

# Analiza sklopnih prenapona u distributivnim mrežama primjenom Matlab-SimPowerSystemsa

---

**Paulin, Josip**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*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:200:793974>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-10**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Stručni studij**

**Analiza sklopnih prenapona u distributivnim mrežama  
primjenom Matlab-SimPowerSystemsa**

**Završni rad**

**Josip Paulin**

**Osijek, 2020**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1S: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za završni ispit na preddiplomskom stručnom studiju**

Osijek, 21.09.2020.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za završni ispit  
na preddiplomskom stručnom studiju**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Josip Paulin
<b>Studij, smjer:</b>	Preddiplomski stručni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	A 4444, 17.09.2019.
<b>OIB studenta:</b>	58922073560
<b>Mentor:</b>	Dr. sc. Krešimir Miklošević
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	Dr. sc. Željko Špoljarić
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	Dr. sc. Krešimir Miklošević
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	Zorislav Kraus
<b>Naslov završnog rada:</b>	Analiza sklopnih prenapona u distributivnim mrežama primjenom Matlab-SimPowerSystemsa
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rada</b>	Student mora opisati aktualne znanstvene i praktične dosege u području analize sklopnih prenapona. Između ostaloga opisati koje se najslabije metode ili tehnike koriste u svrhu iste a koristiti će se i u završnom radu. Na osnovu dostupne literature iz područja prijelaznih pojava u distributivnim mrežama analizirati vrste i karakteristike istih. Detaljno opisati matematički i simulacijski model dalekovoda i simulirane mreže. Usmjeriti istraživanje prema visokofrekvencijskim sklopnim prenaponima. Razviti jednostavan simulacijski primjer uklopa (isklopa) dalekovoda (kabela) u Matlab-SimPowerSystemsu. Na osnovu razvijenog modela distributivne mreže simulirati i dokumentirati karakteristično prijelazno stanje.
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (završnog rada):</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	21.09.2020.
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, 04.10.2020.

Ime i prezime studenta:	Josip Paulin
Studij:	Preddiplomski stručni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	A 4444, 17.09.2019.
Turnitin podudaranje [%]:	3

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Analiza sklopnih prenapona u distributivnim mrežama primjenom Matlab-SimPowerSystemsa**

izrađen pod vodstvom mentora Dr. sc. Krešimir Miklošević

i sumentora

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

Potpis studenta:

# Sadržaj

1. Uvod.....	1
1.1 Zadatak završnog rada.....	1
2. Distribucijske mreže.....	2
3. Prenaponi.....	3
3.1. Vrste prenapona.....	3
3.2. Nastajanje prenapona.....	4
3.3. Sklopni prenaponi.....	4
3.4. Softverski alati za simulaciju prenapona u distributivnim mrežama .....	5
4. Matematički model simulirane mreže.....	7
4.1. Matematičko modeliranje trofaznog simuliranog izvora.....	7
4.2. Matematičko modeliranje energetskog voda.....	8
4.3. Matematičko modeliranje dvonamotnog trofaznog transformatora.....	10
4.4. Matematičko modeliranje SN prekidača.....	13
4.5. Matematičko modeliranje potrošača.....	13
5. Simulacijski model testne simulirane mreže u Matlab – SimPowerSystemsu.....	15
5.1. Matlab – SimPowerSystems.....	15
5.2. Simulacijsko modeliranje distributivne mreže u Matlab – SimPowerSystemsu.....	16
5.3. Simulacijsko modeliranje komponenti distributivne mreže u Matlab – SimPower Systemsu....	17
5.4. Simulacijski model trofaznog izvora.....	17
5.5. Simulacijski model energetskog voda.....	20
5.6. Simulacijski model dvonamotnog trofaznog transformatora.....	22

5.7. Simulacijski model SN prekidača.....	24
5.8. Simulacijski model potrošača.....	25
6. Analiza snimljenih odziva simulirane distributivne mreže.....	28
6.1. Utjecaj visine sklopnog prenapona o vremenu ispada tereta.....	29
6.2. Utjecaj visine sklopnog prenapona o vrijednosti tereta.....	35
7. Zaključak.....	38
LITERATURA.....	39
SAŽETAK.....	40
ABSTRACT.....	41
ŽIVOTOPIS.....	42

# 1. UVOD

Današnje razvijene tehnologije čiji rad se bazira na korištenju električne energije, za ostvarivanje bilo kakvih učinaka za posao ili zabavu, traže mogućnost konstantnog i kvalitetnog dotoka električne energije koja mora proći kroz ključne dijelove elektroenergetskog sustava da bi došla do krajnjeg korisnika. Kao takav elektroenergetski sustav važno je jako dobro poznavati i vrlo je važno održavanje sustava kako bi se električna energija mogla neometano isporučivati krajnjim korisnicima. Za održavanje sustava potrebno je izvršavati sklopne operacije u samom sustavu, što za posljedicu može imati povišenje napona. Takva povišenja napona nazivamo sklopnim prenaponima i vrlo ih je važno analizirati i pokušati ih neutralizirati kako ne bi došlo do oštećenja elemenata u sustavu, te isto tako i do ispada sustava što bi dovelo do velikih gubitaka i zastoja rada velikih pogona.

Stoga ćemo u ovom završnom radu, nakon uvodnog dijela, u drugom poglavlju vidjeti što je to distribucijska mreža i od čega se sastoji elektroenergetski sustav. U trećem se poglavlju opisuju vrste prenapona, te njihovo nastajanje u sustavima. Osim toga u trećem poglavlju opisan je i sklopni prenapon kojeg u ovom završnom radu i analiziramo. Četvrto poglavlje opisuje matematičke modele pojedinih elemenata simulirane mreže, dok su u petom poglavlju opisani simulacijski modeli elemenata mreže kao parametriranje elemenata. Peto poglavlje isto tako opisuje i softverski alat koji je korišten za simulaciju mreže, te se ukratko uspoređuje sa drugim programima. U šestom poglavlju, na osnovu snimljenih naponskih signala, analizirani su sklopni prenaponi dobiveni simulacijom za dva različita utjecaja. U prvom podpoglavlju šestog poglavlja analiziran je utjecaj visine vrijednosti prenapona o vremenu isklapanja dok je u drugom podpoglavlju analiziran utjecaj visine vrijednosti prenapona o vrijednosti opterećenja, te je u sedmom poglavlju iznesen zaključak.

## 1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak ovog završnog rada opisati je metode koje se koriste pri analizi sklopnih prenapona, te nabrojati i opisati sklopne prenapone koji se javljaju u elektroenergetskom sustavu. Potrebno je opisati aktualne znanstvene i praktične dosege u području analize sklopnih prenapona, te izraditi jednostavan simulacijski model uklopa (isklopa) dalekovoda (kabela) u Matlab-SimPowerSystemsu, simulirati i dokumentirati karakteristično prijelazno stanje.

## 2. DISTRIBUCIJSKE MREŽE

Prema [2] distribucijske mreže jedan su od četiri dijela od kojih se sastoji elektroenergetski sustav, a to su proizvodnja električne energije, prijenosna mreža, distribucijska mreža i kao zadnja potrošnja električne energije. Električna energija iz prijenosnog sustava preko transformatora, najčešće 110/35 kV, odlazi u distribucijski sustav koji se dijeli na dva dijela:

- Srednjenaponska mreža – nazivnih napona 35 kV, 20 kV i 10 kV
- Niskonaponska mreža – nazivnog napona 0,4 kV

U Hrvatskoj se zadnjih nekoliko godina uvode transformatori 110/20 kV i 20/0,4 kV sa ciljem skorašnje eliminacije 35 kV-nog i 10 kV-nog naponskog nivoa i zamjena sa 20 kV-nim naponskim nivoom.

U distribucijsku mrežu električna energija osim iz prijenosne mreže dolazi i iz manjih elektrana koje su manjih snaga u odnosu na elektrane koje svoju energiju šalju u prijenosnu mrežu i blizu su ruralnog područja ili nekog većeg postrojenja, te se samim tim jednim dijelom energija utroši blizu same elektrane.

Kako u prijenosnoj mreži, tako i u distribucijskoj mreži za prijenos električne energije koriste se kabeli i zračni vodovi koji povezuju transformatorska postrojenja i same potrošače. Zračni vodovi se najčešće koriste za udaljena mjesta do koji je potrebno dovesti električnu energiju, dok se kabeli najčešće koriste u gradovima i mjestima gdje nije moguće provesti zračni vod. Stoga se na određenu dubinu, ovisno o mogućnostima, ukopavaju kabeli u zemlju.

Struktura distribucijskih mreža ovisi najčešće o području za koje se gradi. Kod srednjenaponskih razina (10 kV, 20 kV i 35 kV) najčešće je struktura prstenasta, što kao glavnu značajku ima dvostrano napajanje, te prilikom kvara na jednom dijelu voda, isporuka električnom energijom može biti drugim krajem koji je u funkciji sve dok se kvar ne otkloni. Dok na niskonaponskoj razini (0,4 kV) mreža je zamkastog tipa, gdje do nekih potrošača dolazi dvostrano napajanje vod, a kod nekih dolazi vod napajanje samo sa jedne strane. Zamkaste mreže u distribucijskom sustavu najčešće možemo vidjeti u gradovima, gdje je konfiguracija mreže određena urbanističkim planom.



### **3. PRENAPONI**

Za sve kabele i vodove definiran je nazivni, odnosno pogonski napon koji taj kabel ili vodič može podnijeti, tj. napon koji može podnijeti izolacija tog kabela ili voda pri tome da ne dođe do proboja izolacije. Prilikom proboja izolacije između dva vodiča različitih potencijala ili između vodiča i zemlje dolazi do stvaranja električnog luka koji za sobom ostavlja neželjene posljedice na opremi u postrojenjima radi stvaranja velike temperature. Sve vrijednosti napona koje prelaze najvišu vrijednost napona, pri kojoj je dio mreže još uvijek u pogonskom stanju, određenog dijela mreže nazivaju se prenaponi. Prenaponi mogu nastati iz prirodnih pojava, prilikom kvara (zemljospoj), Ferrantijevim efektom, te prilikom uklopa/isklopa djela mreže i dr.. Trajanje prenapona može se izraziti u milisekundama, ali ponekad čak i u sekundama, te se prema tome dijeli na privremene prenapone i prijelazne prenapone. Privremeni prenapon se definira kao prenapon pri pogonskoj frekvenciji relativno dugog trajanja, te može biti neprigušen ili slabo prigušen, dok u nekim slučajevima njegova frekvencija može biti nekoliko puta manja ili veća od pogonske, a prijelazni prenapon se definira kao kratkotrajni prenapon, trajanja nekoliko milisekundi, te jako prigušen [1].

#### **3.1. Vrste prenapona**

Postoje različiti prenaponi koje klasificiramo prema njihovom obliku, nastajanju i trajanju. Prema trajanju prenapone dijelimo na privremene i prijelazne, dok u nekim slučajevima postoji i kombinacija oba slučaja. Privremeni prenapon dužeg je trajanja od prijelaznog, te je slabije prigušen ili čak neprigušen dok je prijelazni prenapon jako prigušen. Podjela prenapona prema nastajanju može se opisati atmosferskim prenaponima koji nastaju prilikom atmosferskih pražnjenja i sklopnim prenaponima koji nastaju prilikom sklopnih manevara u elektroenergetskom sustavu. Prema obliku, prenaponi se dijele na prenapone polaganog porasta čela, prenapone brzog porasta čela i na prenapone vrlo brzog porasta čela što zapravo ovisi o trajanju čela [5].

## **3.2. Nastajanje prenapona**

Nastajanje prenapona iz prirodnih pojava događa se prilikom atmosferskih pražnjenja, odnosno prilikom udara groma između naelektriziranog oblaka i zemlje, te se takve vrijednosti napona mogu opisati sa nekoliko milijuna volti. Pri tim vrijednostima napona zrak više nije dovoljan izolator te dolazi do proboja i stvaranja električnog luka unutar oblaka, između oblaka ili prema tlu, što se može vidjeti na velikim udaljenostima.

Usljed kvarova u mreži također dolazi do stvaranja prenapona čija vrijednost ovisi o raznim čimbenicima kvarova, kao što su: mjesto kvara, vrsta kvara, udaljenost od izvora električne energije i dr. Kvar u distributivnoj mreži može se najbolje opisati kao pad jedne faze dalekovoda i spoja sa zemljom.

Nastajanje prenapona Ferrantijevim efektom događa se na dugačkom dalekovodu koji je slabo opterećen ili je neopterećen, te se na kraju dalekovoda zbog dozemnih kapaciteta napon povećava u odnosu na napon na početku voda. Taj napon je veći što je dalekovod duži i što je na većem naponskom nivou. Prenapon koji je nastao Ferrantijevim efektom izraženiji je kod kablova položenih u zemlju nego kod nadzemnih vodova, jer postoji veća kapacitivnost.

Nastajanje prenapona prilikom uklopa/isklopa jednog dijela mreže od drugog koji je pod naponom nazivamo još i sklopni prenaponi koje ćemo u ovom radu detaljnije proučiti.

## **3.3. Sklopni prenaponi**

Sklopni prenaponi su vrijednosti napona, nekog djela mreže, viši od najviše dozvoljene vrijednosti napona, a koji najčešće nastaju prilikom sklapanja nekakvog dugog voda, prilikom gubitka tereta ili prilikom nastanka kvara u mreži.

Kako bi elektroenergetski sustav radio besprijekorno, nužno ga je redovito održavati i raditi remonte na pojedinim dijelovima postrojenja, što za posljedicu ima gašenje djela mreže ili postrojenja, odnosno dovođenje u beznaponsko stanje kako bi terenske ekipe mogle izvršiti sve potrebne radnje u postrojenju. Isto tako prilikom kvarova je potrebno isklapanje dijela mreže u kojoj se dogodio kvar kako ne bi došlo do još većih oštećenja opreme. Prilikom isklapanja djela mreže ili postrojenja,

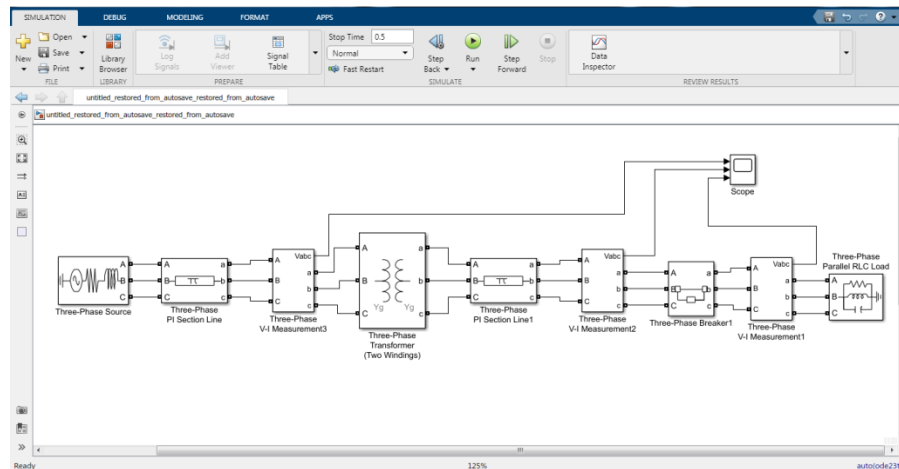
dolazi do prekidanja struje što za posljedicu ima povišenje napona koji prilikom pomicanja kontakata stvara električni luk i veliku količinu topline što može oštetiti prekidačku i rastavljačku opremu. Nakon isklapanja, u vodu se može zadržati električni naboj što će za posljedicu kod ponovnog uklapanja na napon pogonske frekvencije dovesti do još većih vrijednosti napona. Visina vrijednosti napona ovisi o kojoj naponskoj razini je riječ, odnosno o konfiguraciji mreže u kojoj se događa sklopni manevar, te ovisi o snazi kratkog spoja i o karakteristikama opreme u postrojenju.

Trajanje sklopnih prenapona najčešće je u milisekundama, gdje u samom početku dolazi do velikih titraja do dva puta veće vrijednosti od nazivne, te se sa vremenom titraji i vrijednost napona smanjuju i stabiliziraju u nazivnu vrijednost napona. No vrlo je važno napomenuti da i u tako kratkom roku može doći do velikih oštećenja postrojenja i opreme u postrojenju, stoga je vrlo važno pažljivo i točno dimenzionirati sve potrebe zaštitne elemente kako bi se takve iznenadne situacije ublažile ili po mogućnosti u potpunosti uklonile.

Zaštita od prenapona vrši se pomoću odvodnika prenapona koji se ponašaju poput nelinearnih otpora, čiji se iznos mijenja u ovisnosti o vrijednosti narinutog napona. Osim odvodnika prenapona koriste se i prigušni otpornici za sprječavanje visokih prenapona nakon isklapanja dijela mreže u kojoj je preostao električni naboj [5.]

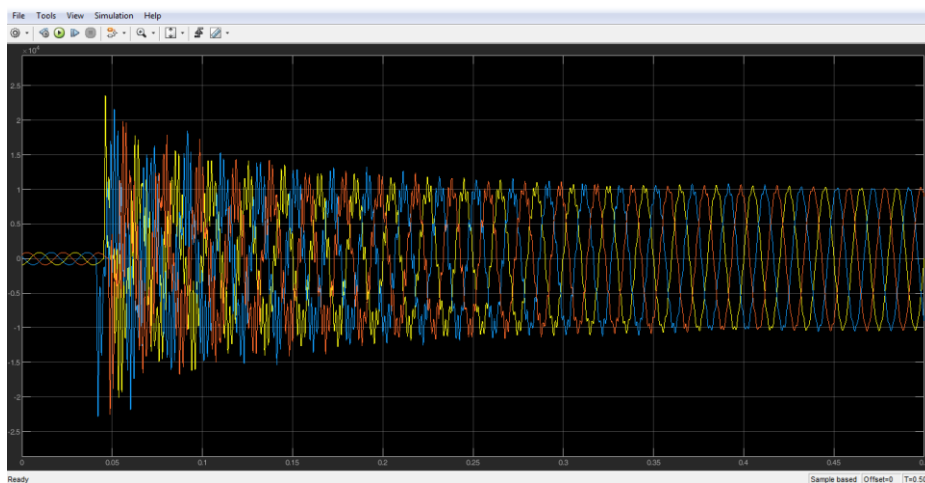
### **3.4. Softverski alati za simulaciju prenapona u distributivnim mrežama**

Zbog same sigurnosti ljudi, samim time i očuvanja opreme, izravno mjerenje bilo kakvih prenapona u postrojenjima je nepreporučljivo i nesigurno, a kako bi smanjili, odnosno eliminirali mogućnost nastanka prenapona vrlo je važno istražiti i analizirati njihov nastanak i izgled za vrijeme trajanja pojave, te analizirati sve moguće posljedice takve pojave, samim tim kako bi mogli dimenzionirati zaštitu sustava. Stoga su znanstvenici iz područja elektrotehnike i informatike razvili raznolike računalne programe, odnosno simulatore kojima se mogu analizirati bilo kakva stanja u elektroenergetskom sustavu, pa tako i sklopni prenaponi. Potrebno je stvoriti mrežu koju želimo promatrati i unijeti parametre mreže koji su nam potrebni kako bi dobili valjane rezultate, te je potrebno pokrenuti simulaciju, snimiti i analizirati dobivene numeričke i grafičke vrijednosti. Jedan takav simulator koji ćemo koristiti u ovom završnom radu za analizu sklopnih prenapona je Matlab – SimPowerSystems.



**Slika 3.1.** Matlab softverski alat za simulaciju sklopnog prenapona - sučelje za izradu simulirane mreže

Osim Matlab – SimPowerSystemsa postoje i drugi alati za simulacije sklopnih prenapona kao što su EasyPower i EMTP prema [12], koji se međusobno razlikuju i najčešće su međusobno neovisni, što za svaki program predstavlja nekakve prednosti i nedostatke u odnosu na drugi program. EasyPower je jednostavan program koji će za simuliranu mrežu prikazati tokove snaga, struje kratkog spoja, padove napona na pojedinim dijelovima sustava i sl. dok kod Matlab–SimPowerSystemsa možemo snimiti valne oblike pojedinih signala i izraditi razna mjerenja, te imamo različitih drugih mogućnosti što ga isto tako čini malo kompliciranijim za korištenje.



**Slika 3.2.** Matlab softverski alat za simulaciju sklopnog prenapona – sučelje za prikaz signala

## 4. MATEMATIČKI MODEL SIMULIRANE MREŽE

U poglavlju matematičkog modeliranja simulirane distributivne mreže, svaki od elemenata pojedinačno će biti razmatran i analiziran. Matematičkim modelom objasniti će se sustav i proučiti utjecaj različitih komponenti na sam sustav, te će se pomoću toga moći predvidjeti ponašanje sustava za vrijeme sklopnih prenapona, kako bi se smanjile štetne posljedice koje utječu na pojedine elemente sustava. Simulacijskim modeliranjem nije moguće utvrditi utjecaj svih komponenta na sustav, te se zbog toga provodi matematičko modeliranje elemenata simulirane mreže.

### 4.1. Matematičko modeliranje trofaznog simuliranog izvora

Model trofaznog izvora, koji zapravo predstavlja krutu trofaznu elektroenergetsku mrežu, predstavljen je uz pomoć elektromotorne sile  $E$  serijski spojene sa impedancijom mreže koju predstavljaju dva elementa. Impedanciju mreže predstavljaju djelatni otpor  $R$  serijski vezan sa induktivitetom, odnosno induktivnom reaktancijom  $X_L$ . Napon koji se generira iz modela trofaznog izvora sinusnog je oblika i možemo ga predstaviti kao razliku elektromotorne sile  $E$  i pada napona zbog impedancije  $Z$ .

Impedancija

$$Z = R + j \cdot X_L \quad (4-1)$$

Napon generiran iz modela trofaznog izvora

$$\bar{U} = \bar{E} - \bar{I} \cdot Z \quad (4-2)$$

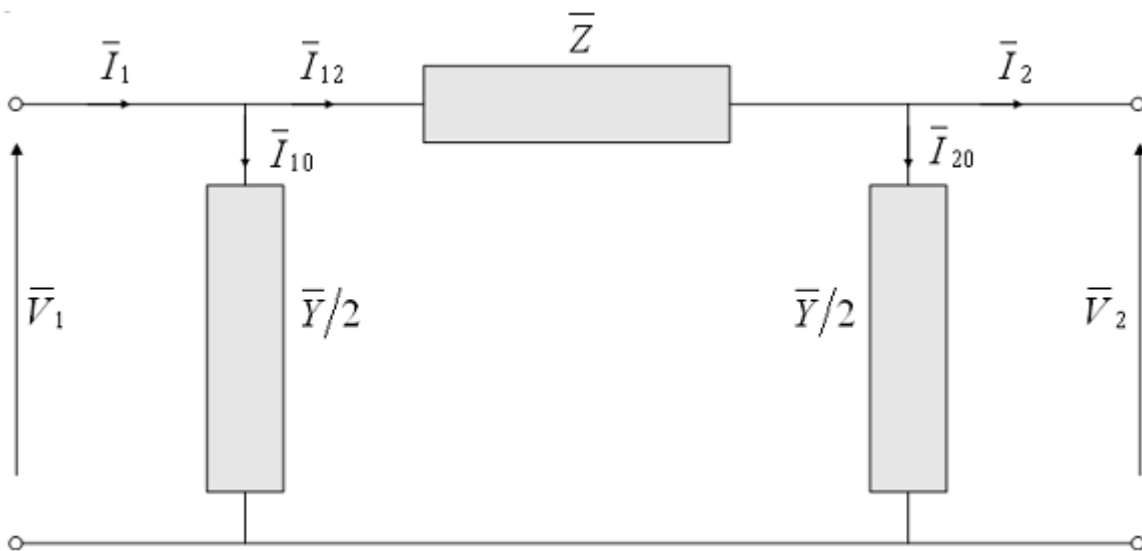
$$\bar{U} = \bar{E} - \bar{I} \cdot (R + j \cdot X_L) \quad (4-3)$$



**Slika 4.1.** Model trofaznog izvora

## 4.2. Matematičko modeliranje energetskog voda

Za modeliranje energetskog voda postoji nekoliko tehnika modeliranja, ali se jedna od tih tehnika najčešće koristi, a to je  $\pi$  model, odnosno  $\pi$ -shema voda (PI shema voda) koja će se koristiti i u ovom završnom radu.  $\pi$ -shema se koristi za proračune simetričnih prilika u mreži za vodove duljine do 200 km, jer pri korištenju  $\pi$ -sheme pri duljinama većim od 200 km dolazi do većih odstupanja od prave vrijednosti, odnosno pojavljuje se greška u rezultatu. Prema  $\pi$ -shemi voda prikazanoj na slici 4.2. možemo vidjeti kako se vod sastoji od uzdužne grane i od poprečnih grana [8].



Slika 4.2.  $\pi$ -shema voda [8]

Impedancija uzdužne grane jednaka je izrazu:

$$\bar{Z} = R_1 \cdot L + j \cdot X_1 \cdot L \quad (4-4)$$

Admitancija poprečnih grana jednaka je izrazu:

$$\bar{Y} = G_1 \cdot L + j \cdot B_1 \cdot L \quad (4-5)$$

Gdje je

- $L$  – duljina voda [km]
- $R_1$  – jedinični otpor [ $\Omega/\text{km}$ ]

- $X_1$  – jedinična reaktancija [ $\Omega/\text{km}$ ]
- $G_1$  – jedinična vodljivost [ $\text{S}/\text{km}$ ]
- $B_1$  – jedinična susceptancija [ $\text{S}/\text{km}$ ]

Struje kroz poprečne grane jednake su izrazu:

- na početku voda  $\bar{I}_{10}$  :

$$\bar{I}_{10} = \frac{\bar{U}_1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\bar{Y}}{2} \quad (4-6)$$

- na kraju voda  $\bar{I}_{20}$ :

$$\bar{I}_{20} = \frac{\bar{U}_2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\bar{Y}}{2} \quad (4-7)$$

Struja na početku  $\bar{I}_1$  voda jednaka je izrazu:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{10} + \bar{I}_{12} \quad (4-8)$$

Struja na kraju  $\bar{I}_2$  voda jednaka je izrazu:

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{12} - \bar{I}_{20} \quad (4-9)$$

- $\bar{I}_{12}$  – struja uzdužne grane [A]
- $\bar{Y}$  – admitancija [S]
- $\bar{U}_1$  – napon na početku voda [V]
- $\bar{U}_2$  – napon na kraju voda [V]

Napon na početku voda jednak je zbroju napona na kraju voda i pada napona na vodu:

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2 + \Delta\bar{U} = \bar{U}_2 + \sqrt{3} \cdot \bar{I}_{12} \cdot \bar{Z} \quad (4-10)$$

Prividna snaga na kraju voda jednaka je izrazu:

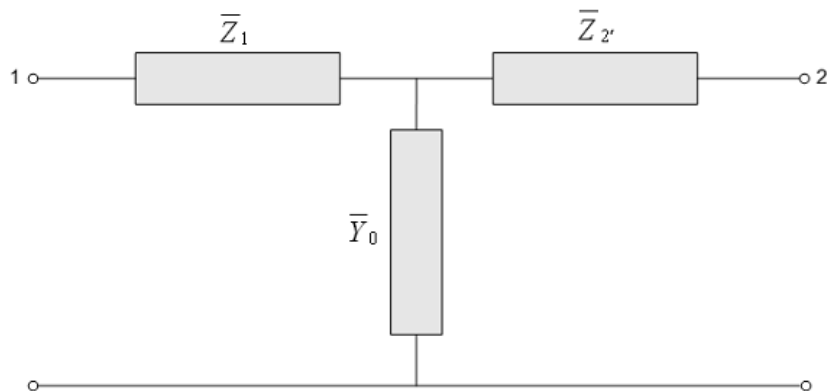
$$\bar{S}_2 = P_2 + j \cdot Q_2 = \sqrt{3} \cdot \bar{U}_2 \cdot \bar{I}_2 \quad (4-11)$$

Gdje je:

- $P_2$  – djelatna snaga na kraju voda [W]
- $Q_2$  – reaktivna snaga na kraju voda [var]

### 4.3. Matematičko modeliranje dvonamotnog trofaznog transformatora

Transformator je električni uređaj koji se, kao što sami naziv kaže, služi za transformaciju električne energije jedne razine u električnu energiju druge razine. U distribucijskim mrežama transformatori se najčešće koriste za transformaciju jedne naponske razine u drugu naponsku razinu, ovisno o djelu mreže za koji je predviđen. Kao takav vrlo je važno poznavati parametre samog transformatora kao što su: broj namota transformatora, krivulju magnetiziranja, gubitke u transformatoru (gubitke u bakru i gubitke u željeznoj jezgri), induktivitete zavoja namota i međuinuktivitete, impedancije. Matematički model transformatora najčešće se predstavlja T shemom transformatora koja vjerno prikazuje sve elemente transformatora.



Slika 4.3. T-shema dvonamotnog transformatora [8]

Pokusom praznog hoda i pokusom kratkog spoja moguće je odrediti potrebne parametre transformatora. Poprečna grana T sheme koristi se pri izračunu pokusa praznog hoda dok se sekundarna strana zanemaruje jer struja sekundara  $I_2$  jednaka nuli, dok kod pokusa kratkog spoja zbog relativno male struje praznog hoda  $I_0$ , poprečna grana se zanemaruje.

Prema T shemi mogu se odrediti impedancije primara  $\bar{Z}_1$  i sekundara  $\bar{Z}'_2$  :

$$\bar{Z}_1 = R_1 + j \cdot X_1 \quad (4-12)$$

$$\bar{Z}'_2 = R'_2 + j \cdot X'_2 = \bar{Z}_2 \cdot \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 \quad (4-13)$$



Gdje je:

- $\bar{Z}_1$  - impedancija primara [ $\Omega$ ]
- $\bar{Z}'_2$  - reducirana impedancija sekundara [ $\Omega$ ]
- $U_1$  - napon primara [V]
- $U_2$  - napon sekundara [V]
- $R_1$  - djelatni otpor primara [ $\Omega$ ]
- $R'_2$  - reduciran djelatni otpor sekundara [ $\Omega$ ]
- $X_1$  – reaktancija primara [ $\Omega$ ]
- $X'_2$  - reducirana reaktancija sekundara [ $\Omega$ ]

Adimtancija poprečne grane  $\bar{Y}_0$  računa se:

$$\bar{Y}_0 = \frac{1}{\bar{Z}_0} = \frac{1}{R_0} - j \cdot \frac{1}{X_0} = G_0 + j \cdot B_0 \quad (4-14)$$

Gdje je.

- $\bar{Z}_0$  – impedancija poprečne grane [ $\Omega$ ]
- $R_0$  – djelatni otpor poprečne grane [ $\Omega$ ]
- $X_0$  – reaktancija poprečne grane [ $\Omega$ ]
- $G_0$  – vodljivost poprečne grane [S]
- $B_0$  – susceptancija poprečne grane [S]

Struja primara  $\bar{I}_1$  računa se:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}'_2 \quad (4-15)$$

Gdje je:

- $\bar{I}_0$  - struja praznog hoda (struja poprečne grane) [A]
- $\bar{I}'_2$  - reducirana sekundarna struja [A]

Struja poprečne  $\bar{I}_0$  grane računa se:

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_{0R} + \bar{I}_\mu \quad (4-16)$$

Gdje je:

- $\bar{I}_{0R}$  - radna komponenta struje praznog hoda [A]
- $\bar{I}_\mu$  - struja magnetiziranja [A]

Vrijednosti sekundara su reducirane radi prijenosnog omjera transformatora, jer kada ne bi bilo reduciranja sekundarnih vrijednosti, pri proračunima bi dobili pogrešne rezultate. Zbog toga sekundarne veličine reduciramo na primarni broj zavoja.

Reducirani napon sekundara  $U'_2$  računa se prema:

$$U'_2 = U_2 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right) \quad (4-17)$$

Gdje je:

- $N_1$  – broj zavoja primara
- $N_2$  – broj zavoja sekundara
- $U_2$  – napon sekundara [V]

Reducirana struja sekundara  $\bar{I}'_2$  računa se prema:

$$\bar{I}'_2 = \bar{I}_2 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right) \quad (4-18)$$

- $\bar{I}_2$  – struja sekundara [A]

Reducirana impedancija sekundara  $\bar{Z}'_2$  računa se prema:

$$\bar{Z}'_2 = \bar{Z}_2 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (4-19)$$

- $\bar{Z}_2$  – impedancija sekundara [ $\Omega$ ]

#### 4.4. Matematičko modeliranje SN prekidača

Prema [3] prekidač je sklopni aparat koji se koristi za prekidanje strujnih krugova. Srednjenaponski prekidač (SN prekidač), možemo definirati kao prekidač koji prekida strujne krugove srednjih napona, te se u takvim postrojenjima kao i u visokonaponskim postrojenjima mogu naći prekidači sa medijem za gašenje električnog luka koji nastaje uslijed sklopnog manevra. Ovisno o vrsti medija koji se nalazi u prekidaču oni se dijele na: vakuumske, SF<sub>6</sub>, uljne, pneumatske, hidromatske i dr. Prekidači imaju dva stanja, a to su stanje vođenja i stanje ne vođenja. Kada prekidač vodi, strujni krug je zatvoren i impedancija tog prekidača jednaka je nuli, dok kada prekidač ne vodi, strujni krug je otvoren i impedancija prekidača tada ima beskonačnu vrijednost. Trenutak uklopa prekidača može utjecati na visinu vršne vrijednosti prenapona, što za rezultat ima uklapanje u bilo kojem trenutku. Prekidači imaju mogućnost da u slučaju kvara u elektroenergetskoj mreži prekinu struju kratkog spoja, što dovodi do velikih termičkih i dinamičkih naprezanja prema kojima prekidač mora biti dimenzioniran i koje mora podnijeti.

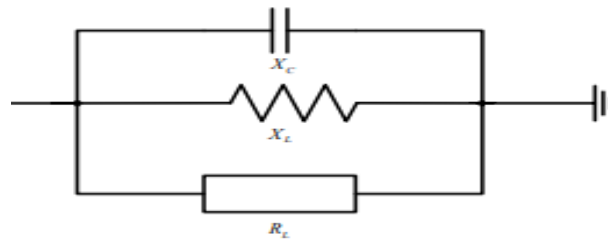


**Slika 4.4.** Primjer vakuumskog prekidača marke Končar koji se koristi u postrojenjima EES-a [9]

#### 4.5. Matematičko modeliranje potrošača

U simuliranoj distributivnoj energetske mreži, potrošač odnosno opterećenje je predstavljeno kao paralelni spoj otpora  $R$ , induktiviteta predstavljenog reaktancijom  $X_L$  i kapaciteta predstavljenog reaktancijom  $X_C$ . Kao takav teret se može predstaviti sa impedancijom paralelnog RLC kruga, jer

RLC komponente dostojno prikazuju sve moguće potrošače koji u sebi sadrže električne veličine prikazane ovim teretom. Jedino je važno uzeti u obzir kolike bi vrijednosti mogle biti pojedine električne veličine RLC kruga koji predstavlja opterećenje nadomjesne simulirane distributivne mreže prilikom simulacije sklopnih prenapona, a da pri tome budu približno jednake stvarnim vrijednostima potrošača u distributivnim mrežama. Osim toga vrlo je važno poznavati i faktor snage  $\cos\varphi$  opterećenja, a to se može dobiti dijeljenjem djelatnog otpora R i ukupne impedancije tereta Z [2].



**Slika 4.5.** Model opterećenja simulirane mreže

Kako bi opterećenje predstavili admitancijom, prvo je potrebno otpor i reaktancije elemenata svesti na recipročne vrijednosti:

$$G = \frac{1}{R} ; B_L = \frac{1}{X_L} ; B_C = \frac{1}{X_C} \quad (4-20)$$

- G - vodljivost [S]
- B - susceptancija [S]
- R - djelatni otpor [ $\Omega$ ]
- X - reaktancija [ $\Omega$ ]

nakon toga admitancija Y se računa prema izrazu:

$$Y = \sqrt{G^2 + (B_C - B_L)^2} \quad (4-21)$$

te prema tome možemo dobiti izraz za impedanciju Z:

$$Z = \frac{1}{Y} \quad (4-22)$$

## **5. SIMULACIJSKI MODEL TESTNE SIMULIRANE MREŽE U Matlab-SimPowerSystemsu**

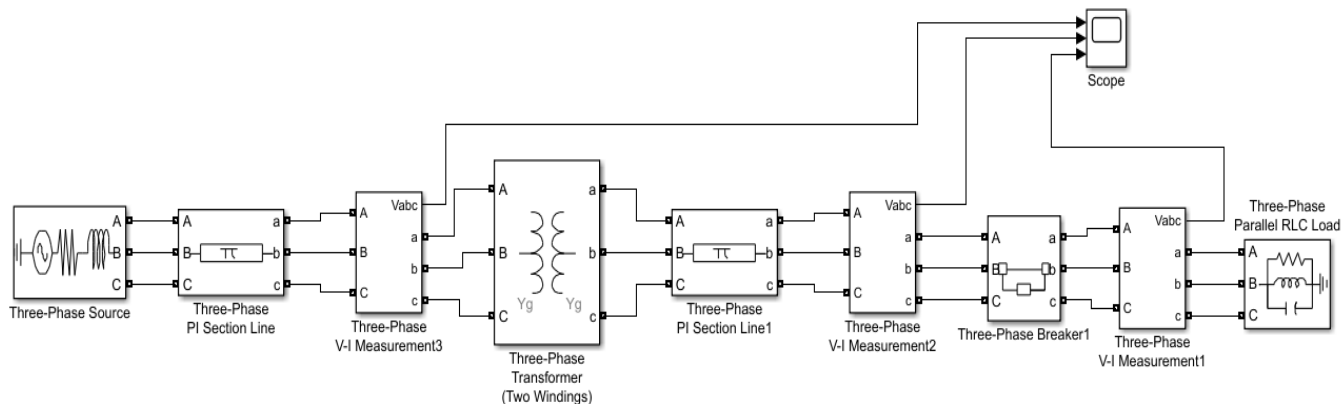
Simulacijski model predstavlja model testne simulirane elektroenergetske distributivne mreže i komponentata simulirane mreže u računalnom simulatoru, u ovom slučaju Matlab-SimPowerSystemsu. Prije same simulacije važno je definirati problem i njegove moguće ishode zbog kojeg dolazi do simulacije. Nakon toga važno je definirati matematički model svih komponentata koji su uključeni u simulaciju, što smo u prethodnom poglavlju i učinili. Uz pomoć ponuđenih simulatora i računalnih programa potrebno je napraviti simulacijski model, te unijeti sve potrebne parametre komponentata simulirane mreže, što će u ovom poglavlju detaljnije biti opisano, te je nakon toga potrebno izvesti simulaciju, snimiti dobivene odzive i analizirati ih [10].

### **5.1. Matlab – SimPowerSystems**

Računalni program, odnosno simulator u kojem postoje već izrađeni modeli za simuliranje, a isto tako postoji mogućnost izrade vlastitih modela mreže ili postrojenja za simuliranje raznih pojava koje je potrebno analizirati. Korištenjem ovakvih simulatora smanjuje se potreba za izradom raznih prototipa i smanjuje se rizik od mjerenja potrebnih veličina u postrojenjima visokog napona. Prema [10] pomoću Matlab-a moguće je izraditi algoritme, analizirati podatke, izraditi modele i aplikacije, moguća su ispitivanja i mjerenja, te obrada signala. Matlab podržava jako puno alata i ima jako puno opcija na raspolaganju za različita programiranja i simuliranja, jedno od takvih je i Simulink grafičko programsko okruženje koja je korišteno za analizu testne distributivne mreže u ovom završnom radu. Simulink služi za modeliranje, simuliranje i analizu različitih dinamičkih sustava, a najčešće se koristi pri automatskom upravljanju i pri digitalnoj obradi signala. Povezivanjem već gotovih modela raznih elemenata mreža i postrojenja, dobivamo željeni model, u ovom slučaju distribucijske mreže, čije rezultate zatim snimamo i analiziramo.

## 5.2. Simulacijsko modeliranje distributivne mreže u Matlab – SimPowerSystemsu

Povezivanjem potrebnih komponenta u Matlab – SimPowerSystemsu stvoren je jednostavan model distribucijske mreže u kojoj se pojavljuju sklopni prenaponi uslijed određenih sklopnih radnji. Takva jednostavna razvijena distribucijska mreža, korištena u ovom završnom radu, sastoji se od modela izvora krute mreže napona 35 kV, dva modela nadzemnog dalekovoda, trofaznog dvonamotnog transformatora, trofaznog SN prekidača, potrošača, te mjernih instrumenata za prikaz valnih oblika napona kao što je prikazano na slici 5.1.



**Slika 5.1.** Shema testne distributivne mreže u Matlab – SimPowerSystemsu

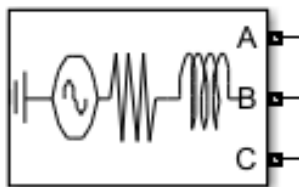
Simulacija u trajanju od 500 ms na prikazuje ispad velikog tereta u distributivnoj mreži. Ispad tereta se vrši uz pomoć trofaznog SN prekidača koji je u vremenu od  $t=0$  s zatvoren, odnosno kroz njega teče struja, te koji za različite simulacije u različitim vremenima isklapa. Isklop SN prekidača dovodi da prekida isporuke električne energije prema potrošaču i do velikih prenapona na sekundarnoj strani transformatora, odnosno na cijeloj dužini voda koja se nalazi na sekundarnoj strani transformatora. Upravo takve prenapone snimiti ćemo i analizirati u ovom završnom radu pri različitim vremenima isklapa i sa različitim vrijednostima tereta.

### 5.3. Simulacijsko modeliranje komponenti distributivne mreže u Matlab – SimPowerSystemsu

Simulacijskim modeliranjem komponenti prikazati će se pojedinačni modeli izvora, energetskog transformatora, potrošača, SN prekidača i dalekovoda koji su korišteni u simuliranoj distributivnoj mreži, a koji se mogu pronaći u Matlab – SimPowerSystems biblioteci koja nam na raspolaganje daje puno raznovrsnih komponenata za izradu različitih sustava za simuliranje. Svaku komponentu potrebno je parametrirati određenim potrebnim parametrima koje ta komponenta zahtjeva. Takvi parametri dani su nam od proizvođača pojedine komponente ili ih je potrebno izračunati iz već poznatih ili izmjerenih podataka i sve to u svrhu što točnije analize stanja mreže [10].

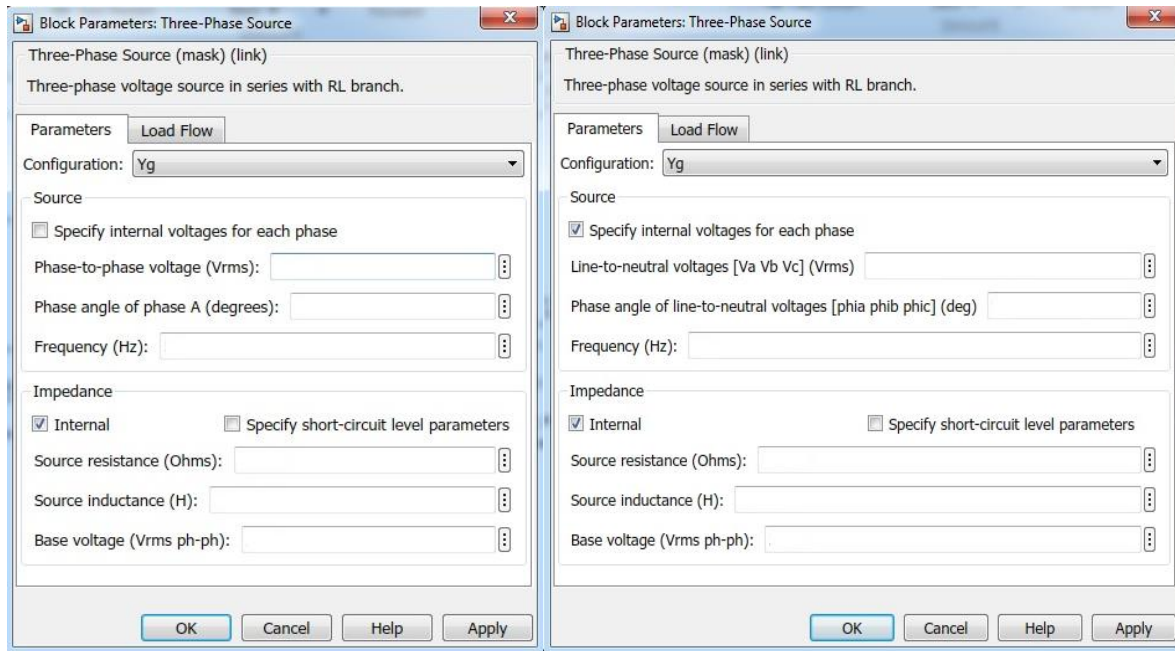
### 5.4 Simulacijski model trofaznog izvora

Trofazni simulacijski model izvora predstavlja krutu mrežu naponske razine 35 kV, gdje su tri jednofazna izvora sa serijski vezanom RL impedancijom spojena u zvijezdu i gdje je zvjezdište direktno uzemljeno (Yg). Osim direktno uzemljenog zvjezdišta postoje i opcija samo zvjezdišta (Y) i opcija (Yn) u kojoj se na model može spojiti direktno ili izolirano zvjezdište. U modelu trofaznog izvora preuzetog iz Matlab biblioteke prikazana je jedna od tri faze kao serijski spoj RL impedancije i direktno uzemljenog izvora, dok iz modela izlaze tri faze (faza A, faza B i faza C) koje se dalje spajaju na sljedeće komponente testne distributivne mreže [10].



**Slika 5.2.** Model trofaznog izvora u Matlab – SimPowerSystemsu

Ulazni parametri potrebni za parametriranje simulacijskog modela trofaznog izvora mogu se unijeti u bloku za parametriranje koji se otvara dvostrukim klikom lijeve tipke miša na model trofaznog izvora.



a)

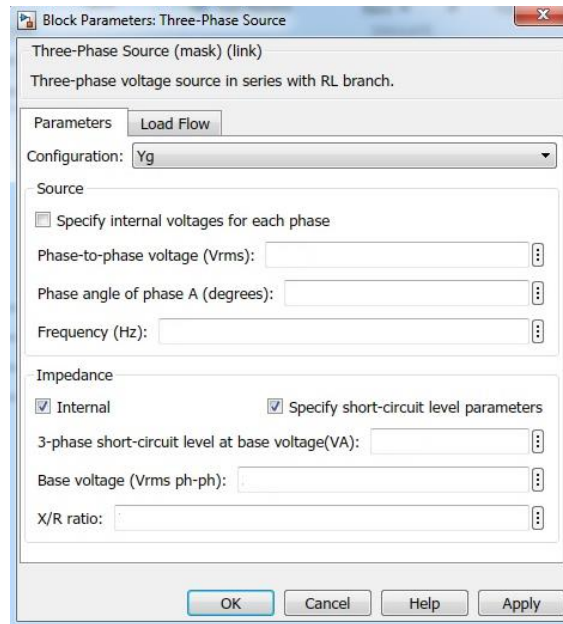
b)

**Slika 5.3.** Blok za izravno parametriranje modela trofaznog izvora

Potrebni ulazni parametri modela trofaznog izvora su efektivna vrijednost linijskog napona [V], fazni kut trofaznog izvora prve faze (faze A) [°], pogonska frekvencija [Hz], te je u ovom slučaju izravno potrebno parametrirati izvor sa vrijednostima unutrašnjeg djelatnog otpora  $R$  [ $\Omega$ ] i unutrašnjeg induktiviteta izvora  $L$  [H]. Bazna efektivna vrijednost linijskog napona izvora jednaka je efektivnoj vrijednosti linijskog napona izvora. Prema slici 8. u slučaju b) vidi se da je moguće parametriranje faznih napona pojedine faze [V] i kuteva pojedine faze [°].

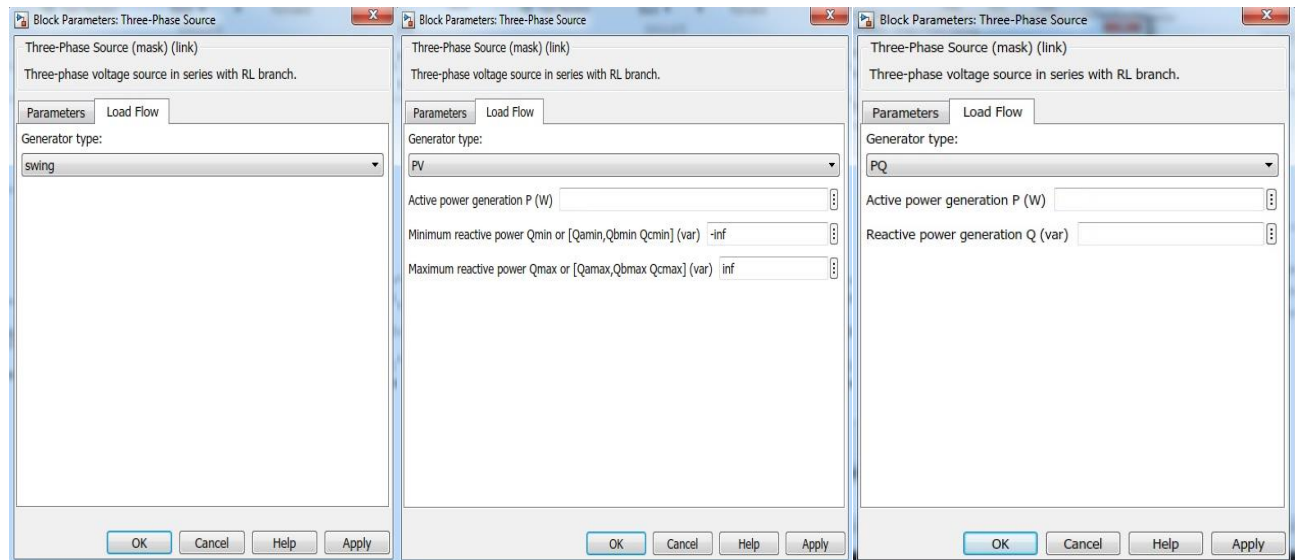
Osim izravnog parametriranja modela trofaznog izvora postoji i neizravno parametriranje modela trofaznog izvora u kojem se unose vrijednosti razine napona trofaznog kratkog spoja [VA], bazni napon [V] i omjer reaktancije induktiviteta i radnog otpora  $X/R$ . Kao i kod izravnog parametriranja, tako i kod neizravnog parametriranja je moguće za izvor unijeti samo jednu vrijednost napona i kuta ili je moguće unijeti vrijednosti faznih napona pojedinačno i njihovih kuteva. Neizravno parametriranje modela trofaznog izvora prikazano je slikom 5.4.





**Slika 5.4.** Blok za neizravno parametriranje modela trofaznog izvora

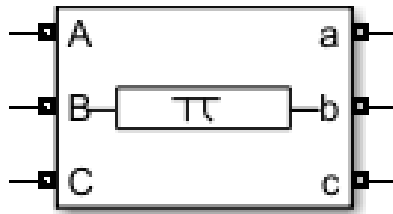
Parametriranje načina rada prikazano je slikom 5.5. te je za način rada izvora moguće odabrati PQ, PV i kontrolirani način rada Swing (referentna sabirnica), koji je u ovom završnom radu i korišten. Korištenjem PQ načina rada, poznate su nam djelatna i jalova snaga, dok kod PV načina rada su nam poznati napon i djelatna snaga. U načinu rada Swing (referentna sabirnica) poznat nam je iznos napona i iznos kuta napona izvora.



**Slika 5.5.** Blokovi za parametriranje načina rada modela trofaznog izvora

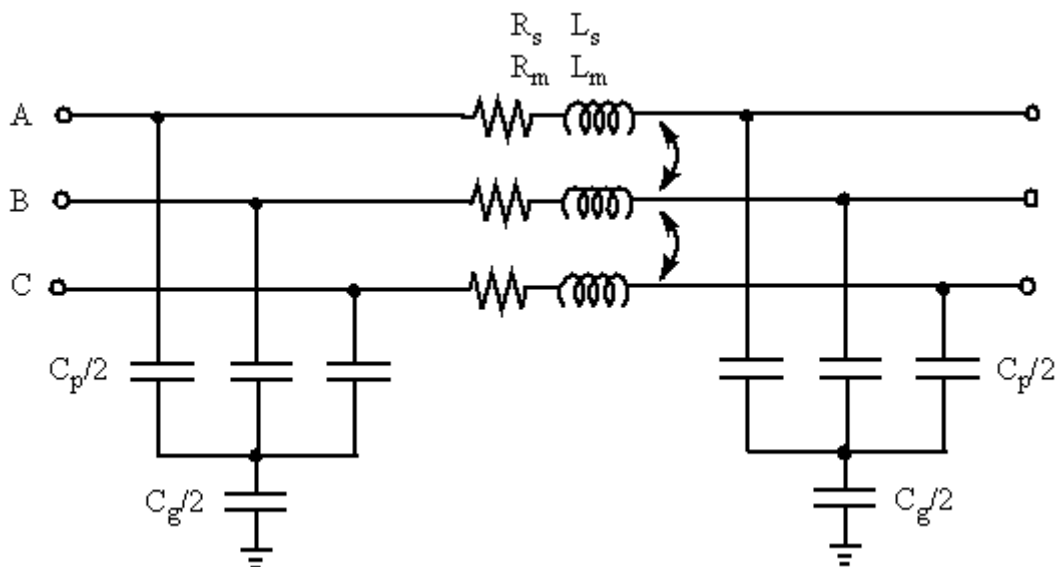
## 5.5. Simulacijski model energetskog voda

Simulacijski model energetskog voda predstavljen je  $\pi$ - shemom voda koja služi za proračune vodova duljine do 200 km.



Slika 5.6. Model energetskog voda u Matlab – SimPowerSystemsu

$\pi$  model dalekovoda implementiran je sa koncentriranim parametrima koji za razliku od distribuiranih parametara, gdje su otpornost, induktivnost i kapacitivnost ravnomjerno raspoređeni duž voda, u obzir uzimaju električne i magnetske petlje između faza, te električne veze prema zemlji predstavljene dozemnim kapacitetima voda. Shema koja predstavlja sve komponente i sve veličine trofaznog voda predstavljena je slikom 5.7 [8].



Slika 5.7. Shema trofaznog voda

Na shemi trofaznog voda mogu se vidjeti fazni  $R_s$  i međufazni  $R_m$  djelatni otpori voda [ $\Omega/\text{km}$ ], fazni  $L_s$  i međufazni  $L_m$  induktiviteti voda [ $\text{H}/\text{km}$ ], te fazni kapaciteti voda  $C_p$  [ $\text{F}/\text{km}$ ] i dozemni kapaciteti voda  $C_g$  [ $\text{F}/\text{km}$ ]. Proračun navedenih veličina vrši se iz direktnog i nultog sustava. Prvo se proračunavaju parametri direktnog i nultog sustava:

$$R_{10} = R_0 \cdot l_0 \cdot k_{R0} \quad (5-1)$$

$$R_{11} = R_1 \cdot l_0 \cdot k_{R1} \quad (5-2)$$

$$L_{10} = L_0 \cdot l_0 \cdot k_{L0} \quad (5-3)$$

$$L_{11} = L_1 \cdot l_0 \cdot k_{L1} \quad (5-4)$$

$$C_{10} = C_0 \cdot l_0 \cdot k_{C0} \quad (5-5)$$

$$C_{11} = C_1 \cdot l_0 \cdot k_{C1} \quad (5-6)$$

Veličine  $k_{R0}$ ,  $k_{R1}$ ,  $k_{L0}$ ,  $k_{L1}$ ,  $k_{C0}$  i  $k_{C1}$  predstavljaju hiperbolne korekcijske faktore koji su za vodove kraće od 50 km jednaki približno 1, te se ne uzimaju u obzir kod proračuna, dok za vodove duljine veće od 50 km se koriste pri proračunu kako bi se dobila prava vrijednost modela voda.

Nakon izračunatih parametara direktnog i nultog sustava, računaju se koncentrirani parametri voda:

$$R_s = \frac{2 \cdot R_{11} + R_{10}}{3} \quad (5-7)$$

$$R_m = \frac{R_{10} - R_{11}}{3} \quad (5-8)$$

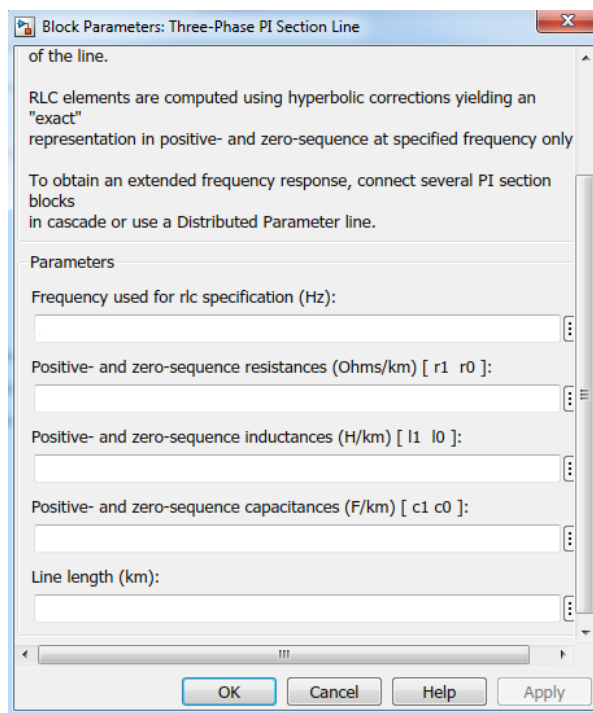
$$L_s = \frac{2 \cdot L_{11} + L_{10}}{3} \quad (5-9)$$

$$L_m = \frac{L_{10} - L_{11}}{3} \quad (5-10)$$

$$C_s = C_{11} \quad (5-11)$$

$$C_g = \frac{3 \cdot C_{11} \cdot C_{10}}{C_{11} - C_{10}} \quad (5-12)$$

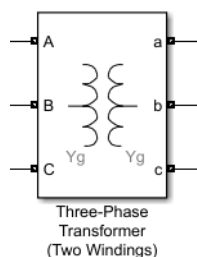
U bloku za parametriranje simulacijskog modela trofaznog voda potrebno je unijeti vrijednost pogonske frekvencije voda [Hz], direktni  $R_1$  i nulti  $R_0$  djelatni otpor voda [ $\Omega/\text{km}$ ], zatim direktni  $L_1$  i nulti  $L_0$  induktivitet voda [ $\text{H}/\text{km}$ ], direktni fazni kapacitet voda  $C_1$  i dozemni kapacitet voda  $C_0$  [ $\text{F}/\text{km}$ ], te je potrebno unijeti duljinu voda [km].



**Slika 5.8.** Blok za parametriranje modela energetskog trofaznog voda

## 5.6. Simulacijski model dvonamotnog trofaznog transformatora

Simulacijski model dvonamotnog trofaznog transformatora predstavljen je kao tri spojena jednofazna dvonamotna transformatora.

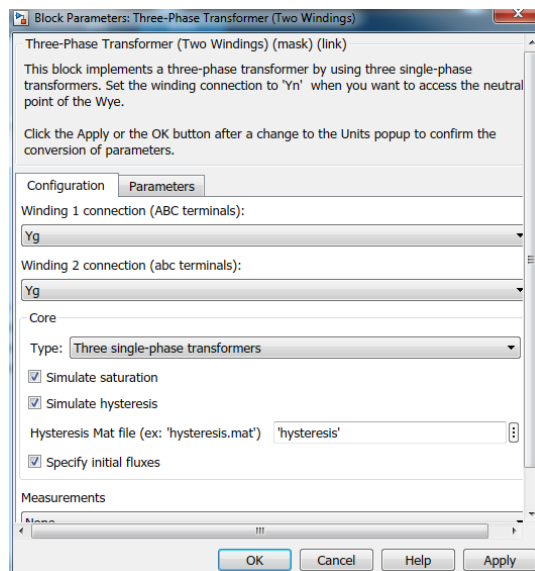


**Slika 5.9.** Model dvonamotnog trofaznog energetskog transformatora

Prilikom parametriranja dvonamotnog trofaznog transformatora moguć je odabir grupa spojeva (Y, D1, D11) i korištenja zvjezdišta (Y, Yn, Yg) za oba namota transformatora. Isto tako moguće je odabrati i tip transformatora, pa se mogu naći.

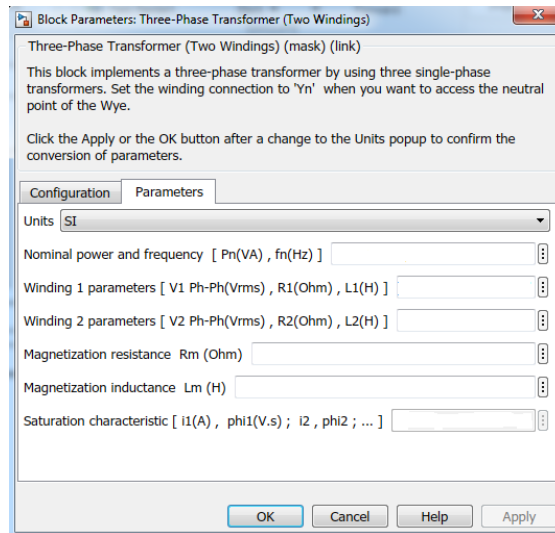
- *Three single-phase transformers* – predstavljen kao trofazni transformator implementiran od tri jednofazna spojena transformatora, ovakav se tip koristi kod transformatora za velike snage.
- *Three-limb core (core-type)* – predstavlja trofazni transformator sa jezgrom od tri utora
- *Five-limb core (shell-type)* – predstavlja trofazni transformator sa jezgrom od pet utora

Također postoji mogućnost simuliranja efekta zasićenja željezne jezgre ili simuliranje petlje histereze.



**Slika 5.10.** Blok za parametriranje konfiguracije modela energetskog transformatora

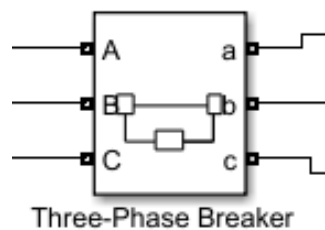
U kartici za unos parametara trofaznog transformatora postoji mogućnost odabira želimo li da nam veličine budu prikazane u SI jedinicama ili pu jedinicama. Nakon toga potrebno je unijeti nazivnu snagu transformatora  $P_n$  [VA] i nazivnu frekvenciju  $f_n$  [Hz], zatim je za svaki namot potrebno unijeti nazivni linijski napon  $V_i$  [V], efektivne vrijednosti linijskih struja  $I_i$  [A] oba namota, te djelatni otpor  $R_i$  [ $\Omega$ ] i induktivitet  $L_i$  [H] za primarni i sekundarni namot. Potrebno je unijeti vrijednost magnetskog otpora željezne jezgre transformatora  $R_m$  [ $\Omega$ ] i međuinduktivitet između primarnog i sekundarnog namota i željezne jezgre  $L_m$  [H].



**Slika 5.11.** Blok za parametrisiranje veličina modela energetskog transformatora

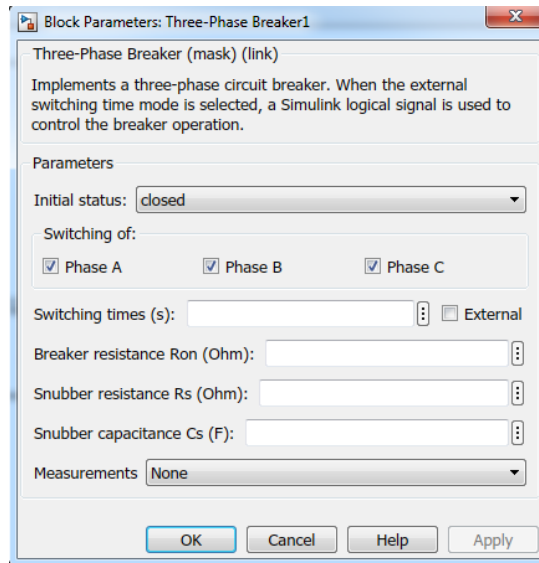
## 5.7. Simulacijski model SN prekidača

Prekidač koji se koristi u svrhu ovog završnog rada u Matlab – SimPowerSystemsu modeliran je tako da ima više različitih opcija upravljanja i prikazan je slikom 5.12.



**Slika 5.12.** Model SN prekidača u Matlab – SimPowerSystemsu

Upravljanje prekidačem može biti unutarnje i vanjsko, te se na ikoni bloka može vidjeti o kakvom upravljanju je riječ. Ukoliko se radi o vanjskom upravljanju, na modelu prekidača se pojavljuje ulaz za vanjski upravljački signal, dok je kod unutarnjeg upravljanja izgled modela prekidača kao na slici 5.12. Ukoliko se kod vanjskog upravljanja žele otvoriti prekidači na ulaz je potrebno dovesti 0, a ukoliko se želi zatvoriti prekidač na ulaz je potrebno dovesti bilo koju pozitivnu vrijednost (najčešće se koristi 1).



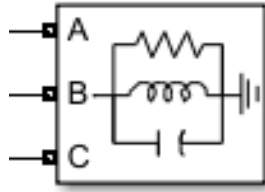
**Slika 5.13.** Blok za parametrisiranje SN prekidača

Ako se radi o unutarnjem upravljanju, potrebno je definirati hoće li početno stanje prekidača biti otvoreno ili zatvoreno. Zatim je potrebno definirati vrijeme uklopa/isklopa u dijaloškom okviru, postoji mogućnost više sklopnih promjena unutar određenog vremena. Moguće je i parametrisirati otpor prekidača prilikom vođenja  $R_{on}$  [ $\Omega$ ], prigušni otpor prekidača  $R_p$  [ $\Omega$ ] i prigušni kapacitet prekidača  $C_p$  [F]. Pri upisivanju parametara moguće je odabrati koje faze želimo uklopiti/isklopiti, što nam zapravo prikazuje da prekidač ima mogućnost uklopa/isklopa istovremeno sve tri faze ili pojedinačne faze.

## 5.8. Simulacijski model potrošača

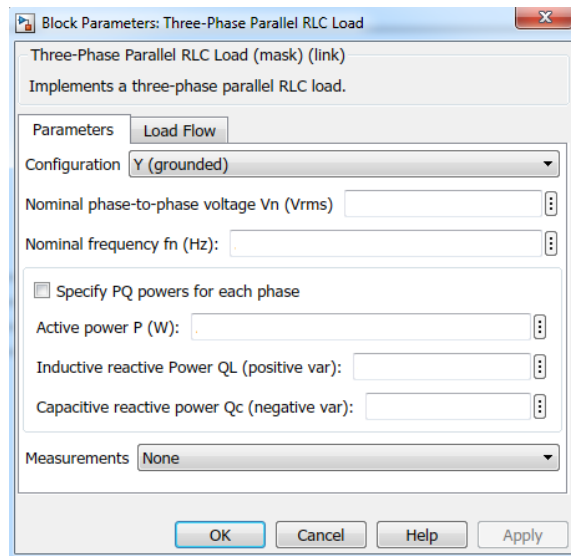
Simulacijski model potrošača predstavljen je paralelnim spojem RLC elemenata koji vjerno prikazuje potrošače u distributivnim mrežama, jer se potrošači ukupno gledano sastoje samo od te tri komponente. U ovisnosti o veličini vrijednosti pojedine snage neke skupine potrošača definira se karakter potrošača koji može biti radno-kapacitivni ili radno-induktivni, te se prema tome određuje faktor snage  $\cos \varphi$  za određenu skupinu potrošača. Ukoliko je  $\cos \varphi$  znatno manji od 1 pri velikim snagama mora se vršiti kompenzacija snage ovisno o karakteru skupine potrošača, jer će u protivnom doći do velikih gubitaka u sustavu. Idealan slučaj bio bi kada bi  $\cos \varphi$  bio jednak 1, u tom

bi slučaju prevladavao samo radni karakter i u sustavu ne bi bilo nikakvih gubitaka, te ne bi bilo potrebe za kompenzacijom snage.



**Slika 5.14.** Model potrošača u Matlab – SimPowerSystemsu

Parametri koje je potrebno unijeti bloku za parametrisiranje su efektivna vrijednost nazivnog linijskog napona potrošača  $U_n$  [V], nazivna frekvencija potrošača  $f_n$  [Hz], aktivna snaga  $P$  [W], induktivna jalova snaga  $Q_L$  [var] i kapacitivna jalova snaga  $Q_C$  [var]. Osim toga moguće je odabrati vrstu uzemljenja trošila (spoj trošila u zvijezdu direktno uzemljeno, spoj trošila u zvijezdu izolirano uzemljenje, spoj trošila u trokut).



**Slika 5.15.** Blok za parametrisiranje potrošača

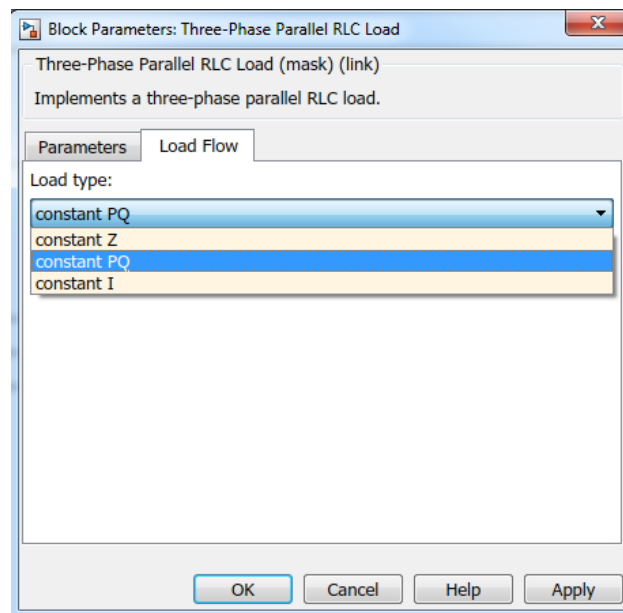
Kod parametrisiranja potrošača imamo mogućnost odabira tokova snaga koje nemaju nikakav utjecaj na rezultate simulacije. Ukoliko se koristi *constant (stalna)*  $I$  struja opterećenja se održava konstantnom na njezinoj nazivnoj vrijednosti određenog od baznog napona u parametrisiranog



dijaloškom okviru i aktivne snage  $P$  i jalove snage  $Q_L$  i  $Q_C$ , također parametrirane u dijaloškom okviru.

Ukoliko se odabere *constant (stalna) PQ* aktivna snaga  $P$  i jalova snaga  $Q$  održati će se konstantnima i jednakim vrijedostima parametriranim u dijaloškom okviru. Nazivni linijski napon  $V_n$  se prilagođava na linijski napon sabirnice.

Ukoliko se odabere *constant (stalna) Z* impedancija opterećenja određuje se iz nazivnog linijskog napona  $V_n$ , aktivne snage  $P$  i jalove snage ( $Q_L - Q_C$ ) parametriranim u dijaloškom okviru. Tijekom protoka opterećenja impedancija  $Z$  se održava konstantnom, dok aktivna snaga  $P$  i jalova snaga  $Q$  variraju proporcionalno kvadratu napona sabirnice

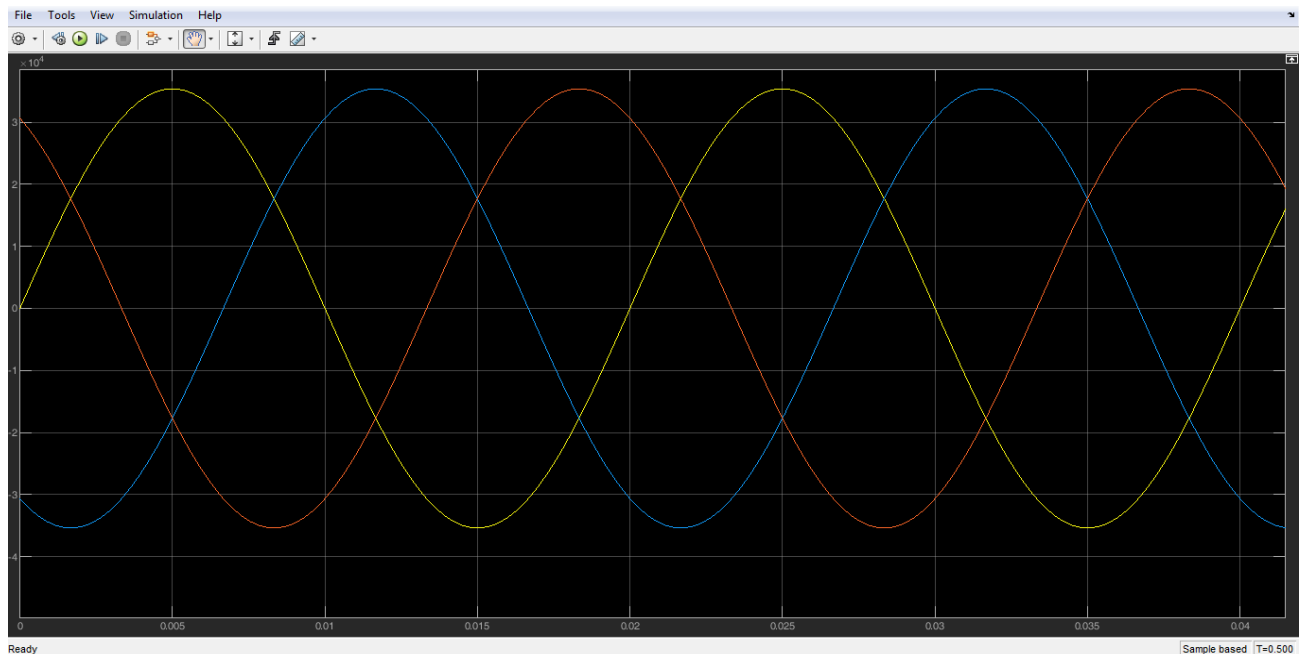


**Slika 5.16.** Blok za parametriranje potrošača - tokovi snaga

## 6. ANALIZA SNIMLJENIH ODZIVA SIMULIRANE DISTRIBUTIVNE MREŽE

Prilikom dizajniranja i izgradnje elektroenergetskog sustava i radi sprječavanja uništenja opreme u elektroenergetskom sustavu, te radi mogućnosti konstantne opskrbe potrošača električnom energijom vrlo je važno poznavati elektroenergetski sustav i pojave koje se u njemu mogu desiti. Isto tako vrlo je važno dizajnirati zaštitu sustava koja bi prilikom kvara isključila dio sustava kako ne bi došlo do uništenja opreme. No da bi sve to znali, potrebno je izgraditi nekakav prototip mreže na kojem bismo sve te veličine izmjerili i proračunali, ali to dovodi do velikih financijskih gubitaka i isto tako do gubitaka vremena. Stoga se koriste računalni simulatori u kojima se može dizajnirati sustav po potrebama potrošača i gdje se mogu promatrati razni uvjeti sustava, pa tako i analize sklopnih prenapona koji svojom pojavom u sustavu imaju negativan utjecaj na opremu sustava. Kako bi smanjili pojavu i utjecaj sklopnih prenapona u sustavu vrlo ih je važno analizirati i pretpostaviti njihovu pojavu, vrijeme trajanja i iznos veličine prenapona, što će u ovom poglavlju biti i detaljnije opisano.

Nazivni trofazni napon izvora koji predstavlja krutu mrežu je sinusoidalnog oblika faznog pomaka faza od  $120^\circ$ . Vrijednost nazivnog napona je 35 kV, frekvencije 50 Hz.



Slika 6.1. Nazivni napon izvora

## 6.1. Utjecaj visine sklopnog prenapona o vremenu ispada tereta

U ovom poglavlju biti će prikazan utjecaj visine vrijednosti napona sekundarne strane energetskog dvonamotnog trofaznog transformatora o vremenu isklopa trofaznog prekidača, odnosno o vremenu simuliranog ispada velikog tereta na sekundarnoj strani energetskog transformatora. Teret u ovom slučaju predstavlja skupinu potrošača u distributivnoj mreži. Trofazni prekidač je zatvoren, te će se u zadanim trenucima otvarati i prekidati dotok električne energije ka teretu što će rezultirati povišenim vrijednostima napona.

Simulacija se odvija pri ulaznom naponu, tj. linijskom naponu krute mreže u vrijednosti od 35 kV pri frekvenciji od 50 Hz, faznog pomaka  $120^\circ$ .

Transformator:

- 35/10 kV
- Direktno uzemljenje
- Nazivna snaga 25 MVA

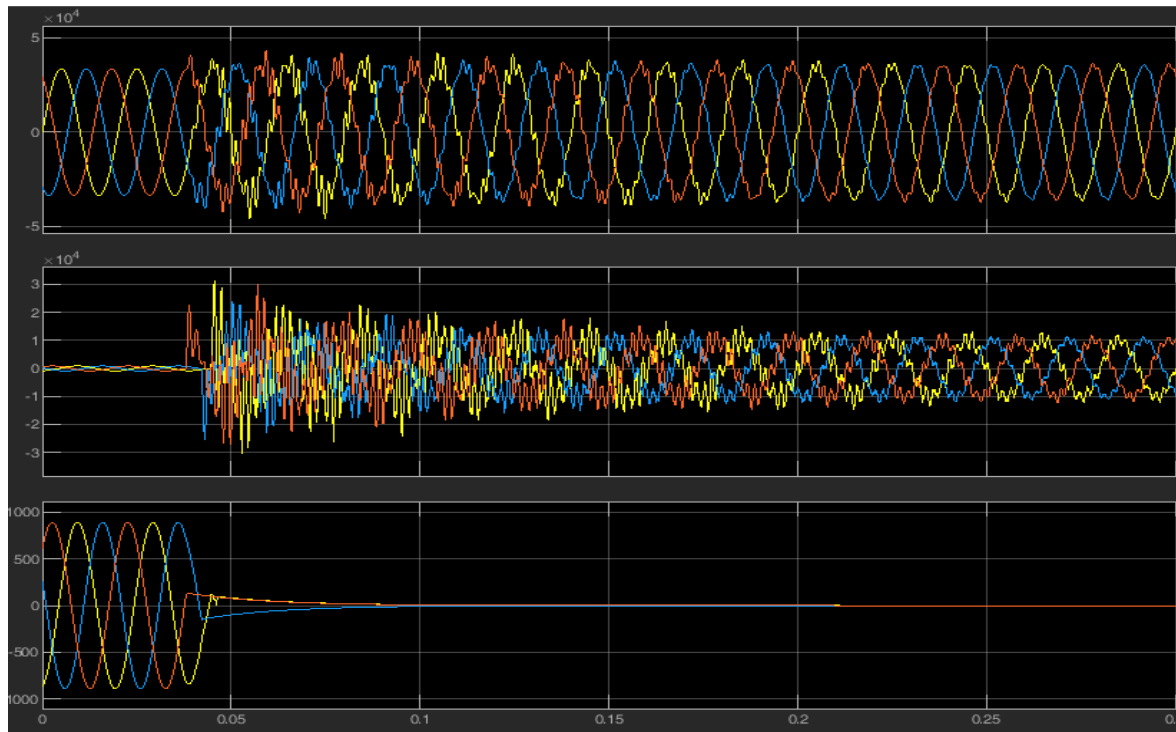
Teret:

- Nazivni napon 10 kV
- Nazivna radna snaga  $P = 20 \text{ MW}$
- Jalova induktivna snaga  $Q_L = 5 \text{ Mvar}$
- Jalova kapacitivna snaga  $Q_C = 2 \text{ Mvar}$

Vremena isklapanja prekidača:

- $t = 0,035 \text{ s}$
- $t = 0,04 \text{ s}$
- $t = 0,043 \text{ s}$
- $t = 0,045 \text{ s}$
- $t = 0,05 \text{ s}$

Vrijeme isklopa prekidača  $t = 0,035$  s



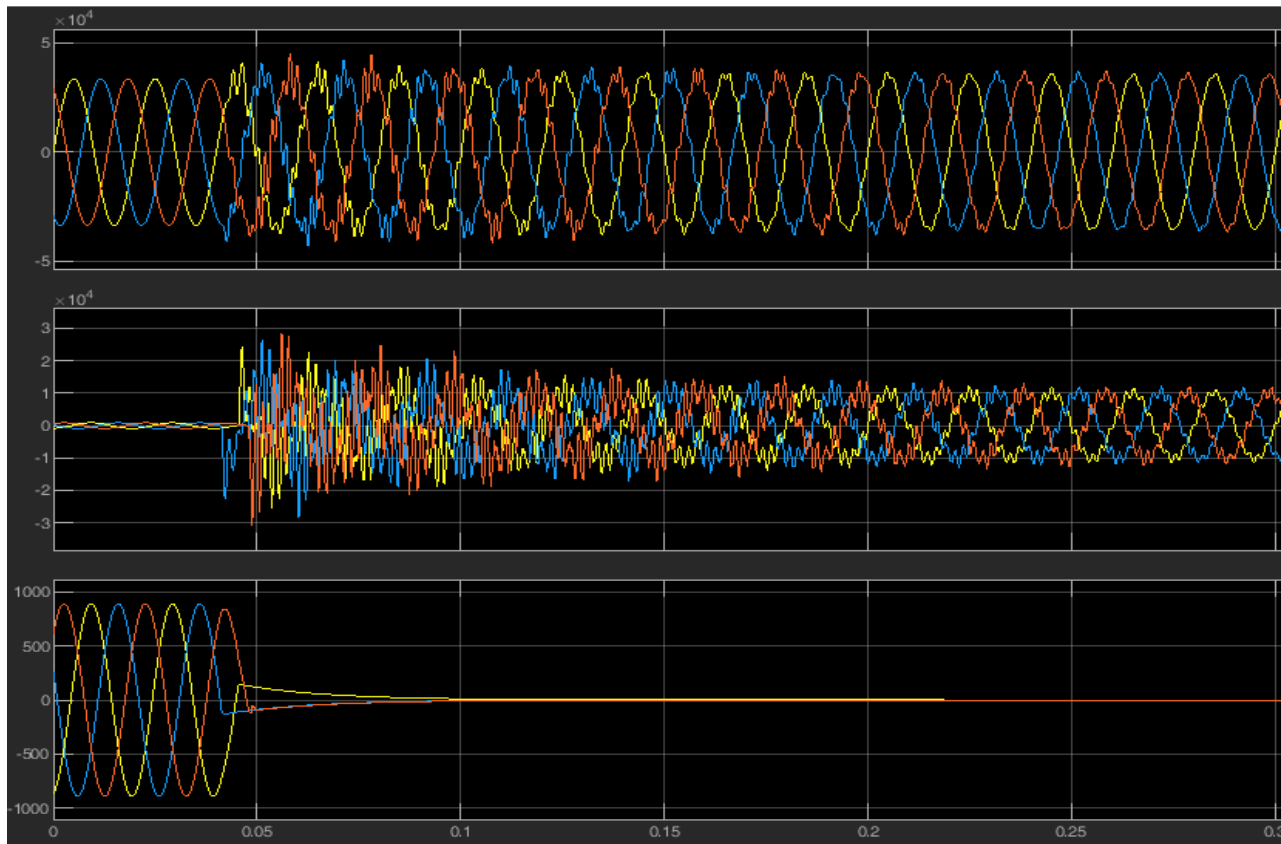
**Slika 6.2.** Snimljeni valni oblici primarnog napona i sekundarnog napona transformatora, te napona na teretu za vrijeme isklapanja prekidača  $t = 0,035$  s

Prema snimljenim odzivima za vrijeme isklapanja prekidača  $t = 0,035$  s može se vidjeti da faza A (žuta) ima najveću vrijednost napona i to čak iznad 30 kV, što nam predstavlja povećanje napona i do 3 puta u odnosu na nazivni. Isklapanje se dogodilo u trenutku kada je faza A poprimila negativnu vršnu vrijednost napona, te radi toga faza A poprima najveću vrijednost prenapona.

Druga po visini vrijednosti prenapona prema srednjem grafu je faza C (narančasta) čija je amplituda ulaznog napona rasla prema pozitivnoj vršnoj vrijednosti napona sve do trenutka isklapanja u kojem je poprimila pola vršne vrijednosti, odnosno 15 kV.

Vrijednost ulaznog napona faze B (plava) prilikom isklapanja prekidača također je bila 15 kV kao i kod faze C, jedino što je amplituda faze B težila ka negativnoj vršnoj vrijednosti, te je faza C vršnu vrijednost ulaznog napona poprimila prije faze B, što predstavlja razlog zbog kojeg faza C ima veću vrijednost prenapona u odnosu na fazu B s obzirom da su im za vrijeme prekida amplitude bile na istoj vrijednosti napona.

Vrijeme isklopa prekidača  $t = 0,04$  s

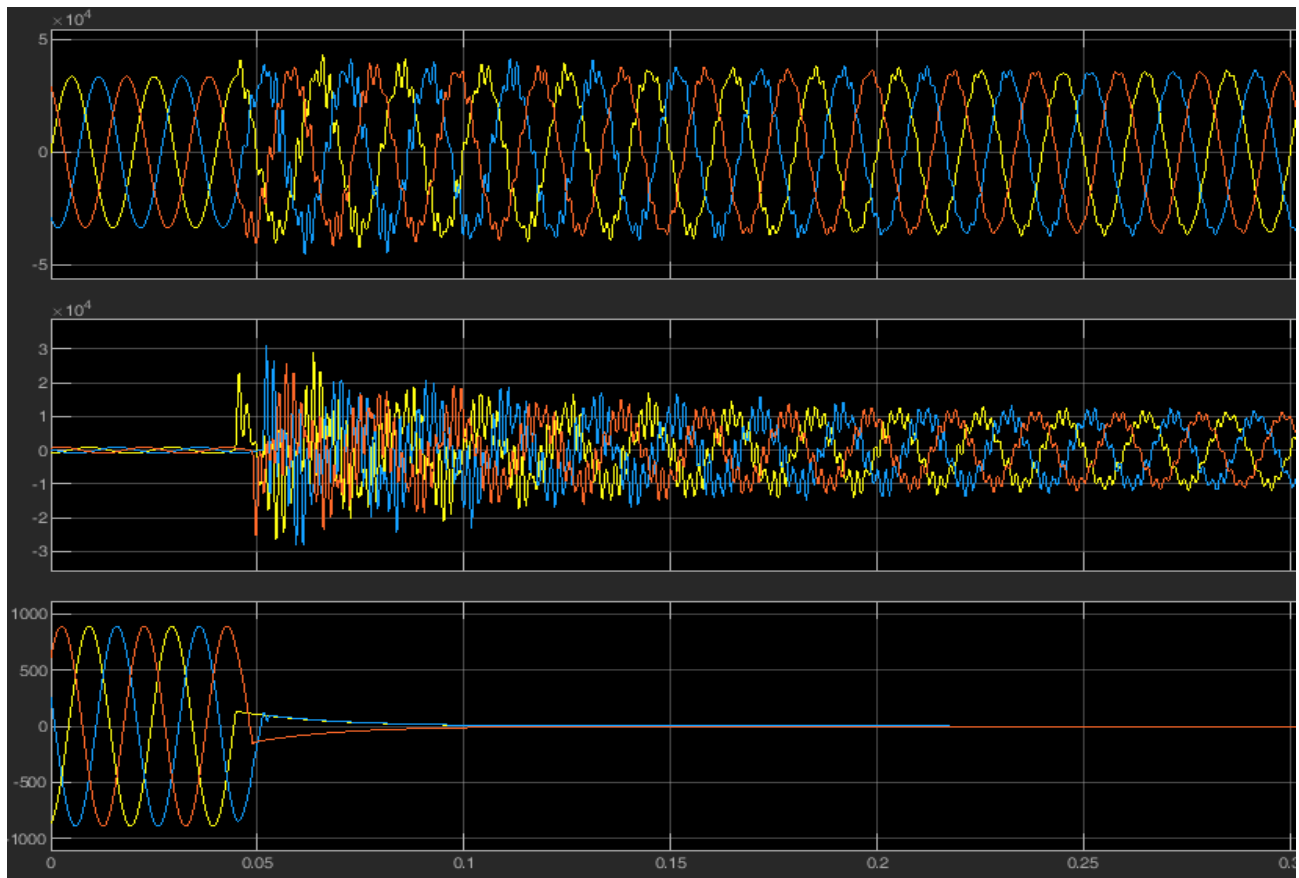


**Slika 6.3.** Snimljeni valni oblici primarnog napona i sekundarnog napona transformatora, te napona na teretu za vrijeme isklapanja prekidača  $t = 0,04$  s

Već nakon četvrtine periode (5 ms) u trenutku isklapanja prekidača  $t = 0,04$  s najvišu vrijednost napona poprima faza C (narančasta) koja, gledajući amplitudu narintog napona, teži ka nuli odnosno koja u vremenu  $t = 0,047$  s doseže vršnu negativnu vrijednost, te prema srednjem grafu u tom vremenu doseže najveću vrijednost prenapona negativnog predznaka.

Druga po visini vrijednosti prenapona je faza B (plava) čija amplituda u trenutku isklapanja prekidača seže prema negativnoj vršnoj vrijednosti ulaznog napona. Dok je amplituda faze A (žuta) u trenutku isklapanja jednaka nuli, te seže ka pozitivnoj vršnoj vrijednosti napona.

Vrijeme isklopa prekidača  $t = 0,043$  s

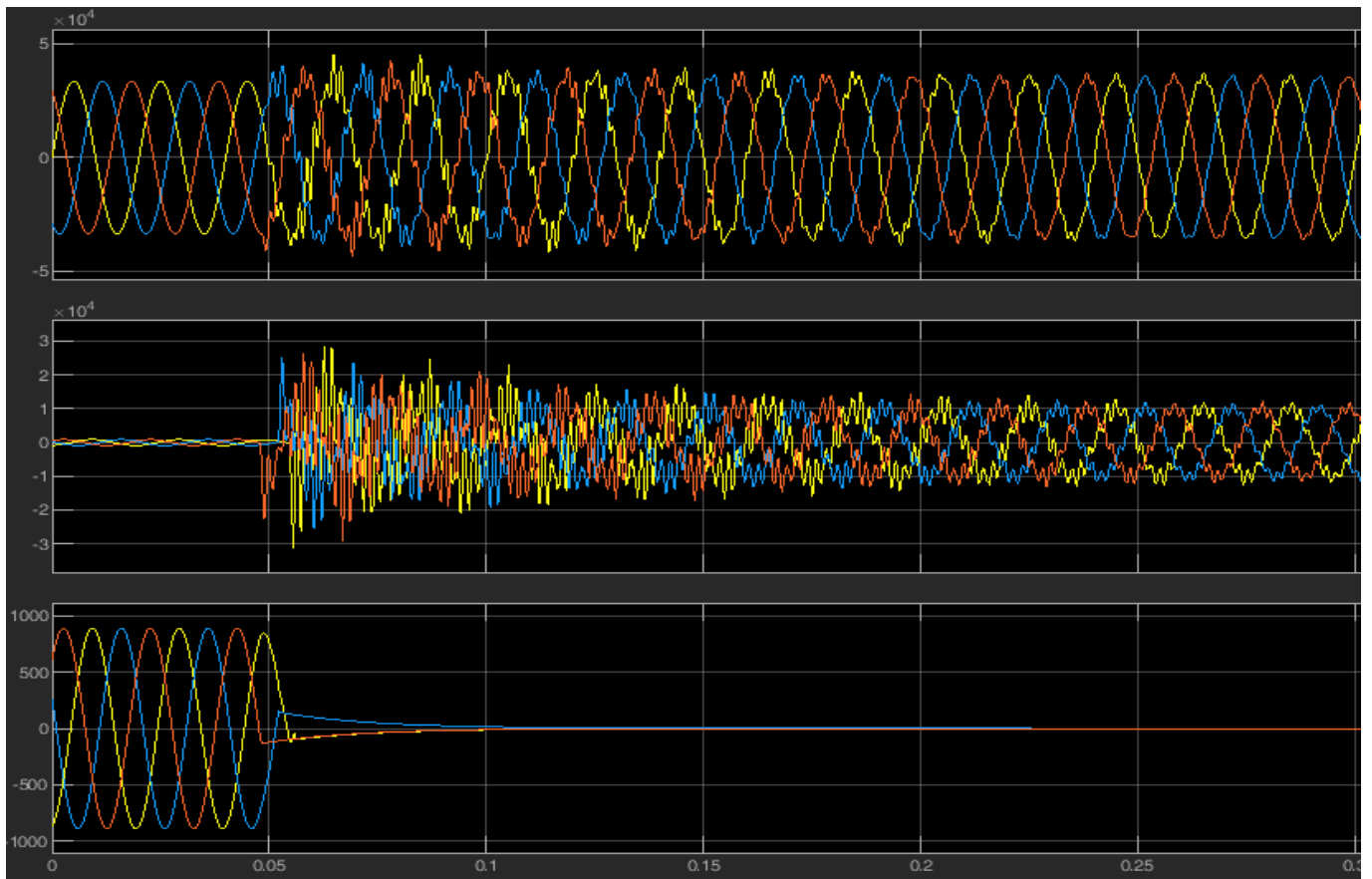


**Slika 6.4.** Snimljeni valni oblici primarnog napona i sekundarnog napona transformatora, te napona na teretu za vrijeme isklapanja prekidača  $t = 0,043$  s

U trenutku isklapanja prekidača  $t = 0,043$  s možemo vidjeti da faza B (plava) poprima najveću vrijednost prenapona pozitivnog predznaka, čija amplituda ulaznog napona seže iz negativne vršne vrijednosti ka nuli.

Amplituda ulaznog napona faze C (narančasta) je u trenutku isključenja prekidača jednaka nuli, te seže ka negativnoj vršnoj vrijednosti. Dok amplituda faze A (žuta) ulaznog napona seže od nule ka pozitivnoj vršnoj vrijednosti u trenutku isklapanja.

Vrijeme isklopa prekidača  $t = 0,045$  s

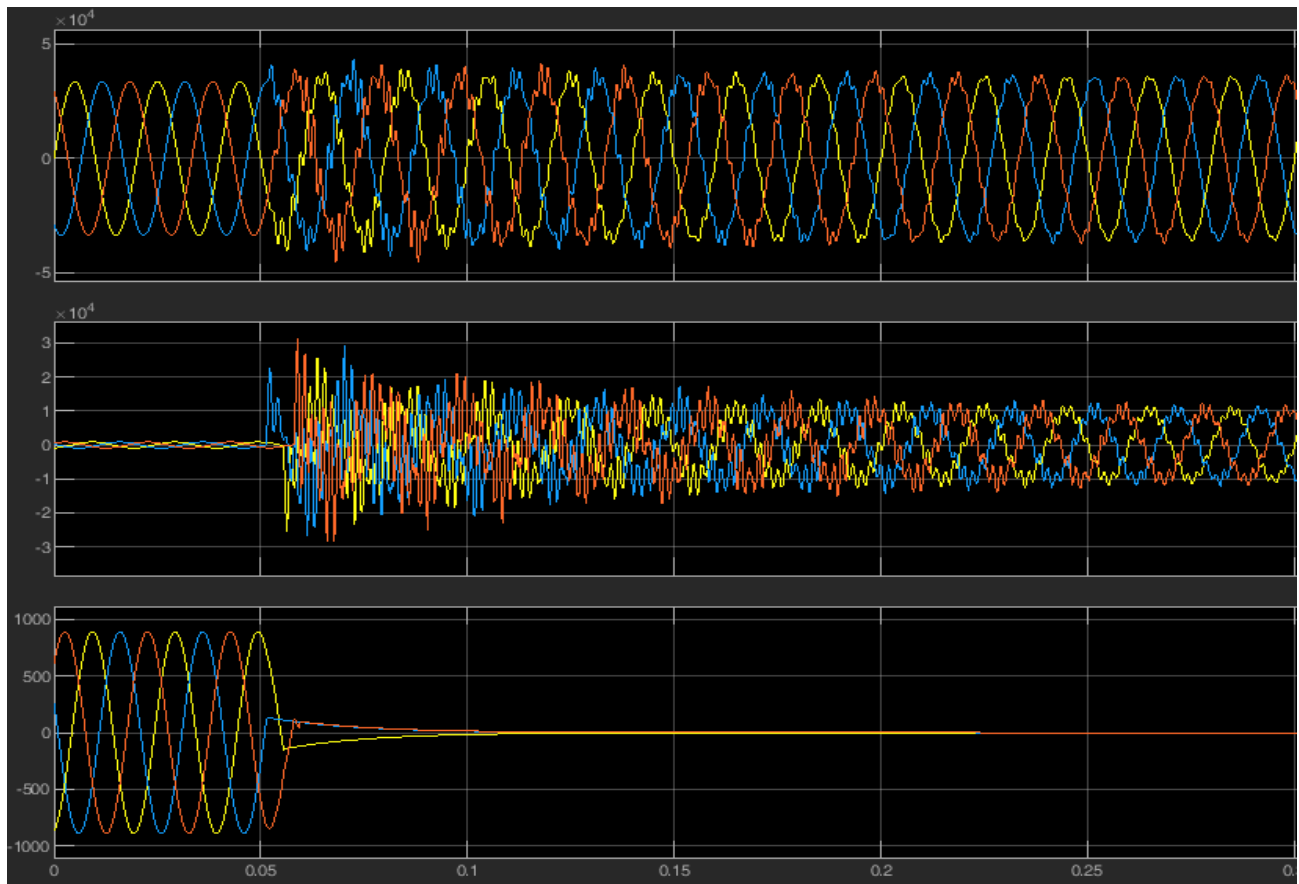


**Slika 6.5.** Snimljeni valni oblici primarnog napona i sekundarnog napona transformatora, te napona na teretu za vrijeme isklapanja prekidača  $t = 0,045$  s

U trenutku isklapanja prekidača  $t = 0,045$  s, nakon pola periode, možemo ponovno vidjeti kako faza A (žuta) ima najvišu vrijednost prenapona kao za vrijeme isklapanja prekidača od  $t = 0,035$  s samo negativnog predznaka. To se dogodilo zbog toga što je amplituda narinutog napona poprimila pozitivnu vršnu vrijednost.

Osim amplitude ulaznog napona faze A jednake vrijednosti samo suprotnog predznaka su i amplitude faze B (plava) i faze C (narančasta).

Vrijeme isklopa prekidača  $t = 0,05$  s



**Slika 6.6.** Snimljeni valni oblici primarnog napona i sekundarnog napona transformatora, te napona na teretu za vrijeme isklapanja prekidača  $t = 0,05$  s

Isto kao i kod faze A, samo obrnutim redoslijedom se dogodilo i za fazu C koja u trenutku isklapanja prekidača  $t = 0,05$  s poprima najveću vrijednost prenapona, samo različitog predznaka u odnosu na vrijeme isklapanja  $t = 0,04$  s.

Iz snimljenih valnih oblika može se vidjeti kako vrijeme isklopa utječe na visinu napona. Visina napona ovisi u kojem vremenu prekidač isklopi, odnosno u kojem dijelu amplitude pojedine faze narinutog napona prekidač isklopi. U trenutku isklopa prekidača, napon na teretu seže ka nuli, no zbog postojanja kapaciteta taj napon se neko vrijeme izbija, dok napon ispred prekidača poprima jako velike vrijednosti te dolazi do velikih titraja tog istog napona koji se tek nakon određenog vremena stabilizira na nazivnu vrijednost i ponovno postaje pravilnog sinusnog oblika.



## 6.2. Utjecaj visine sklopnog prenapona o vrijednosti tereta

U distributivnim mrežama vrijednosti grupe tereta pojedinih energetskih transformatora kako većih snaga, pa tako i onih manjih, znatno variraju. Varijacije potrošnje električne energije mogu se promatrati za jedan dan, tjedan, mjesec, sezonu ili godinu, te ovise o području u kojem se promatraju. Stoga je vrlo važno poznavati kakav utjecaj na elemente energetskih postrojenja i dalekovoda ima visina tereta, odnosno kakve će se pojave događati u mreži prilikom ispada različitih vrijednosti potrošača.

U ovom poglavlju uz konstantan napon iz mreže, pri jednakom vremenu isklapanja, promatrati ćemo isklapanja nekoliko različitih vrijednosti tereta. Simulacija se odvija pri ulaznom naponu, tj. linijskom naponu krute mreže u vrijednosti od 35 kV pri frekvenciji od 50 Hz, faznog pomaka 120°.

Vrijeme isklapanja prekidača  $t = 40$  ms

Transformator:

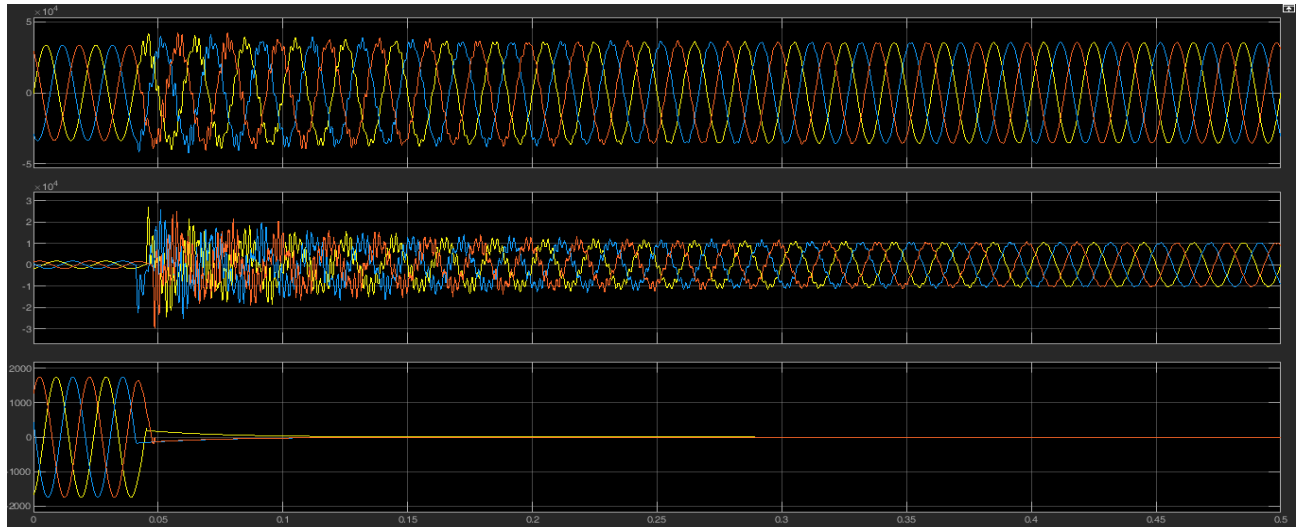
- 35/10 kV
- Direktno uzemljenje
- Nazivna snaga 25 MVA

Vrijednosti opterećenja:

- $P = 10$  MW
- $P = 15$  MW
- $P = 20$  MW

**Tab. 6.1.** Vrijednosti opterećenja za  $P = 10 \text{ MW}$

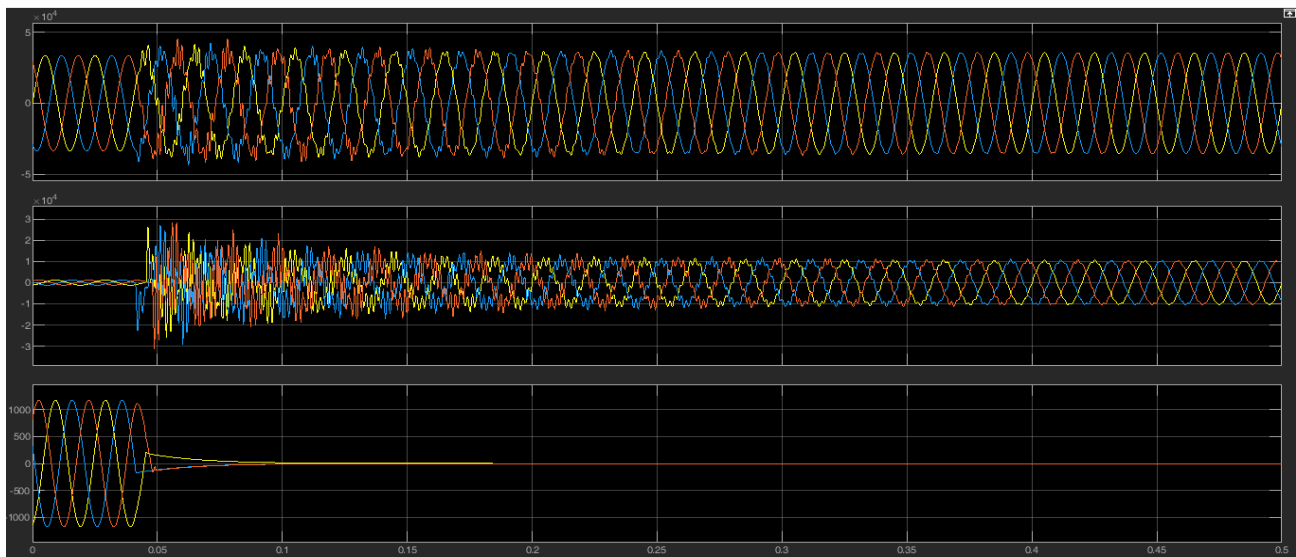
$P = 10 \text{ MW}$	$Q_L = 3 \text{ Mvar}$	$Q_C = 1 \text{ Mvar}$	$\cos \varphi = 0,95$
---------------------	------------------------	------------------------	-----------------------



**Slika 6.7.** Snimljeni valni oblici primarnog napona i sekundarnog napona transformatora, te napona na teretu za snage prema Tab. 6.1.

**Tab. 6.2.** Vrijednosti opterećenja za  $P = 15 \text{ MW}$

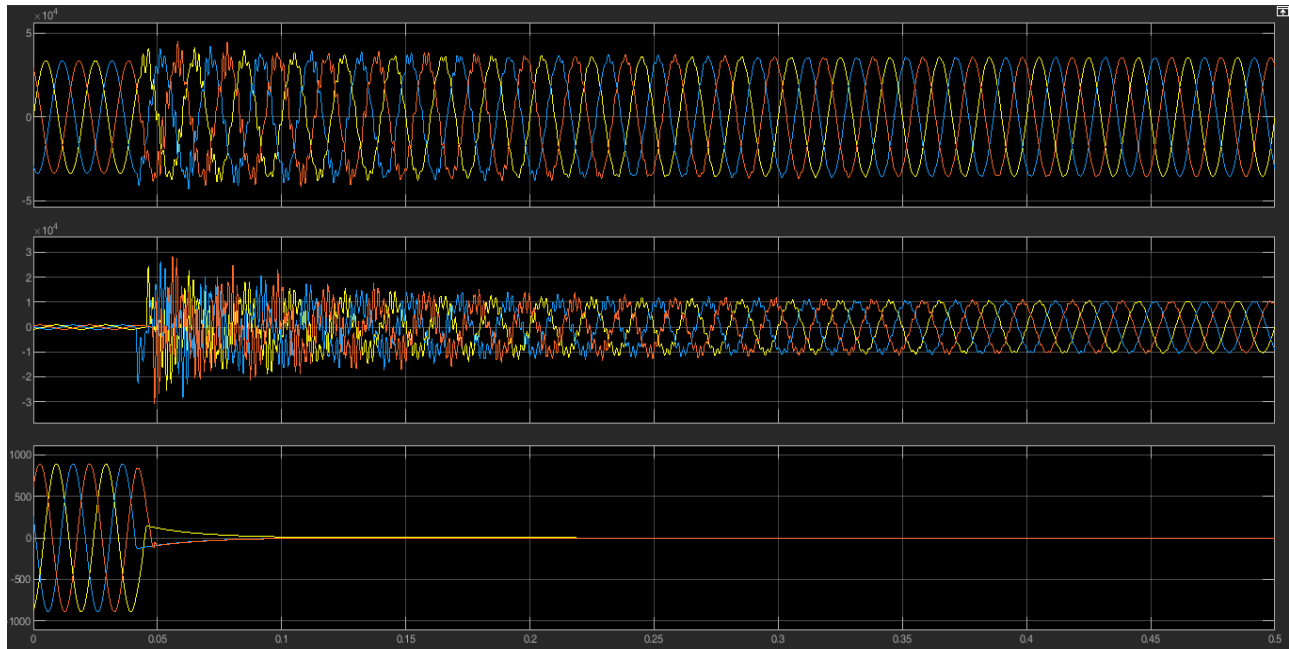
$P = 15 \text{ MW}$	$Q_L = 4 \text{ Mvar}$	$Q_C = 1,5 \text{ Mvar}$	$\cos \varphi = 0,96$
---------------------	------------------------	--------------------------	-----------------------



**Slika 6.8.** Snimljeni valni oblici primarnog napona i sekundarnog napona transformatora, te napona na teretu za snage prema Tab. 6.2.

**Tab. 6.3.** Vrijednosti opterećenja za  $P = 20$  MW

$P = 20$ MW	$Q_L = 5$ Mvar	$Q_C = 2$ Mvar	$\cos \varphi = 0,97$
-------------	----------------	----------------	-----------------------



**Slika 6.9.** Snimljeni valni oblici primarnog napona i sekundarnog napona transformatora, te napona na teretu za snage prema Tab. 6.3.

Visina vrijednosti opterećenja, prema snimljenim odzivima, nema prevelik utjecaj na visinu vrijednosti prenapona koji se pojavljuje u mreži. Prema snimljenim odzivima može se vidjeti da do promjene visine prenapona dolazi jedino u pojedinim fazama, pri čemu su vrijednosti prenapona za pojedine faze u sva tri slučaja podjednake. Visina tereta pri konstantnom naponu utječe na struje u mreži što dokazuje da će pri većim teretima teći veća struja u mreži, pa tako i postojati mogućnost od većih vrijednosti struja kratkog spoja. Ulazni napon nakon isklapanja titra kao i u prethodnim slučajevima, te se nakon određenog vremena stabilizira. Napon na prekidaču doseže i do 2,8 puta veću vrijednost u odnosu na vrijednost u normalnom pogonu, te titra do određenog vremena nakon kojeg se ponovno stabilizira. Napon na trošilu kao i u prethodnim slučajevima nakon isklapanja tek nakon određenog vremena poprima vrijednost nula i to zbog određenih kapaciteta u mreži koji ne dopuštaju da napon odmah dosegne vrijednost nula.

## 7. ZAKLJUČAK

Cilj ovog završnog rada bio je analizirati sklopne prenapone u distributivnim mrežama uz pomoć Matlab programskog paketa za jedan od slučajeva u kojem se javljaju sklopni prenaponi. Simulirana mreža predstavlja isključenje, odnosno ispad velikog potrošača na sekundarnoj strani 35/10 kV-ne transformatorske stanice. Snimljeni odzivi prikazuju valne oblike napona prije transformatora, nakon transformatora, te napon na potrošaču za različita vremena isključenja sredjenaponskog prekidača pri istoj vrijednosti tereta i za različite vrijednosti tereta pri istom vremenu isključenja. Prema snimljenim odzivima vidljivo je kako je vrijednost prenapona, u prvim trenucima nakon isključenja, 2,8 – 3,1 puta veća od nazivne vrijednosti linijskog napona sekundarne strane transformatora. Isto tako je vidljivo kako vrijeme isključenja, unutar jedne periode signala  $T = 20$  [ms], utječe na visinu prenapona, odnosno ovisi o tome da li se isključenje dogodilo pri rastućem dijelu signala (prema maksimalnoj vrijednosti), pri maksimalnoj vrijednosti signala ili pri silazećem dijelu signala (prema nuli). Najveća vrijednost prenapona dogodila se kada je signal određene faze bio na maksimalnoj vrijednosti u trenutku isključenja. Osim vremena isključenja, visina vrijednosti prenapona ovisi i o karakteristikama mreže koje utječu na taj napon, kao što su duljine dalekovoda, jedinični otpori dalekovoda i otpori elemenata mreže, temperature okoline i dr.. Znatan utjecaj na visinu vrijednosti prenapona imaju i potrošači, odnosno vrijednosti jalove snage koje, gledano na veće područje, ukoliko nisu barem djelomično uravnotežene visine kapacitivne i induktivne jalove snage, mogu utjecati na visinu prenapona u nekom dijelu mreže. Stoga je vrlo važno poznavati prijelazne pojave poput prenapona koji se javljaju bilo kakvim sklapanjima i sve ostale prijelazne pojave koje se javljaju u elektroenergetskim sustavima kako ne bi došlo do smetnji u sustavu, a isto tako i do prekida isporuke električne energije ka krajnjim korisnicima što bi rezultiralo velikim gubicima.

## LITERATURA

- [1] Jianming Li, Measurement and Analysis of Overvoltages in Power Systems, Wiley, 2018
- [2] M. Ožegović; K. Ožegović, Električne energetske mreže II, Udžbenici Sveučilišta u Splitu, Split 1997.
- [3] M. Stojkov; Z. Baus; M. Barukčić; I. Provči, Električni sklopni aparati, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Elektrotehnički fakultet u Osijeku, Slavonski Brod/ Osijek 2015.
- [4] K. Miklošević, Poboljšana analiza i predviđanje sklopnih prenapona u elektroenergetskoj mreži razvojem grafičkog sučelja, Doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike i informacijskih tehnologija Osijek, Osijek 2017
- [5] Prezentacije predavanja sa kolegija Sklopni aparati i visokonaponska tehnika, Fakultet elektrotehnike i informacijskih tehnologija Osijek
- [6] Prezentacije predavanja sa kolegija Elektroenergetska postrojenja, Fakultet elektrotehnike i informacijskih tehnologija Osijek
- [7] Prezentacije predavanja sa kolegija Prijenos i distribucija električne energije, Fakultet elektrotehnike i informacijskih tehnologija Osijek
- [8] Prezentacije predavanja sa kolegija Elektroenergetske mreže i vodovi, Fakultet elektrotehnike i informacijskih tehnologija Osijek
- [9] Vakumski prekidači serije VKΣ, URL: <https://www.koncar-ap.hr/documents/cats/kap-vksigma-2018-trial-he.pdf>, [Datum pristupanja: 02.09.2020.]
- [10] MATLAB, URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>, [Datum pristupanja: 02.09.2020.]
- [11] Schrack technik, Odvodnici prenapona, URL: [https://www.schrack.hr/fileadmin/f/hr/Bilder/Produkte\\_Shop/stranice/Info-cv-dani/2012/Infodani\\_Schrack\\_Technik\\_2011\\_12\\_prenaponska\\_zastita.pdf](https://www.schrack.hr/fileadmin/f/hr/Bilder/Produkte_Shop/stranice/Info-cv-dani/2012/Infodani_Schrack_Technik_2011_12_prenaponska_zastita.pdf) [Datum pristupanja: 03.09.2020]
- [12] EMTP, URL: <https://www.emtp-software.com/> [Datum pristupanja : 17.09.2020.]

## SAŽETAK

### **Analiza sklopnih prenapona u distributivnim mrežama primjenom Matlab-SimPowerSystemsa**

Sklopni prenaponi javljaju se tijekom sklopnih operacija u elektroenergetskom sustavu, koje za rezultat imaju gašenje dijelova sustava zbog održavanja ili zbog kvarova, te njihovo ponovno uključivanje. Visina vrijednosti prenapona ovisi o karakteristikama sustava u kojem se pojavljuje, a sustav u kojem analiziramo prenapone za ovaj završni rad opisan je u trećem drugom. Nastajanje prenapona, kao i mogućnosti njihove analize opisani su u trećem poglavlju koji nam ujedno govori nešto više o prenaponima. Četvrtim poglavljem prikazan je matematički model simulirane mreže. Matematičkim modelom opisani su svi elementi simulirane mreže pojedinačno. Peto poglavlje predstavlja simulacijski model simulirane mreže. U tom su poglavlju opisane sve simulacijske komponente simulirane mreže kao i program u kojem je napravljena simulacija sklopnog prenapona. U šestom poglavlju analizirani su dobiveni rezultati simulacije, gdje se promatra visina vrijednosti prenapona u ovisnosti o vremenu isključenja prekidača i gdje se promatra visina vrijednosti prenapona o vrijednosti opterećenja potrošača, što daje za rezultat da visina napona ovisi o vremenu isključenja i o vrijednosti opterećenja .

Ključne riječi: analiza sklopnih prenapona, distribucijka mreža, elektroenergetski sustav, prenapon, sklopni prenapon

## **ABSTRACT**

### **Analysis of switching overvoltages in distribution networks by using Matlab-SimPowerSystems**

Switching overvoltages occur during switching operations in the power system, which results in the shutdown and reconnection of system parts due to maintenance or malfunctions. The size of the surging value depends on the system's characteristics in which it occurs. The analyzed system used in this final paper is described in the second chapter. The appearance of overvoltages and their analysis possibilities are described in the third chapter, which also tells us a bit more about overvoltages. The fourth chapter presents a mathematical model of a simulated network that describes all the simulated network elements individually. The fifth chapter presents a simulation model of a simulated network. This chapter explains all the simulation components of the simulated network and the program in which the simulation of the switching overvoltage was made. In the sixth chapter, the obtained simulation results are analyzed using the sizes of overvoltage values which are observed based on the switch-of time and the amount of the consumer's load, which results in the voltage level depending on the switch-off time and the load value.

Key words: switching overvoltages analysis, distribution network, electrical grid, overvoltage, switching overvoltage

## **ŽIVOTOPIS**

Josip Paulin rođen 05.05.1998. godine u Virovitici. Živi u mjestu Četekovac, gdje 2005. godine započinje školovanje u Područnoj školi u Četekovcu, pri Osnovna škola Mikleuš gdje 2009. godine nastavlja obrazovanje. Završetkom Osnovne škole u Miklešu 2013. godine, upisuje Srednju školu Marka Marulića Slatina, smjer Elektrotehničar. Nakon završene srednje škole 2017. godine upisuje Stručni preddiplomski studij na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, smjer Elektroenergetika.