

# Analiza prijelazne pojave uključenja i isključenja visokonaponske prigušnice

---

Lasić, Mario

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:200:859989>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-09**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**ANALIZA PRIJELAZNE POJAVE UKLJUČENJA I ISKLJUČENJA  
VISOKONAPONSKE PRIGUŠNICE**

**Završni rad**

**Mario Lasić**

**Osijek, 2022.godina**

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

Osijek, 18.09.2022.

Odboru za završne i diplomske ispite

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

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Mario Lasić
<b>Studij, smjer:</b>	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	4540, 24.07.2018.
<b>OIB Pristupnika:</b>	34058726518
<b>Mentor:</b>	Prof. dr. sc. Predrag Marić
<b>Sumentor:</b>	,
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Analiza prijelazne pojave uključjenja i isključenja visokonaponske prigušnice
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rad:</b>	Modelirati ispitni prijenosni elektroenergetski sustav u simulacijskom sučelju. Izvršiti analizu strujno-naponskih prilika prijelazne pojave uključjenja i isključenja prigušnice na nekoliko lokacija ispitnog sustava.
<b>Prijedlog ocjene završnog rada:</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	18.09.2022.
<b>Datum potvrde ocjene od strane Odbora:</b>	21.09.2022.
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, 23.09.2022.

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Mario Lasić
<b>Studij:</b>	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	4540, 24.07.2018.
<b>Turnitin podudaranje [%]:</b>	8

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Analiza prijelazne pojave uključenja i isključenja visokonaponske prigušnice**

izrađen pod vodstvom mentora 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

<b>1. Uvod</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Zadatak završnog rada</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Teorijski osvrt na visoki napon u EES</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1. Primjer ugradnje visokonaponske prigušnice u praksi stvarnog prijenosnog sustava</b> .....	<b>9</b>
<b>3. Simulacija sklapanja visokonaponske prigušnice</b> .....	<b>10</b>
<b>3.1. Isklapanje jedne faze prigušnice prilikom prolaska struje kroz maksimum</b> .....	<b>11</b>
<b>3.2. Isklapanje sve tri faze prigušnice prilikom prolaska struje kroz maksimum</b> .....	<b>17</b>
<b>3.3. Isklapanje sve tri faze prigušnice prilikom prolaska struje kroz minimum</b> .....	<b>23</b>
<b>4. Zaključak</b> .....	<b>29</b>
<b>Literatura</b> .....	<b>30</b>
<b>Sažetak</b> .....	<b>31</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>31</b>

## **1. Uvod**

Dulji niz godina je problem regulacije napona, odnosno povećanje napona na krajevima voda za vrijeme niskog opterećenja. O trajnom opterećenju i kapacitetu voda ovisi napon na kraju voda. Vodovi veće duljine koji su slabo opterećeni generiraju jalovu snagu kapacitivnog karaktera. Jalova snaga koja se generira veća je od snage koju vod može apsorbirati, zbog toga dolazi do porasta napona na kraju voda. Ta pojava se naziva i Ferrantijev efekt i manifestira se tako da je napon na kraju voda viši nego na početku. Dalekovodi koji padnu ispod 70% svoje prirodne snage se smatraju slabo opterećenim dalekovodima. Ugradnjom nekoliko visokonaponskih prigušnica duž voda problem Ferrantijevog efekta se dovodi pod kontrolu. Visokonaponska prigušnica svojim induktivnim karakterom kompenzira kapacitivnu jalovu snagu slabo opterećenog ili neopterećenog dalekovoda, time drži u određenim granicama napon dalekovoda. [1]

U završnom radu predstavljen je teorijski osvrt problematike u elektroenergetskom sustavu gdje se opisuju prenaponi, Ferrantijev efekt, uklapanje dalekovoda te uklapanje i isklapanje visokonaponskih prigušnica. U trećem poglavlju je opisana problematika previsokog napona prema podacima iz stvarnog EES. U četvrtom poglavlju je prikazana analiza simulacije isključenja visokonaponske prigušnice. Simulacija je provedena za isključenje jedne faze pri maksimalnoj vrijednosti struje, isključenje sve tri faze pri maksimalnoj vrijednosti struje i minimalnoj vrijednosti struje sa različitim parametrima od 50 Mvar, 100 Mvar i 1000 Mvar.

### **1.1. Zadatak završnog rada**

Zadatak rada je problematika pogonskih prenapona u EES pri isključenju visokonaponske prigušnice. Nakon teorijskog pregleda područja prenapona u EES, u završnom je radu potrebno izvršiti analizu strujno-naponskih prilika prijelazne pojave uključenja i isključenja prigušnice na modelu dijela EES u simulacijskom softveru.

## 2. Teorijski osvrt na visoki napon u EES

Previsoki naponi su događaji kada vrijednost nazivnog napona prekorači 10% nazivne vrijednosti, a definirana je normom EN 50160 [2]. Prenaponi se dijele na sklopne, prolazne i atmosferske.

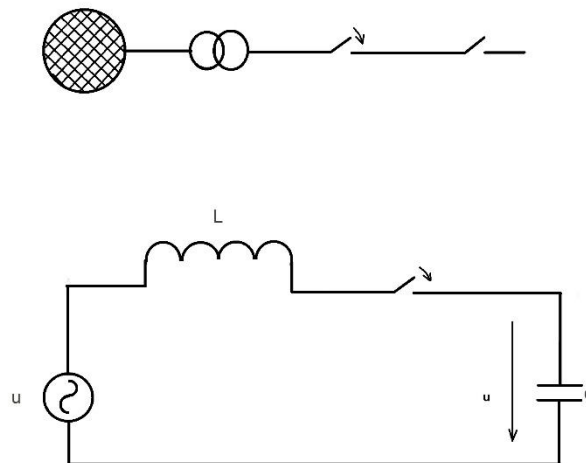
Sklopni prenaponi su posljedica brzih promjena u strukturi mreže. Prenapone možemo svrstati u tri skupine, a to su prenaponi nastali u normalnom opterećenju, prenaponi nastali sklapanjem malih induktivnih struja i prenaponi nastali sklapanjem kapacitivnih krugova kao na primjer neopterećenih vodova te kondenzatorske baterije. [2]

Posljedice prenapona variraju ovisno o periodu događaja, učestalosti ponavljanja, magnitudi, gradijentu te frekvenciji. Neki razlozi dolaska do prenapona su: proboj izolatora, propadanje opreme tijekom vremena, dugotrajni naponski prekidi izazvani uništenjem opreme te elektrodinamički i toplinski udar izazvan munjom ili sklopnim prenaponima.

Metoda poboljšanja sklopnih prenapona je instaliranje fiksnih zavojnica. Nadalje, statički automatski reaktivni kompenzatori (SVC) upravljaju trenutkom uklapanja i isključenja posebno su prikladni za niskonaponsku opremu koja ne može podnijeti prijelazne prenapone.. [2]

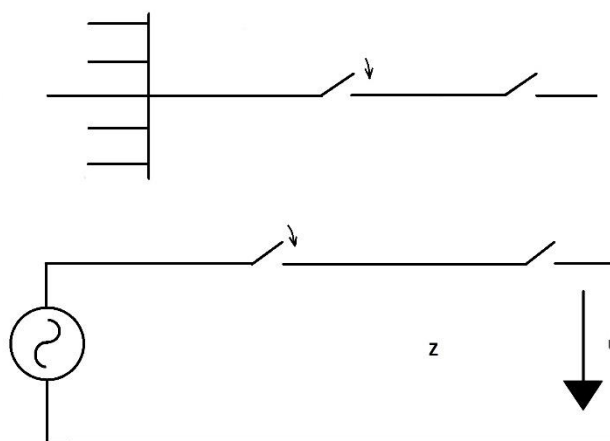
Uklapanje neopterećenog dalekovoda se može izvesti na tri načina, a to su uklapanje preko transformatora, uklapanje preko većeg broja drugih vodova i kabela, uklapanje preko kompleksnog izvora. [3]

Uklapanje preko transformatora prikazano na slici 2.1. karakteristično je za "slabe" mreže i susreće se na početku izgradnje EES. U električnoj shemi vod se predstavlja rasipnim kapacitetom, a transformator induktivitetom. Kod uklapanja voda preko transformatora prijelazna pojava ima samo jednu frekvenciju oscilacija koja je niska. Za uklapanje koje se dešava kod maksimalnog pogonskog napona prva amplituda može dostići dvostruku amplitudnu vrijednost pogonskog napona. [3]



Slika 2.1. Shema uklapanja preko transformatora [3]

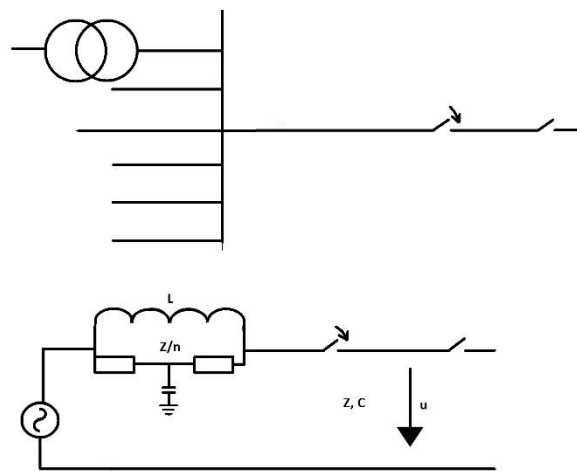
Neopterećeni vod se uključuje preko sabirnice prema slici 2.2. na sabirnicu je priključeno više nadzemnih vodova ili kabela. Valna impedancija priključenog voda je vrlo velika u usporedbi sa valnom impedancijom nadzemnih vodova ili kabela. Ako vod koji se uklapa nije dulji od već priključenih vodova, prijelazna će pojava imati jednu frekvenciju, frekvencija će odgovarati prirodnoj frekvenciji voda. [3]



Slika 2.2. Shema uklapanja preko većeg broja dugih vodova ili kabela [3]

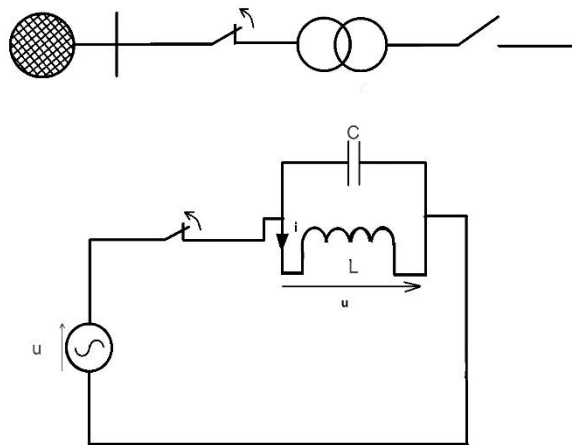


Uklapanje preko kompleksnog izvora prikazano na slici 2.3. karakteristično je za razvijene EES. Na prijelaznu pojavu utječe induktivitet transformatora i valne impedancije prethodno priključenih vodova. Prijelazna pojava se sastoji od više frekvencija. Amplitude određenih frekvencija se ne javljaju u istodobno. Najčešće su amplitude viših frekvencija prijelazne pojave već prigušene kada se nastaju amplitude nižih frekvencija. [3]



Slika 2.3 Shema isklapanja malih kapacitivnih struja [3]

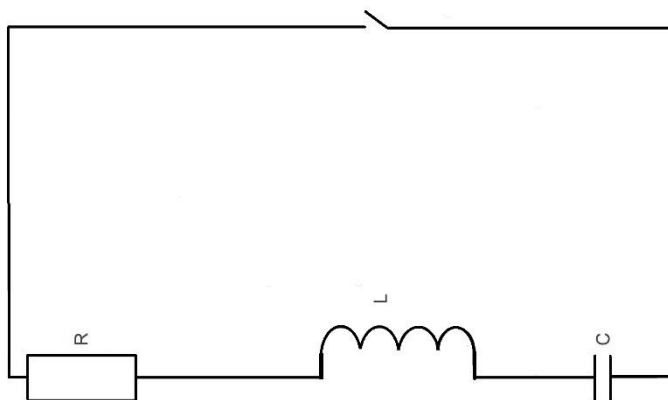
Kod isklapanja malih induktivnih struja prikazano na slici 2.4. zbog svojstva gašenja luka, prije prirodnog prolaska kroz nulu može doći do prekida struje. Takvi slučajevi nastaju prilikom isklapanja uređaja kao što su transformatori ili prigušnica u praznom hodu koji koriste struju magnetiziranja. Nakon prekida magnetska energija koja se akumulirala u induktivitetu transformira se u električnu energiju na kapacitetu transformatora. [3]



Slika 2.4. Shema isklapanja malih induktivnih struja [3]

Smanjenje previsokih pogonskih napona na vodovima se vrši preko visokonaponske prigušnice-elementu elektroenergetskog sustava koji troši induktivnu jalovu snagu i time pogoduje sniženju napona na mjestu priključenja. [4]

Visokonaponska prigušnica prikazane je na slici 2.5. Prigušnice se najčešće spajaju na tercijare mrežnih transformatora, krajeve vodova te sabirnice u transformatorskim stanicama. Kompenzacijske prigušnice dijelimo na jednofazne i trofazne s obzirom na broj faze, te na regulacijske i fiksne prigušnice s obzirom na regulaciju snage. Zbog ekonomske isplativosti ugrađuje se jedna prigušnica sa regulacijom snage umjesto više prigušnica fiksne snage. Zbog ugradnje jedne prigušnice bitno je jeftinije održavanje samo jednog uređaja. [4]



Slika 2.5. Shema prigušnice [5]

Prijelazna pojava uklapanja i isklapanja prigušnice se računa prema izrazu (2.1.) prema literaturi [5] :

$$\frac{d^2v}{dt^2} + \frac{Rdv}{Ldt} + \frac{1}{LC}v = 0 \quad (2.1.)$$

Gdje je :

$v$  – brzina uklapanja prigušnice

$t$  – vrijeme uklapanja prigušnice

$R$  – djelatni otpor prigušnice

$L$  – induktivitet prigušnice

$C$  - kapacitet prigušnice

Kod uklapanja VN prigušnice pojava nesimetričnih udarnih struja magnetiziranja ovisi o trenutku uklopa prekidača u odnosu na referentni signal. Uklapanja u nepovoljnim uvjetima mogu uzrokovati struje visokih iznosa i dugih trajanja kod prigušnica s uzemljenim neutralnim vodičem, nesimetrične struje uzrokuju tok nulte komponente, te time mogu uzrokovati lažnu proradu zaštite. Tijekom uključanja visokonaponske prigušnice moguće su i mehaničke vibracije i zujanje transformatora. [6]

Nesimetrija struje postaje manja ako se kontakti prekidača zatvore bliže maksimalne vrijednosti napona. S druge strane, to uzrokuje komutacijske prenapone. Tijekom pogona prigušnice, izolacija prigušnice je izložena dielektričnom naprezanju. Tablicom 2.6. prikazane su razine napona koju izolacija mora podnijeti temeljenu na europskoj praksi u DS/EN 60076-3. Ako izolacija ne izdrži prenapon izolator gubi svoja dielektrična svojstva te se počinje ponašati kao vodič. Dielektrično naprezanje izolacije prigušnice uzrokovano je vrlo strmim prenaponima nastalim neposredno prije zatvaranja kontakata prekidača. [6]

Nazivni linijski napon	Najviši napon za opremu
10 kV	12 kV
15 kV	17,5 kV
20 kV	24 kV
30 kV	36 kV
50-60 kV	72,5 kV
132 kV	140 kV
150 kV	170 kV
400 kV	420 kV

Tablica 2.6. Standardne razine izolacije za prigušnicu [7]

Trenuci zatvaranja kontakta prekidača utječu na vrijednosti sklopnih struja i trajanja nesimetričnih struja. Kontrolirano zatvaranje ima značajan utjecaj na iznose struje i strujnu nesimetriju. [6]

Veličina probojnog napona kod kruto uzemljene prigušnice između kontakta prekidača ne premašuje 1 p.u. faznog napona, a očekivana je tjemena vrijednost sklopnog prenapona  $\leq 1,5$  p.u. [1]

Nekontrolirano uklapanje prigušnice nastupa kada su u istom trenutku sklopljene sve faze prigušnice. Uobičajeno je da u stvarnom svijetu dolazi do preskoka koji nastaje u prekidnim komorama prilikom približavanja kontakta prekidača i do malog odstupanja uklapanja pojedinih polova prekidača. [8]

Kontrolirano uklapanje prigušnice nastupa kada su istovremeno uklopljene sve tri faze prigušnice u trenucima kada fazni naponi poprimaju vršne iznose. Kontrolirano sklapanje prigušnice znatno smanjuje amplitude i trajanje uklopnih struja te nultih struja koje se zatvaraju kroz zvjezdište prigušnice. [8]

Za isključivanje VN prigušnice prilikom prekida malih induktivnih struja koje se koriste za gašenje električnog luka će razviti brzo povećanje otpora i nagli prekid struje prije nego njena vrijednost bude nula. Oslobođenje energije u prigušnici će uzrokovati elektromagnetske procese koje dovode do prenapona. Sklopni prenaponi koji se mogu pojaviti tijekom normalnog rada sklapanja prigušnice postavljaju dodatne zahtjeve za dielektričnu čvrstoću. Električni luk u strujnom krugu visokog napona stvara se na prekidaču koji ovisi o parametrima vodljivosti. Metoda se temelji na Cassie i Mayrovoj jednadžbi električnog luka (2.2.). prema [6] :

Gdje je

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta(g)} \left( \frac{i_s^2}{P(g)} - g \right) \quad (2.1.)$$

$g$  – vodljivost luka

$P$  – snaga hlađenja luka

$i_s$  – struja prebacivanja

$\theta$  - toplinsko konstanta luka

Rezanje prenapona nastaje ako je struja prekinuta prije njenog prirodnog prolaska kroz nulu, u prigušnici mora biti akumulirana energija koja se oslobađa kroz oscilacije LC kruga. Nakon prekida faze doći će do oscilacija. Oscilacije ne prelaze vrijednost prvog maksimuma. Na posljednjoj prekinutoj fazi oscilacije će se eksponencijalno smanjivati. Povećavanjem jalove snage prigušnice povećavat će se i frekvencija oscilacija. Prijelazni povratni napon uspostaviti će se na kontaktima prekidača nakon prekida struje. Njegova maksimalna očekivana vrijednost jednaka je, ako se zanemari prigušenje, zbroju vršnih napona izvora i prenapona izazvanog rezanjem struje. [6]

Prenaponi ponovnog paljenja luka nastaju ponovnim paljenjem nakon početnog prekida i gašenja luka. Ponovna paljenja se javljaju kada povratni napon u kontaktnom razmaku premašuje dielektričnu otpornost. Ponovno paljenje se obično može očekivati blizu vršne vrijednosti povratnog napona. Za analizu dielektričnih naprezanja izolacije prigušnice, osim prenapona prema zemlji, potrebno je uzeti u obzir i razlike napona između dvije uzastopne vršne vrijednosti suprotnog polariteta nakon ponovnog paljenja. [6]

Prije konačnog gašenja luka može doći do nekoliko ponovnih paljenja. Ova pojava se označava kao eskalacija napona, a može se dogoditi pri prekidu struja s vrlo strmim nagibima na prijelazima od minimalnih vrijednosti. U praksi je uočeno da u nekim slučajevima ponovno paljenje dovodi do oštećenja prekidača. Iz tog razloga, a budući da također može utjecati na izolaciju prigušnice, poželjno je eliminirati ponovno paljenje. Pojava ponovnog paljenja ovisi o struji prigušnice koju treba uključiti. Što je struja induktiviteta veća, mogućnost ponovnog paljenja je veća. Prenaponi ponovnog paljenja ovise o konfiguraciji mreže i karakteristikama prekidača. [6]

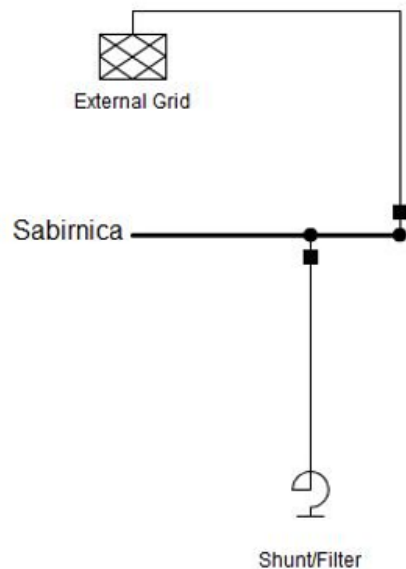
## **2.1. Primjer ugradnje visokonaponske prigušnice u praksi stvarnog prijenosnog sustava**

Prenaponi u prijenosnom području Osijek nastaju za vrijeme slabih opterećenja u 400 i 200 kV mreži. Slaba opterećenja nastaju tijekom noći, te u proljetnom periodu. Proljetni period ima nisko opterećenje jer korisnici ne koriste grijanje niti klimatizacijske uređaje.

Kompenzacijska prigušnica snage 100 Mvar, nazivnog napona 123 kV ugrađena je u trafostanicu Ernestinovo. Prigušnica se većinu svog pogona nalazi na naponu 116-117 kV, tada je snaga prigušnice 88-92 Mvar-a . Preporuke da prigušnica kompenzira manje od 50% jalove snage dalekovoda koji je priključen na sabirnice, odgovara približno nazivnoj snazi instalirane prigušnice. Prigušnica svojim uključanjem na 400 kV-oj strani smanji napon za 4-5 kV. [9]

### 3. Simulacija sklapanja visokonaponske prigušnice

Sklapanje visokonaponske prigušnice je provedeno kroz 3 simulacijska scenarija u DIgSILENT PowerFactory softveru na modelu prikazanom na slici 4.1. Simulacijski scenariji su: „Isključenje jedne faze prigušnice pri maksimalnoj vrijednosti struje“, „Isključenje tri faze prigušnice pri maksimalnoj vrijednosti struje“ i „Isključenje tri faze prigušnice pri minimalnoj vrijednosti struje“. Za svaki scenariji mijenjali su se parametri reaktancije prigušnice pri nazivnom naponu prigušnice od 117 kV. Jalova snaga prigušnice poprima vrijednosti 50 Mvar, 100 Mvar i 1000 Mvar.



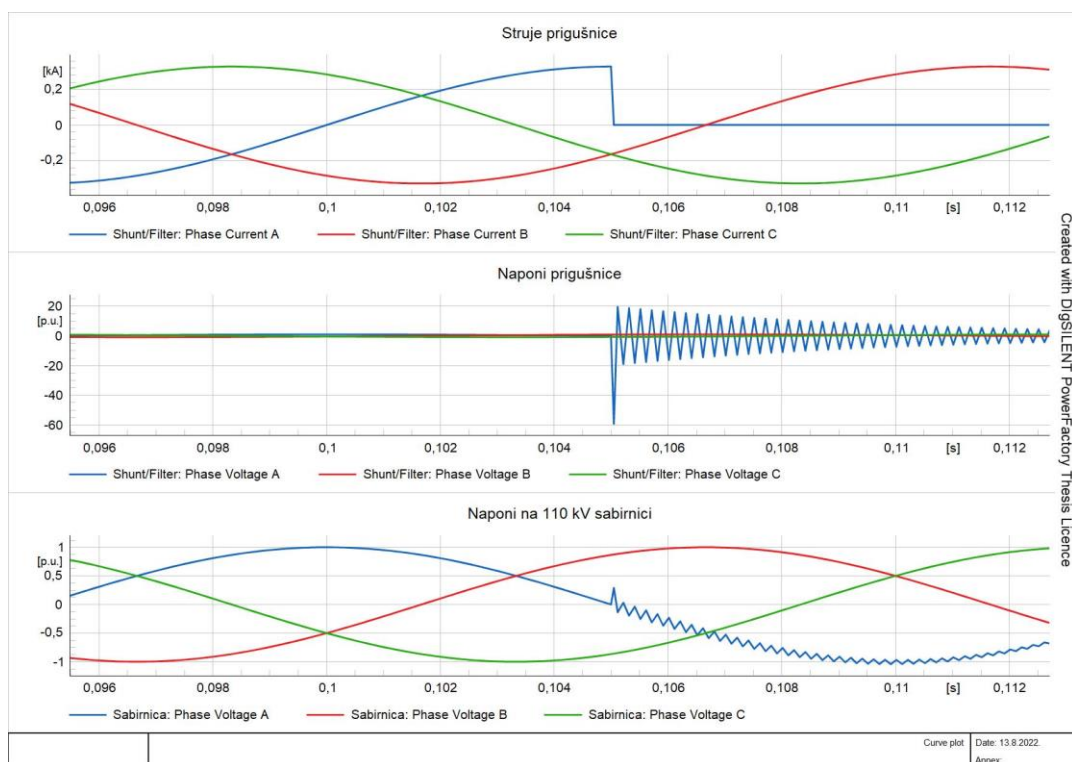
Slika 3.1. Simulacijski model visokonaponske prigušnice

Zbog prekida struje prije njezinog prirodnog prolaska kroz nulu akumulirana energija u prigušnici se oslobađa kroz LC oscilacije. Oslobođenjem energije se javljaju prenaponi na sabirnici i na prigušnici. Promjenom reaktancije prigušnice mijenjamo akumuliranu energiju u prigušnici i ona se očituje prenaponima na sabirnici.

### 3.1. Isklapanje jedne faze prigušnice prilikom prolaska struje kroz maksimum

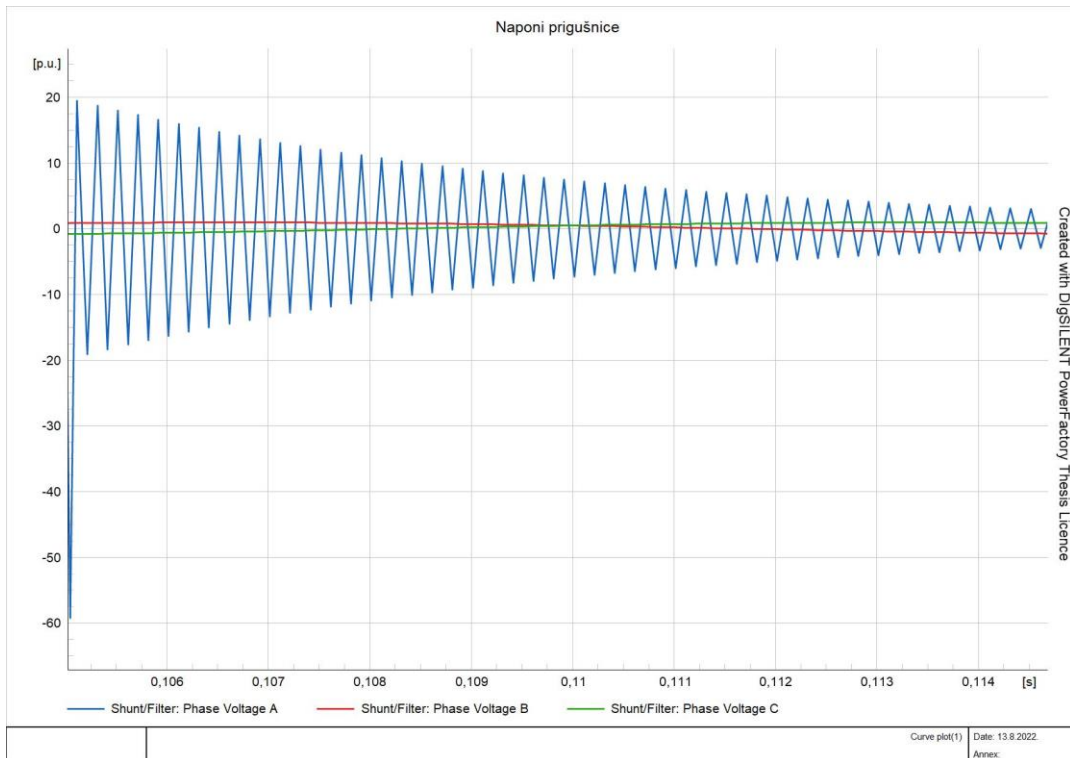
#### *Prigušnica jalove snage 50 Mvar*

Prikazano slikom 3.4. struja faze A je prekinuta pri njenoj vršnoj vrijednosti od 330 A. Slikom 3.2. prikazani su naponi prigušnice i sabirnice te struje prigušnice. Struja prigušnice je prekinuta u 0,105 s. Nakon isključenja prikazanim na slici 3.3. dolazi do oscilacija na prigušnici iznosa -60 p.u. ili -7020 kV, a na sabirnici je 0.3 p.u. ili 35.1 kV.

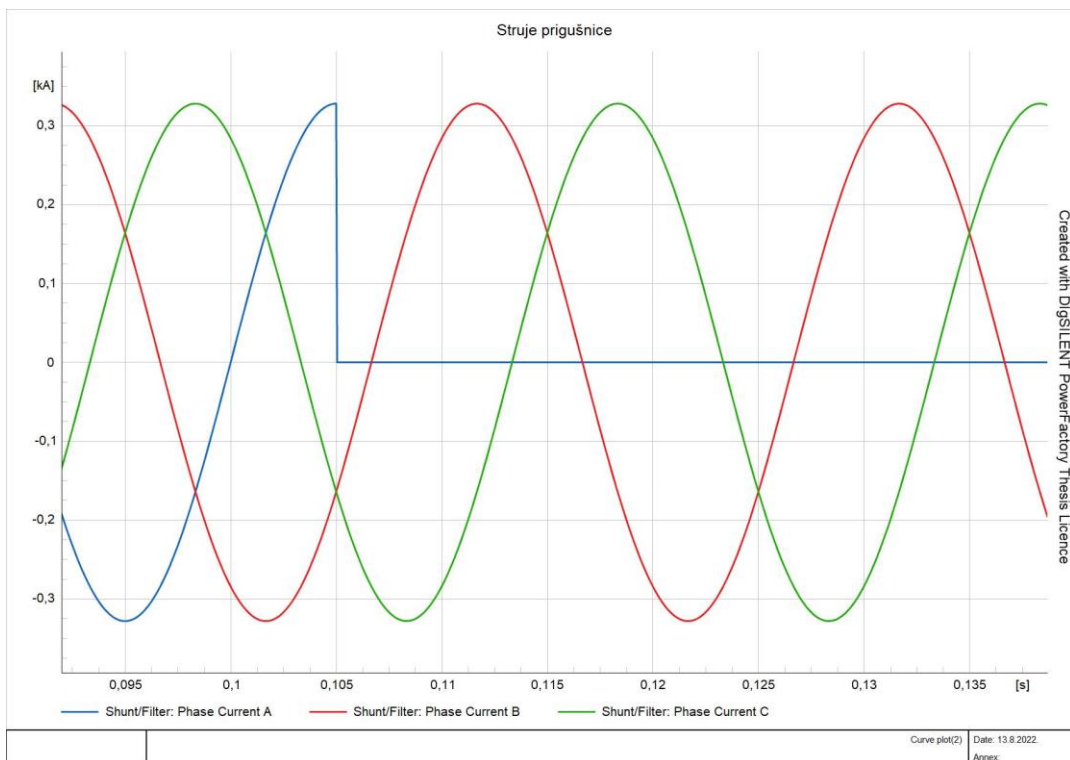


Slika 3.2. Isključenje jedne faze prigušnice pri maksimalnoj struji i 50 Mvar





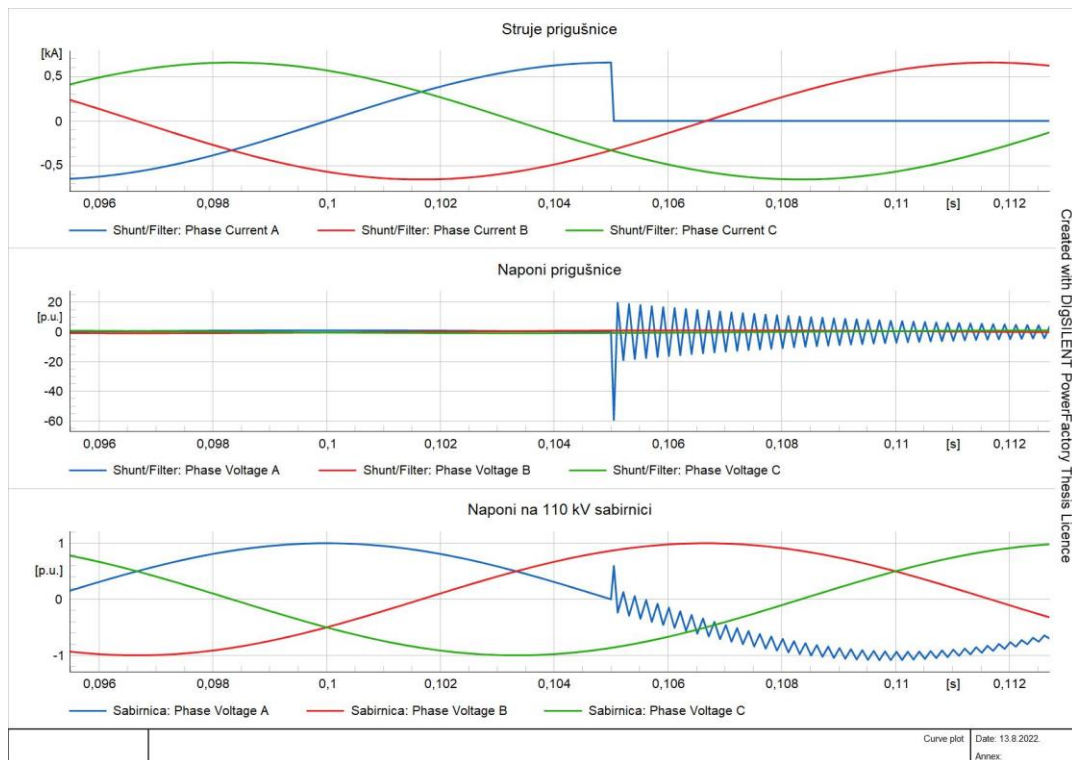
Slika 3.3. Napon prigušnice jalove snage 50 Mvar



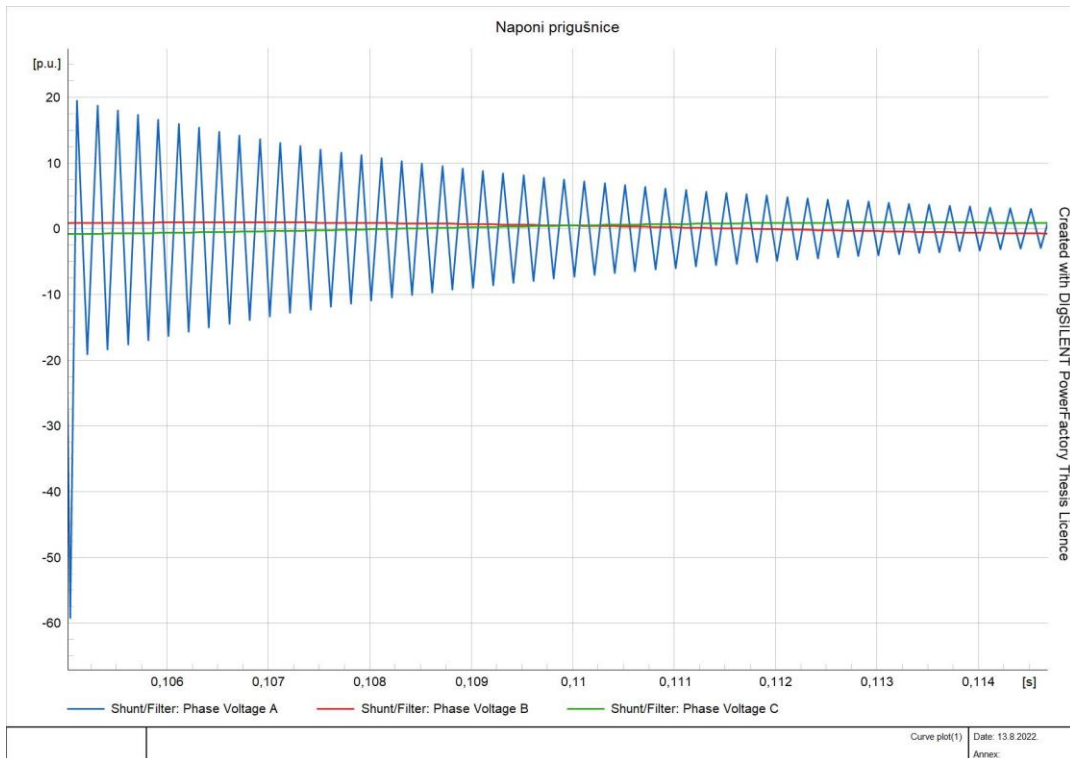
Slika 3.4. Struje prigušnice jalove snage 50 Mvar

### ***Prigušnica jalove snage 100 Mvar.***

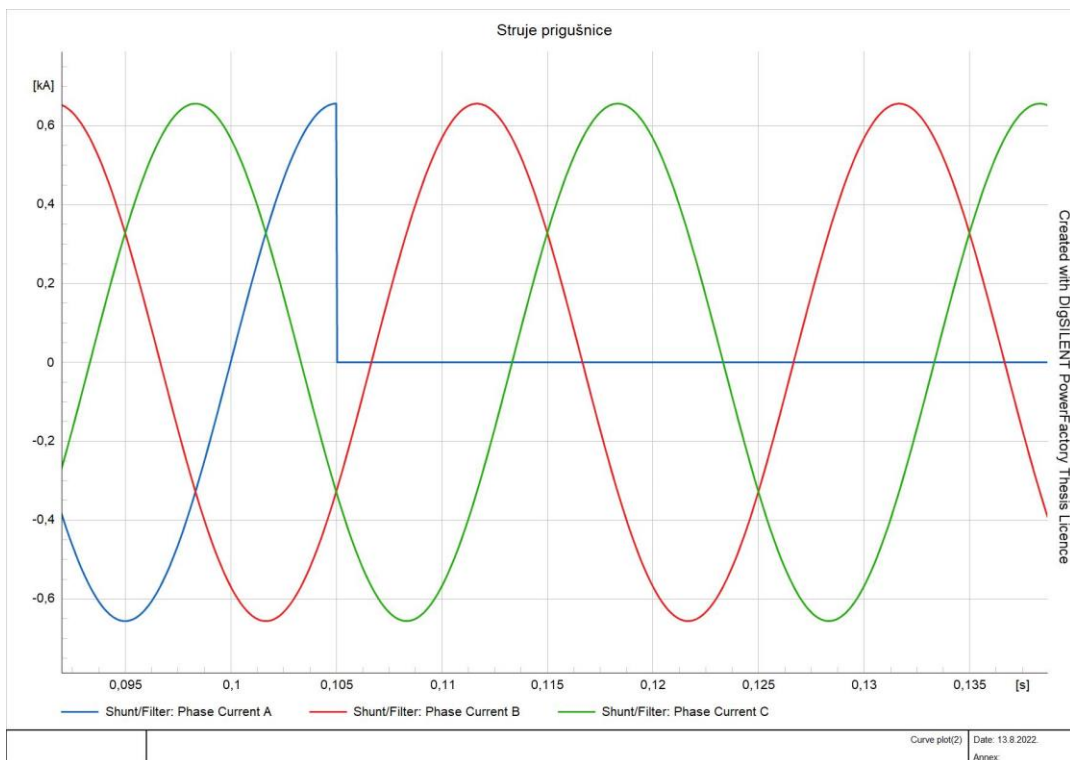
Prikazano slikom 3.7. struja faze A je prekinuta pri njenoj vršnoj vrijednosti od 660 A. Slikom 3.5. prikazani su naponi prigušnice i sabirnice te struje prigušnice. Struja prigušnice je prekinuta u 0,105 s. Prenapon na prigušnici prikazan slikom 3.6. ostaje isti kao i u prošloj simulaciji -7020 kV. Prenapon na sabirnici se povećao na 0.6 p.u. ili 70.2 kV.



Slika 3.5. Isključenje jedne faze prigušnice pri maksimalnoj struji i 100 Mvar



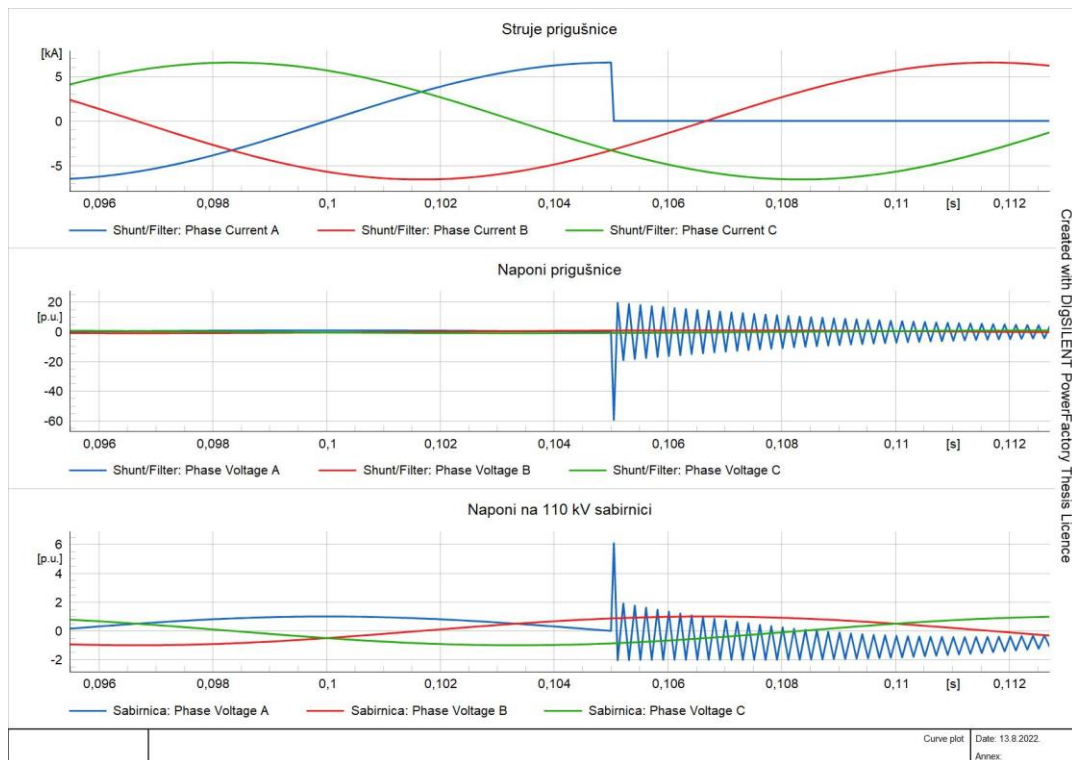
Slika 3.6. Napon prigušnice jalove snage 100 Mvar



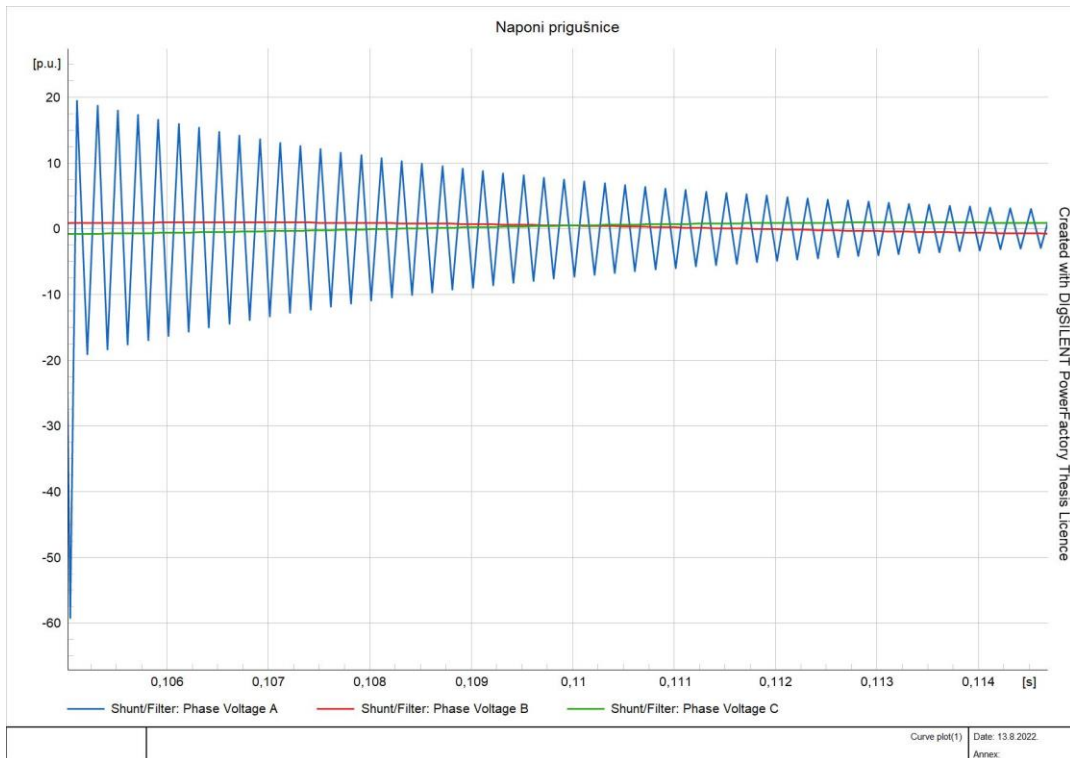
Slika 3.7. Struje prigušnice jalove snage 100 Mvar

### *Prigušnica jalove snage 1000 Mvar.*

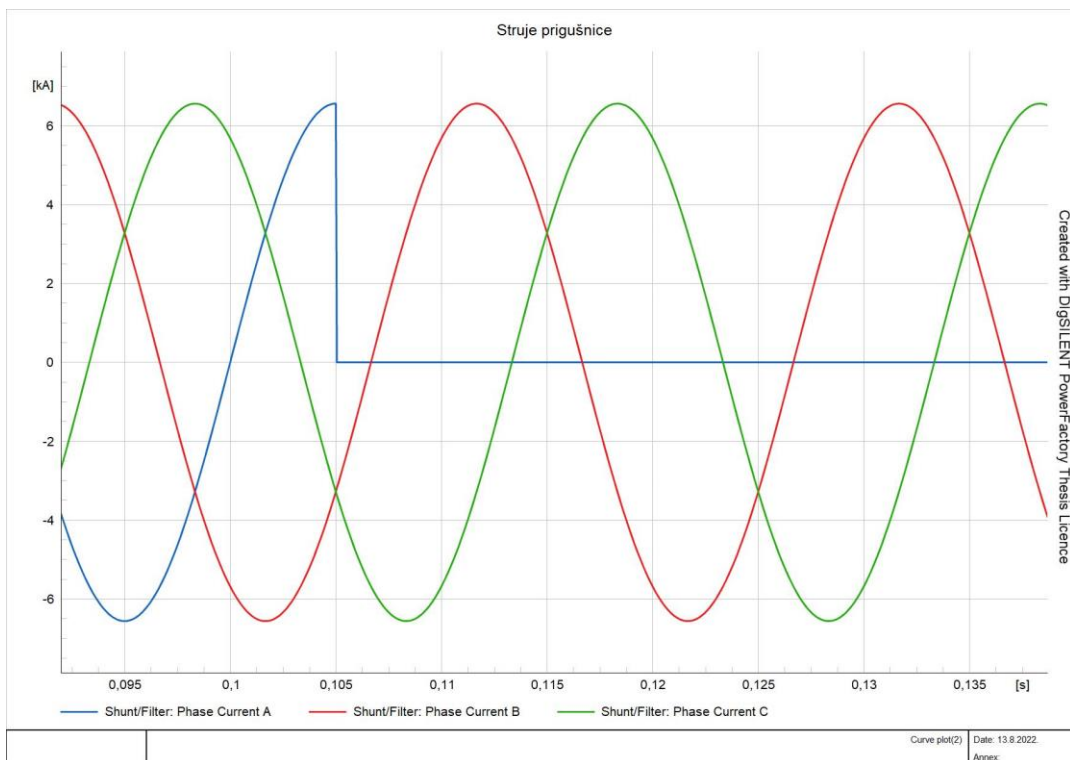
Prikazano slikom 3.10. struja faze A je prekinuta pri njenoj vršnoj vrijednosti od 6.6 kA. Slikom 3.8. prikazani si su naponi prigušnice i sabirnice te struje prigušnice. Struja prigušnice je prekinuta u 0,105 s. Prenapon na prigušnici prikazan slikom 3.9. ostaje isti kao i u prošloj simulaciji -7020 kV. Prenapon na sabirnici se povećao na 6 p.u. ili 702 kV.



Slika 3.8. Isključenje jedne faze prigušnice pri maksimalnoj struji i 1000 Mvar



Slika 3.9. Napon prigušnice jalove snage 1000 Mvar

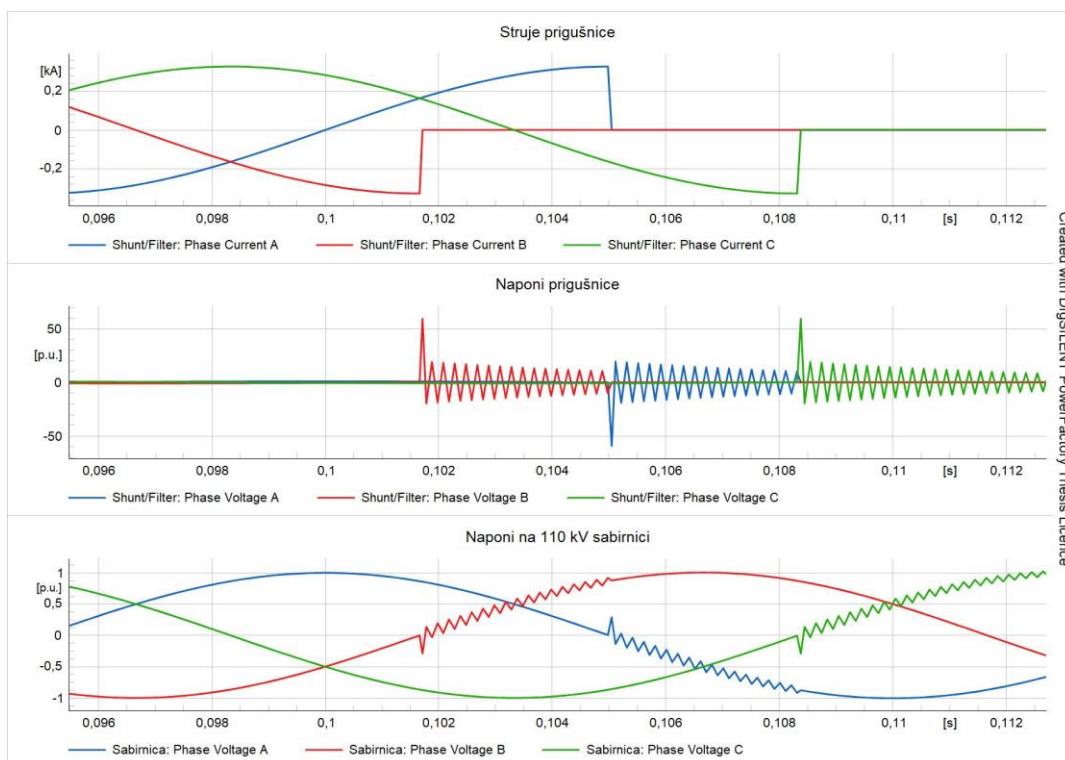


Slika 3.10. Struje prigušnice jalove snage 1000 Mvar

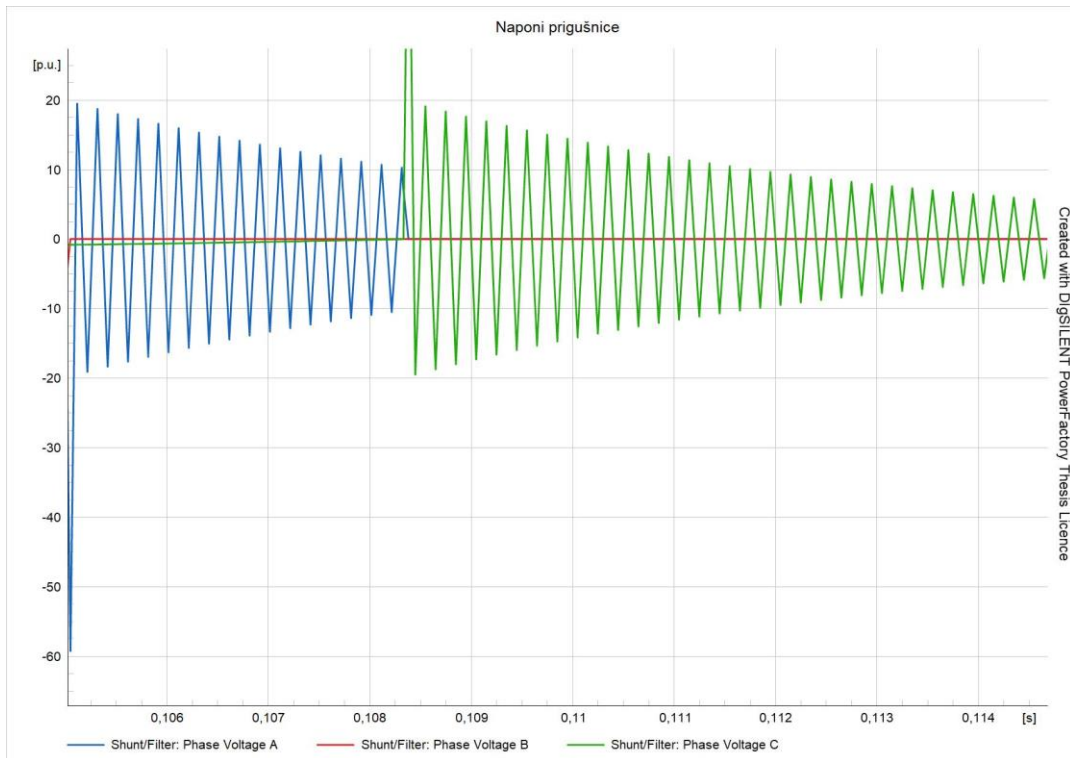
## 3.2. Isklapanje sve tri faze prigušnice prilikom prolaska struje kroz maksimum

### *Prigušnica jalove snage 50 Mvar*

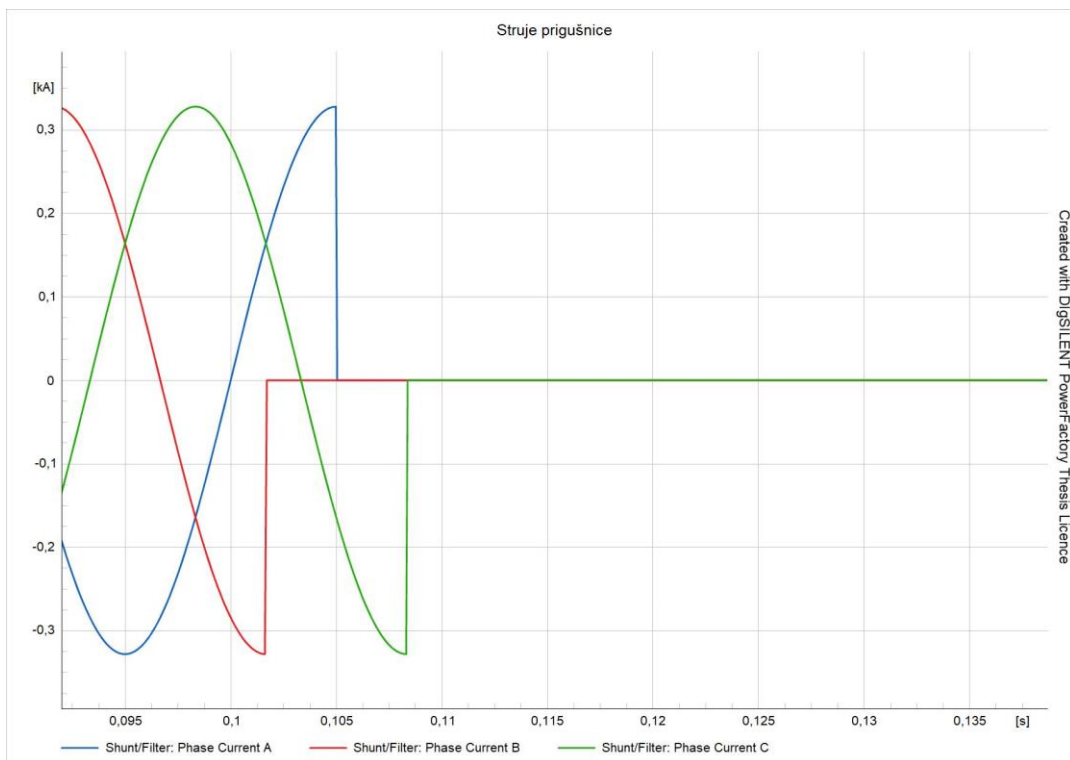
Slikom 3.11. su prikazane struje prigušnice, naponi prigušnice i naponi na sabirnici. Struja faze A prikazana slikom 3.13. je prekinuta u 0.105 s pri njenoj vršnoj vrijednosti od 330 A. Faza B je prekinuta u 0.1016 s pri vrijednosti od -330 A. Faza C je prekinuta u 0.1084 s pri vrijednosti od -330 A. Maksimalni prenapon na prigušnici u fazi A je -60 p.u. ili -7020 kV, a na sabirnici je 0.3 p.u. ili 35.1 kV. Faze B i C imaju prenapon na prigušnici od 60 p.u. ili 7020 kV, a na sabirnici -0.3 p.u. ili 35.1 kV. Na slici 3.12 su prikazane oscilacije u fazi B koje prestaju u 0.1016 s kada počinju oscilacije u fazi A, a prestaju u 0.1084 s kada počinju oscilacije u fazi C.



Slika 3.11. Isključenje tri faze prigušnice pri maksimalnoj struji i 50 Mvar



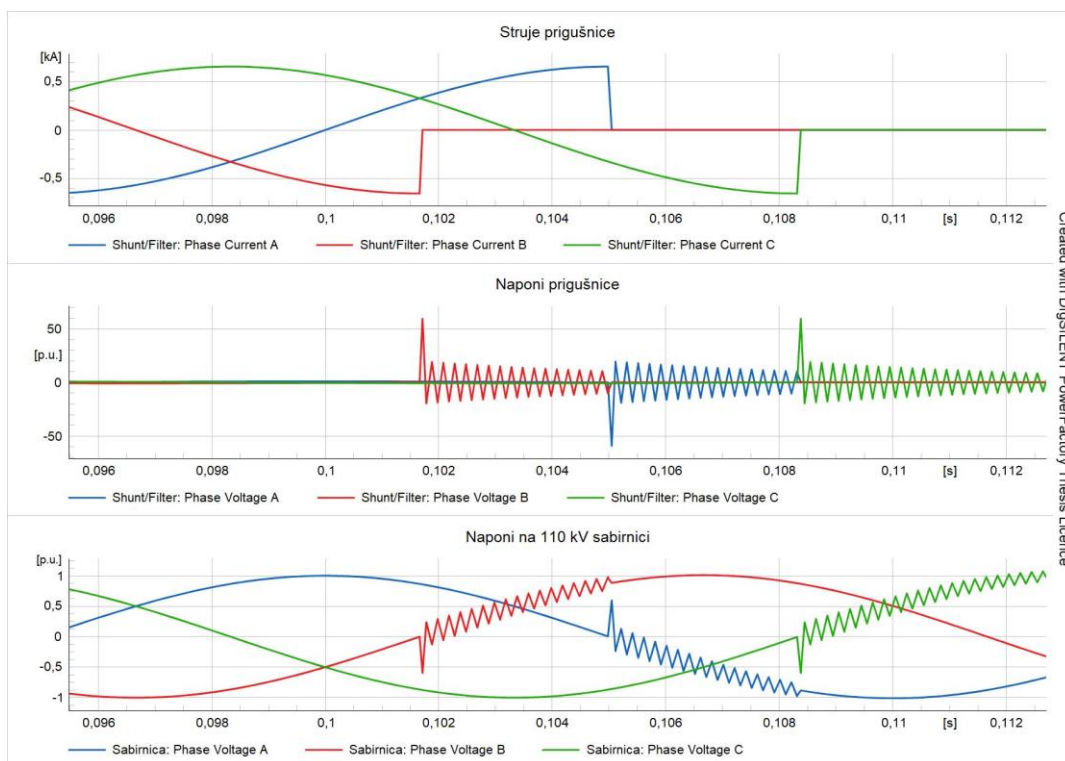
Slika 3.12. Naponi prigušnice jalove snage 50 Mvar



Slika 3.13. Struje prigušnice jalove snage 50 Mvar

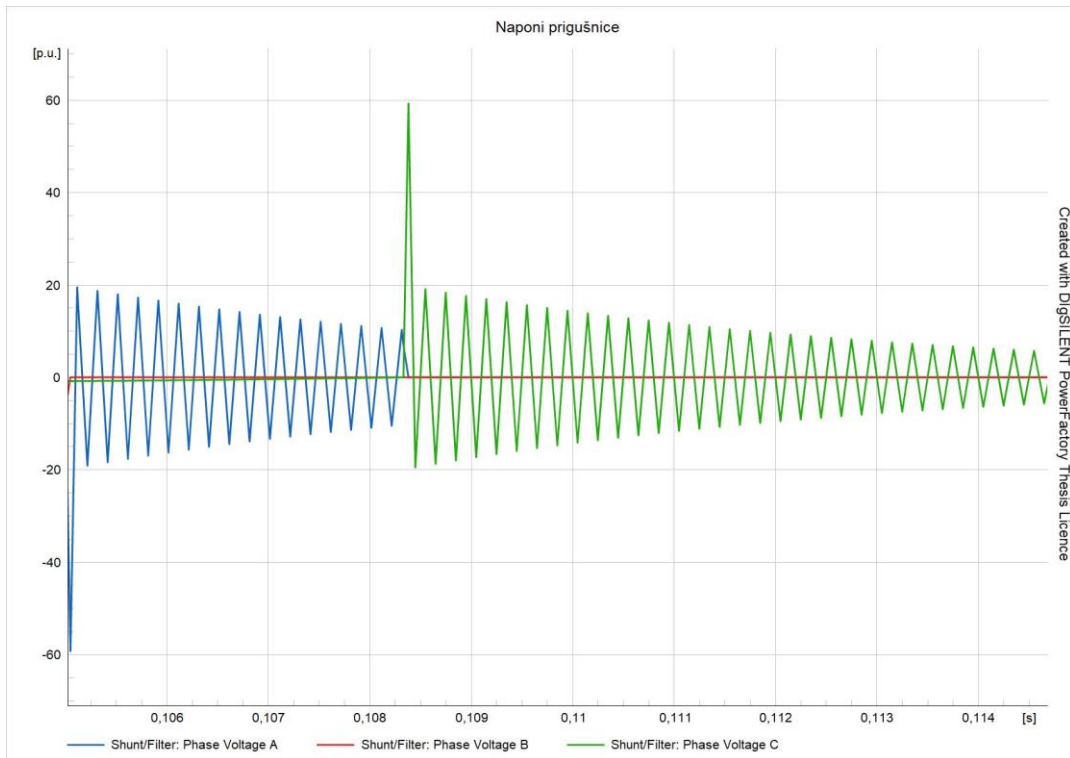
### *Prigušnica jalove snage od 100 Mvar.*

Slikom 3.14. su prikazane struje prigušnice, naponi prigušnice i naponi na sabirnici. Struja faze A prikazana slikom 3.16. je prekinuta u 0.105 s pri njenoj vršnoj vrijednosti u od 660 A. . Faza B je prekinuta u 0.1016 s pri vrijednosti od -660 A. Faza C je prekinuta u 0.1084 s pri vrijednosti od -660 A. Maksimalni prenapon na prigušnici u fazi A je -60 p.u. ili -7020 kV, a na sabirnici je 0.6 p.u. ili 70.2 kV. Faze B i C imaju prenapon na prigušnici od 60 p.u. ili 7020 kV, a na sabirnici -0.6 p.u. ili -70.2 kV. Na slici 3.15. prikazane su oscilacije u fazi B koje prestaju u 0.1016 s kada počinju oscilacije u fazi A, a prestaju u 0.1084 s kada počinju oscilacije u fazi C. Napon na sabirnici se 2 puta povećao u odnosu na prošlu simulaciju.

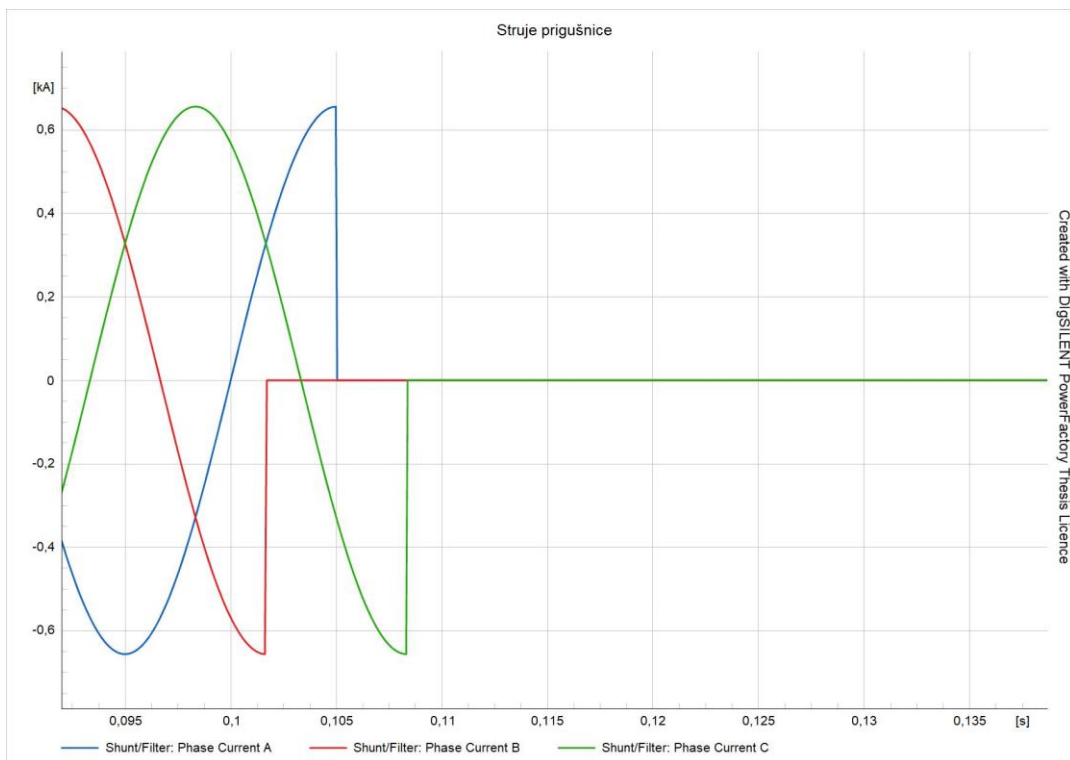


Slika 3.14. Isključenje tri faze prigušnice pri maksimalnoj struji i 100 Mvar





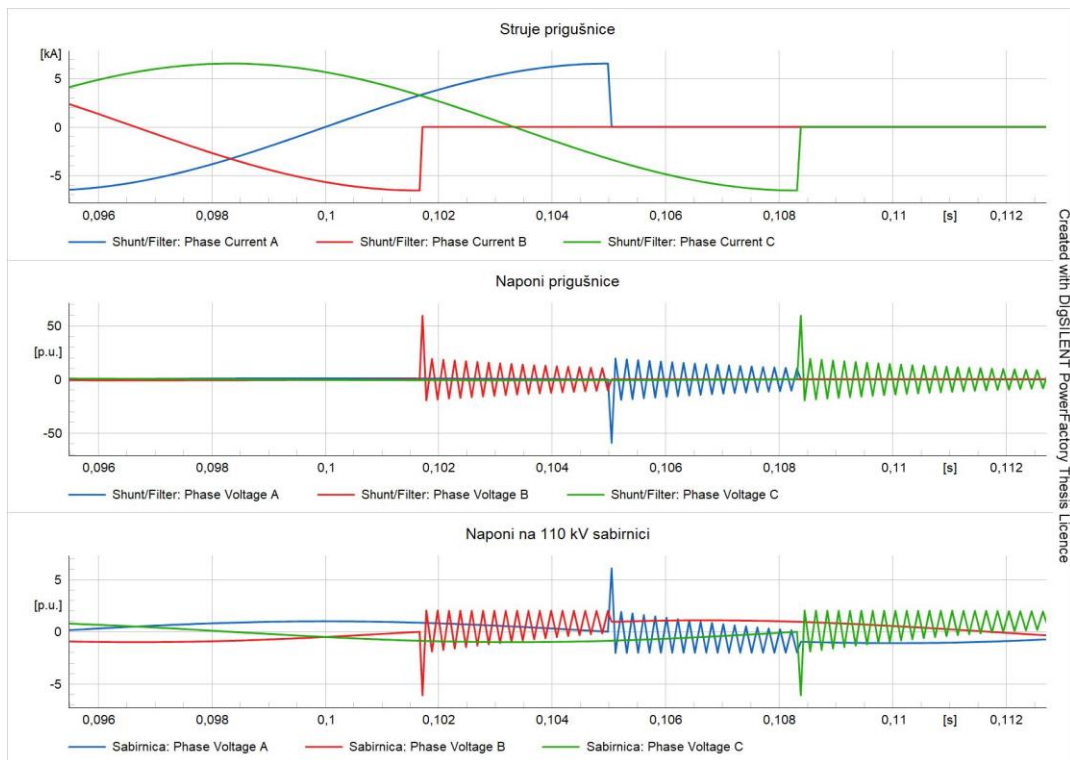
Slika 3.15. Naponi prigušnice jalove snage 100 Mvar



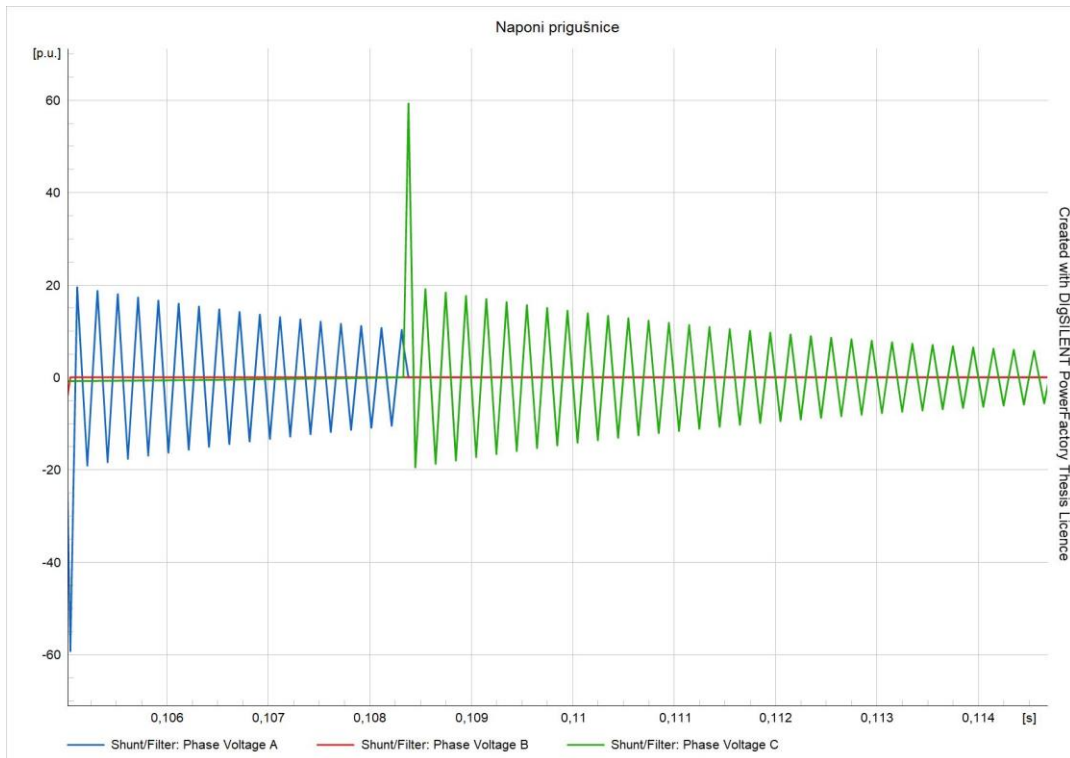
Slika 3.16. Struje prigušnice jalove snage 100 Mvar

### *Prigušnica jalove snage 1000 Mvar.*

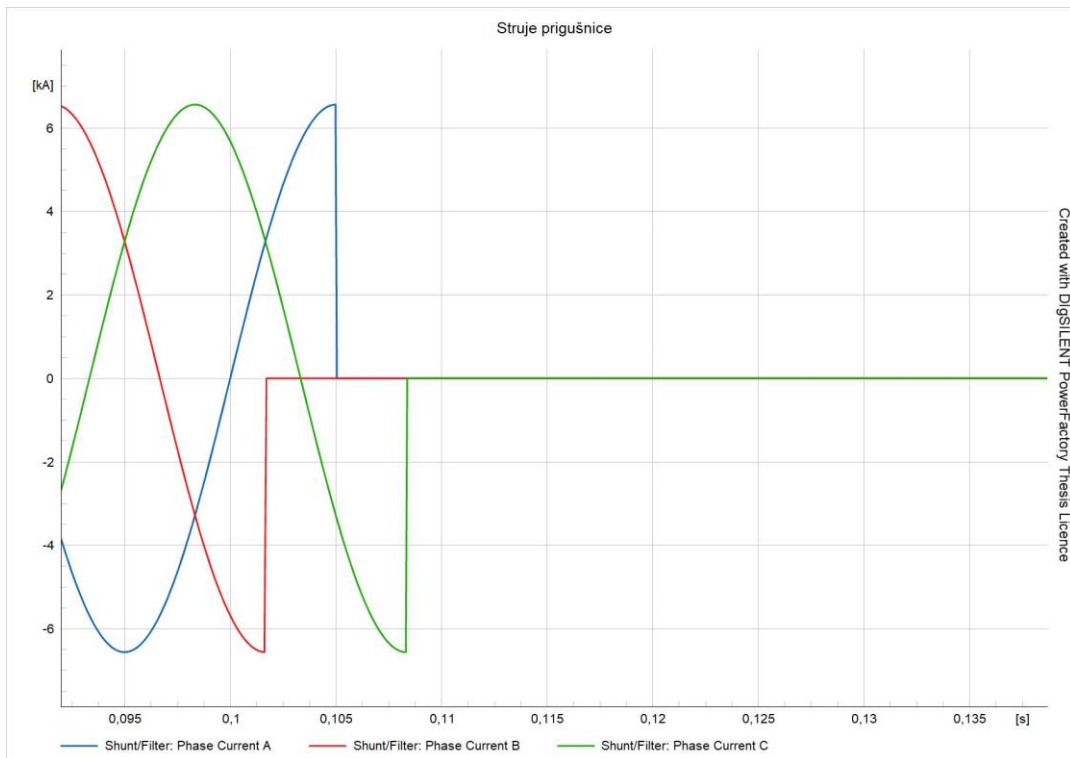
Slikom 3.17. su prikazane struje prigušnice, naponi prigušnice i naponi na sabirnici. Struja faze A prikazana slikom 3.19. je prekinuta pri njenoj vršnoj u 0.105 s vrijednosti od 6.6 kA. Faza B je prekinuta u 0.1016 s pri vrijednosti od -6.6 kA. Faza C je prekinuta u 0.1084 s pri vrijednosti od -6.6 kA. Maksimalni prenapon na prigušnici u fazi A je -60 p.u. ili -7020 kV, a na sabirnici je 6 p.u. ili 702 kV. Faze B i C imaju prenapon na prigušnici od 60 p.u. ili 7020 kV, a na sabirnici -6 p.u. ili 702 kV. Na slici 3.18. prikazane su oscilacije u fazi B koje prestaju u 0.1016 s kada počinju oscilacije u fazi A, a prestaju u 0.1084 s kada počinju oscilacije u fazi C. Napon na sabirnici se 10 puta povećao u odnosu na prošlu simulaciju.



Slika 3.17. Isključenje tri faze prigušnice pri maksimalnoj struji i 1000 Mvar



Slika 3.18. Naponi prigušnice jalove snage 1000 Mvar

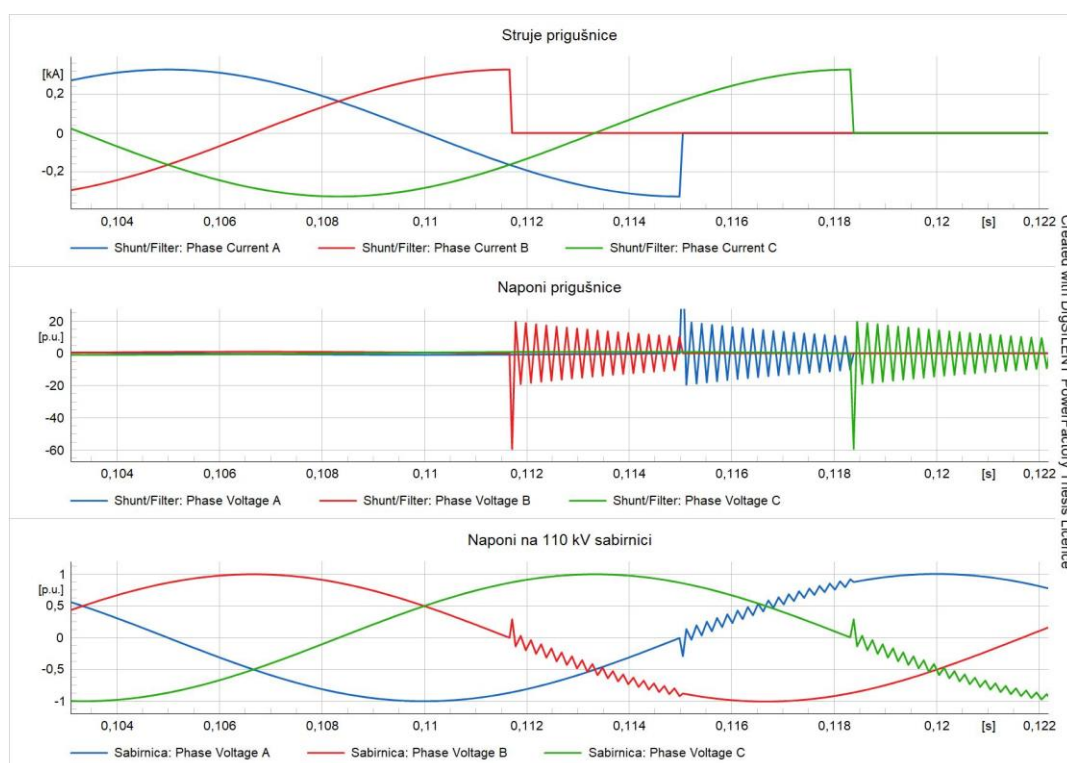


Slika 3.19. Struje prigušnice jalove snage 1000 Mvar

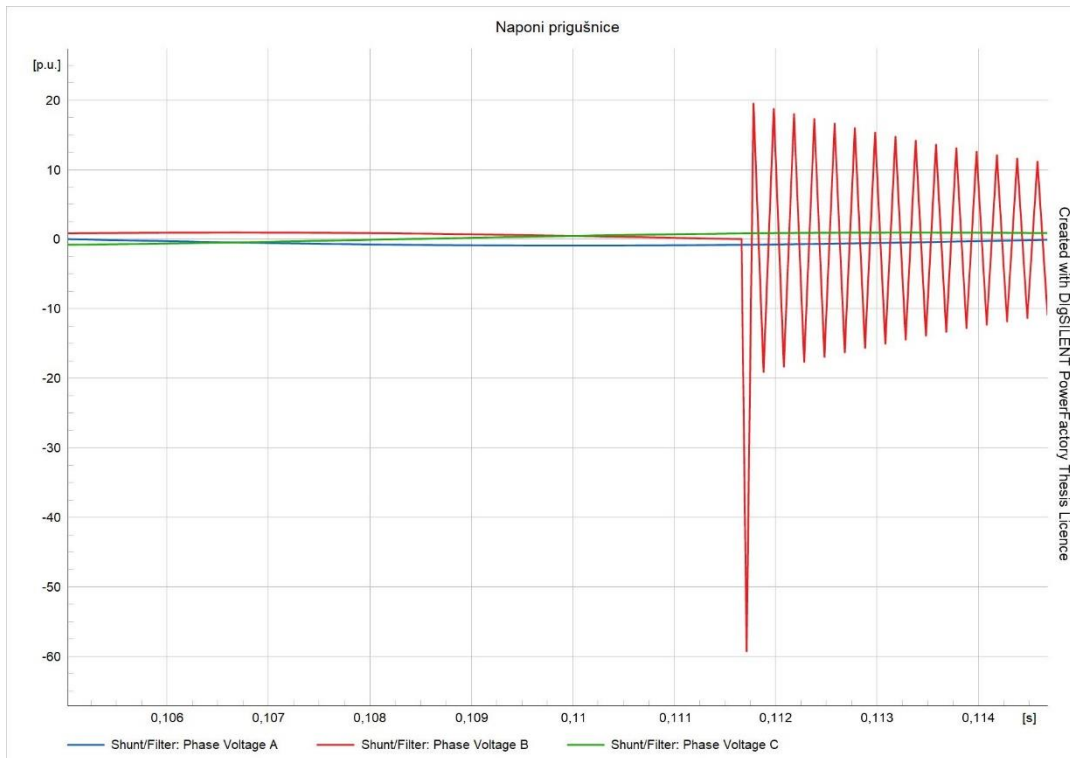
### 3.3. Isklapanje sve tri faze prigušnice prilikom prolaska struje kroz minimum

#### *Prigušnica jalove snage 50 Mvar.*

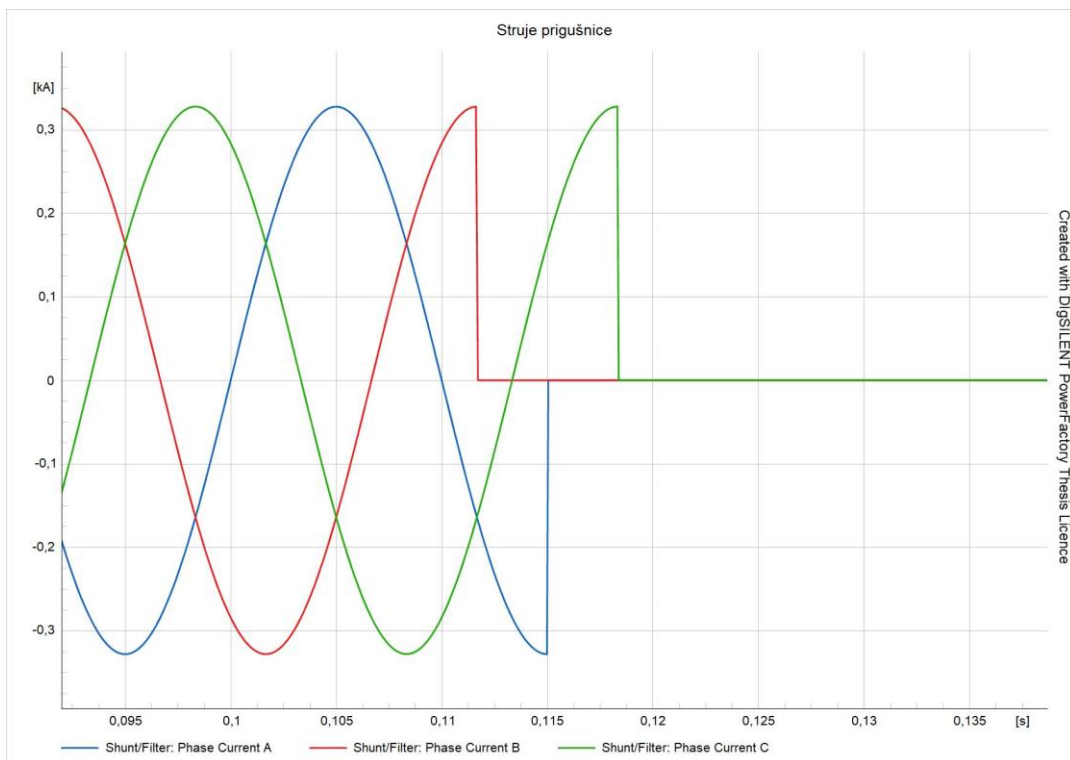
Slikom 3.20. su prikazane struje prigušnice, naponi prigušnice i naponi na sabirnici. Struja faze A prikazana slikom 3.22. je prekinuta u 0.115 s pri vrijednosti od -330 kA. Faza B je prekinuta u 0.1116 s pri vrijednosti od 330 kA. Faza C je prekinuta u 0.1184 s pri vrijednosti od 330 kA. Maksimalni prenapon na prigušnici u fazi A je 60 p.u. ili 7020 kV, a na sabirnici je -0.3 p.u. ili -31.5 kV. Faze B i C imaju prenapon na prigušnici od -60 p.u. ili -7020 kV, a na sabirnici 0.3 p.u. ili 31.5 kV. Na slici 3.21. su prikazane oscilacije u fazi B koje prestaju u 0.1116 s kada počinju oscilacije u fazi A, a prestaju u 0.1184 s kada počinju oscilacije u fazi C.



Slika 3.20. Isključenje tri faze prigušnice pri minimalnoj struji i 50 Mvar



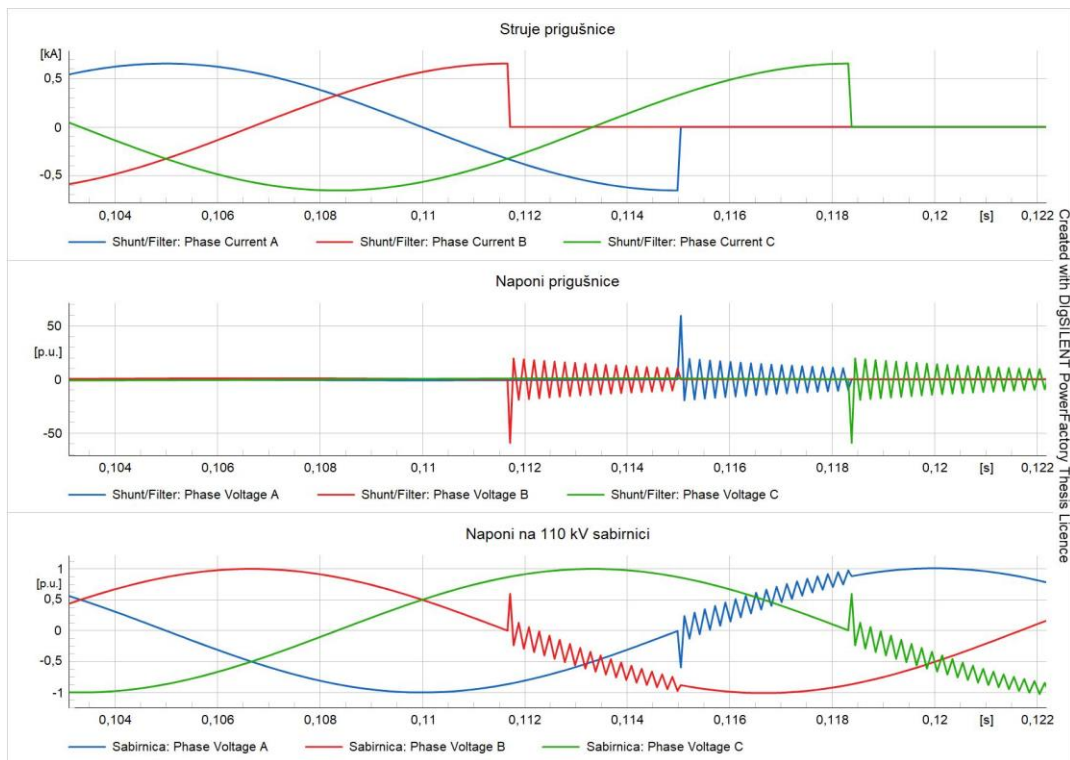
Slika 3.21. Naponi prigušnice jalove snage 50 Mvar



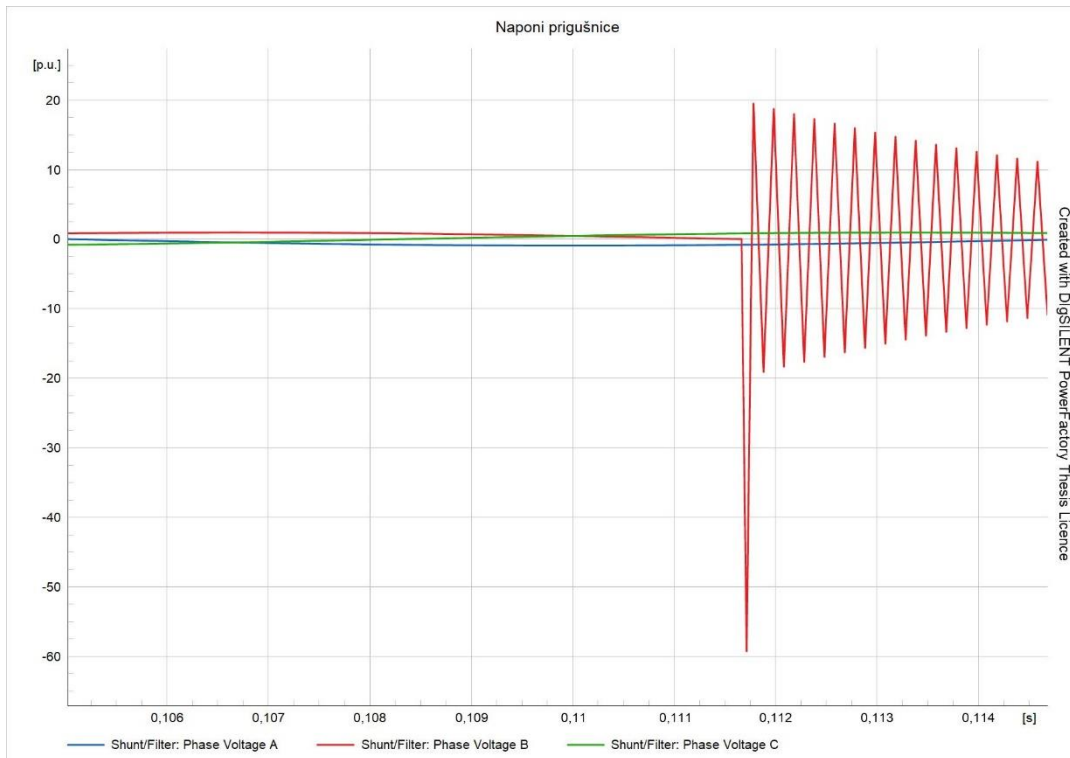
Slika 3.22. Struje prigušnica jalove snage 50 Mvar

### Prigušnica jalove snage 100 Mvar

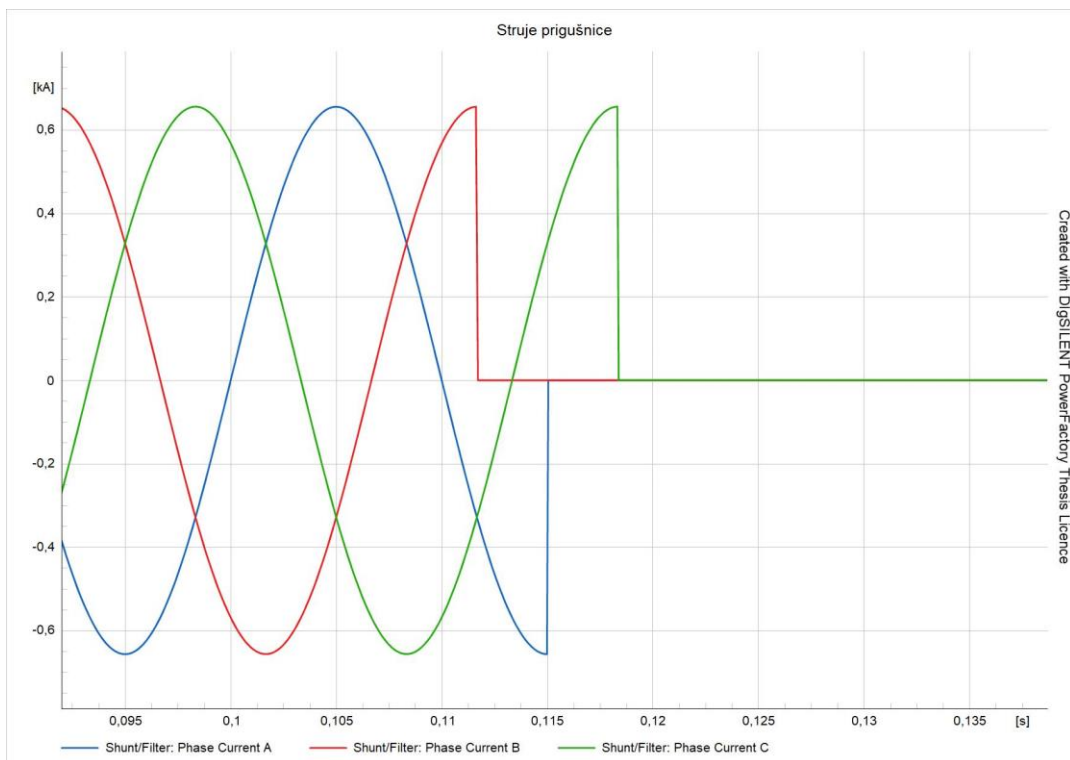
Slikom 3.23. su prikazane struje prigušnice, naponi prigušnice i naponi na sabirnici. Struja faze A prikazana slikom 3.25. je prekinuta u 0.115 s pri vrijednosti od -660 kA. Faza B je prekinuta u 0.1116 s pri vrijednosti od 660 kA. Faza C je prekinuta u 0.1184 s pri vrijednosti od 660 kA. Maksimalni prenapon na prigušnici u fazi A je 60 p.u. ili 7020 kV, a na sabirnici je -0.6 p.u. ili -70.2 kV. Faze B i C imaju prenapon na prigušnici od -60 p.u. ili -7020 kV, a na sabirnici 0.6 p.u. ili 70.2 kV. Slikom 3.24. prikazane su oscilacije u fazi B koje prestaju u 0.1116 s kada počinju oscilacije u fazi A, a prestaju u 0.1184 s kada počinju oscilacije u fazi C. Napon na sabirnici se povećao 2 puta u odnosu na prošlu simulaciju.



Slika 3.23. Isključenje tri faze prigušnice pri minimalnoj struji i 100 Mvar



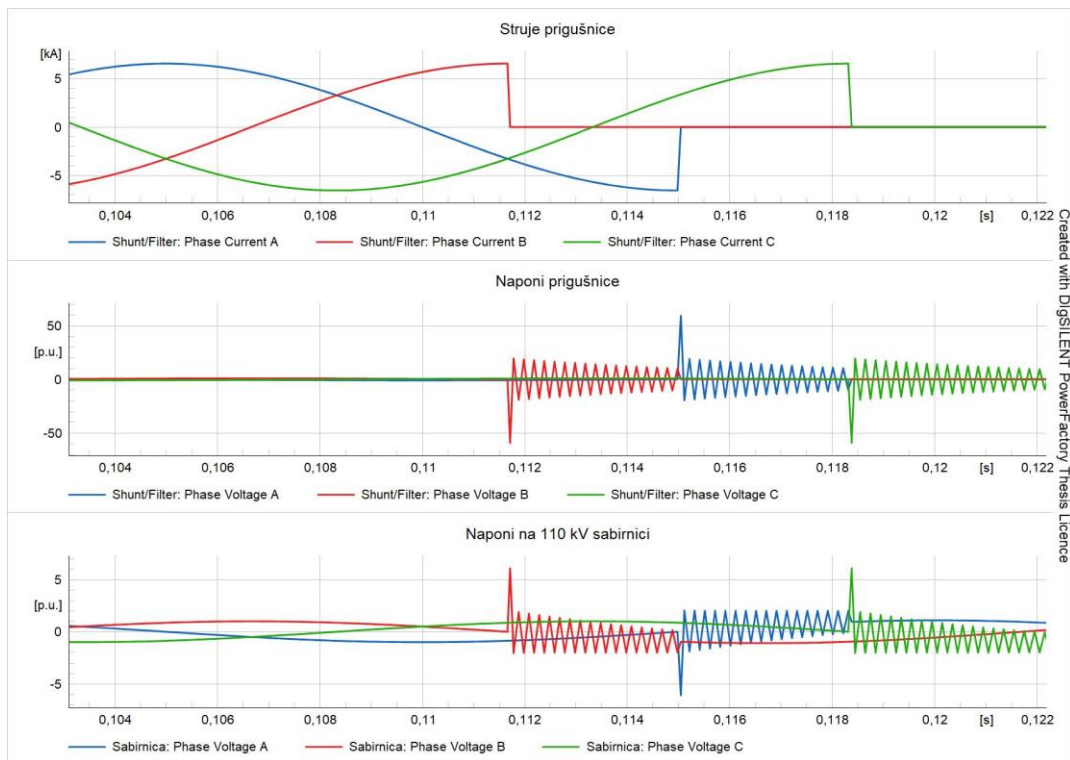
Slika 3.24. Naponi prigušnice jalove snage 100 Mvar



Slika 3.25. Struje prigušnice jalove snage 100 Mvar

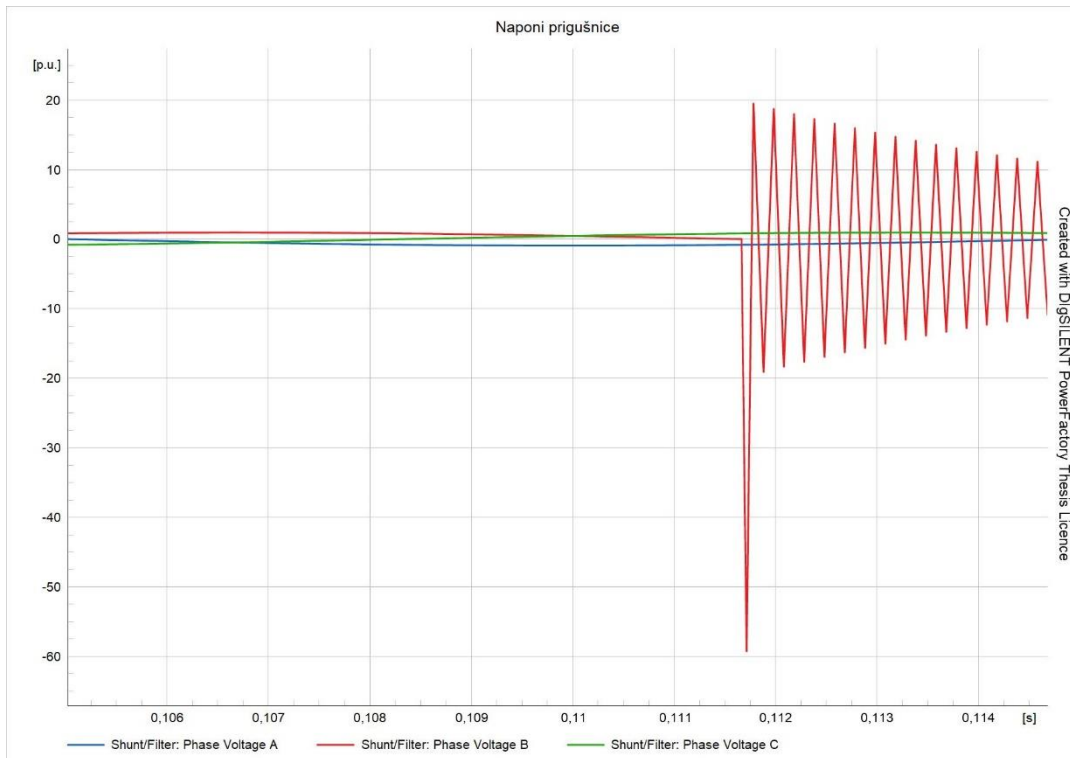
### *Jalova snagu prigušnice od 1000 Mvar.*

Slikom 3.26. su prikazane struje prigušnice, naponi prigušnice i naponi na sabirnici. Struja faze A prikazana slikom 3.28. je prekinuta u 0.115 s pri vrijednosti od -6.6 kA. Faza B je prekinuta u 0.1116 s pri vrijednosti od 6.6 kA. Faza C je prekinuta u 0.1184 s pri vrijednosti od 6.6 kA. Maksimalni prenapon na prigušnici u fazi A je 60 p.u. ili 7020 kV, a na sabirnici je -6 p.u. ili 702 kV. Faze B i C imaju prenapon na prigušnici od -60 p.u. ili 7020 kV, a na sabirnici 6 p.u. ili 702 kV. Slikom 3.27. prikazane su oscilacije u fazi B koje prestaju u 0.1116 s kada počinju oscilacije u fazi A, a prestaju u 0.1184 s kada počinju oscilacije u fazi C. Naponi na sabirnici su se povećali 10 puta.

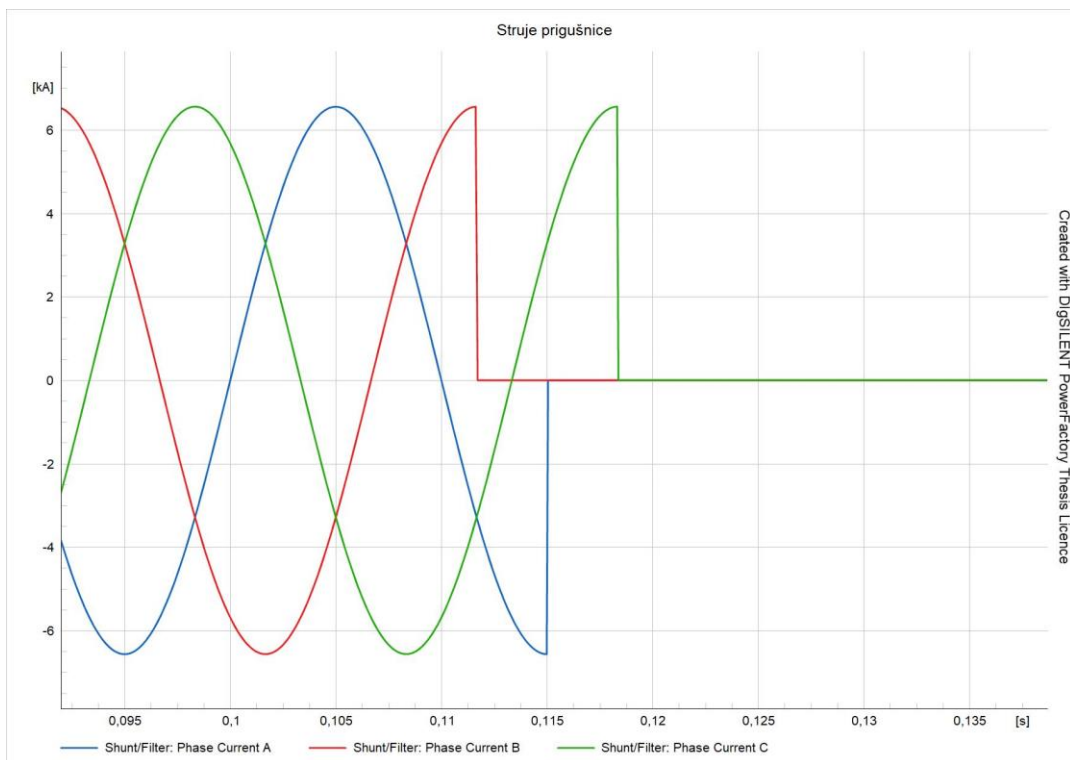


Slika 3.26. Isključenje tri faze prigušnice pri minimalnoj struji i 1000 Mvar





Slika 3.27. Naponi prigušnice jalove snage 1000 Mvar



Slika 3.28. Struje prigušnice jalove snage 1000 Mvar

Prilikom isklopa jedne faze prigušnice uočavamo da se prenapon stvara i na prigušnici i na sabirnicama. Povećanjem reaktancije prigušnice prenapon na prigušnici ostaje isti, ali se prenapon na sabirnicama proporcionalno povećava. Kod isključenja sve tri faze prigušnice pri maksimalnoj vrijednosti uočavamo da prenapon faze A na prigušnici i na sabirnici teži prema minimalnoj vrijednosti, ostale dvije faze idu u maksimalnu vrijednost. Prilikom isključenja sve tri faze prigušnice prolaskom struje kroz minimalnu vrijednost uočavamo da prenapon faze A na prigušnici i na sabirnici ide u maksimalnu vrijednost, ostale dvije faze idu u minimalnu vrijednost. Prilikom isključenja sve tri faze oscilacije počinju kada napon na sabirnici prirodno prolazi kroz nulu i prestaju kada se isključuje druga faza.

#### **4. Zaključak**

U ovom radu su opisani prijelazni procesi isključenja visokonaponske prigušnice pri jalovim snagama 50 Mvar, 100 Mvar i 1000 Mvar. Simulacija je obavljena u programskom paketu DigSilent Power Factory. Prenapni na prigušnici ostali su isti kroz sve simulacije i iznosili su 7020 kV. Kod prigušnice jalove snage 50 Mvar prenaponi na sabirnici na koju je prigušnica priključena su bili iznosa 31.5 kV uvelike su manji od prenapona na sabirnici na koju je priključena prigušnica jalove snage 1000 Mvar iznosa 702 kV. Kod isključenja sve tri faze prigušnice pri maksimalnoj vrijednosti struje prenaponi nastali u fazi A su negativnog predznaka iznosa -7020 kV, dok su kod isključenja pri minimalnoj vrijednosti struje prenaponi u fazi A pozitivnog predznaka iznosa 7020 kV. Zbog prekida struje prije njenog prolaska kroz nulu oslobađa se akumulirana energija kroz oscilacije. Prilikom isključenja sve tri faze oscilacije počinju kada napon na sabirnici prolazi kroz nulu, a prestaju kada se isključuje druga faza.

## Literatura

- [1] B.Đikić, V.Ravlić, B. Filipović-Grčić, I.Uglašić, Prenaponska zaštita regulirane prigušnice nazivne snage 200MVAR u TS Melina, Cigre, Šibenik, 2017
- [2] Z. Klaić, M. Primorac, M. Žnidarec, Kvaliteta električne energije 3, Ferit, Osijek, 2022
- [3] Ivo Uglašić, Tehnika visokog napona, Fer, Zagreb, 2002
- [4] G. Levačić, A. Župan, I. Uglašić, B. Filipović-Grčić, Problematika ugradnje kompenzacijskih uređaja u prijenosnoj elektroenergetskoj mreži, Cigre, Šibenik, 2017
- [5] D.Peelo, Shunt Reactor Switching: Theory and Practice, IEEE Power & Energy Society, Atalanta, 2019.
- [6] I. Uglašić, M. Krepela, B. Filipović-Grčić, F. Jakl, S.Hutter, Transients Due to Switching of 400kV Shunt Reactor, International Conference on Power Systems Transients, Rio de Janeiro, 2001
- [7] Danish Energy Association, Research and Development , Recommendation 28 10-400 kV oil-immersed shunt reactors 3rd edition, Danska, March 2019
- [8] B. Filipović-Grgić, I. Uglašić, M.Krpela, A.Župan, D.Mihalic, Prenaponi uzrokovani sklapanjem 420 kV regulacijske prigušnice, Cigre, Šibenik, 2015
- [9] M. Greganić, I. Petrović, K. Tačković, Mogućnost održavanja napona u prijenosnoj mreži nakon ulaska u pogon DV 2x400kV Ernestinovo-Pecs, Cigre, Zadar, 2010

## **Sažetak**

U završnom radu se prikazuje isključenje visokonaponske prigušnice modelirane u DigSilent Power Factory programu instalirane jalove snage 50 Mvar, 100 Mvar i 1000 Mvar. U programskom paketu je provedeno 9 simulacija. Isključenje faze prigušnice se ne odvija trenutno zbog akumulirane energije u prigušnici. Isključenje jedne faze prigušnice u maksimalnoj vrijednosti struje stvara oscilacije na sabirnici i na prigušnici. Maksimalna vrijednost prenapona se povećava povećanjem reaktancije prigušnice. Prilikom isključenja sve tri faze prigušnice u maksimalnoj vrijednosti u fazi A se stvara prenapon na prigušnici kojem je maksimalna vrijednost negativnog predznaka, za razliku kod isključenja u minimalnoj vrijednosti gdje se stvara prenapon na prigušnici pozitivnog predznaka. Prilikom isključenja sve tri faze prigušnice oscilacije na prigušnici i sabirnici prestaju nakon isključenja sljedeće faze.

Ključne riječi: visokonaponska prigušnica, prenaponi, jalova snaga, Ferrantijev efekt

## **Abstract**

In the final paper, the disconnection of the high-voltage shunt modeled in the DigSilent Power Factory program installed reactive power 50Mvar, 100Mvar i 1000Mvar. 9 simulation were carried out in the program package. Shutdown of the shunt phase does not take place at the moment due to the accumulated energy in the shunt. Switching off one phase of the choke at the maximum value of the current creates oscillations on the bus and on the choke. The maximum overvoltage value increases by increasing the choke reactance. When switching off all three phases of the choke at the maximum value in phase A, an overvoltage is created on the choke with a maximum value of negative sign, unlike when switching off at a minimum value, where an overvoltage is created on the choke with a positive sign. When switching off all three phases of the choke, the oscillations on the choke and the bus stop after switching off the next phase.

Key words: high-voltage shunt reactor, surges, reactive power, Ferranti effect