr]	7,65	4,58	5,24	6,11	4,82	3,65
cosφ	0,81	0,90	0,93	0,85	0,88	0,96

Nakon što je napravljen proračun tokova snaga, dobiju se rezultati sa iznosima napona, struja i snaga svih faza na početku i kraju voda.. Radi jednostavnosti, mjerne jedinice napona za nesimetričnu simulaciju u programu DIGSILENT prikazani su u *per unit*.

Struja na početku voda manja je nego na kraju voda i naponi faza na kraju voda manji nego na početku voda. Razlog tome je što vodovi imaju svoj otpor pa prolaskom struje kroz njega dolazi do pada napona, a također i do pada vrijednosti radnih snaga na kraju vodova radi gubitaka na njemu. Može se vidjeti da je struja druge faze na izlazu ovaj puta najmanja, što nije bio slučaj pri simulaciji pomoću simulatora. Tu opet dolazi do problema nesavršenosti stvarnog kruga koji utječe na rezultate simulacije.

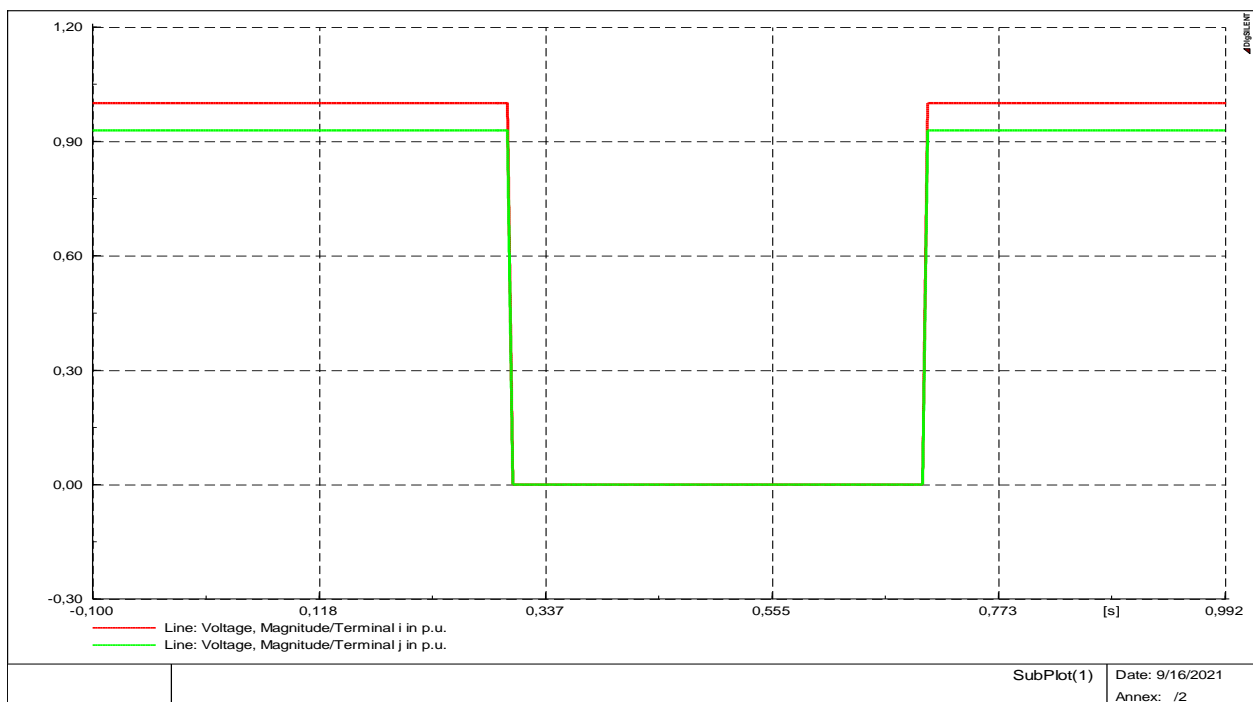
4.3 Prijelazne pojave simetrije i nesimetrije

Uz tablične rezultate simulacija, različitih duljina vodova, za simetrično i nesimetrično opterećen vod, prikazani su i grafovi isključenja i uključenja voda simulacije.

U periodu od jedne sekunde promatra se isključenje voda koji nastupa od 0.3s, do 0.7s kada je vod ponovo uključen. Dijagramima će biti prikazane prijelazne pojave napona, struja, radnih i jalovih snaga simetrično i nesimetrično opterećenog voda za vrijeme isključenja i uključenja istog, te kako se pojave nesimetrično opterećenog voda mijenjaju ako im se djelatna i jalova snaga potrošača povećaju za 50%.

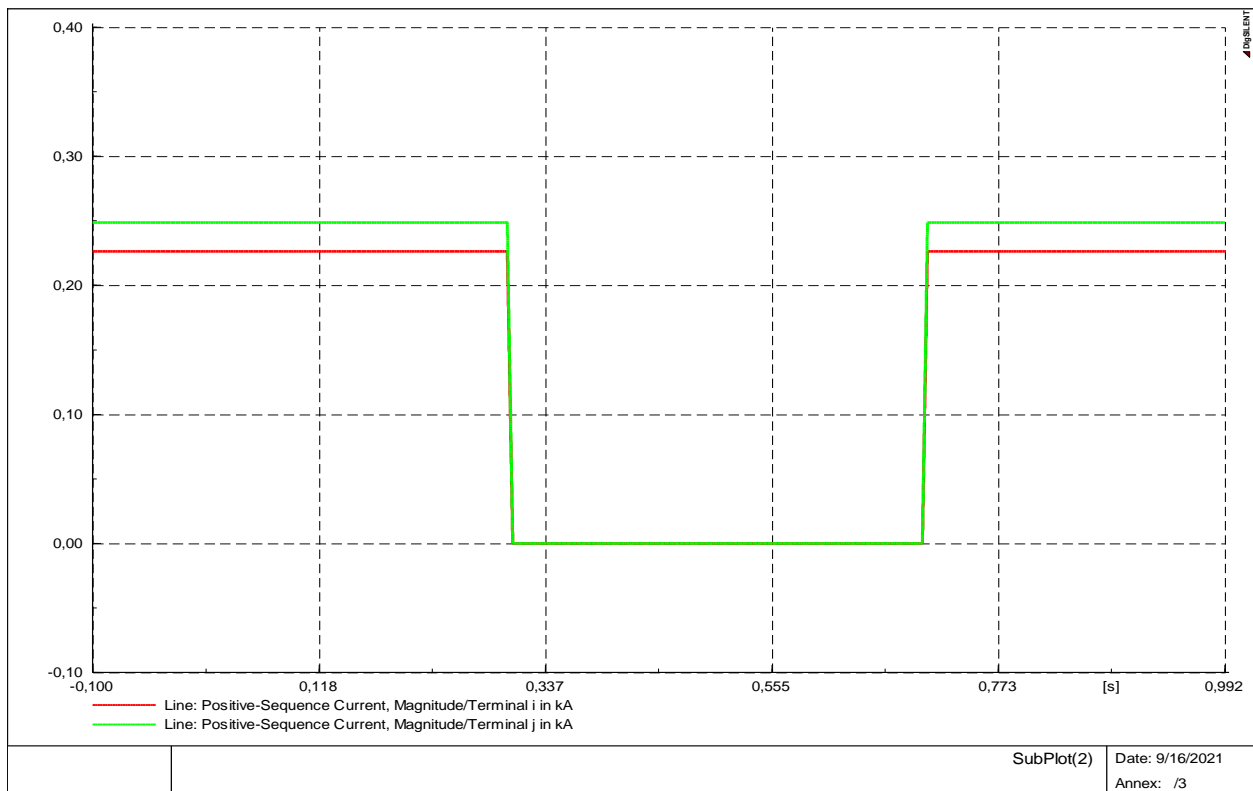
Simetrično opterećenje

Na sljedećim slikama prikazani su iznosi napona i struje radne i jalove snage dijagramima prijelaznih pojava pri isključenju i uključenju voda za simetrično opterećen vod.(Slika 4.3.,Slika 4.4, Slika 4.5., Slika 4.6.)

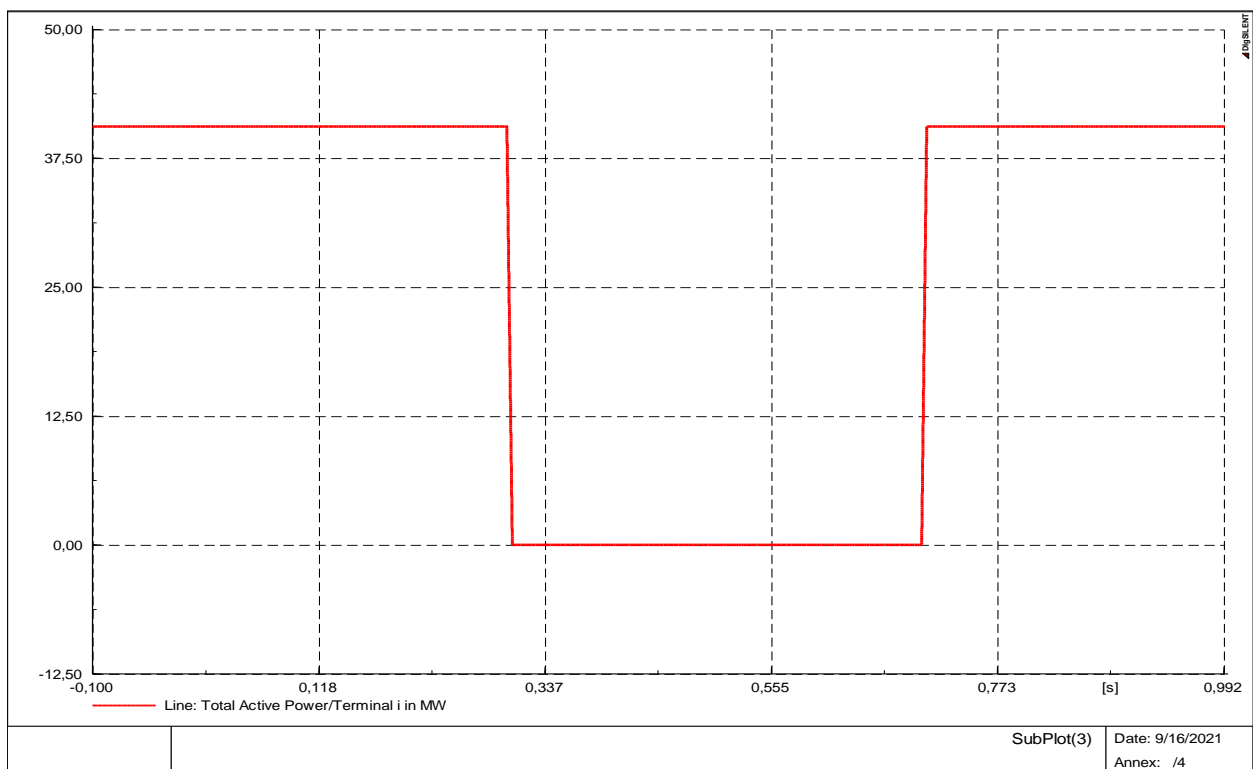


Slika 4.3. Prijelazna pojava napona pri isključenju i uključenju simulacije simetrično opterećenog voda

Sa Slike 4.3. vidi se pad napona na početku i na kraju voda jednak nuli u trenutku isključenja, točnije u trenutku isključenja voda Nakon uključenja voda naponi se vraćaju u prvobitno stanje. Može se primijetiti blagi nagib u trenucima isključenja i uključenja do kojeg dolazi zbog impedancije voda. Napon na početku voda ima veću amplitudu od napona na kraju voda.

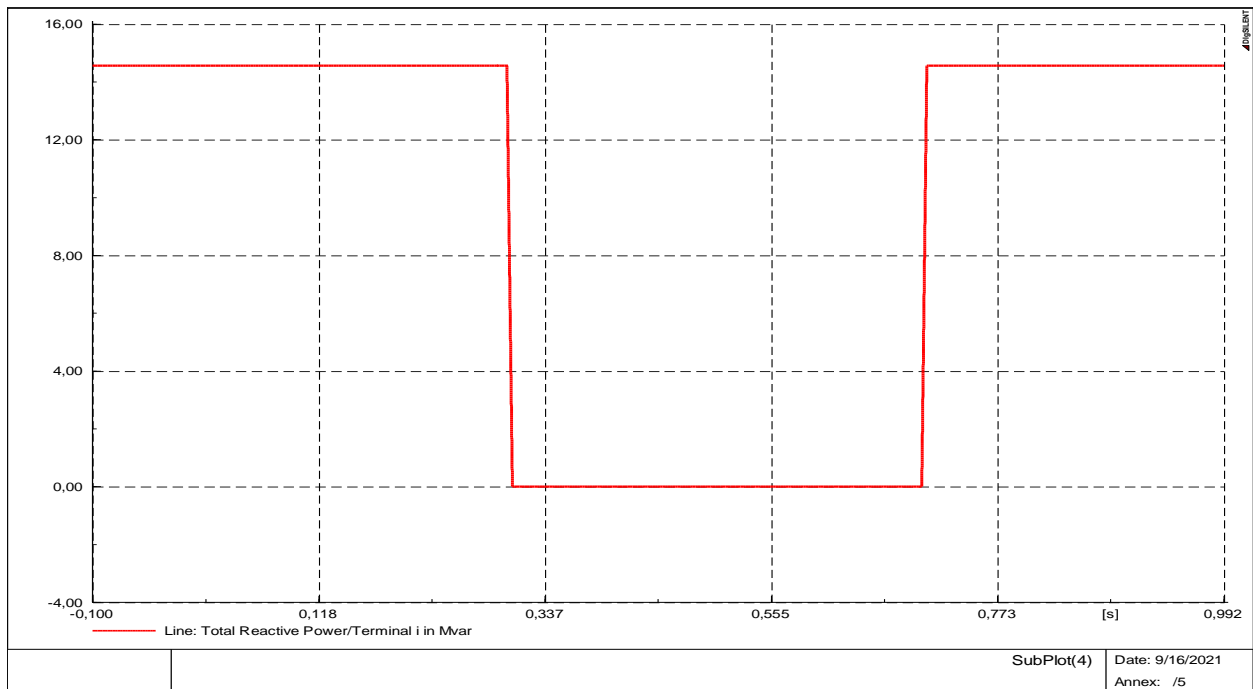


Slika 4.4. Prijelazna pojava struje pri isključenju i uključenju simulacije simetrično opterećenog voda



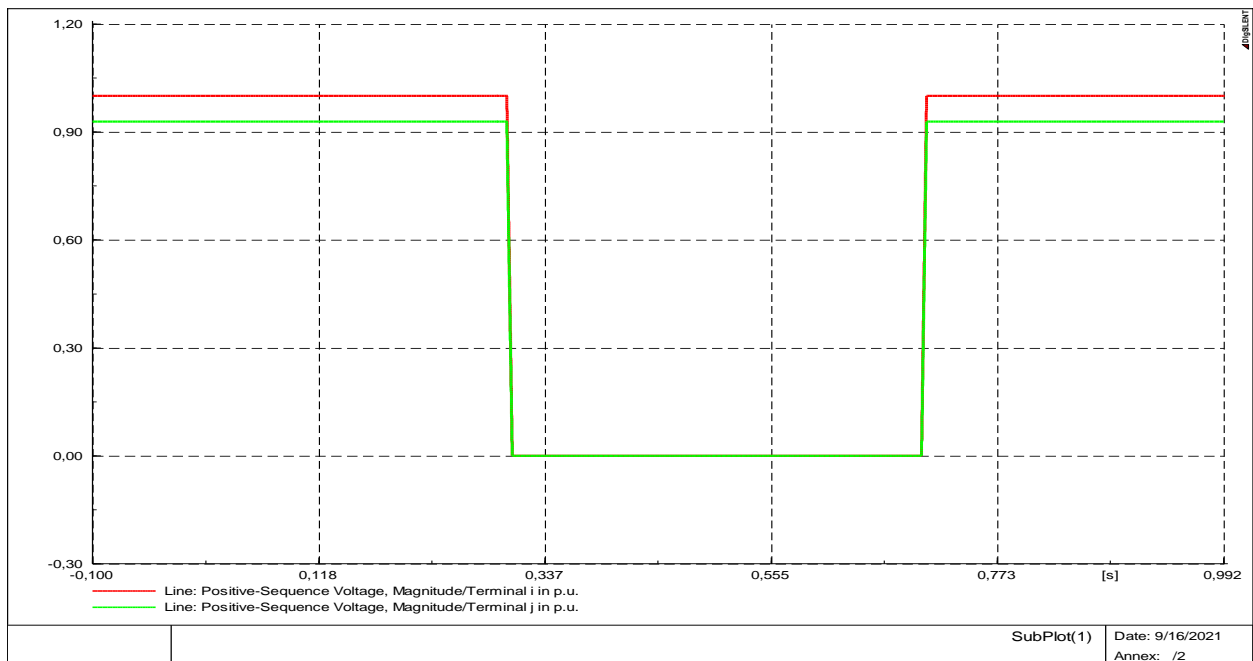
Slika 4.5. Prijelazna pojava radne snage pri isključenju i uključenju simulacije simetrično opterećenog voda

Tijekom isključenja voda kao što je i vidljivo na slici 4.5 radna snaga iznosi nula. Po amplitudi je veća od jalove zbog dominacije realnog dijela potrošača ($R > X$). Analogno vrijedi i za graf jalove snage koji je prikazan na slici 4.6.



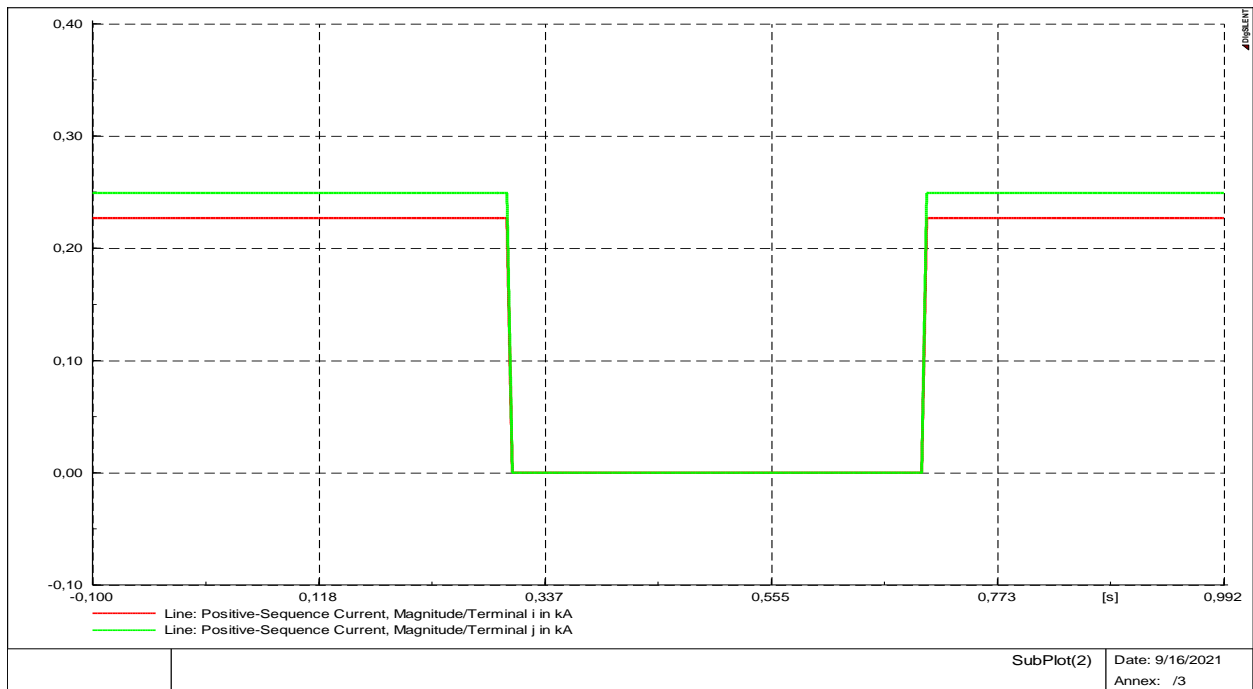
Slika 4.6. Prijelazna pojava jalove snage pri isključenju i uključenju simulacije simetrično opterećenog voda

Nesimetrično opterećenje

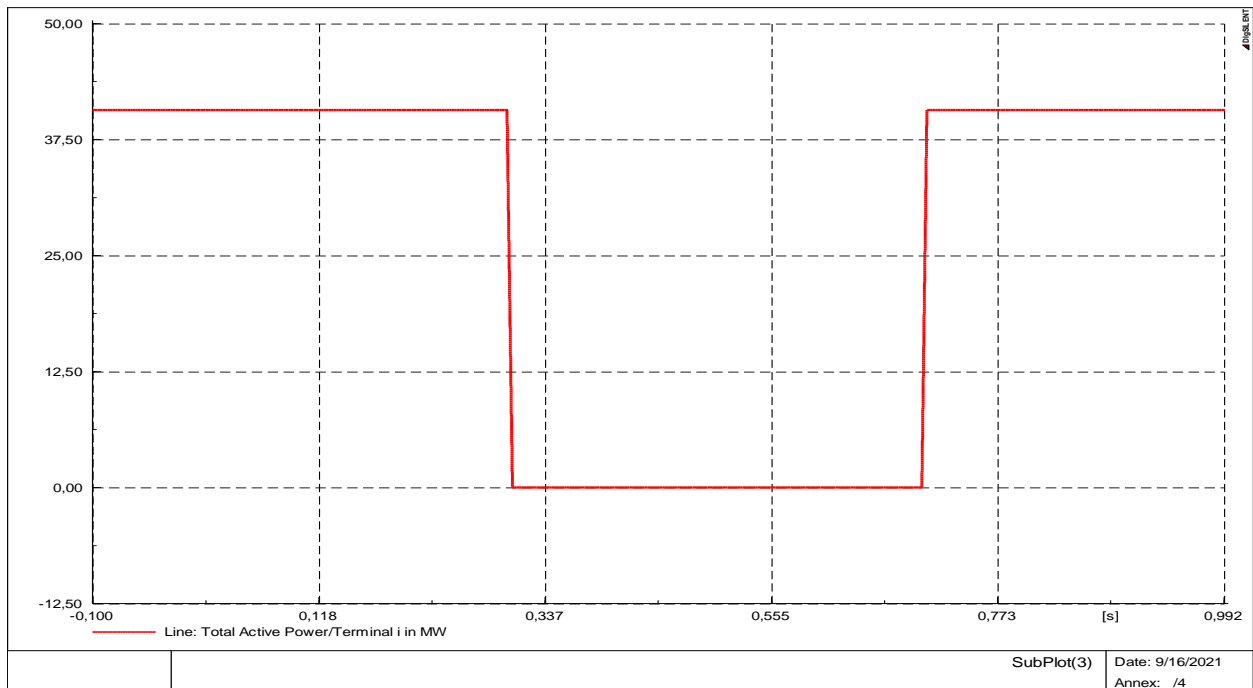


Slika 4.7. Prijelazna pojava napona pri isključenju i uključenju simulacije nesimetrično opterećenog voda

Kao i za slučaj kada je provedeno uključenje i isključenje sa simetrično opterećenim vodom. Napon na kraju voda je manji od napona na početku voda zbog pada napona na djelatnoj i reaktivnoj komponenti opterećenja. To je vidljivo na slici 4.7.

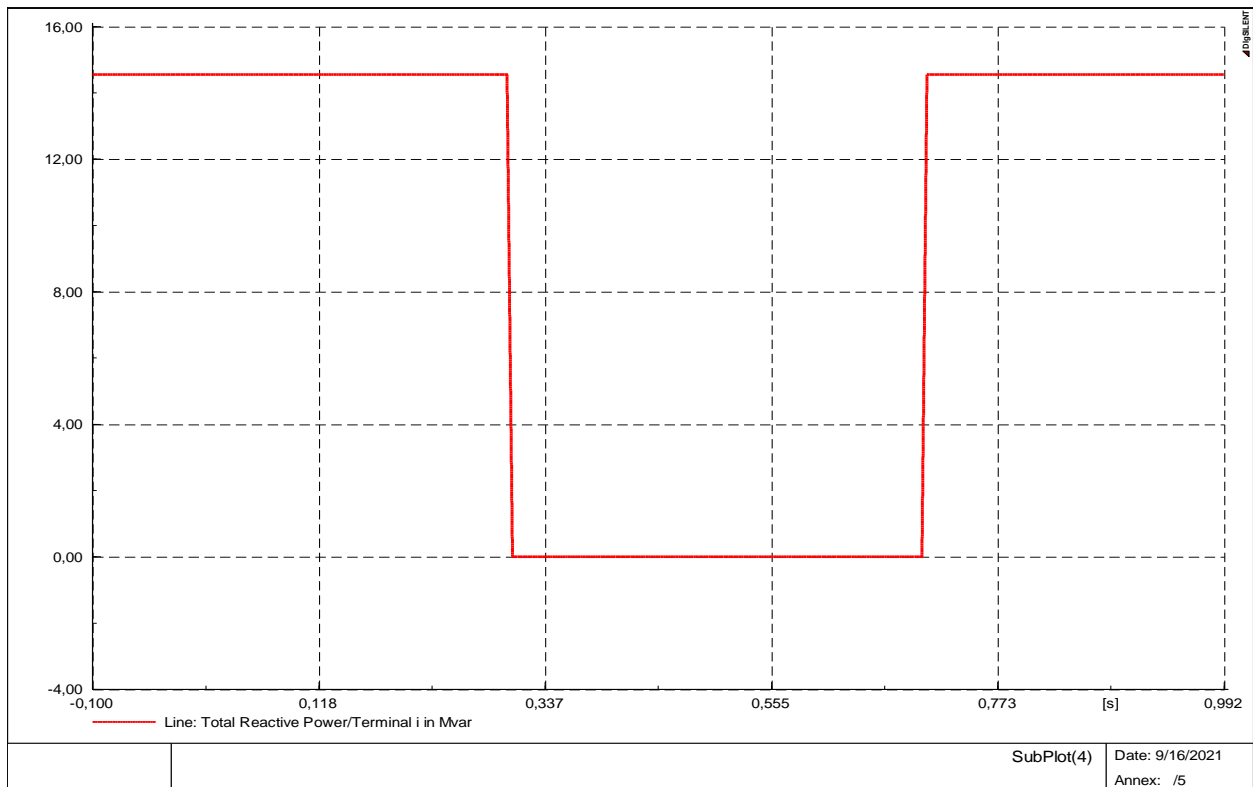


Slika 4.8. Prijelazna pojava struje pri isključenju i uključenju simulacije nesimetrično opterećenog voda



Slika 4.9. Prijelazna pojava radne snage pri isključenju i uključenju simulacije nesimetrično opterećenog voda

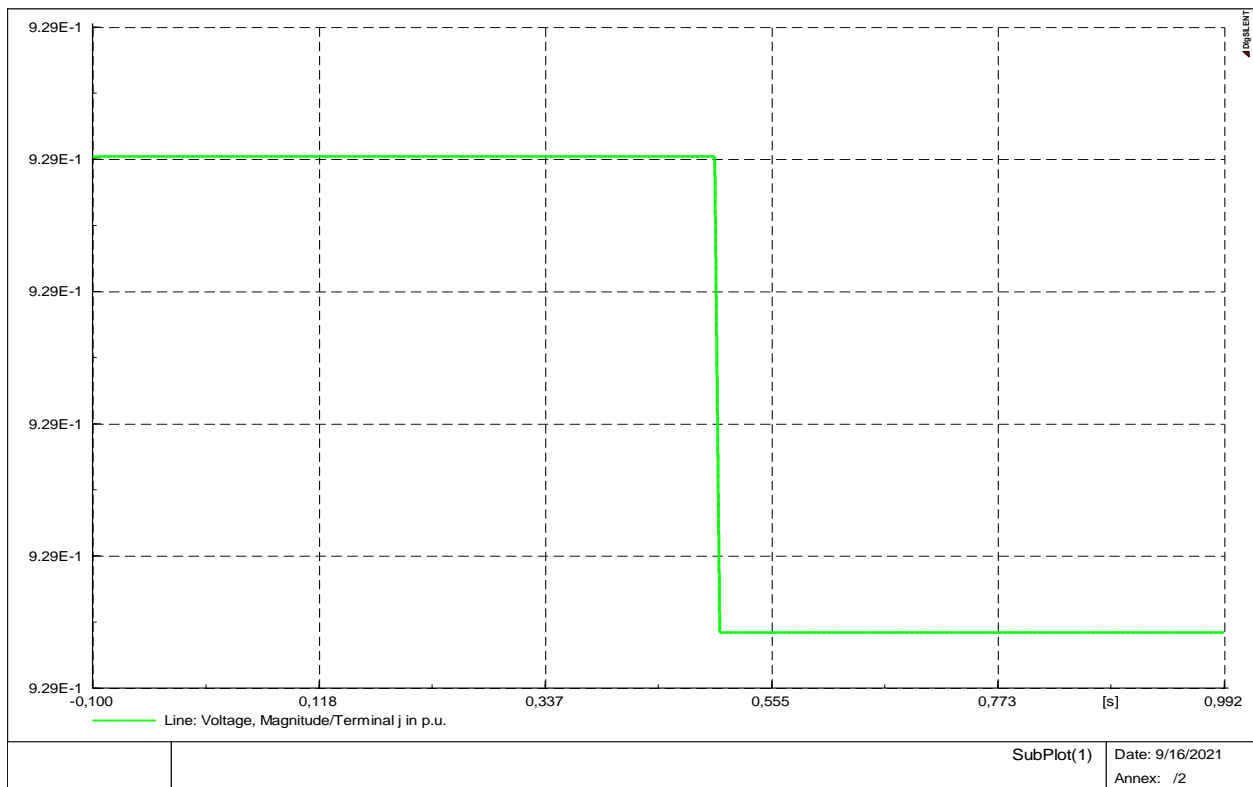
Kao i za slučaj kada je provedeno uključenje i isključenje sa simetrično opterećenim vodom, može se primijetiti blagi nagib zbog impedancije, a struja na kraju voda je veća od struje na početku voda zbog kapaciteta. Što je vidljivo na slici 4.8.



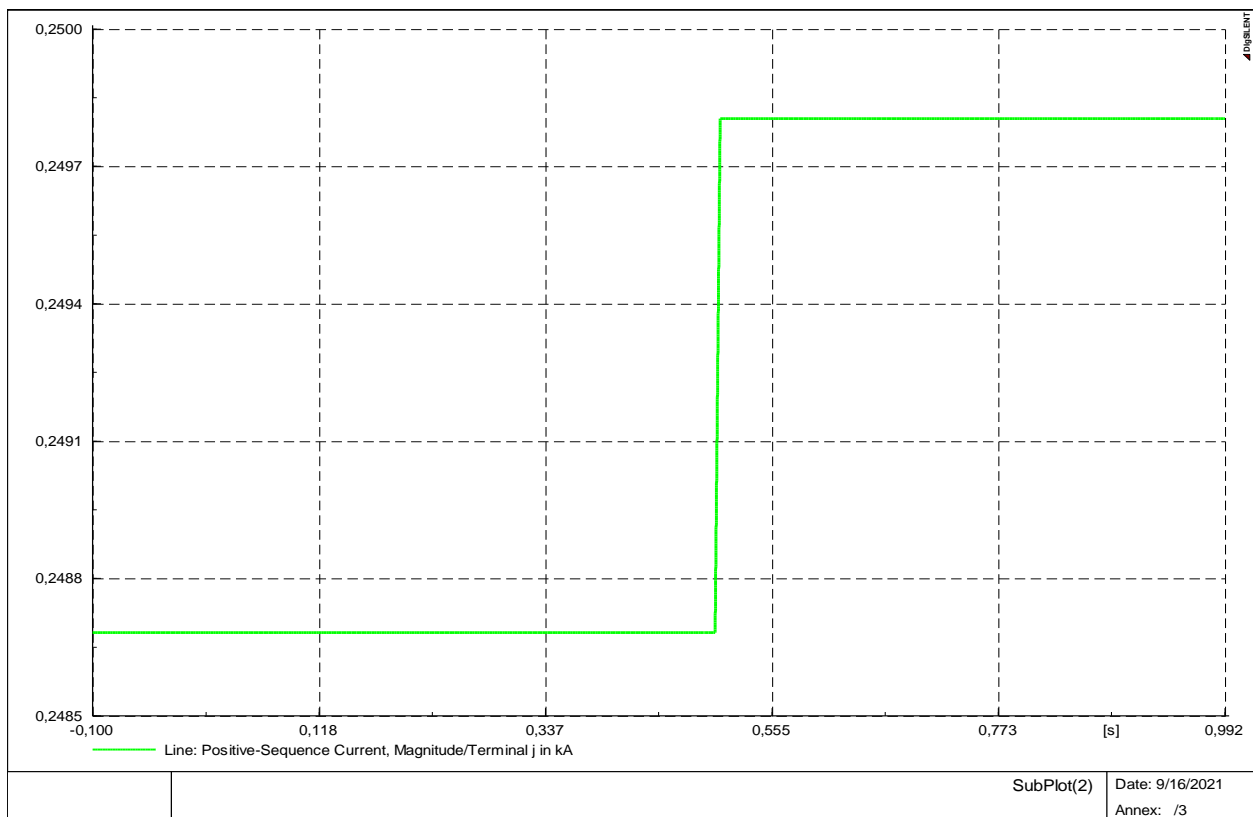
Slika 4.10. Prijelazna pojava jalove snage pri isključenju i uključenju simulacije nesimetrično opterećenog voda

Povećanje snage opterećenja

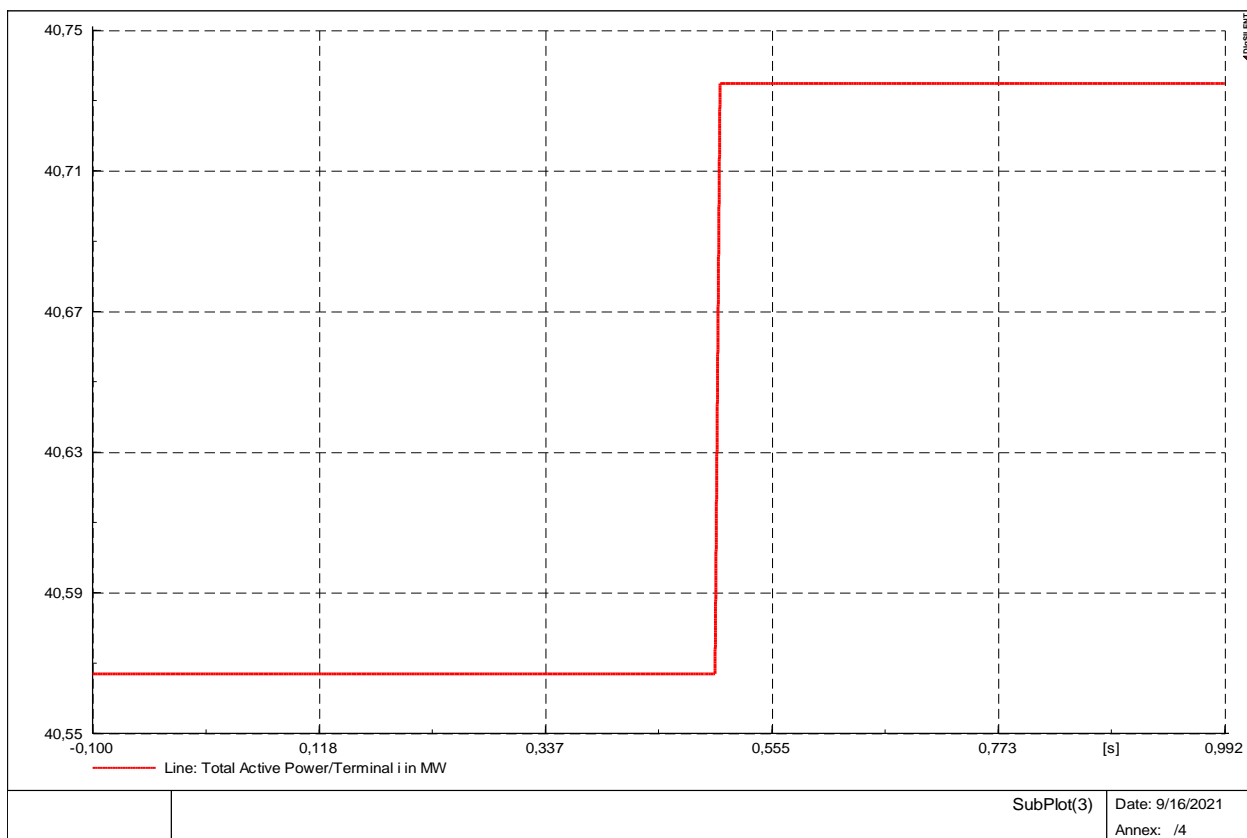
Za slijedeće prijelazne pojave, u programskom paketu podesiti će se povećanje djelatne i jalove snage opterećenja za 50%. Promatrati će se dijagrami prijelaznih pojava napona i struje, koje se nalaze na Slika 4.11. i Slika 4.12., i njihova ponašanja, te će se prikazati povećanje snaga preko prijelaznih pojava snaga (Slika 4.13. i Slika 4.14.)



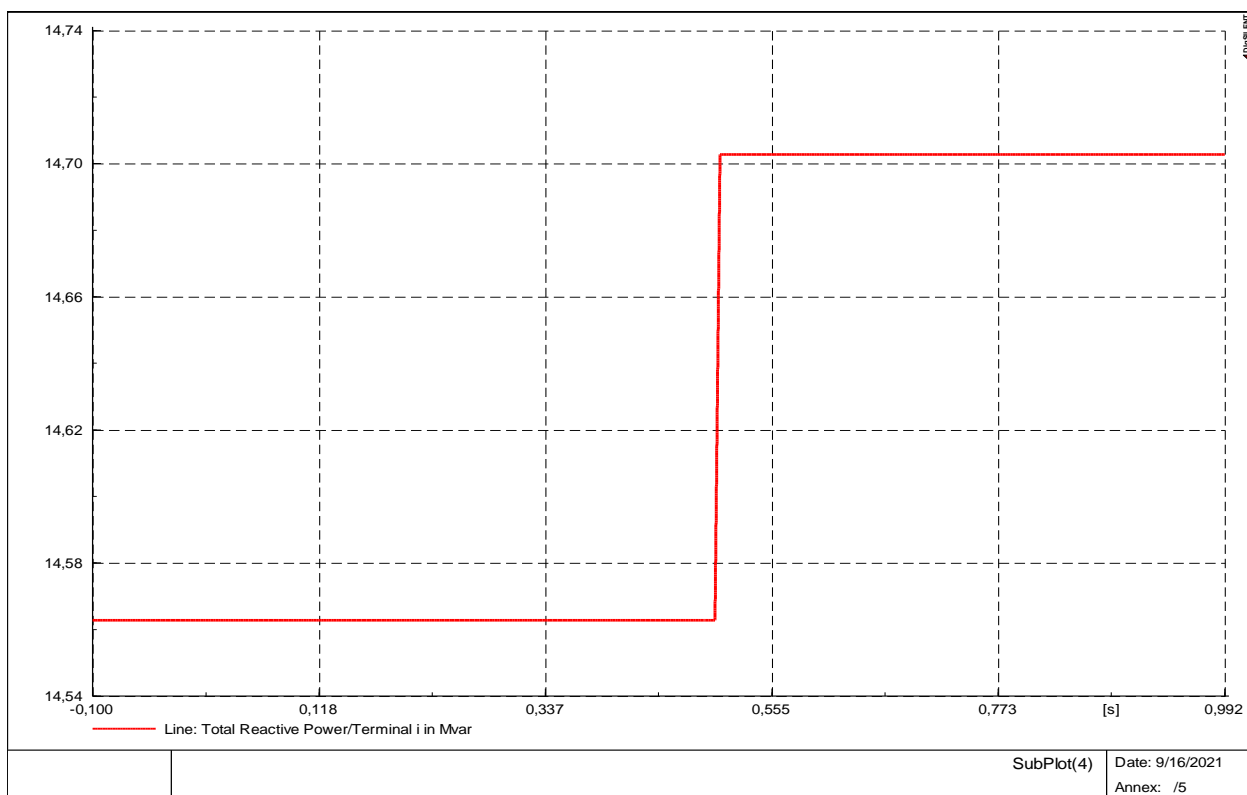
Slika 4.11. Prijelazna pojava napona pri povećanju snaga za 50%



Slika 4.11. Prijelazna pojava struje pri povećanju snaga za 50%



Slika 4.12. Prijelazna pojava radne snage pri povećanju snaga za 50%



Slika 4.13. Prijelazna pojava jalove snage pri povećanju snaga za 50%

Pri povećanju opterećenja za 50% dolazi do pada napona kao što je vidljivo na slici 4.11. Porast opterećenja tj. djelatne i jalove komponente rezultira veću struju prilikom uključanja voda. Rast opterećenja vodi ka većem padu napona na djelatnoj i jalovoj komponenti, dok kod povećanja opterećenja za 50% dolazi do porasta struje kao što je vidljivo na slici 4.11. Porast opterećenja rezultira potrebu za većom strujom. Povećanje djelatne i jalove snage rezultira povećanje struje kvadratno.

Na slici 4.12 i slici 4.13 prikazane su djelatna snaga i jalova snaga, kao i porast njihovih amplituda za 50%. Porastom opterećenja raste potreba i za potrošnjom djelatne snage. Vidljiv je i blagi nagib od trenutka isključenja voda do trenutka uključanja voda.

Kod prijelaznih pojava snaga jasno se vidi trenutak povećanja jalove snage koja se mijenja povećanjem potrošnje. Na slici 4.13 je vidljiv i blagi nagib od vremena isključenja i uključanja voda.

5. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu napravljena je usporedba simetričnog i nesimetričnog opterećenja. Nesimetrično opterećenje se pojavljuje kada faze nisu jednako opterećene. Simulacije su provedene na dva načina, na laboratorijskom modelu i u programskom paketu DigSilent, te su promatrane strujno naponske prilike na početku i kraju voda. Cilj je bio usporediti odnose napona i struja za simetrično i nesimetrično opterećenje. Nakon odrađene analize može se primijetiti kako se u mjerenjima napon smanjuje, odnosno struja se povećava na kraju voda. Razlog smanjenja napona na kraju voda je pojava pad napona na uzdužnoj grani voda. Analogno tome, povećanjem opterećenja dolazi do povećanja struje na kraju voda što može rezultirati oštećenjem voda prilikom prolaska veće struje u odnosu na struju pri kojoj je vod dimenzioniran. Upravo iz tog razloga nastoje se korigirati brze promjene opterećenja kako bi se izbjegle štete na vodu. Iako se očekuju jednake vrijednosti rezultata jer su parametri za obje simulacije postavljeni jednako, vrijednosti se razlikuju zbog toga što se kod simulacije pomoću simulatora ne može izmjeriti vrijednosti kao na programu. To se događa zbog nesavršenosti kruga simuliranog na simulatoru kojem su uzroci gubitci na pojedinim elementima u mreži, nesavršenosti izolacije, izvedbe pojedinog modula, gubitaka instrumenata, gubitaka na spojnim vodovima.

SAŽETAK

U ovom radu opisuje se analiza strujno-naponskih prilika simetrično i nesimetrično opterećenog voda. Simulacije su se izvodila na dva načina: na simulatoru voda LEYBOLD DIDACTICS i u programu DIgSILENT Power Factory. Cilj je bio usporediti odnose napona i struje nesimetrično opterećenog voda simulacijama predstavljenih simulatorom i programskim paketom DIgSILENT. Analize su se provodile za tri različite duljine voda i za simetrično i nesimetrično opterećenje. Mijenjali su se parametri opterećenja za nesimetrične analize. Rezultati analize prikazani su tablično i grafički.

Ključne riječi: nesimetrično opterećenje voda, nesimetrija, DIgSILENT, LEYBOLD DIDACTICS

ABSTRACT

This paper describes the analysis of current-voltage conditions of balanced and unbalanced loaded line. Simulations were performed in two ways. With the LEYBOLD DIDACTICS simulator and in the DIgSILENT Power Factory program. The goal was to compare the voltage-current ratios of the unbalanced loaded line with simulations presented by a simulator and the DIgSILENT software package. Analyzes were performed for three different line lengths for balanced and unbalanced loading simulations. Load parameters for unbalanced analyzes were changed. The results of the analysis are presented in tables and graphs.

Key words: simulations, unbalanced load, DIgSILENT, LEYBOLD DIDACTICS

LITERATURA

- [1] M. Ožegović, K. Ožegović, Električne energetske mreže II, Split 1997.
- [2] R. Tiwari, R. Nilsen, Active Compensation of Unbalanced Load Currents in Grid Connected Voltage Source Converters, 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia), 2019.
- [3] Peng Li, Bai Dan, Kang Yong, Chen Jian, Research on Three-Phase Inverter with Unbalanced Load, Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04., 1, 128–133.
- [4] M. Ožegović, K. Ožegović, Električne energetske mreže V, Split 2002
- [5] Predavanje: doc.dr.sc. Krešimir Fekete, 5a. ELEKTROENERGETSKI VODOVI_UVOD https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/4712884/mod_resource/content/4/5a_Elektroenergetski%20vodovi_Uvod_2017.pdf (11.9.2021.)
- [6] https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektricni_vodovi.pdf
- [7] J. Schlabbach, D. Blumeand, T Stephanblome, "Voltage Quality in Electrical Power Systems" London, 1999.
- [8] Ž. Despotović, Proračun struja kratkih spojeva metodom simetričnih komponenti, 2014. https://www.fer.unizg.hr/download/repository/Kvaliteta_elektricne_energije_2020.pdf (11.9.2021.)
- [9] Predavanja: Kvaliteta napona u elektroenergetskom sustavu, izv.prof.dr.sc. Zvonimir Klaić.
- [10] E. Mihalek, "Niskonaponske distribucijske mreže", Zagreb, 2014.
- [11] Službena stranica programskog paketa DIGSILENT <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html> (11.9.2021.)