Analiza propagacije naponskih propada i struje kratkog spoja s obzirom na različite grupe spoja transformatora

Bilandžić, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:910843

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

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

Sveučilišni studij

ANALIZA PROPAGACIJE NAPONSKIH PROPADA I STRUJE KRATKOG SPOJA S OBZIROM NA RAZLIČITE GRUPE SPOJA TRANSFORMATORA

Diplomski rad

Josip Bilandžić

Osijek, 2016.

SADRŽAJ

1. UVOD 1

1.1. Zadatak završnog rada 1

2. KVAROVI U MREŽI I NAČINI SPAJANJA TRANSFORMATORA 2

2.1. Struje kratkog spoja 2

2.2.Vrste kratkog spoja 4

2.3.Naponski propadi 10

2.4.Načini spajanja transformatora 13

3. PROVEDENE SIMULACIJE 23

3.1. Propagacija naponskih propada prilikom kvara na 35 kV dalekovodu za različite spojeve transformatora 35/20 kV 24

3.2.Propagacija naponskih propada prilikom kvara na 110 kV dalekovodu za transformatore 110/35 kV, 35/20 kV i 20/0.4 kV 38

4. ZAKLJUČAK 51

LITERATURA 52

SAŽETAK 53

ABSTRACT 54

ŽIVOTOPIS 55

1. UVOD

Svrha rada je izraditi model električne mreže u programskom paketu Dig-SILENT Power Factory i izvršiti simulacije za tri vrste kratkog spoja, jednofazni kratki spoj, kratki spoj između dvije faze i kratki spoj između dvije faze uz istovremeni dodir sa zemljom. Uz to, potrebno je mijenjati spojeve transformatora i vidjeti kako pojedina vrsta kratkog spoja utječe na vrstu spoja i satni broj transformatora.

1.1. Zadatak diplomskog rada

Zadatak diplomskog rada je ukratko teorijski obraditi temu naponskih propada, struje kratkog spoja te grupe spoja transformatora. Nadalje, potrebno je detaljno prikazati kako utječe pojedina grupa spoja transformatora na propagaciju naponskih propada i struje kratkog spoja u elektroenergetskom sustavu. Na modelu dijela elektroenergetskog sustava potrebno je napraviti simulaciju kratkog spoja te provesti analizu osjetljivosti rezultata ovisno o različitim grupama spoja transformatora.

2. KVAROVI U MREŽI I NAČINI SPAJANJA TRANSFORMATORA

2.1. Struje kratkog spoja

Do kratkog spoja dolazi vodljivim premoštenjem izolacije između dijelova električnog postrojenja koji se nalaze na različitim potencijalima [2]. Uzrok pojave kratko spoja je:

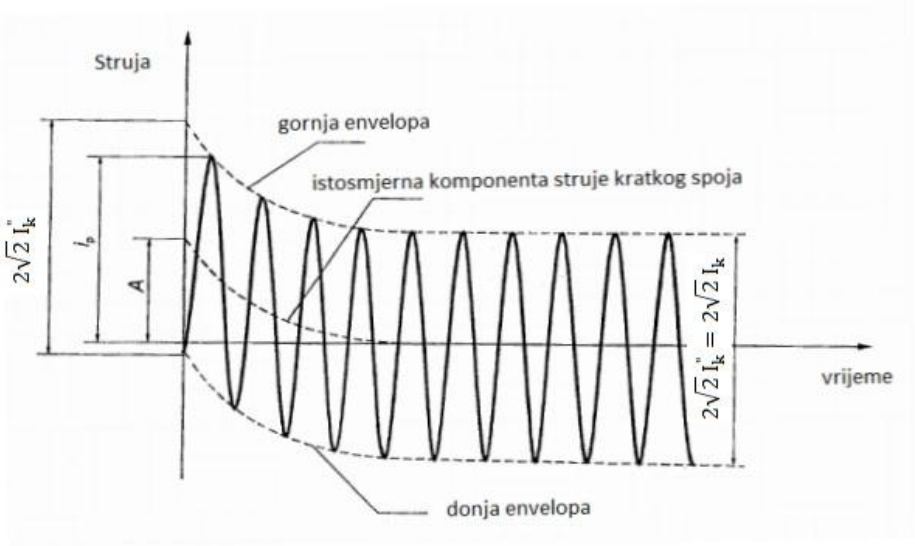
- Povećanje napona koji djeluje na izolaciju
- Smanjenje izolacije (npr. dodir vodiča uslijed njihanja vodiča)
- Istovremeno povećanje napona i smanjenje izolacije

S obzirom na trajanje kratkog spoja, dijelimo uzročnike kratkog spoja na:

- Prolazne uzročnike (prenaponi, trošenje izolacije, dodir uslijed njihanja vodiča, premoštenje nekim stranim gorivim tijelom)
- Trajne uzročnike (lom izolatora, pad vodiča na drugi vodič, ili na uzemljeni dio) [3]

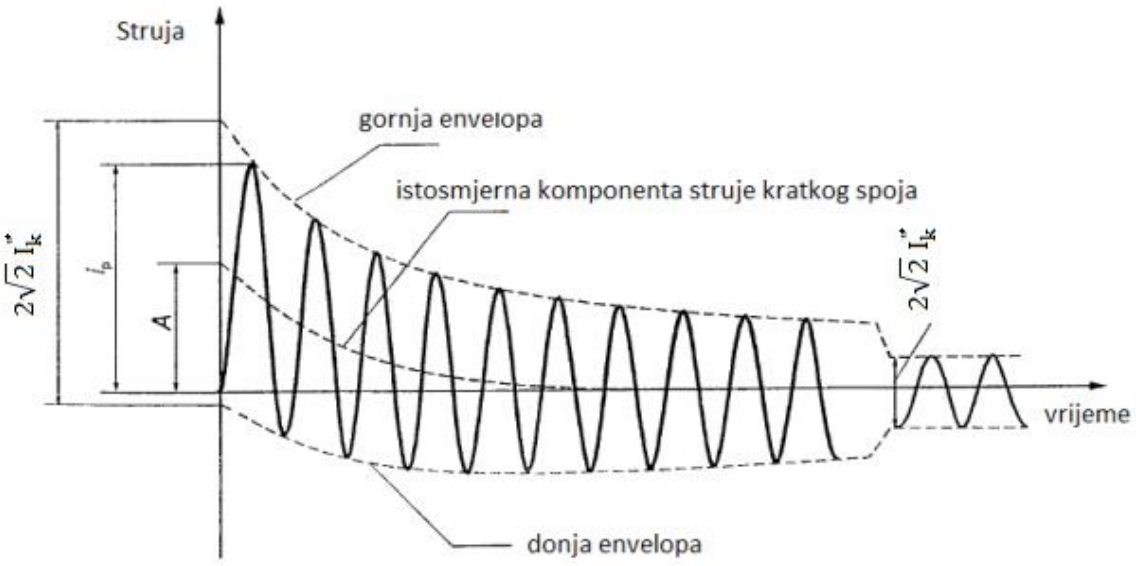
Pri izboru aparata i dimenzioniranju dijelova raklponih postrojenja treba razlikovati nazivnu struju i struju za vrijeme kratkog spoja [1]. Pod nazivnom strujom smatra se ona struja koja svojim protjecanjem kroz elemente sustava neće nanijeti nikakvu štetu, a struja kratkog spoja je struja koja nastaje u slučaju kvara u nekom od elemenata sustava, kao i struja preopterećenja.

U slučaju kratkog spoja, postoje dvije varijante. Kada je kvar daleko od generatora i kada je kvar blizu generatora. Daleko od generatora znači da se kratko spojeni strujni krug priključuje na točku s krutim naponom. Također, razlikujemo i sljedeće vrste struja: udarnu struju kratkog spoja, rasklopnu struju i struju mjerodavnu za zagrijavanje za vrijeme kratkog spoja



Sl. 2.1. *Valni oblik struje kratkog spoja kada je kvar daleko od generatora (konstantna izmjenična komponenta)[6]*

Slika 2.1.[6] prikazuje valni oblik struje kratkog spoja kada je kvar daleko od generatora.

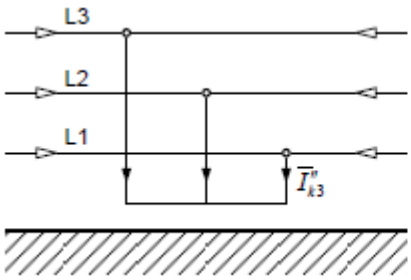


Sl. 2.2. *Valni oblik struje kratkog spoja kada je kvar blizu generatora (opadajuća izmjenična komponenta)[6]*

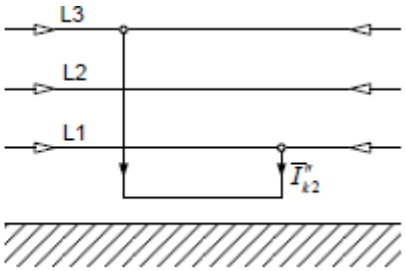
Slika 2.2. [6] prikazuje valni oblik struje kratkog spoja kada je kvar blizu generatora. Struja I_k'' naziva se subtranzijentna ili početna struja kratkog spoja i ona je mjerodavna za mehanička naprezanja u mreži. Udarna struja I_p, ili uklopna struja, definira se kao najveća dopuštena vrijednost struje kratkog spoja koju prekidač može prekinuti bez oštećenja uz nominalni napon. Javlja se za vrijeme prvog maksimuma, kao što je prikazano na slikama 2.1. i 2.2.. Istosmjerna komponenta struje javlja se zbog zaostale magnetske energije u generatoru i duljina njezinog trajanja ovisi o induktivitetu kruga. Postoji još i trajna struja kratkog spoja. Ona se javlja u ustaljenom stanju i mjerodavna je za termička naprezanja opreme [5].

2.2. Vrste kratkih spojeva

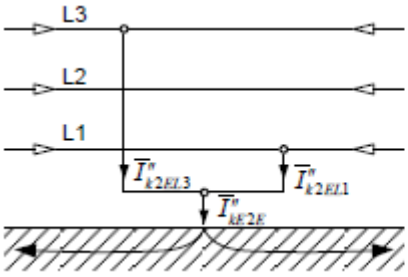
U trofaznoj mreži mogu nastupiti slijedeće vrste kratkih spojeva:



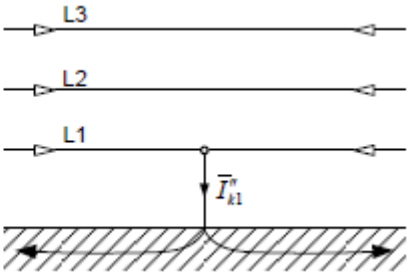
Sl. 2.3. *Trofazni kratki spoj[2]*



Sl. 2.4. *Dvofazni kratki spoj[2]*



Sl 2.5. *Dvofazni kratki spoj uz dodir sa zemljom[2]*

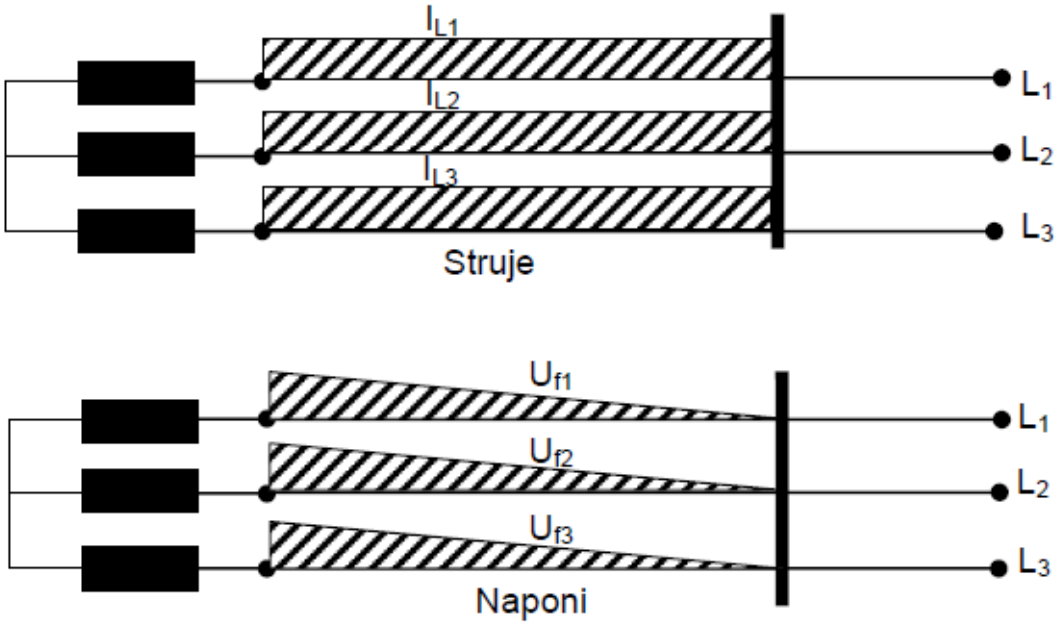


Sl. 2.6. *Jednofazni kratki spoj[2]*

Trofazni kratki spoj čini oko 5% svih kratkih spojeva, dvofazni i dvofazni uz istosmjerni dodir sa zemljom čine oko 15% svih kratkih spojeva, dok jednofazni kratki spoj čini 80% svih kvarova [2].

Trofazni kratki spoj se, pošto je simetričnog karaktera, najlakše proračunava. Na mjestu kvara, tri se fazna napona smanjuju na nulu i struja kratkog spoja opterećuje fazne vodiče simetrično, a neutralni vodič i zemlja ne sudjeluju u vođenju struje [2]. Struje se zatvaraju preko

dozemnih kapaciteta. Struja kratkog spoja ista je, neovisno o tome je li zvjezdište uzemljeno ili izolirano. Zbog toga je dovoljno proračun provesti samo za jednu fazu.

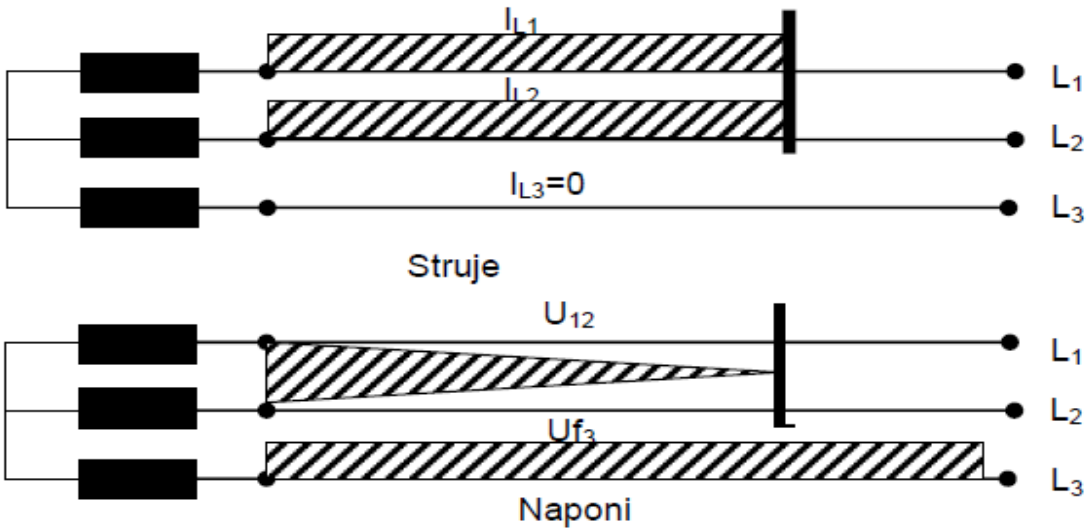


Sl. 2.7. *Raspodjela struje i napona po vodičima kod trofaznog kratkog spoja[3]*

Slika 2.7. prikazuje struje i napone po vodičima kod trofaznog kratkog spoja. Struje su jednake u svim fazama koje su u kvaru. Fazni i linijski naponi opadaju od nazivne vrijednosti vrijednosti u izvoru, do nule u točki kratkog spoja [3].

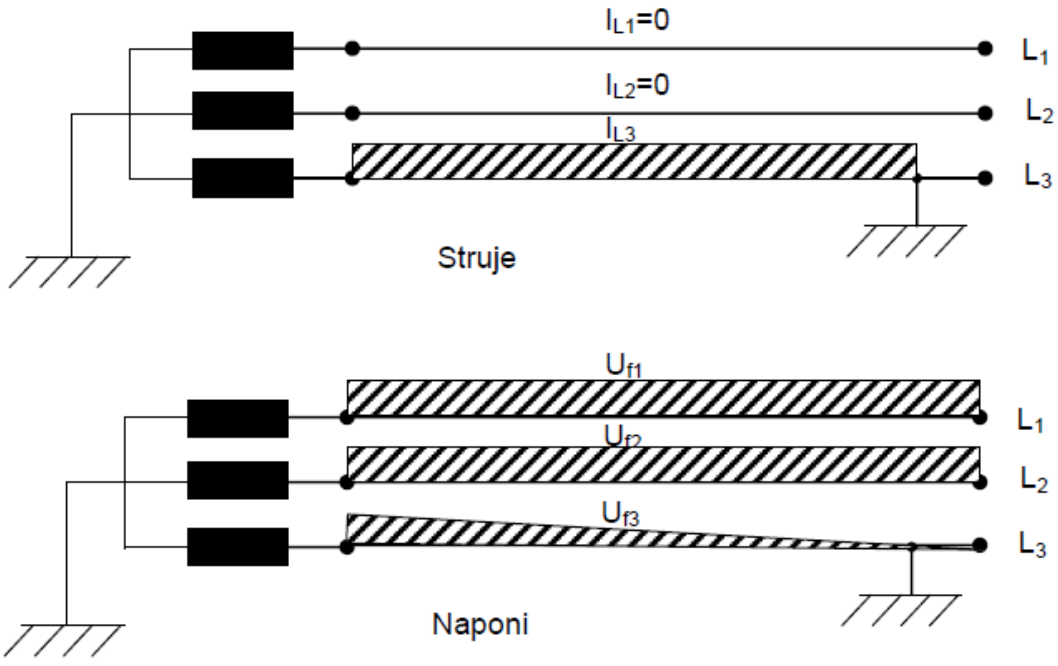
Pri nesimetričnim kvarovima (svi kvarovi osim trofaznog), situacija je znatno kompliciranа, naročito ako se u obzir mora uzeti i dodir sa zemljom. Kod tih se kratkih spojeva ne smanjuju svi naponi na nulu na mjestu kvara. Kao s posljedicom nesimetrije, osim elektromagnetskog ulančanja između faznih vodiča, dolazi i do ulančanja sa zemljom kao povratnim vodičem, ili pak s nulvodičem [2].

Sljedeće slike pokazuju raspodjelu napona i struja u slučaju nesimetričnih kratkih spojeva:



Sl. 2.8. *Raspodjela struje i napona po vodičima kod dvofaznog kratkog spoja[3]*

Slika 2.8. prikazuje struje i napone po vodičima kod dvofaznog kratkog spoja. Struje teku samo u fazama koje su u kvaru (jedna te ista struja teče u fazama koje su u kvaru, $I_{L1} = I_{L2}$). Struja zdrave faze jednaka je nuli. Fazni napon zdravog vodiča konstantan je duž vodiča. Linijski napon između faza u kvaru postepeno opada od pune vrijednosti u izvoru, do nule u točki kratkog spoja.



Sl. 2.9. *Raspodjela struje i napona po vodičima kod jednofaznog kratkog spoja[3]*

Slika 2.9. prikazuje struje i napone po vodičima kod jednofaznog kratkog spoja. Vidljivo je da struja teče samo u fazi koja je u kvaru i vraća se kroz zemlju. Fazni naponi zdravih faza su konstatni duž zdravih faznih vodiča. Na vodiču koji je u kvaru, napon opada od nazivnog napona u izvoru, do nule u točki kratkog spoja [3].

Struje u trofaznom simetričnom sustavu mogu se izračunati na slijedeći način [6]:

$$i_{L1} = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega t + \varphi) \tag{2.1.}$$

$$i_{L2} = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin\left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \tag{2.2.}$$

$$i_{L3} = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin\left(\omega t + \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) \tag{2.3.}$$

gdje je I efektivna vrijednost struje, φ kut struje u trenutku t=0, ω kružna frekvencija.

Pošto su sinusne funkcije, struje možemo prikazati u kompleksnoj ravnini vektorom modula I i argumentom φ pa je:

$$\bar{I}_{L1} = I \cdot e^{j\varphi} = I\angle\varphi \tag{2.4.}$$

$$\bar{I}_{L2} = I \cdot e^{j\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right)} = I\angle\varphi - \frac{2\pi}{3} \tag{2.5.}$$

$$\bar{I}_{L3} = I \cdot e^{j\left(\varphi - \frac{4\pi}{3}\right)} = I\angle\varphi - \frac{4\pi}{3} \tag{2.6.}$$

Radi pojednostavljenja izraza uvodi se operator a koji ima vrijednost:

$$a = 1\angle 2\pi/3 = 1\angle 120° \tag{2.7.}$$

Množenje s operatorom a znači zakretanje vektora za kut $\frac{2\pi}{3}$ odnosno 120° [1]. Potenciranjem operatora a dobije se:

$$a^2 = \left(e^{j\frac{2\pi}{3}}\right)^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} \tag{2.8.}$$

Uzevši u obzir izraze od (2.4.) do (2.6.), (2.7.) i (2.8.) moeže se napisati slijedeće:

$$\bar{I}_{L1} = I \cdot e^{j\varphi} \tag{2.9.}$$

$$\bar{I}_{L2} = I \cdot e^{j\varphi} \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}} = a^2 \cdot I \cdot e^{j\varphi} = a^2 I_{L1} \tag{2.10.}$$

$$\bar{I}_{L3} = I \cdot e^{j\varphi} \cdot e^{-j\frac{4\pi}{3}} = a \cdot I \cdot e^{j\varphi} = a I_{L1} \tag{2.11.}$$

Za simetričan trofazni sustav vrijedi:

$$\bar{I}_{L1} + \bar{I}_{L2} + \bar{I}_{L3} = 0 \tag{2.12.}$$

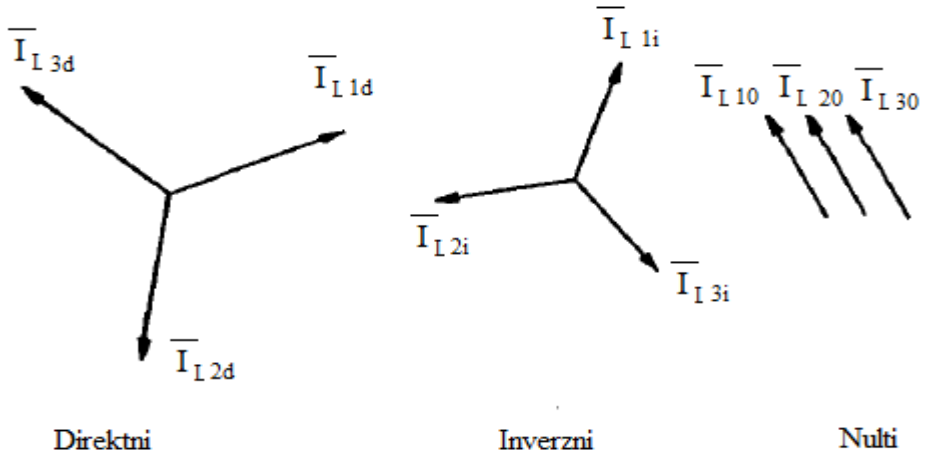
pa uvrštavanjem izraza od (2.9.) do (2.11.) u (2.12.) dobije se:

$$\bar{I}_{L1}(1 + a + a^2) = 0 \tag{2.13.}$$

što je i ispunjeno, jer je

$$1 + a + a^2 = 0 \tag{2.14.}$$

Osim simetričnog kvara postoje i nesimetrični, kako je već ranije navedeno. U nesimetričnom sustavu nije moguće prilike u mreži odrediti promatranjem stanja samo u jednoj fazi, pa nije moguće ni trofaznu mrežu neposredno zamijeniti s ekvivalentnom shemom. Rastavljanjem trofaznog nesimetričnog sistema u tri simetrična trofazna sustava, koja se mogu prikazati sa tri jednofazne sheme, postiže se znatno pojednostavljenje računa. Može se pokazati da se tri bilo kakva vektora mogu zamijeniti sa tri sustava vektora, slika 2.10. [1]:



Sl. 2.10.*Simetrične komponente*

Direktni sustav je onaj sustav koji ima redoslijed faza kao simetrični trofazni sustav, inverzni je onaj koji ima obrnut redoslijed rasporeda faza od onog u simetričnom sustavu dok je nulti sustav prikazan vektorima istog modula i istog argumenta.

Upotrebom operatora a moguće je prikazati veličine u direktnom sustavu izrazima:

$$\bar{I}_{L1,d} = \bar{I}_d \tag{2.15.}$$

$$\bar{I}_{L2,d} = a^2\bar{I}_d \tag{2.16.}$$

$$\bar{I}_{L3,d} = a\bar{I}_d \tag{2.17.}$$

Za inverzni sustav vrijede relacije:

$$\bar{I}_{L1,i} = \bar{I}_i \tag{2.18.}$$

$$\bar{I}_{L2,i} = a\bar{I}_i \tag{2.19.}$$

$$\bar{I}_{L3,i} = a^2\bar{I}_i \tag{2.20.}$$

Za nulti sustav vrijedi:

$$\bar{I}_{L1,0} = \bar{I}_{L2,0} = \bar{I}_{L3,0} = \bar{I}_0 \tag{2.21.}$$

U (2.15.) struja direktnog sustava u fazi L1 označena je samo sa $\bar{I}_d$, bez oznake faze. To je učinjeno i za struje inverznog i nultog sustava. Prema tome $\bar{I}_d$, $\bar{I}_i$ i $\bar{I}_0$, znače struje direktnog, inverznog, odnosno nultog sustava u fazi L1. Zbrajanjem triju komponenata jedne faze dobivamo stvarnu veličinu (struju) u toj fazi. Prema tome je:

$$\bar{I}_{L1} = \bar{I}_d + \bar{I}_i + \bar{I}_0 \tag{2.22.}$$

$$\bar{I}_{L2} = a^2\bar{I}_d + a\bar{I}_i + \bar{I}_0 \tag{2.23.}$$

$$\bar{I}_{L3} = a\bar{I}_d + a^2\bar{I}_i + \bar{I}_0 \tag{2.24.}$$

Ako zbrojimo jednadžbe (2.22.), (2.23.) i (2.24.) dobivamo:

$$3\bar{I}_0 = (\bar{I}_{L1} + \bar{I}_{L2} + \bar{I}_{L3}) - (\bar{I}_d + \bar{I}_i)(1 + a + a^2) \tag{2.25.}$$

uzmemo li u obzir (2.14.), za nultu komponentu imamo:

$$\bar{I}_0 = \frac{1}{3}(\bar{I}_{L1} + \bar{I}_{L2} + \bar{I}_{L3}) \tag{2.26.}$$

Da odredimo direktnu komponentu, pomnožimo (2.23.) sa a, a (2.24.) sa a^2, te zbrojimo te dvije jednadžbe sa (2.22.). Tada dobivamo:

$$\bar{I}_d = \frac{1}{3}(\bar{I}_R + a\bar{I}_S + a^2\bar{I}_T) \tag{2.27.}$$

Pri određivanju inverzne komponente množimo (2.23.) sa a^2,a (2.24.) sa a, pa iz zbroja tih jednadžbi sa (2.25.) dobije se:

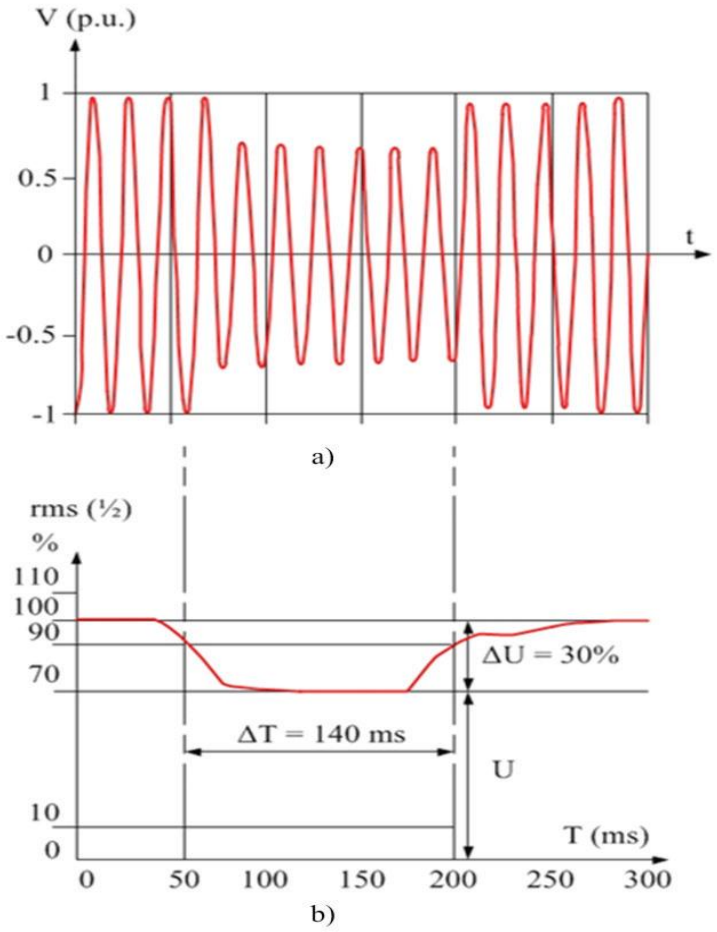
$$\bar{I}_i = \frac{1}{3}(\bar{I}_{L1} + a^2\bar{I}_{L2} + a\bar{I}_{L3}) \tag{2.28.}$$

Pomoću izraza (2.26.), (2.27.) i (2.28.) mogu se odrediti simetrične komponente nesimetričnog trofaznog sustava, a pomoću (2.22.), (2.23.) i (2.24.) struje u fazama pomoću simetričnih komponenata [1].

2.3. Naponski propadi

Naponski propad je dvodimenzionalni elektromagnetski poremećaj, određen razinom napona i vremenom trajanja. U kratkom vremenu, dolazi do naglog, kratkotrajnog sniženja efektivne vrijednosti izmjeničnog, opskrbnog napona, slika 2.10. [7]. Naponski propad definira se kao slučaj kada efektivna vrijednost napona padne na vrijednost između 10 i 90% nazivne vrijednosti u trajanju između 10 ms i 1 min. Vrijednost takvog, iznenadnog, propada označava se najčešće kao preostala efektivna vrijednost napona u tom trenutku. Definicija naponskog propada grafički je prikazana na slici 2.10. [8]. Većinom su izazvani kratkim spojevima i pokretanjem motora većih snaga, te stvaraju probleme posebno osjetljivoj opremi [7]:

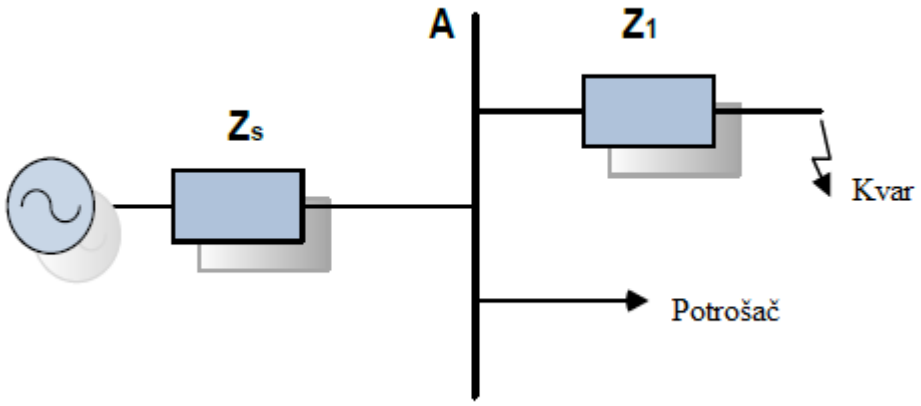
- pogoni s promjenjivom brzinom,
- oprema za vođenje procea,
- računala



Sl. 2.10. *Primjer naposnkog propada: a) vremenska domena, b) efektivna vrijednost[9]*

Kako su kvarovi uzrokovani većinom kratkim spojevima u mreži, razlikujemo simetrične naponske propade i nesimetrične naponske propade, ovisno o vrsti kratkog spoja koji ih je uzrokovao (jednofazni kratki spoj, dvofazni kratki spoj, dvofazni kratki spoj uz istovremeni dodir sa zemljom, trofazni kratki spoj) [9]. Svaka od navedenih pojava, osim što izaziva naponski propad, posljedično i rezultira narušenom simetrijom cjelokupnog sustava [8]. U tom slučaju, potrebno je provesti proračune za sve faze ili koristiti metodu simetričnih komponenata. Karakteristike naponskih propada kojima su uzroci nesimetrični kratki spojevi prikazani su pomoću modela naponskog dijelila primjenom pojednostavljene metode simetričnih komponenti. Pojednostavljena metoda simetričnih komponenti odnosi se na pretpostavku da su direktna i inverzna komponenta simetričnog sustava jednake. Takvu aproksimaciju možemo izvesti budući da se u prijenosnoj mreži radi uglavnom o statičkim krugovima s vodovima i transformatorima kao osnovnim dijelovima. Na

slici 2.11. [8] prikazan je model naponskog dijelila gdje Z_S predstavlja impedanciju izvorišta, Z_1 impedanciju kvara, a točka A njihovu zajedničku sabirnicu.



Sl. 2.11. *Model naponskog dijelila[9]*

Analitički izraz za napone trofaznog sustava izražen pomoću (pojednostavljene) metode simetričnih komponenata prikazan u matričnom obliku glasi [9]:

$$V_A = \frac{Z_1}{Z_S + Z_1} \cdot E \tag{2.29.}$$

ako pretpostavimo da je napon E prije nastanka kvara 1 p.u., tada izraz (2.29.) poprima slijedeći oblik:

$$V_A = \frac{Z_1}{Z_S + Z_1} \tag{2.30.}$$

iz jednadžbe (2.30.) može se uočiti da propad postaje veći za kvarove električki bliže potrošaču (Z_1 se smanjuje) i za sustave sa manjom razinom kvara (Z_S se povećava) [9].

Takvi kvarovi uzrokuju prekide u industrijskim procesima koji rezultiraju neispravnim radom opreme i značajnim ekonomskim gubicima [9]. Za razvoj kompatibilnosti opreme, važno je poznavati slijedeća dva podatka: trajanje propada i jačinu naponskog propada.

Trajanje naponskog propada je vremenski interval od trenutka nastanka propada valnog oblika, do ponovnog uspostavljanja valnog oblika napona kakav je on bio neposredno prije kvara, odnosno do oporavka vala.

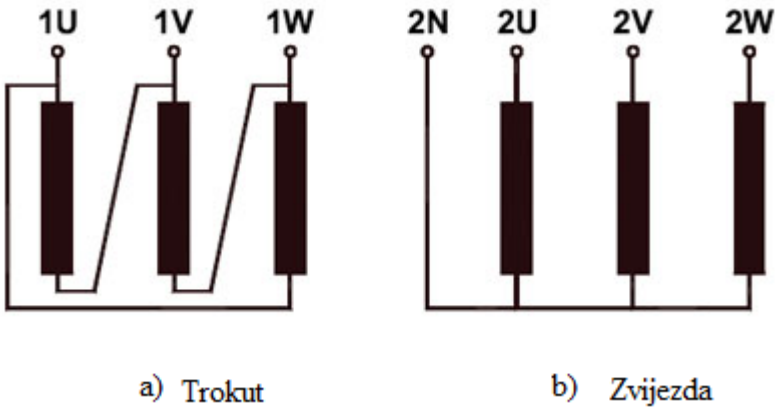
Jačina naponskog propada odnosi se na preostali napon na sabirnici tijekom kvara i na vrijeme koje je potrebno da zaštita ukloni kvar [10]. Osim pada efektivne vrijednosti napona, dolazi i do pomaka faznog kuta [11].

Izuzev nabrojanih poteškoća koje stvaraju naponski propadi, postoji još jedna vrlo važna. To je utjacaj naponskog propada na transformator, odnosno na magnetiziranje njegove jezgre. Zasićenje jezgre transformatora javlja se zbog varijacije napona kada se napon oporavlja i uzrokuje struje koje su slične onim strujama do kojih dolazi kada se transformator priključuje [11]. Razlog zbog kojeg dolazi do zasićenja je istosmjerna komponenta magnetskog toka nakon propada. Tok nije jednak nuli i pojavljuje se zasićenje jezgre.

Broj i karakteristike propada napona kao što su amplituda, fazni kut i trajanje mogu se razlikovati na mjestu nastanka od onih koji se vide na korisničkom sučelju. Ta pojava razultat je propagacije takvog poremećaja kroz različite elemente mreže. Poremećaj koji se dogodi na višim naponskim nivoima u prijenosnoj mreži horizontalno se širi upetljanom mrežom preko spojnih vodova te posljedično pogađa čvorove u kojima se preko energetskih transformatora kaskadno prenosi kroz različite naponske razine sve do sučelja s krajnjim korisnikom. Važno je napomenuti da smjer širenja poremećaja iz niženaponske mreže u višenaponsku nije toliko značajan, budući da transformator predstavlja veliku impedanciju gledajući s niženaponske strane. Shodno tome, poremećaj koji se dogodi na niženaponskoj strani, neće imati osjetnog efekta na karakteristike napona na višenaponskoj strani. Pri propagaciji naponskog poremećaja s viših na niže naponske razine, mnogo je faktora koji imaju utjecaj na izobličenje karakteristika istog. Osim pada napona na impedancijama vodova, utjecaj izvedbe transformatorski namota te način i mjesto uzemljenja pojedine mreže imaju dominantnu ulogu u navedenoj distorziji karakteristika naponskog poremećaja [8].

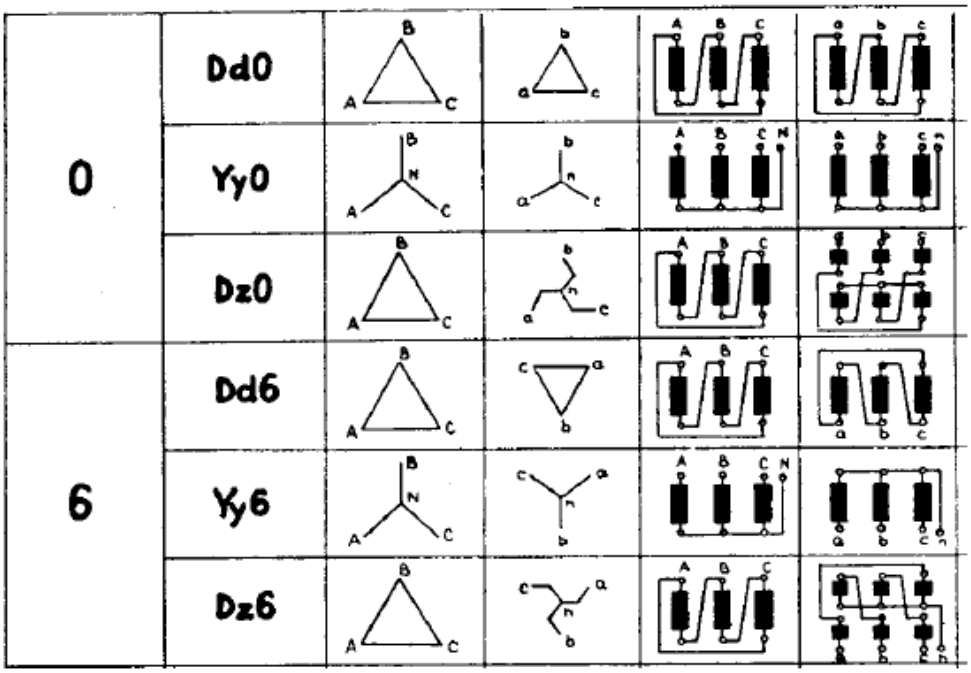
2.4. Načini spajanja transformatora

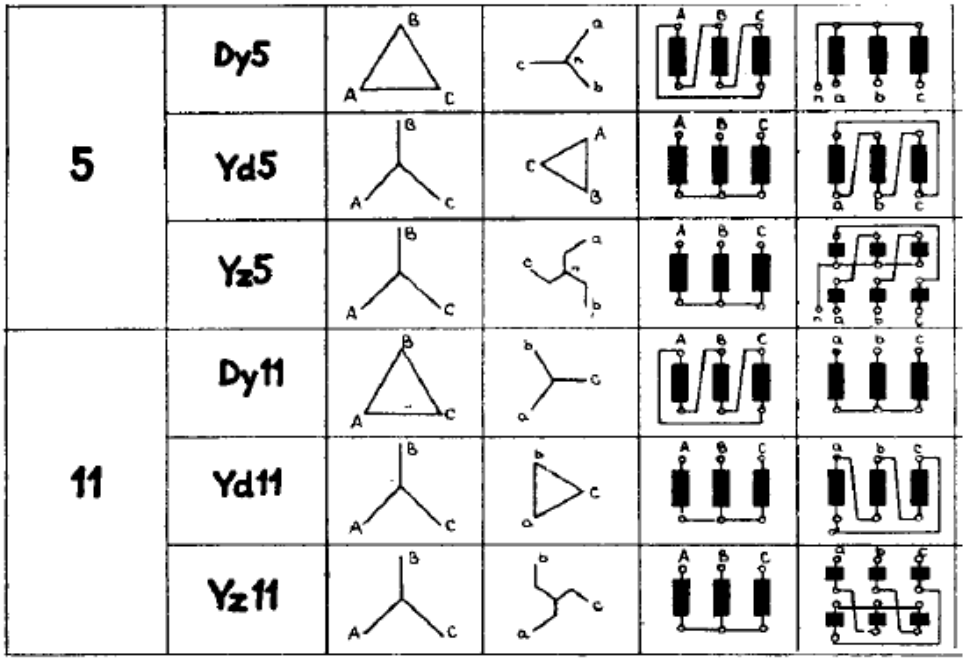
Energetski transformatori u svojoj izvedbi mogu se razlikovati prema grupi spoja njihovih namota. Fazni namoti transformatora tako dolaze u spoju trokuta (oznake D ili d) ili spoju zvijezde (Y ili y), slika 2.12. [12]. Pri tom velika slova predstavljaju primarni, a mala sekundarni namot [8]. Postoji još i spoj cik cak, ali njega se neće promatrati u ovome radu.



Sl. 2.12. *Spoj namota u trokut a) i u zvijezdu b)*

Kako se namot primara i sekundara može spojiti na spomenute načine postoje razne kombinacije spojeva transformatora. U te kombinacije još se uključuje satni broj koji predstavlja višekratnik kuta 30° za koji zaostaje niskonaponski fazni napon iza istoimenog visokonaponskog faznog napona [12]. Slijedeća slika pokazuje kombinacije spojeva namota primara i sekundara [13].





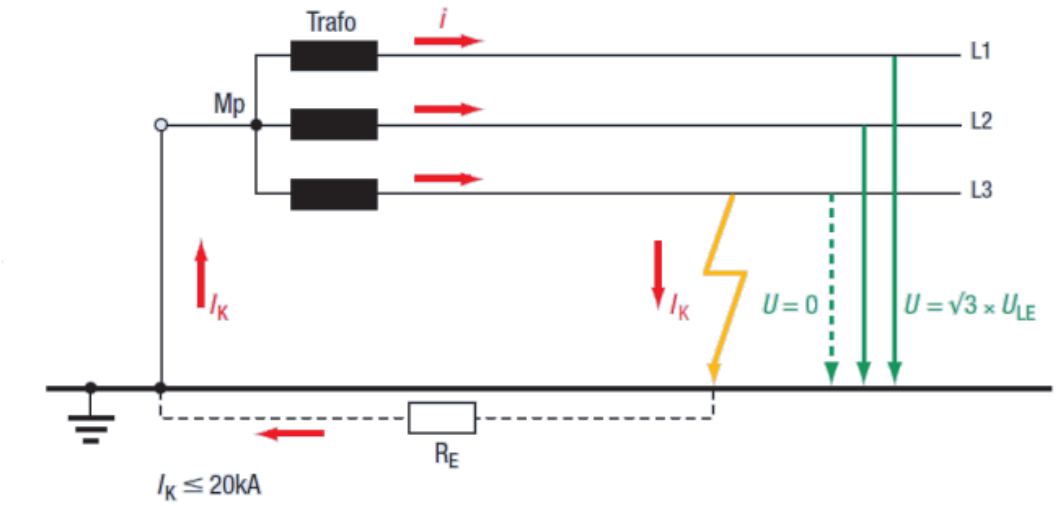
Sl 2.13. *Kombinacije spojeva namota transformatora[13]*

Pošto namot transformatora može biti i uzemljen, potrebno je uzeti u obzir i način uzemljivanja neutralne točke transformatora pri promatranju propagacije naponskog propada u mreži. S obzirom na uloge uzemljenja razlikuju se pogonsko i zaštitno te gromobransko uzemljenje. Uzemljenje zvjezdišta transformatora (bez obzira na vrstu uzemljenja) pripada uzemljenju mreže u normalnom pogonu (pogonskom uzemljenju). Ono može biti:

- izolirano prema zemlji;
- direktno (kruto) spojeno sa zemljom;
- spojeno sa zemljom kombiniranjem prigušnice i maloomsko otpornika;
- spojeno sa zemljom preko maloomskog otpornika;
- spojeno sa zemljom preko prigušnice:
    - fino regulirane,
    - stupnjevite (ručno/stupnjevima),
    - fiksne.

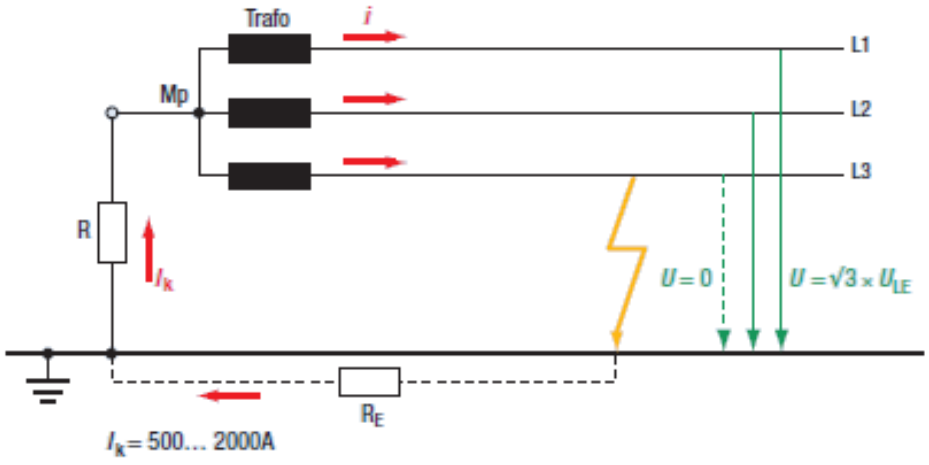
Praksa uzemljenja u Hrvatskoj je sljedeća: visoki napon direktno se uzemljuje, srednji napon u pravilu se ili ostavlja izoliran ili se uzemljuje preko maloomskog otpornika, dok se niski napon direktno uzemljuje [14].

U slučaju kada je zvjezdište direktno uzemljeno slika 2.14. [14], veličina struje jednofaznog kratkog spoja reda je veličine struje trofaznog kratkog spoja. Direktnim spajanjem zvjezdišta sa zemljom dobivamo zatvorenu petlju kroz koju teče razmjerno velika struja kvara I_k.



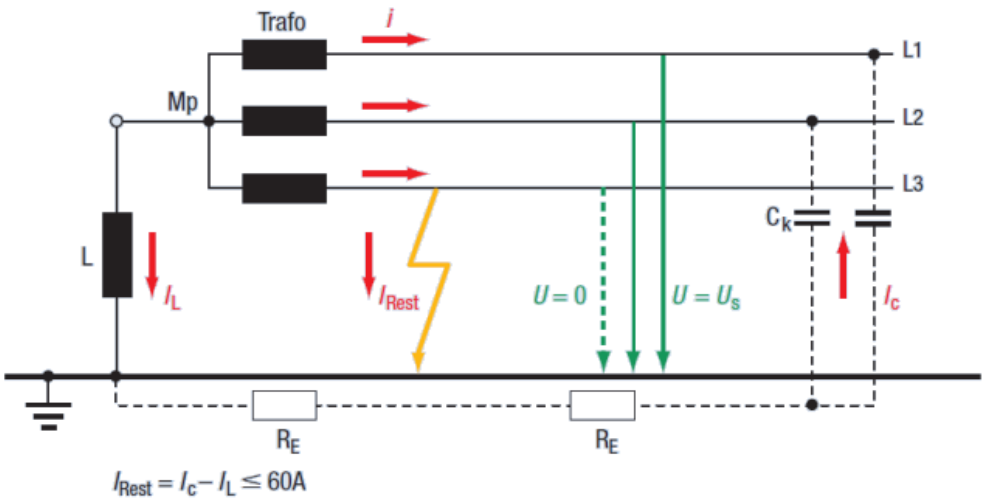
Sl. 2.14. *Zvjezdište direktno uzemljeno[14]*

Uzemljenje možemo izvesti i dodavanjem maloomskog otpornika između zvjezdišta i zemlje pa spoj izgleda kao na slici 2.15. [14]:



Sl. 2.15. *Zvjezdište uzemljeno preko maloomskog otpornika[14]*

Ugradnjom automatskih kompenzacijskih prigušnica (Petersonovih prigušnica) za rezonantno uzemljenje povećava se kvaliteta opskrbe električnom energijom s gledišta pouzdanosti napajanja. K tome, automatskom prigušnicom se vrši i kompenzacija kapacitivne struje mreže. Prema načinu izvedbe automatske kompenzacijske prigušnice za rezonantno uzemljenje obično se dijele na: kontinuirane automatske kompenzacijske prigušnice i stupnjevanje automatske prigušnice. Princip rada kompenzacijske prigušnice je jednostavan. U slučaju zemljospoja jedne faze, ukupni kapacitet mreže prema zemlji i induktivitet prigušnice , stvaraju jedan rezonantni krug čija je impedancija teorijski beskonačna. U ovoj situaciji reaktivna struja na mjestu kvara, neovisno o prijelaznom otporu između faze i zemlje, se poništava, slika 2.16. [14].



Sl. 2.16. *Uzemljenje zvjezdišta pomoću prigušnice[14]*

Obzirom na utjecaj izvedbe energetskog transformatora na propagaciju nesimetričnog naponskog poremećaja isti se mogu podijeliti na tri osnovne skupine [8]:

- Transformatori koji nemaju utjecaja na izobličenje karakteristika propada napona na sekundarnoj strani,
- Transformatori koji filtriraju nultu komponentu napona simetričnog trofaznog sustava,
- Transformatori koji preslikavaju linijske napone u fazne i obrnuto.

Transformatori koji nemaju utjecaja na izobličenje karakteristika propada napona preslikavaju naponske propade na sekundarnu stranu bez promjene karakteristika istih već ih samo transformiraju

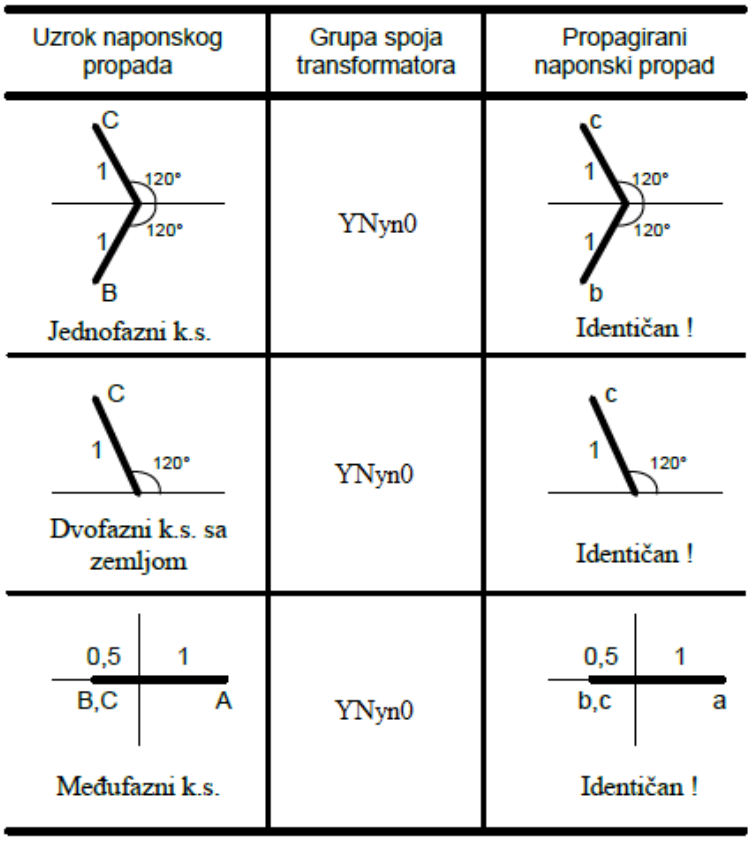
u nazivnom omjeru transformacije za svaku fazu podjednako. Takvi transformatori prenose sve tri komponente napona simetričnog trofaznog sustava te nemaju utjecaja na promjenu jediničnih vrijednosti pojedinih faznih vektora. Jedini tip transformatora s takvim karakteristikama je transformator s primarnim i sekundarnim namotima spojenim u zvijezdu te s oba zvjezdišta uzemljena. Njegova standardna oznaka je YNyn te takav transformator ima očuvan relativan odnos fazora napona primarne i sekundarne strane u jediničnim vrijednostima (p.u.). Navedeni relativni odnos fazora napona u p.u. pokazuje matrica transformacije prema izrazu (2.31.),

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{as} \\ \bar{V}_{bs} \\ \bar{V}_{cs} \end{bmatrix} = [M_T] \begin{bmatrix} \bar{V}_{ap} \\ \bar{V}_{bp} \\ \bar{V}_{cp} \end{bmatrix} \tag{2.31.}$$

gdje su V_{as}, V_{bs} i V_{cs} fazni naponi na sekundarnoj strani dok su V_{ap}, V_{bp} i V_{cp} fazni naponi primarne strane u jediničnim vrijednostima. Matrica transformacije $[M_T]$ izračunava se na način da se svaki nesimetrični naponski propad razloži na simetrične komponente trofaznog sustava koje se, ovisno o izvedbi transformatora, pojedinačno preslikavaju na sekundarnu stranu istog. Njihovo sumiranje nakon propagacije rezultira fazorskom slikom napona sekundarne strane. Matrica tramsformacija M_{T1} za YNyn transformator prikazana je s (2.32.) [8]:

$$M_{T1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.32.}$$

Koristeći matricu transformacija moguće je procijeniti karakteristike propagiranog nesimetričnog naponskog propada poznavajući pri tom njegov inicijalni izgled. Propagacija reprezentativnih tipova nesimetričnih propada kroz YNyn transformator prikazana je na slici 2.17. [8]:



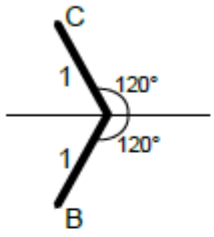
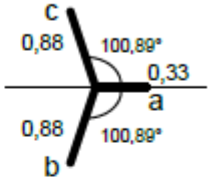
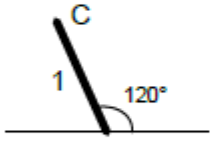
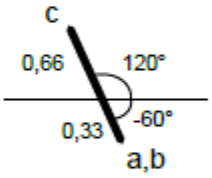
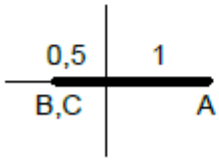
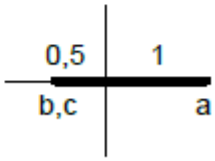
Sl. 2.17. *Propagacija nesimetričnog naponskog propada kroz YNyn transformator[8]*

Iz slike 2.17. vidljivo je da se vektori napona svake pojedine faze preslikavaju na sekundarnu stranu u identičnim jediničnim vrijednostima što posljedično podrazumijeva nepromijenjene karakteristike naponskog propada [8].

U slučaju kada su namoti transformatora na primarnoj i sekundarnoj strani spojeni u istovrsni spoj (zvijezda ili torkut) sa barem jednim neuzemljenim namotom, tada dolazi do određenog oblika deformacije karakteristika naponskog propada na propagiranoj strani. Uzrok tome leži u činjenici da takva grupa spoja predstavlja beskonačnu impedanciju za nultu komponentu napona nesimetričnog propada koja se u tom slučaju ne može transformirati na sekundarnu stranu. Na sekundarnoj se strani tada sumiraju vektori simetričnih komponenti trofaznog sustava bez nulte komponente što posljedično rezultira diferentnim karakteristikama naponskog propada u odnosu na inicijalni [8]. Vrste transformatora koje posjeduju navedeno svojstvo nose oznaku Yy, Yyn, Yny i Dd, a njihova matrica transformacije dana je izrazom (2.33.) [8].

$$M_{T2} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \tag{2.33.}$$

Odraz reprezentativnih tipova nesimetričnih naponskih propada s primarne strane na sekundarnu stranu navedenih transformatora dobiva se uvrštenjem matrice (2.33.) u izraz (2.31.), a rezultati propagacije prikazani su na slici 2.18. [8]:

Uzrok naponskog propada	Grupa spoja transformatora	Propagirani naponski propad
 Jednofazni k.s.	Yy0 Yyn0 YNy0 Dd0	 Propad u svim fazama!
 Dvofazni k.s. sa zemljom	Yy0 Yyn0 YNy0 Dd0	 Propad u svim fazama!
 Međufazni k.s.	Yy0 Yyn0 YNy0 Dd0	 Identičan !

Sl. 2.18. *Propagacija nesimetričnog naponskog propada kroz Yy0, YNy0, Yyn i Dd0 transformator[8]*

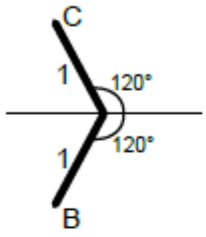
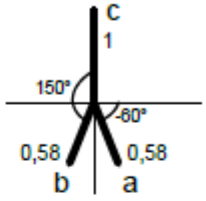
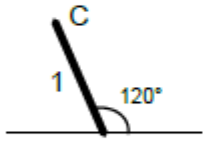
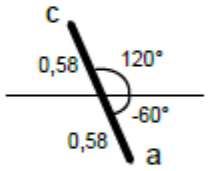
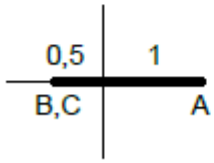
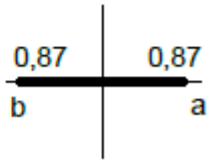
Iz slike 2.18. može se primjetiti da jednofazni ili dvofazni propad napona uzrokovan dozemnim spojem na primarnoj strani rezultira trofaznim propadom na sekundarnoj. Indikativno je i to što ovakvi tipovi transformatora na sekundarnoj strani održavaju napon iznad 0.33 p.u. čak i kada se na primarnoj dogodi bliski kratki spoj nulte magnitude. Stoga, može se zaključiti da kod ovakvih konstrukcija energetskih transformatora na sekundarnoj strani nikada neće doći do prekida napajanja zbog nesimetričnih kratkih spojeva na primarnoj strani [8].

Kod transformatora s raznovrsnim tipom spoja namota na primarnoj i sekundarnoj strani (zvijezda – trokut i obrnuto) razlika u karakteristikama nesimetričnog naponskog propada nešto je

značajnija. Osim što takve grupe spoja sprječavaju prolazak nulte komponente dolazi i do transformacije faznih vrijednosti napona u linijske i obrnuto. Ova transformacija stoga nužno implicira manifestaciju poremećaja iz jedne faze na primarnoj strani u dvije faze koje se u koincidenciji s istom na sekundarnoj strani. Transformatori s takvim svojstvima su Dy1, Yd1, YNd1 i Dyn1, a matrica transformacije je [8]:

$$M_{T3} = \frac{j}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \tag{2.34.}$$

Koristeći matricu (2.34.) u izrazu (2.31.) može se procijeniti propagacija reprezentativnih vrsta nesimetričnih naponskih propada kroz navedene transformatore. Rezultati propagacije vidljivi su na slici 2.19. [8]:

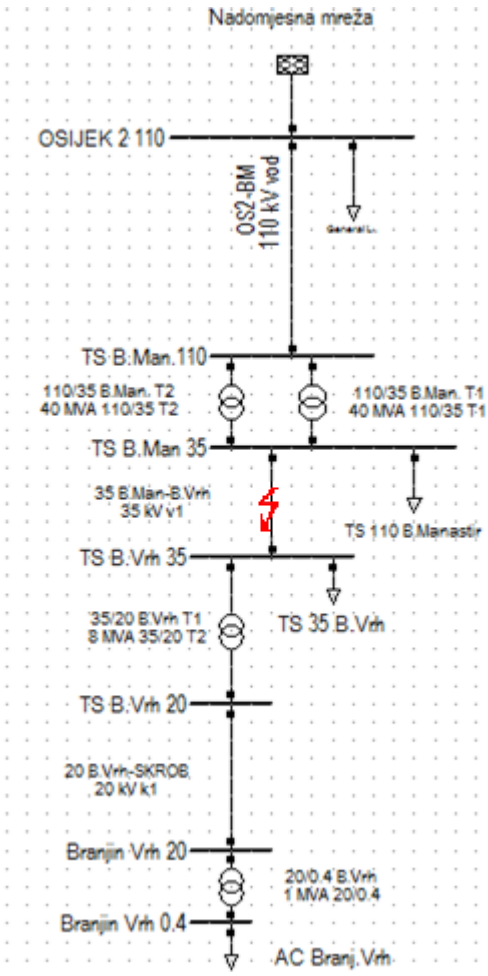
Uzrok naponskog propada	Grupa spoja transformatora	Propagirani naponski propad
 Jednofazni k.s.	Dy1 Yd1 YNd1 Dyn1	 Propad u dvije faze!
 Dvofazni k.s. sa zemljom	Dy1 Yd1 YNd1 Dyn1	 Propad u dvije faze i prekid u trećoj!
 Međufazni k.s.	Dy1 Yd1 YNd1 Dyn1	 Propad u dvije faze i prekid u trećoj!

Sl. 2.19. *Propagacija nesimetričnog naponskog propada kroz Dy1, Yd1, YNd1 i Dyn1 transformator[8]*

Kao što je vidljivo na slici 2.19. jednofazni naponski propad rezultirati će dvofaznim dok će napon treće faze ostati na nazivnoj vrijednosti. Ovdje je situacija slična onoj u prethodnom slučaju istovrsne grupe spoja. Naime, napon za vrijeme jednofaznog propada nulte magnitude na primarnoj strani neće biti manji od 0.58 p.u. na sekundarnoj, što u tom slučaju garantira da na sekundarnoj strani ovog tipa transformatora ne može doći do prekida napajanja. U slučaju naponskog propada u dvjema fazama na primarnoj strani, na sekundarnoj će nužno doći do prekida napajanja u jednoj te do propada određene magnitude u preostalim fazama [8].

3. PROVEDENE SIMULACIJE

U modelu mreže prikazanom na slici 3.1. simulirani su jednofazni kratki spoj, kratki spoj između dvije faze uz istovremeni dodir sa zemljom i kratki spoj između dvije faze. Mjesto kvara je na 50 % dužine 35 kV dalekovoda koji povezuje 35 kV trafostanice Beli Manastir i Branjin vrh.

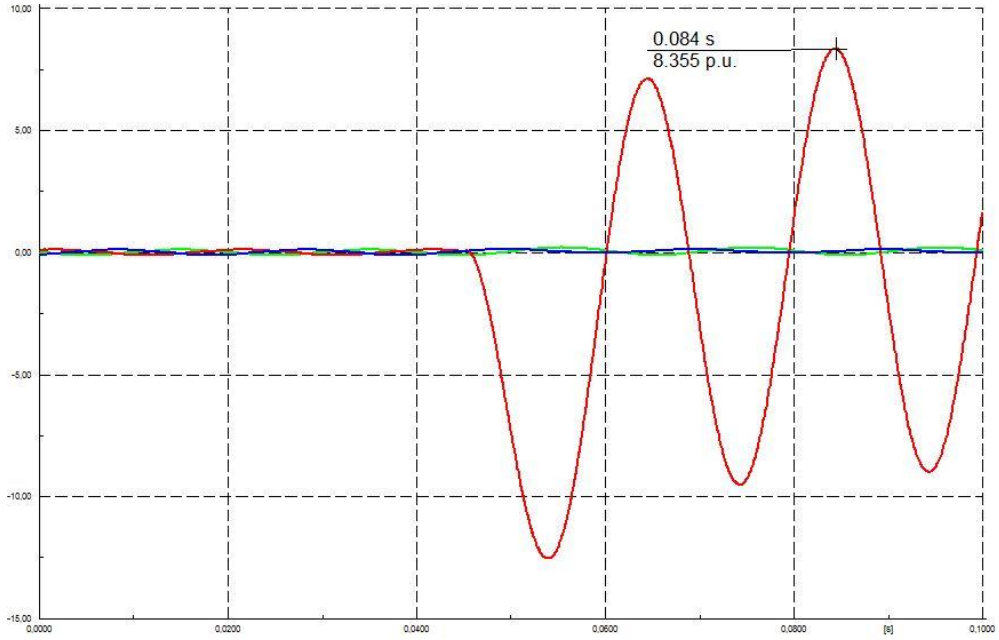


Sl. 3.1. *Model mreže*

Vrijeme trajanja simulacije postavljeno je na 100 ms, dok je trenutak nastanka kvara u 45 ms u svim simulacijama. Na svim dijagramima napona, napon faze A označen je crvenom, B zelenom i C plavom bojom. U prvome dijelu simulacije su provedene za spojeve transformatora prema slikama 2.17., 2.18., 2.19. Drugi dio odnosi na propagaciju naponskog propada u slučaju jednofaznog kratkog spoja na 110 kV dalekovodu kroz tri transformatora 110/35 kV, 35/20 kV i 20/0.4 kV, za uobičajene grupe transformatora za određenu naponsku razinu.

3.1. Propagacija naponskih propada prilikom kvara na 35 kV dalekovodu za različite spojeve transformatora 35/20 kV

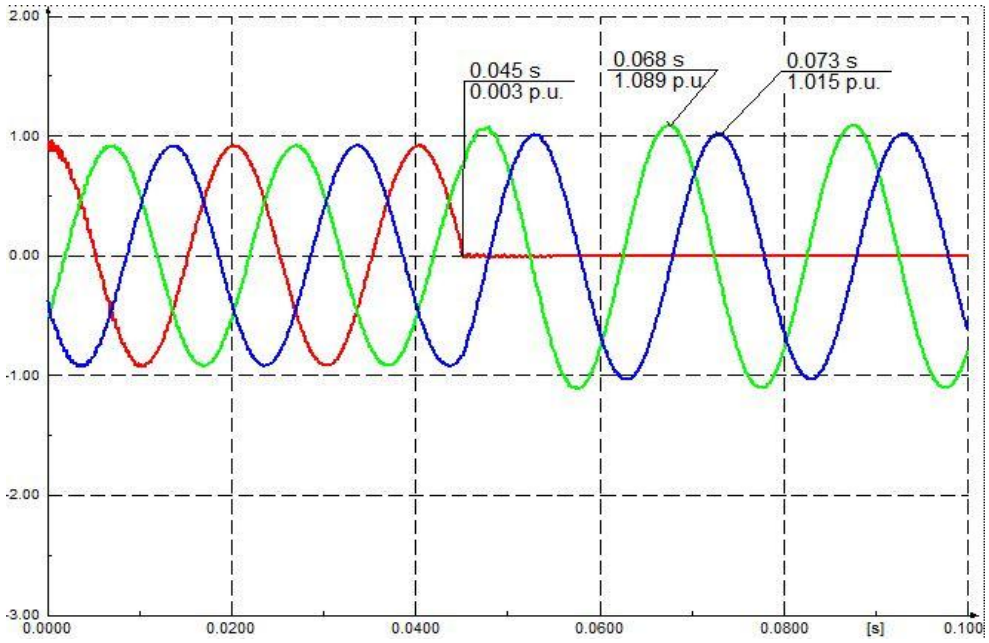
Kako je već navedeno u uvodnom dijelu, propade uzrokuju velike struje u mreži. Valni oblici struja biti će prikazani samo u ovome slučaju jer su isti za sve. Tako se za jednofazni kratki spoj dobije sljedeći valni oblik struja:



Sl. 3.2. *Valni oblici struja pojedinih faza za jednofazni kratki spoj*

Vidljivo je da je faza A, označena crvenom bojom, u kvaru. Struja te faze doseže iznos od preko 8 p.u. u trenutku 45 ms.

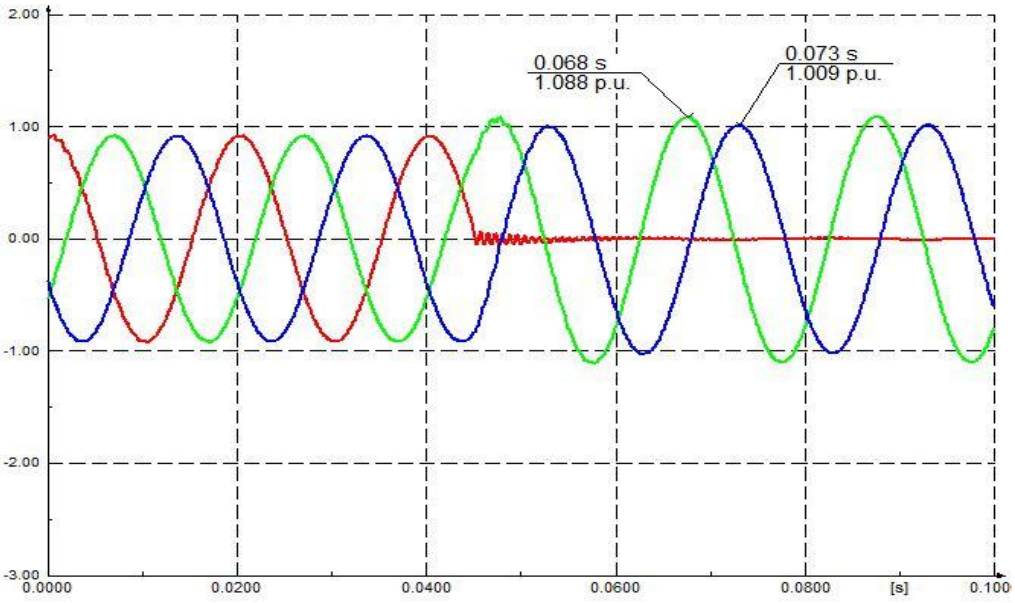
Uporabom transformatora 35/20 kV koji je u spoju YNyn0, za vrijeme jednofaznog kratkog spoja na 50 % duljine dalekovoda dobiju se sljedeći valni oblici napona na primaru:



Sl. 3.3. *Valni oblici napona pojedinih faza na primaru za jednofazni kratki spoj*

Na slici se vidi trenutak nastanka kratkog spoja u 45 ms gdje napon faze A padne na nulu. Naponi zdravnih faza se približavaju linijskom pa su zato povišeni.

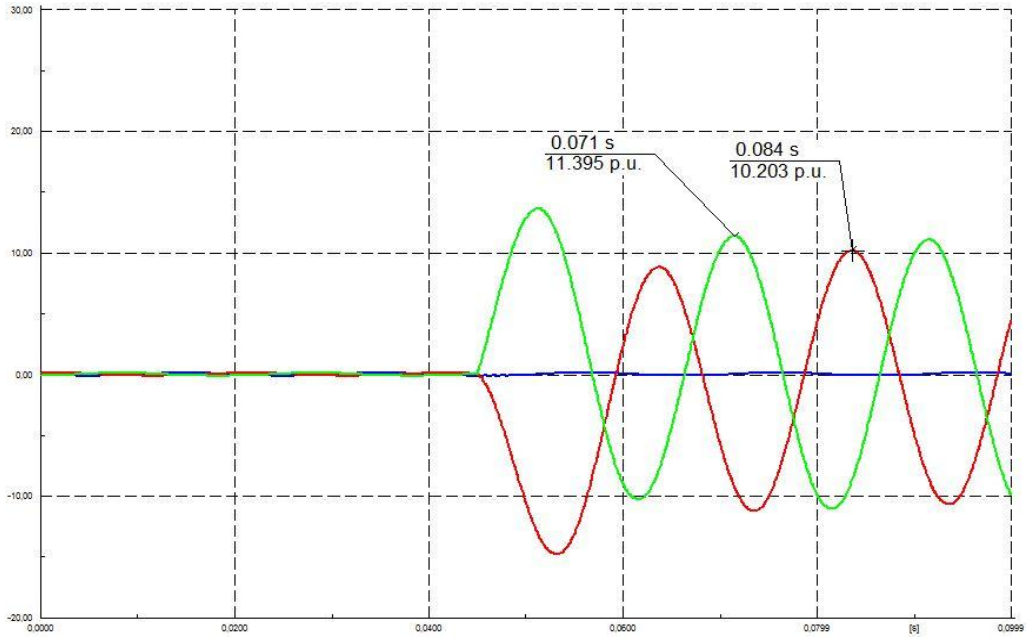
Prema [8], valni oblici napona se identično preslikaju pod ovakvim uvjetima:



Sl. 3.4. *Valni oblici napona pojedinih faza na sekundarnoj strani za jednofazni kratki spoj*

Valni oblik napona na sekundaru sličan je valnom obliku napona na primaru uz malo istitravanje faze A zbog prijelaznih pojava.

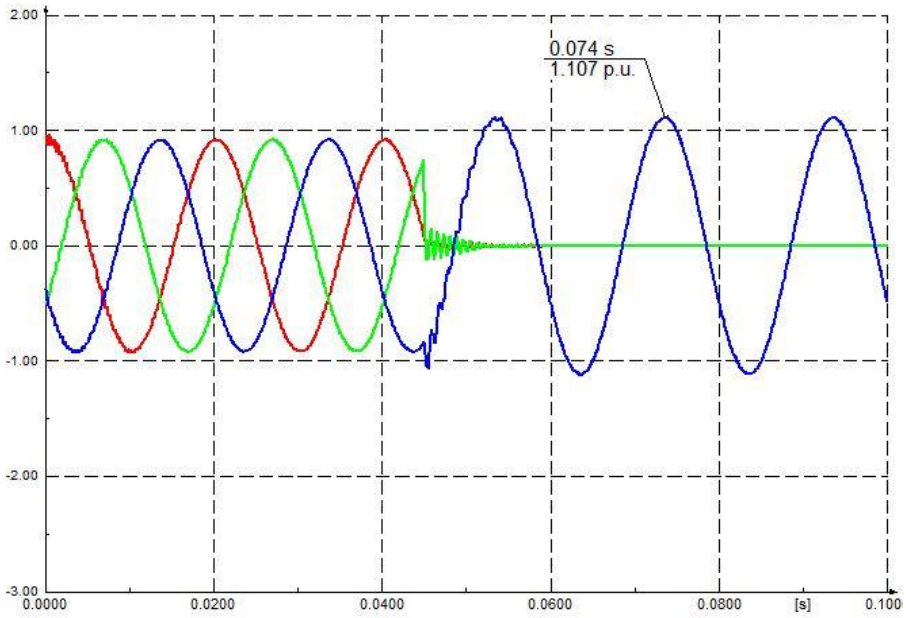
Struje dvofaznog kratkog spoja imaju porast u dvije faze koje su u kvaru, A i B označene crvenom i zelenom bojom:



Sl 3.5. *Valni oblici struja pojedinih faza za dvofazni kratki spoj uz dodir sa zemljom*

Ovdje struje poprimaju vrijednosti preko 10 p.u. za vrijeme trajanja kratkog spoja, uzrokujući tako propade napona na transformatoru.

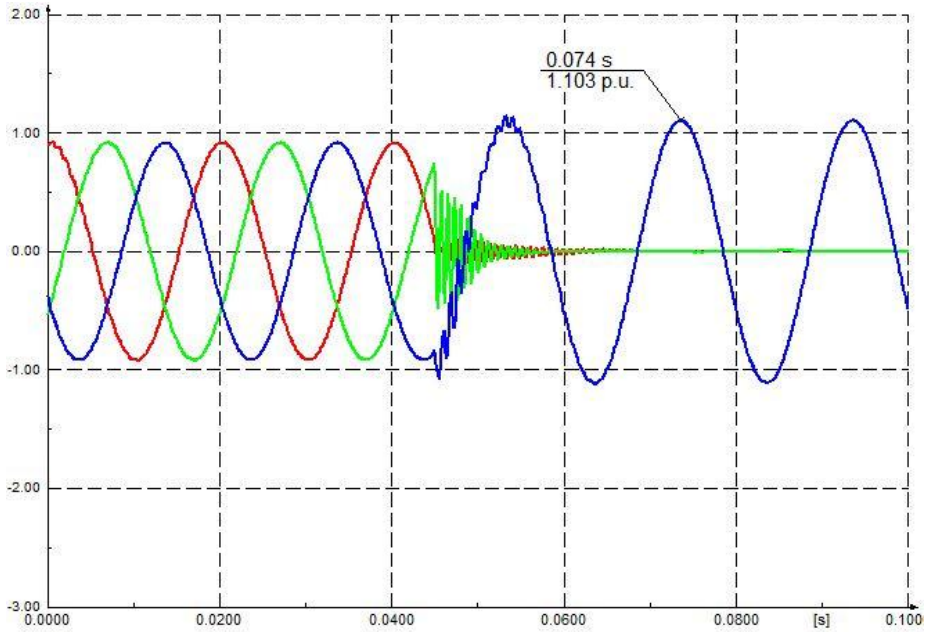
Za dvofazni kratki spoj faza A i B uz istovremeni dodir sa zemljom i na istome mjestu kvara, odziv na primaru transformatora je sljedeći:



Sl 3.6. *Valni oblici napona pojedinih faza na primaru za dvofazni kratki spoj uz dodir sa zemljom*

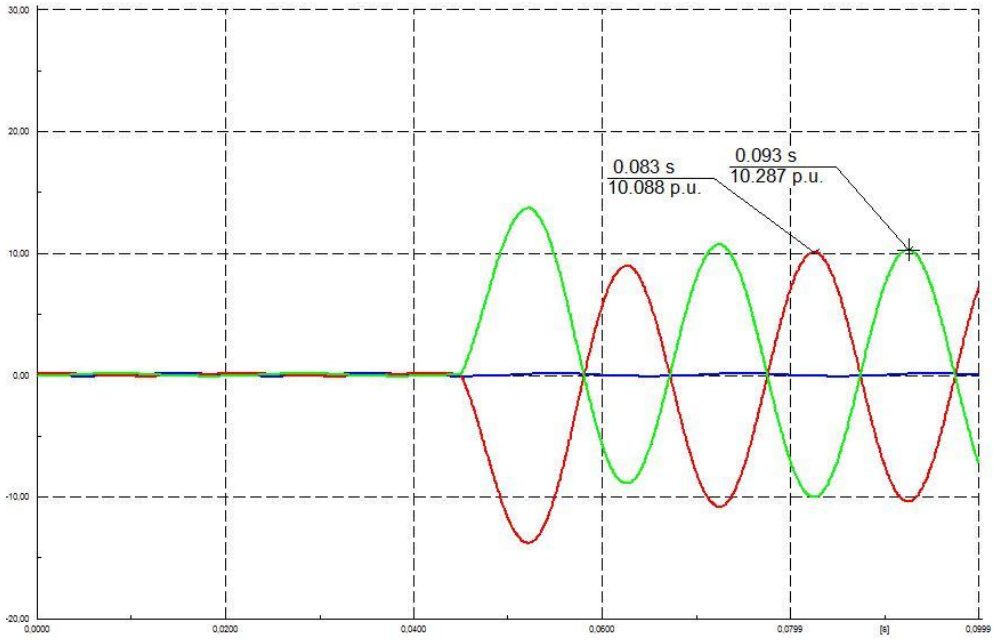
Sada naponi dviju faza A i B koje su u kvaru padaju na nulu, dok preostala zdrava faza C teži vrijednosti linijskog napona.

Prilikom ovakvog kvara također dolazi do identičnog preslikavanja valnog oblika napona na sekundar jer koristimo isti spoj transformatora:



Sl. 3.7. *Valni oblici napona pojedinih faza na sekundaru za dvofazni kratki spoj uz dodir sa zemljom*

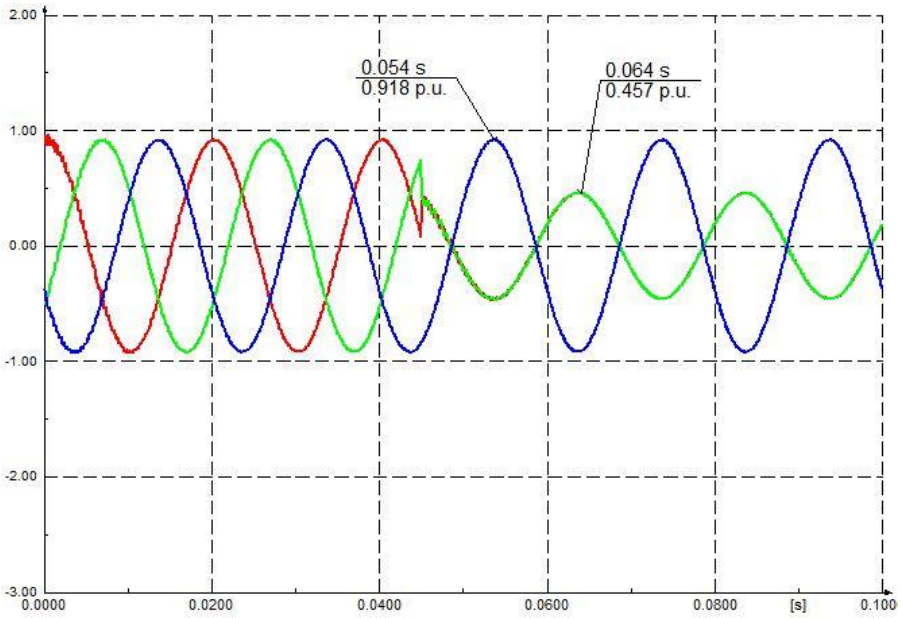
Zadnja vrsta kvara za koji je obavljena simulacija u ovome dijelu je kratki spoj između dvije faze, A i B:



Sl 3.8. *Valni oblici struja pojedinih faza za dvofazni kratki spoj*

U trenutku nastanka kratkog spoja, struje poprimaju puno veće vrijednosti od nominalnih i tako prouzrokuju naponske propade u mreži.

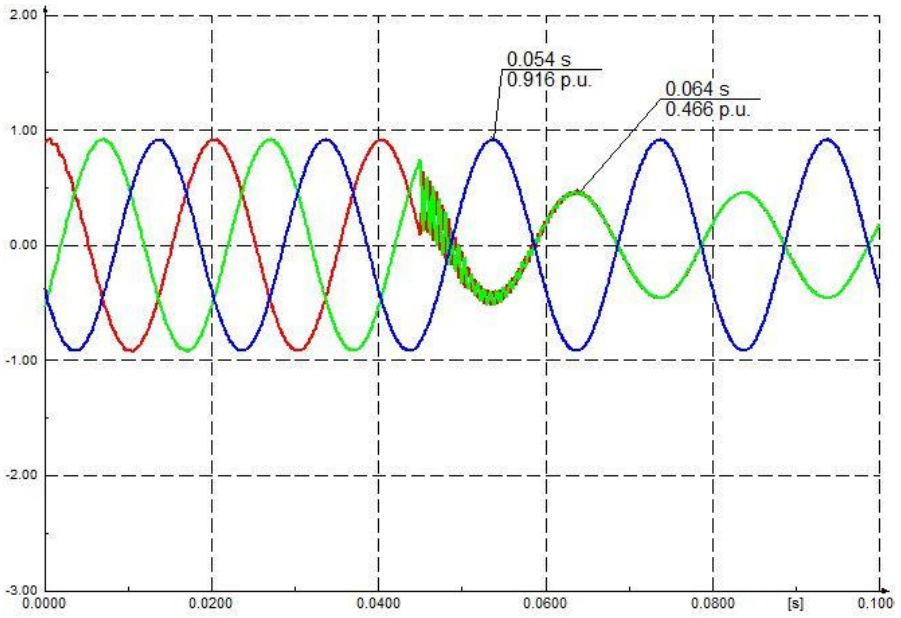
U ovome slučaju, valni oblici napona koji su u kvaru ne padnu na nulu nego na približno 0.5 p.u.



Sl 3.9. *Valni oblici napona pojedinih faza na primaru za dvofazni kratki spoj*

Slika 3.9. prikazuje valne oblike napona na primaru gdje su sada naponi pogođenih faza pali na 0.457 p.u. dok je napon zdrave faze ostao približno 1 p.u..

Valni oblici na sekundaru transformatora:

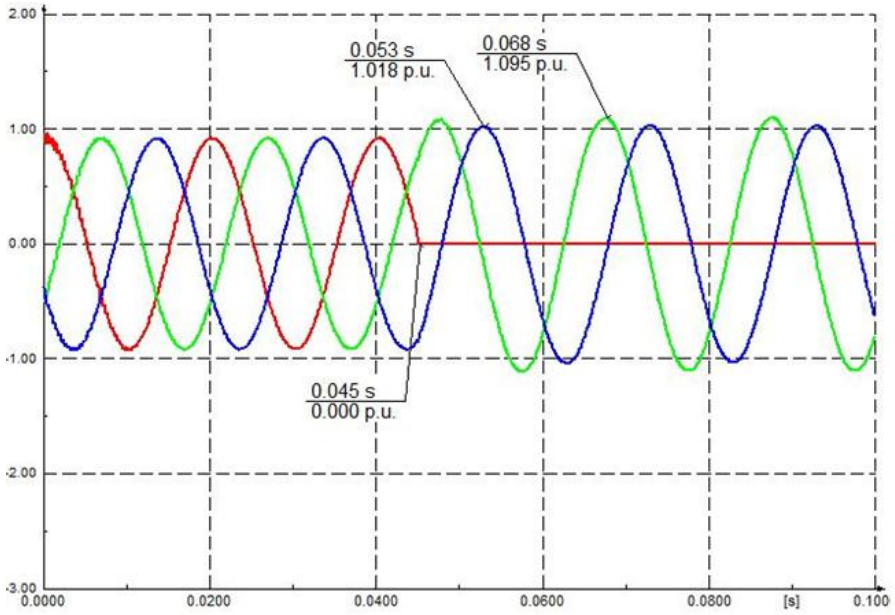


Sl 3.10. *Valni oblici napona pojedinih faza na sekundaru za dvofazni kratki spoj*

Valni oblici napona preslikani su sa primara u slučaju kvara između dvije faze. Nakon provedenih simulacija može se zaključiti da transformator u spoju YNyn0 preslikava valne oblike napona pojedninih faza sa primara na sekundar.

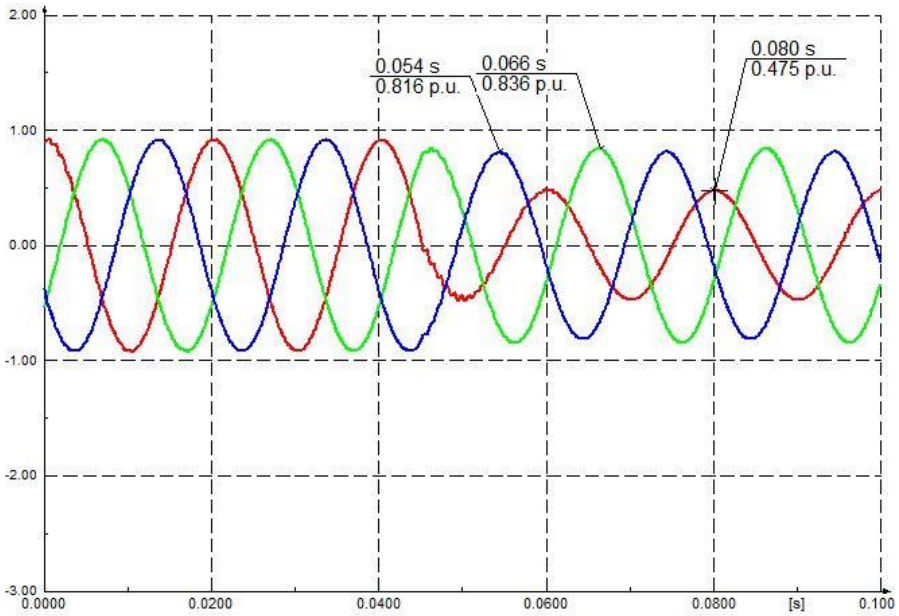
Koristimo li sada transformator 35/20 kV u spoju Yy0, rezultati simulacije biti će isti i za slijedeće spojeve: Yyn0, YNy0 i Dd0. Zajedničko tim spojevima je to što ili nisu uzemljeni ili su uzemljeni samo na jednoj strani pa u slučaju jednofaznog ili dvofaznog kvara uz dodir sa zemljom dio mreže ne uzima se u proračun nulte reaktancije.

U simulaciji jednofaznog kratkog spoja, valni oblik napona na primaru identičan je slučaju sa transformatorom spojenim u YNyn0:



Sl. 3.11. *Valni oblici napona pojedinih faza na primaru za jednofazni kratki spoj*

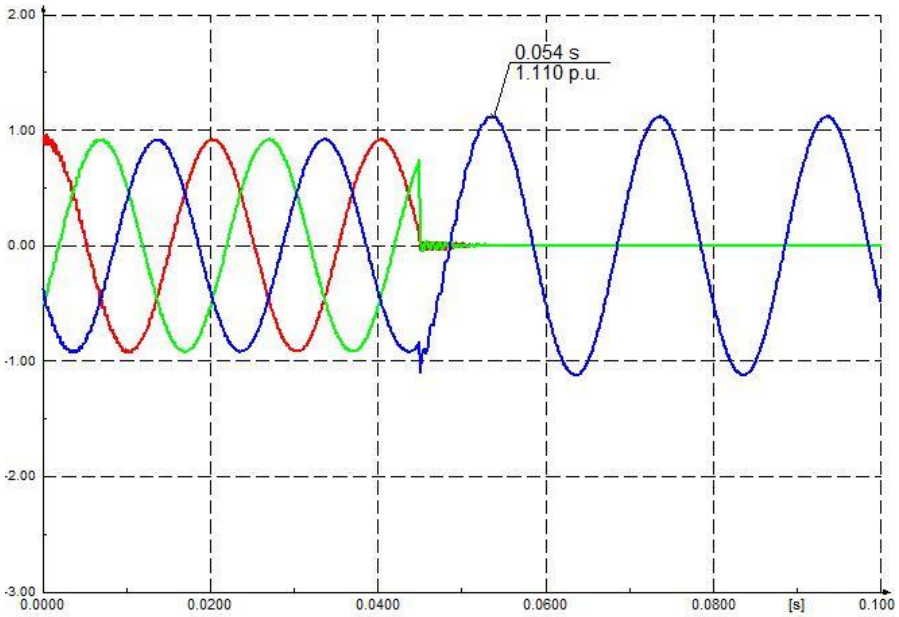
Valni oblik se na sekundaru neće preslikati jer je sekundar sada drugačije spojen:



Sl. 3.12. *Valni oblici napona pojedinih faza na sekundaru za jednofazni kratki spoj*

Prema [8], naponi zdravih faza u idealnim uvjetima trebaju biti oko 0.88 p.u. dok napon pogođene faze A približno 0.33 p.u.. Na slici 3.12. naponi imaju određeno odstupanje zbog utjecaja ostatka mreže, ali su u granicama.

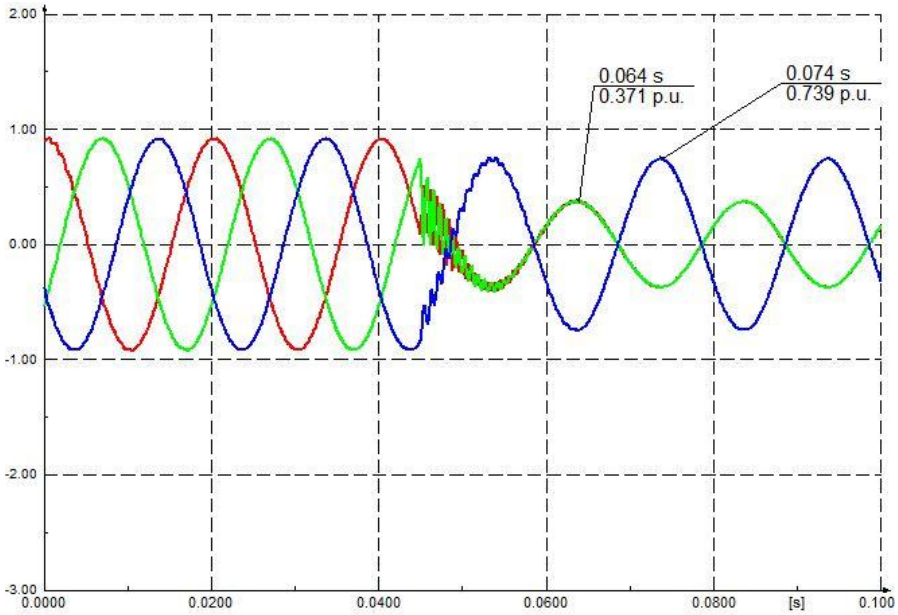
Za dvofazni kratki spoj uz istovremeni dodir sa zemljom valni oblici napona na primaru su slijedeći:



Sl. 3.13. *Valni oblici napona pojedinih faza na primaru za dvofazni kratki spoj uz dodir sa zemljom*

Naponi pogođenih faza A i B poprimaju vrijednost nula, dok se napon zdrave faze C poveća kao što je ranije objašnjeno.

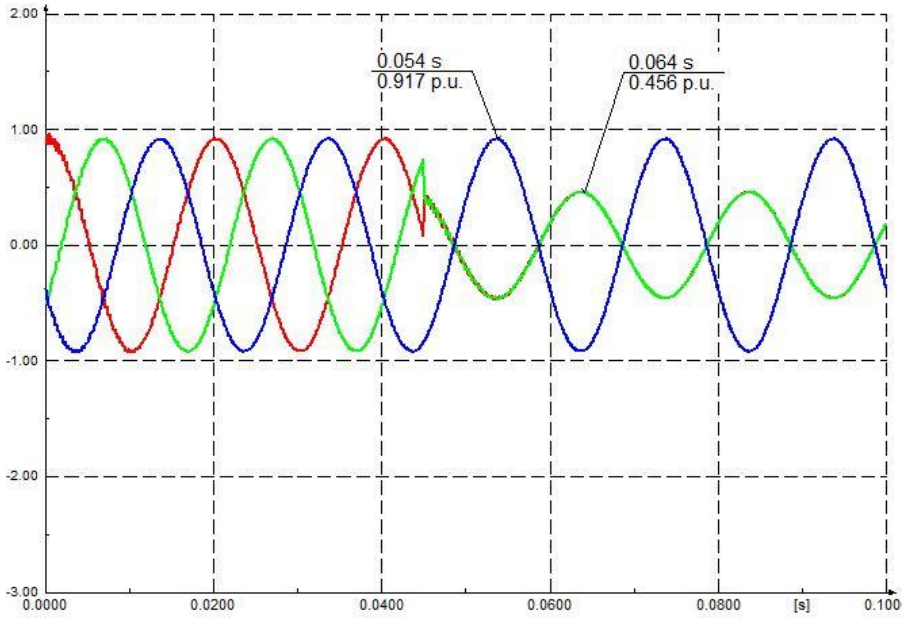
Valni oblici napona na sekundaru transformatora:



Sl. 3.14.*Valni oblici napona pojedinih faza na sekundaru za dvofazni kratki spoj uz dodir sa zemljom*

Naponi pogođenih faza su sniženi na 0.371 p.u. i u fazi su, dok je napon zdrave faze C smanjen na 0.739 p.u. i u protufazi je sa ostalim naponima.

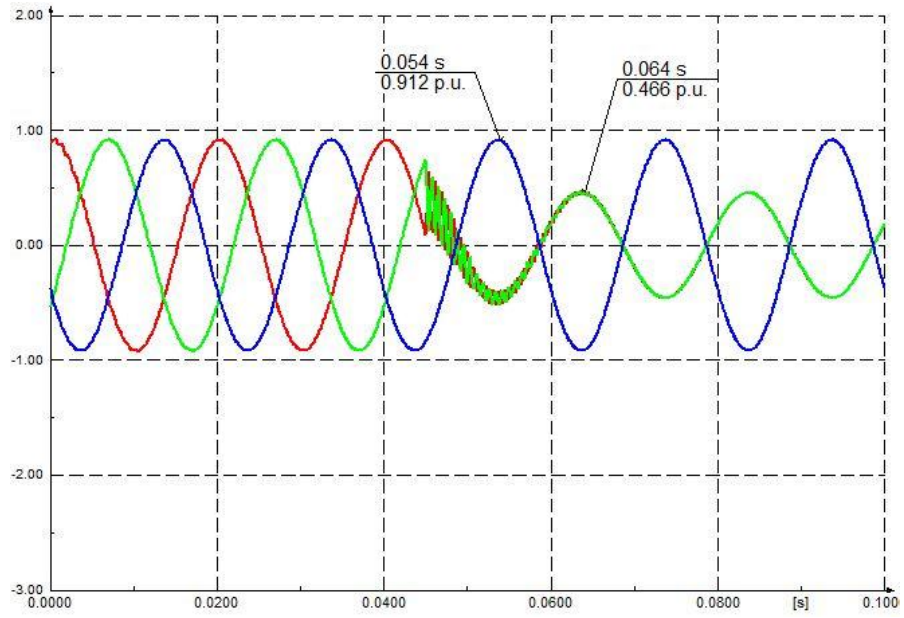
U slučaju kratko spoja međusobno dvije faze na primaru se dobije valni oblici napona prema slici:



Sl. 3.15. *Valni oblici napona pojedinih faza na primaru za dvofazni kratki spoj*

Ovdje faze koje su u kvaru ne dodiruju zemlju pa zbog toga nisu nula, ali su smanjene, dok je zdrava faza nakon kvara slijedi valni oblik kakav je bio i prije kvara.

Valni oblici napona na sekundaru su približno jednaki onima na primaru:

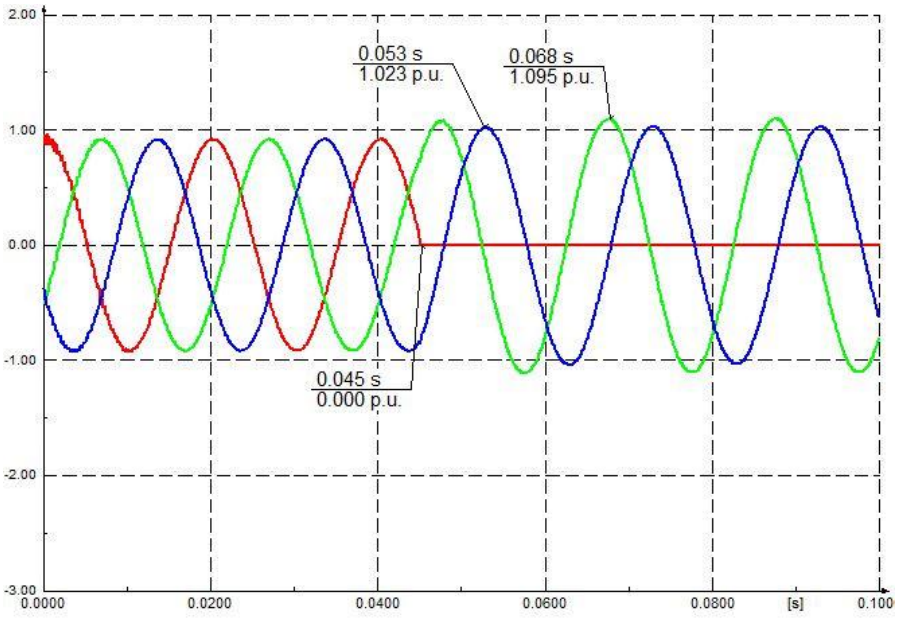


Sl. 3.16. *Valni oblici napona pojedinih faza na sekundaru za dvofazni kratki spoj*

Nakon provedenih simulacija možemo zaključiti da transformatori u spoju Yy0, Yyn0, YNy0 i Dd prigušuju napone zdravih faza osim kod kratkog spoja između dvije faze gdje preslikaju valne oblike sa primara.

Slijedeće simulacije provedene su prema uvjetima na slici 2.19. Transformator 35/20 kV u spojevima Dy1, Yd1, YNd1, Dyn1 i uz kvarove na 50 % duljine 35 kV dalekovoda.

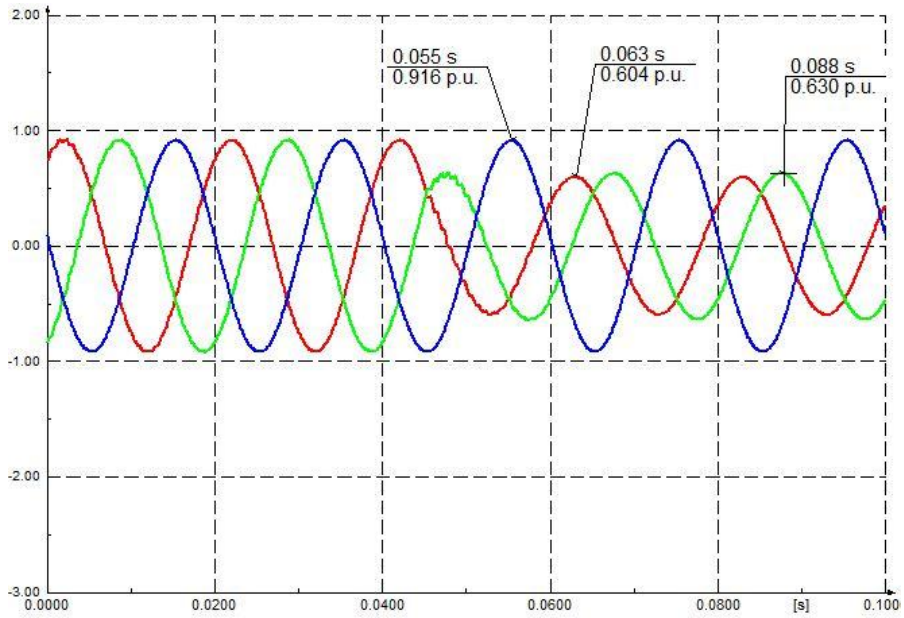
Pri jednofaznom kratkom spoju na dalekovodu, na primarnoj strani transformatora dobijemo valne oblike:



Sl. 3.17. *Valni oblici napona pojedinih faza na primaru za jednofazni kratki spoj*

Vrijednost faze A je poprimila vrijednost nula u trenutku kratkog spoja, dok su vrijednosti preostale dvije zdrave faze B i C porasle kao što je vidljivo na slici 3.17.

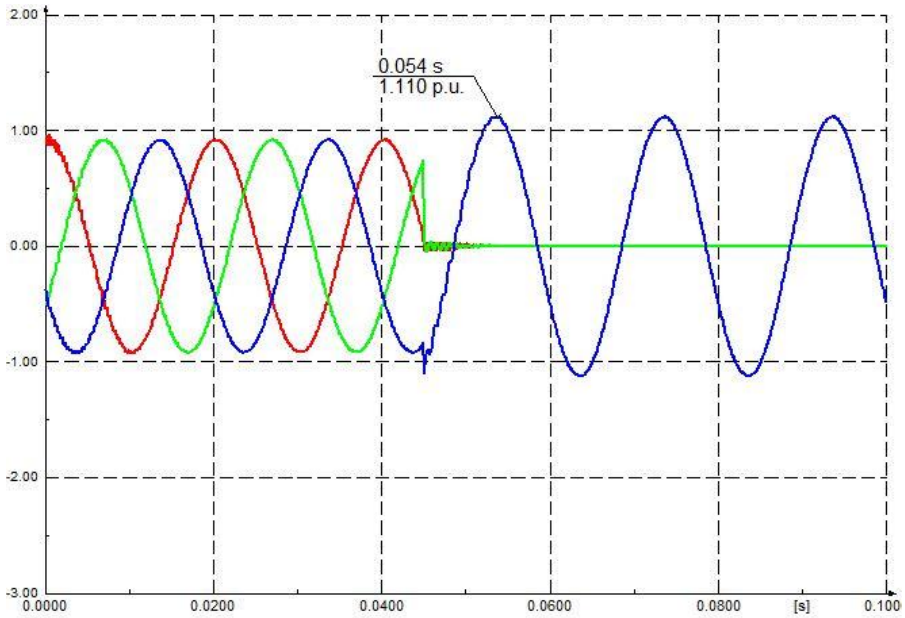
Propagacija kvara na sekundaru može se vidjeti na slici 3.18:



Sl. 3.18. *Valni oblici napona pojedinih faza na sekundarnoj strani za jednofazni kratki spoj*

U ovome slučaju jedna faza ostaje na vrijednosti kao i prije nastanka kratkog spoja, dok preostale dvije padnu na 0.6 p.u..

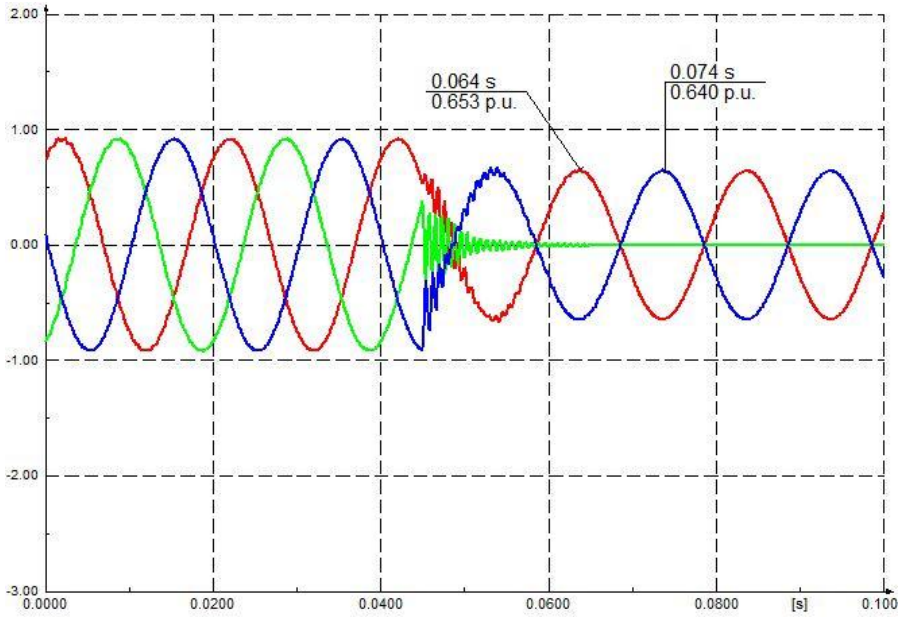
Uslijed kvara između dvije faze uz istovremeni dodir sa zemljom valni oblici napona prikazani su na slici 3.19:



Sl. 3.19. *Valni oblici napona pojedinih faza na primaru za dvofazni kratki spoj uz dodir sa zemljom*

Faze A i B poprimaju vrijednost potencijala zemlje koji iznosi nula, dok se zdrava faza C poveća na iznos od 1.1 p.u.

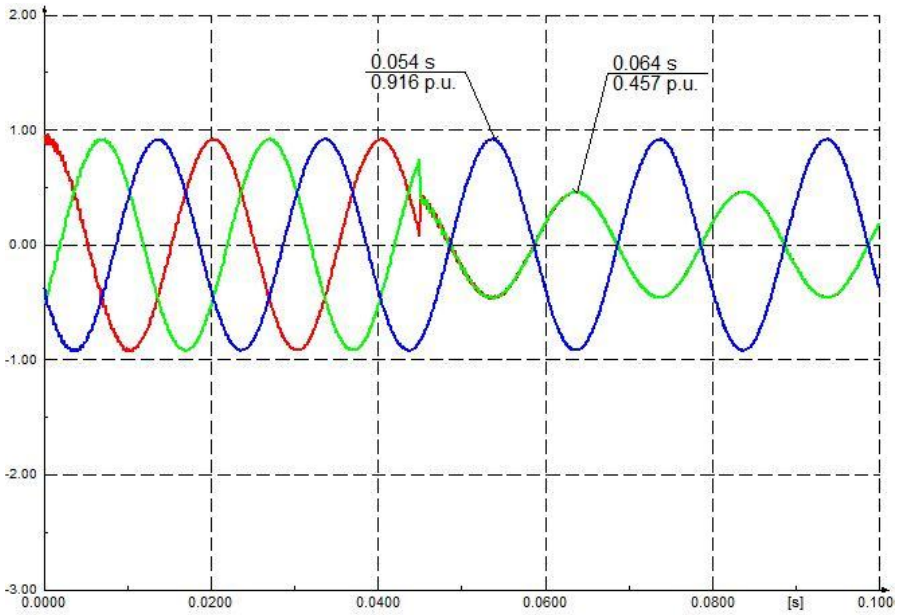
Ovakvi spojevi transformatora sa satnim brojem 1 prouzrokovat će na sekundaru prigušenje u dvije faze i propad u trećoj za vijeme kratkog spoja između dvije faze uz istovremeni dodir sa zemljom:



Sl. 3.20. *Valni oblici napona pojedinih faza na sekundaru za dvofazni kratki spoj uz dodir sa zemljom*

Naponi koji su prigušeni na 0.65 p.u., također su pomaknuti u fazi za 180°.

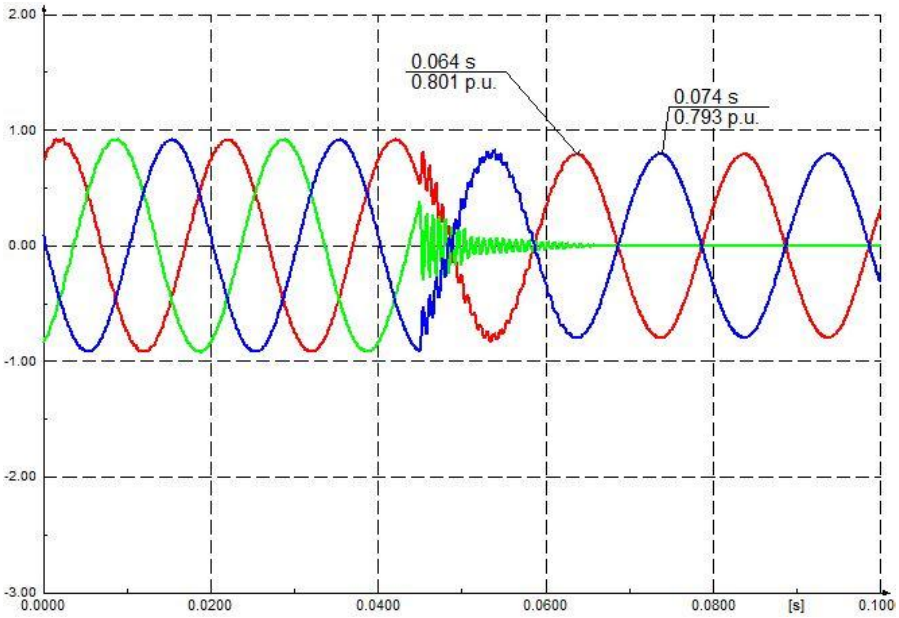
Simulacija kratkog spoja između dvije faze, valni oblici napona na primaru transformatora:



Sl. 3.21. *Valni oblici napona pojedinih faza na primaru za dvofazni kratki spoj*

Naponi pogođenih faza su smanjeni na 0.45 p.u. i u fazi su, dok je napon zdrave faze ostao isti kao i prije nastanka kratkog spoja.

Valni oblici napona na sekundaru za ovu vrstu kratkog spoja:



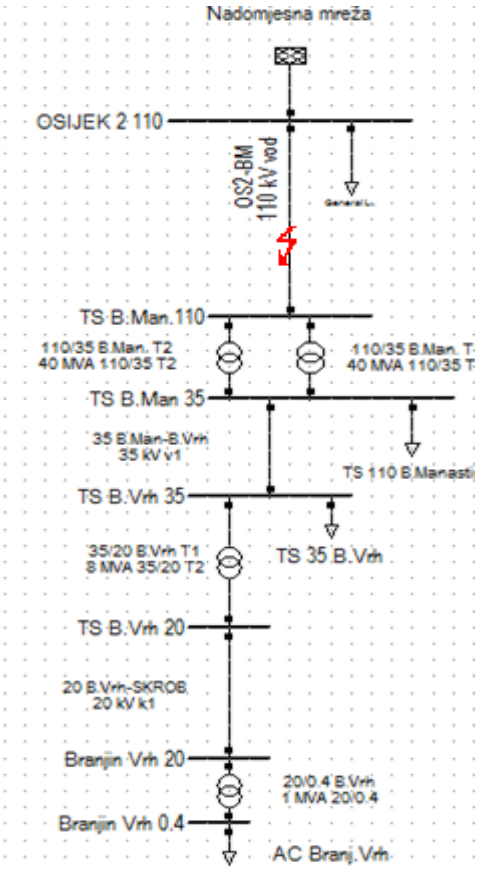
Sl. 3.22. *Valni oblici napona pojedinih faza na sekundaru za dvofazni kratki spoj*

Ovdje su naponi u dvije faze nešto manje prigušeni, iznose oko 0.8 p.u., ali su opet pomaknuti u fazi za 180°, i prekid u trećoj fazi.

Nakon provedenih simulacija, za ovakve tipove transformatora možemo zaključiti da za vrijeme sva tri simulirana kvara, prigušuju napone, a u dvofaznim kratkim spojevima uzrokuju i prekid jedne faze.

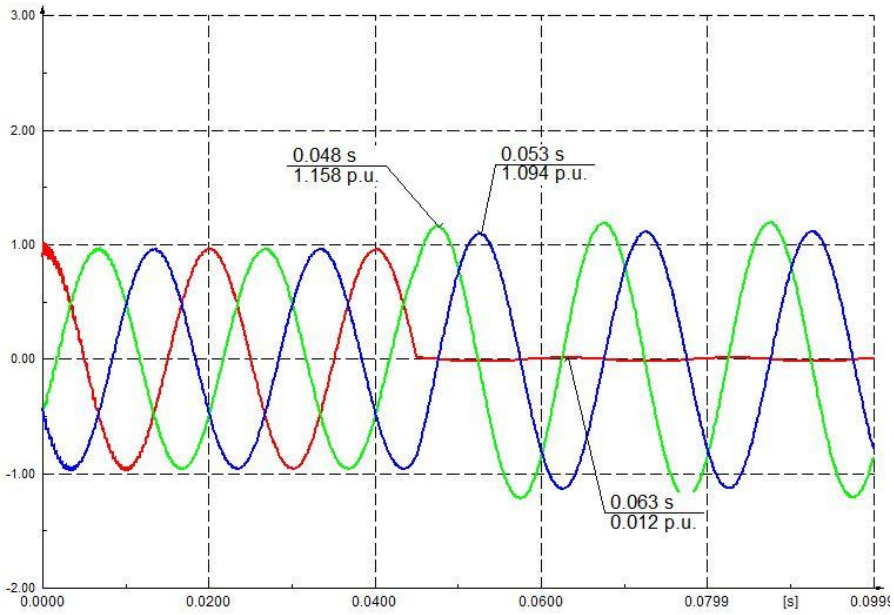
3.2. Propagacija naponskih propada prilikom kvara na 110 kV dalekovodu za transformatore 110/35 kV, 35/20 kV i 20/0.4 kV

U ovome dijelu rada, simulira se jednofazni kratki spoj na 50 % duljine 110 kV dalekovoda koji povezuje Osijek 2 i trafostanicu Beli Manastir. Grupe spoja transformatora odabrane su za određenu naponsku razinu. Prema IEC 60076 normi [12], uobičajena grupa spoja za transformator 110/35 kV je YNyn, transformator 35/20 kV Dy5 ili Yd5 i za transformator 20/0.4 kV: Dyn0, Dyn5, Dyn6 i Dyn11.



Sl. 3.23. *Model mreže*

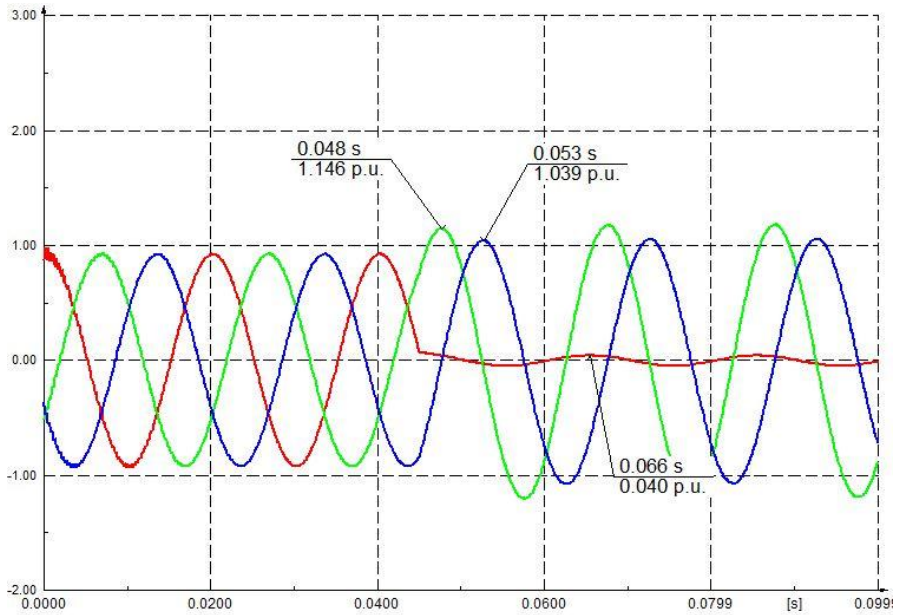
Kao što je već prikazano ranije na slikama 3.5. – 3.10. transformator u spoju YNyn će identično preslikati valni oblik napona sa primara transformatora na sekundar pa će zbog toga valni oblici biti prikazani samo jednom:



Sl. 3.24. *Valni oblici napona pojedinih faza na primaru 110/35 kV za jednofazni kratki spoj*

Vrijednost napona faze koja je u kvaru je jednaka nuli, dok su se vrijednosti napona u preostale dvije zdrave faze povećale.

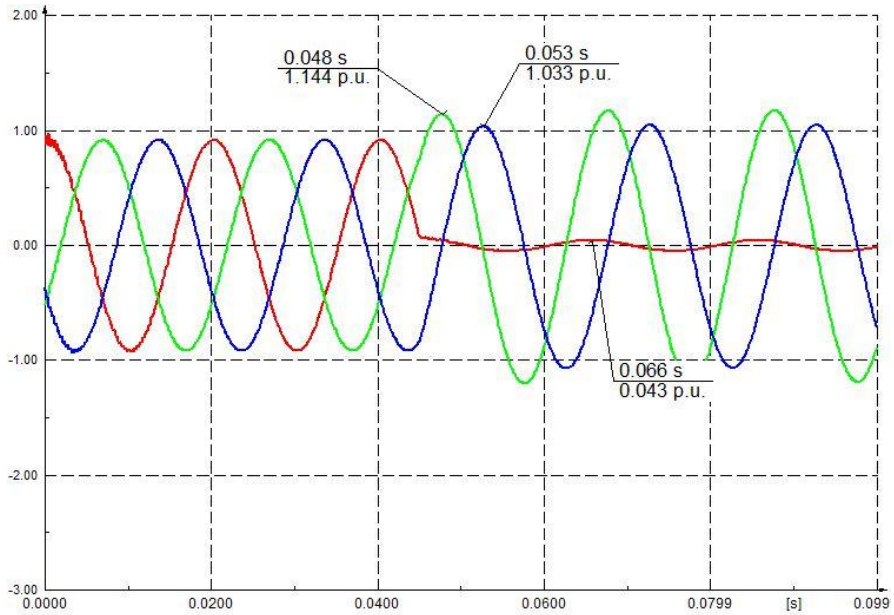
Valni oblici napona na sekundaru:



Sl. 3.25. *Valni oblici napona pojedinih faza na sekundaru 110/35 kV za jednozazni kratki spoj*

Valni oblici napona su preslikani kao što je već ranije spomenuto.

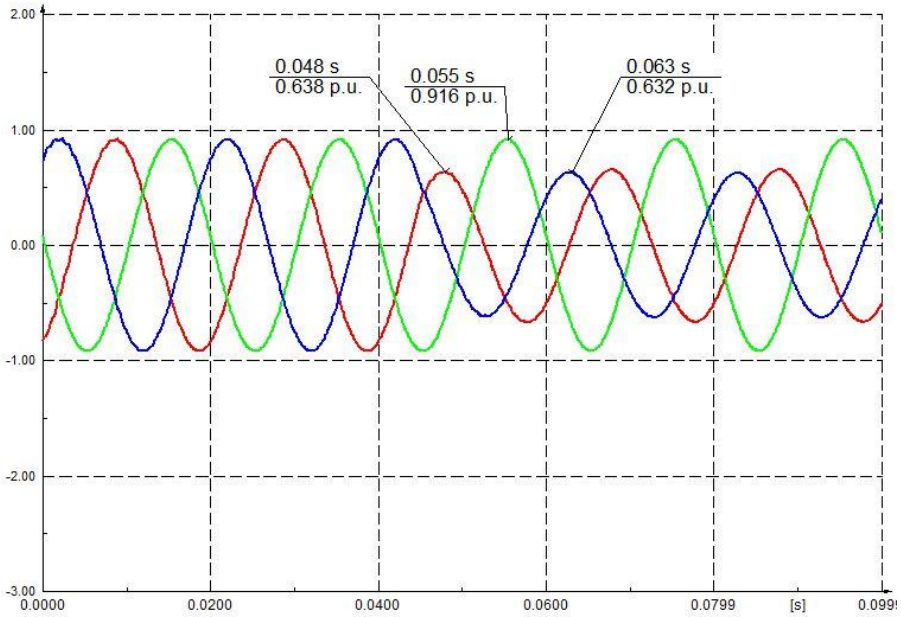
Nakon 110/35 kV transformatora, slijedi 35/20 kV transformator i to u spoju Dy5. Naponi na primaru imaju sljedeći valni oblik:



Sl. 3.26. *Valni oblici napona pojedinih faza na primaru 35/20 kV za jednofazni kratki spoj*

Na slici je vidljivo da su naponi primara 35/20 kV transformatora isti kao i naponi na sekundaru 110/35 kV transformatora.

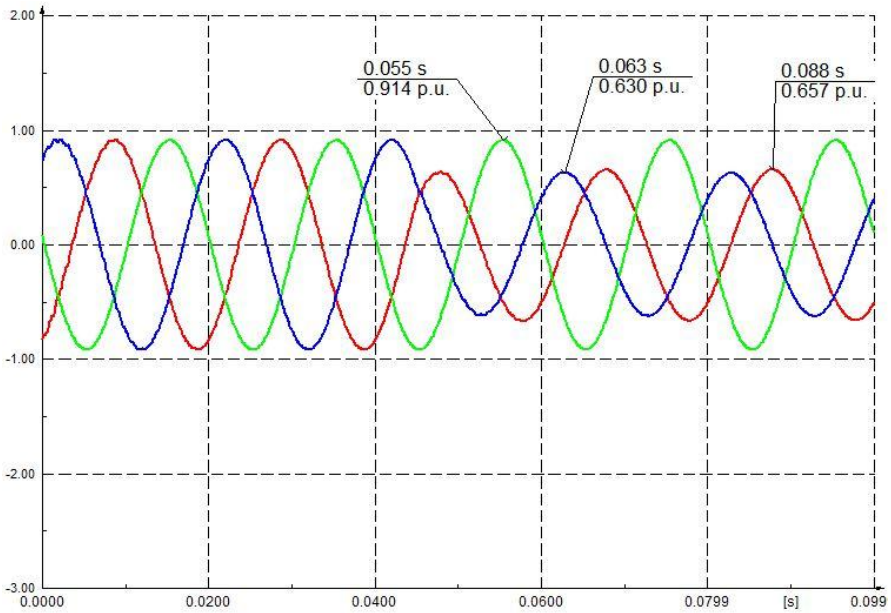
Naponi na sekundaru 35/20 kV transformatora:



Sl. 3.27. *Valni oblici napona pojedinih faza na sekundaru 35/20 kV za jednofazni kratki spoj*

Na sekundarnoj strani transformatora 35/20 kV naponi su prigušeni u dvije faze na 0.63 p.u., dok jedna faza ostaje na vrijednosti kao i prije kratkog spoja.

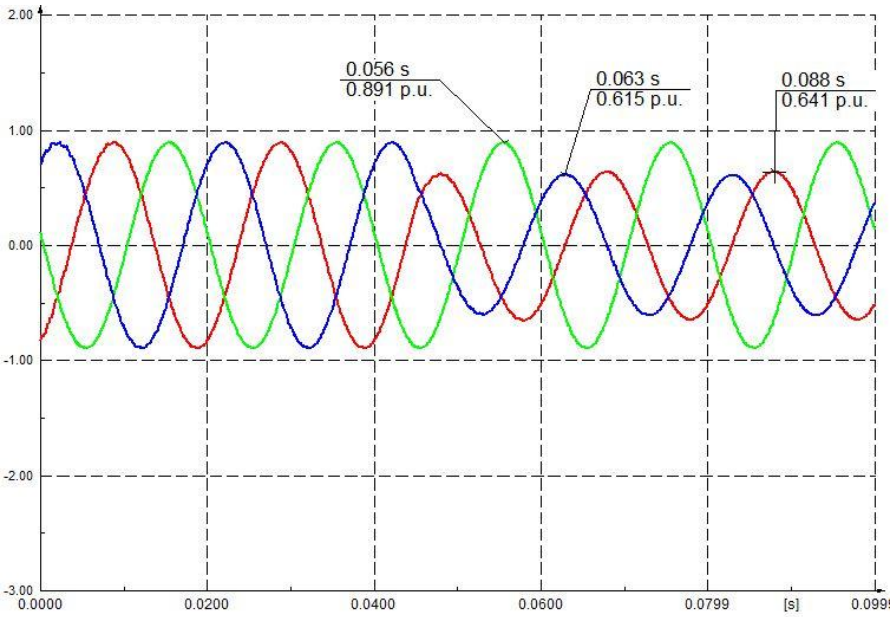
Poslije 35/20 kV dolazi 20/0.4 kV transformator u Dyn0 spoju. Valni oblici napona na njegovom primaru slijede valne oblike napona na sekundaru 35/20 kV transformatora.



Sl. 3.28. *Valni oblici napona pojedinih faza na primaru 20/0.4 kV za jednofazni kratki spoj*

Valni oblici isti kao i na sekundaru 35/20 kV.

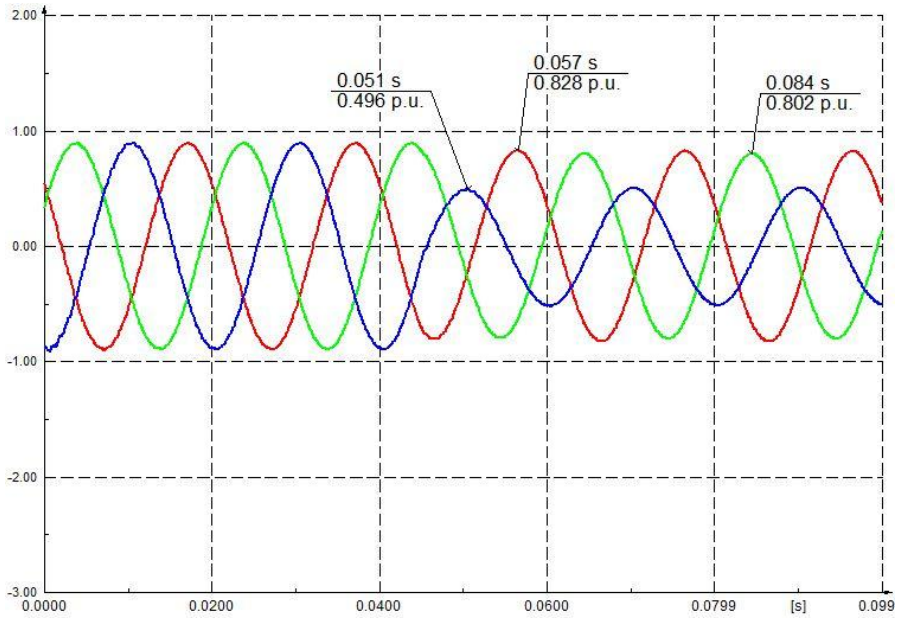
Promotrimo li valne oblike napona na sekundaru transformatora 20/0.4 kV na slici 3.26:



Sl. 3.29. *Valni oblici napona pojedinih faza na sekundaru 20/0.4 kV za jednofazni kratki spoj*

Vidljivo je da transformator u spoju Dyn0 preslikava valne oblike napona sa primara.

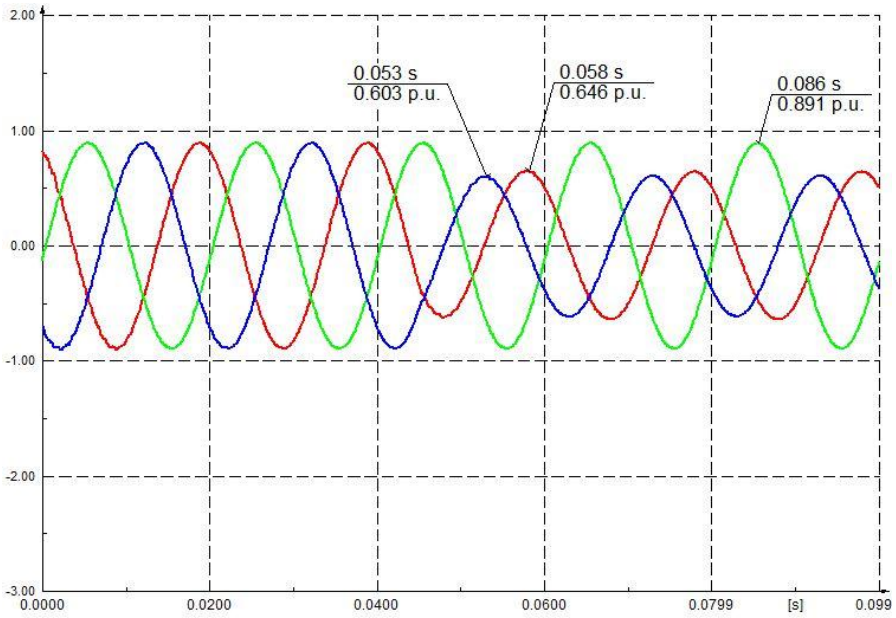
Promjena satnog broja spoja transformatora 20/0.4 kV u Dyn5 neće imati nikakav utjecaj na 110/35 kV i 35/20 kV transformator. Na primar transformatora 20/0.4 kV dolaze naponi valnog oblika kao na slici 3.28. te stoga oni neće biti ponovno prikazivani nego samo naponi sekundara transformatora 20/0.4 kV:



Sl. 3.30. *Valni oblici napona pojedinih faza na sekundaru 20/0.4 kV za jednofazni kratki spoj*

Ovdje je došlo do prigušenja u sve tri faze. Najizraženije prigušenje je u fazi C čiji napon poprima vrijednost 0.49 p.u..

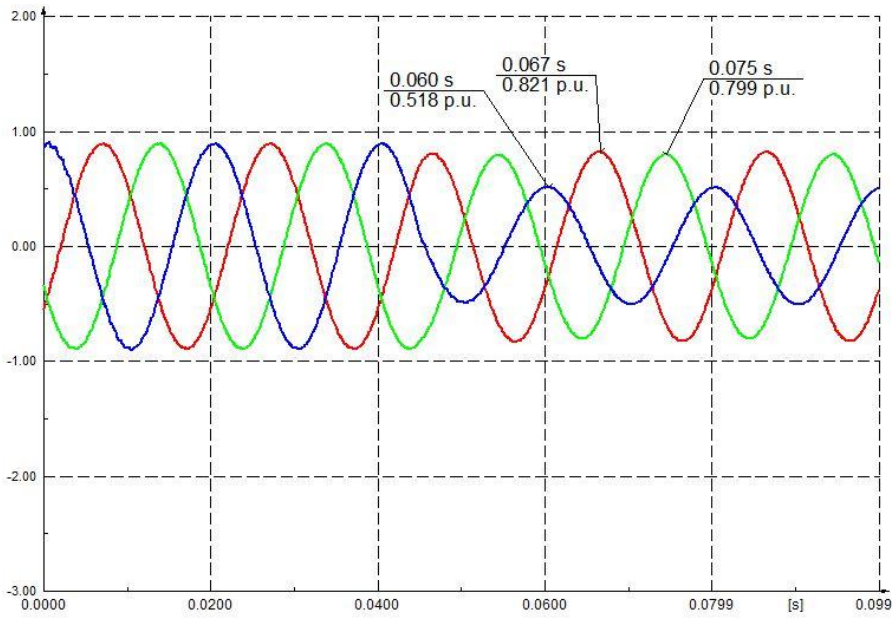
Valni oblici napona na sekundaru transformatora 20/0.4 kV u spoju Dyn6:



Sl. 3.31. *Valni oblici napona pojedinih faza na sekundaru 20/0.4 kV za jednofazni kratki spoj*

Prigušenja su samo u dvije faze na 0.6 i 0.646 p.u.. Jedna faza ostaje kao i za vrijeme prije kratkog spoja.

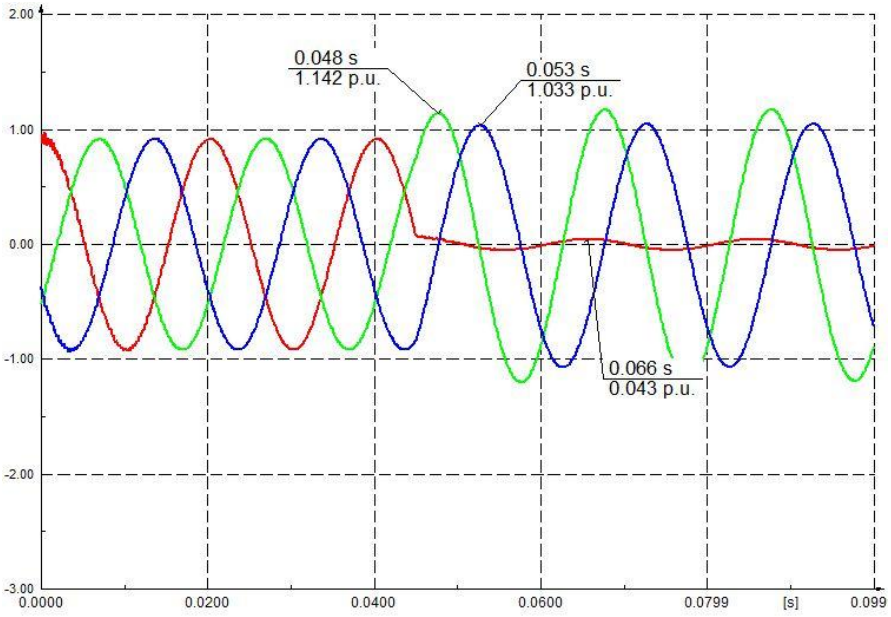
Valni oblici napona na sekundaru transformatora 20/0.4 kV za spoj Dyn11:



Sl. 3.32. *Valni oblici napona pojedinih faza na sekundaru 20/0.4 kV za jednofazni kratki spoj*

Usporedimo li slike 3.32. i 3.30. može se uočiti da su valni oblici napona isti, kao što je slučaj i sa 3.29. i 3.31. Transformatori Dyn koji imaju satne brojeve 0, 2, 4 uzrokuju prigušenja samo u dvije faze, dok oni sa satnim brojevima 1, 3, 5 uzrokuju prigušenja u sve tri faze, ali u jednoj značajno. U kojoj će to prigušenje biti značajno ovisi o satnom broju. Nakon satnog broja 5 ciklus se ponavlja. Zato su valni oblici napona isti za transformatore Dyn0 i Dyn6 kao i za Dyn5 i Dyn11.

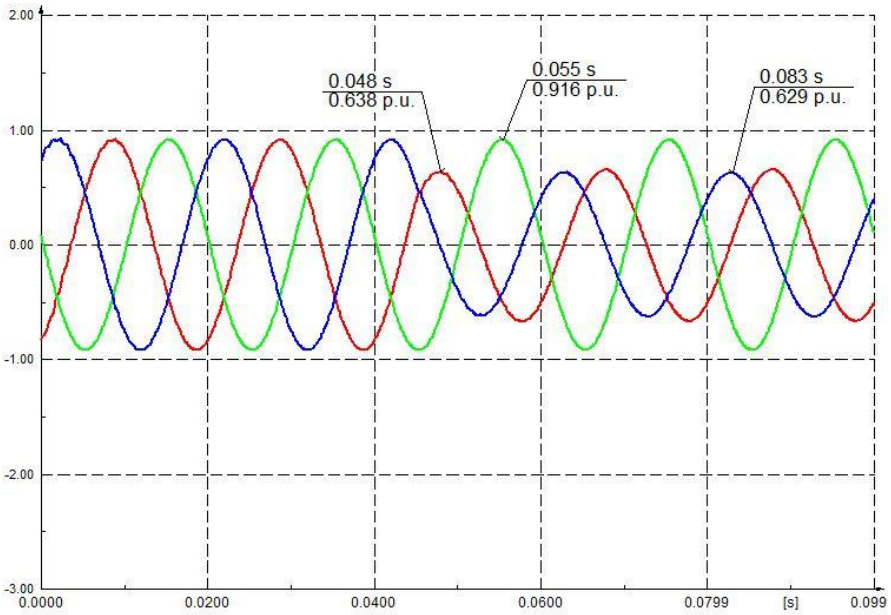
Za spoj transformatora 35/20 kV Yd5 na primaru se dobiju sljedeći valni oblici:



Sl. 3.33 *Valni oblici napona pojedinih faza na primaru 35/20 kV za jednofazni kratki spoj*

Pogođena faza je približno jednaka nuli, a preostale dvije faze se povećaju kao što se može vidjeti na slici 3.30.

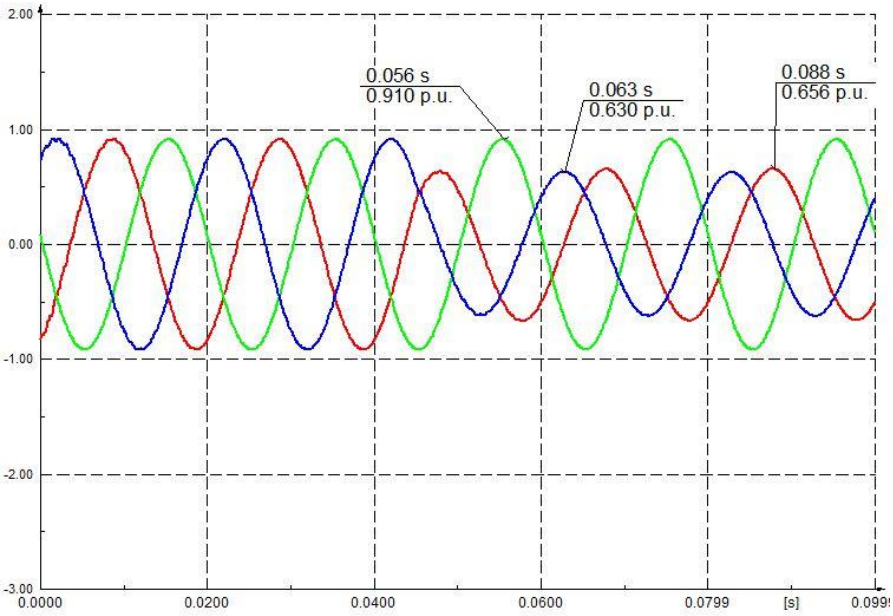
Prolazak kvara kroz sekundar transformatora 35/20 kV nastat će valni oblici napona kao na sljedećoj slici:



Sl 3.34. *Valni oblici napona pojedinih faza na sekundaru 35/20 kV za jednofazni kratki spoj*

Naponi su prigušeni u dvije faze na 0.6 p.u., a treća faza je ostala nepromijenjena.

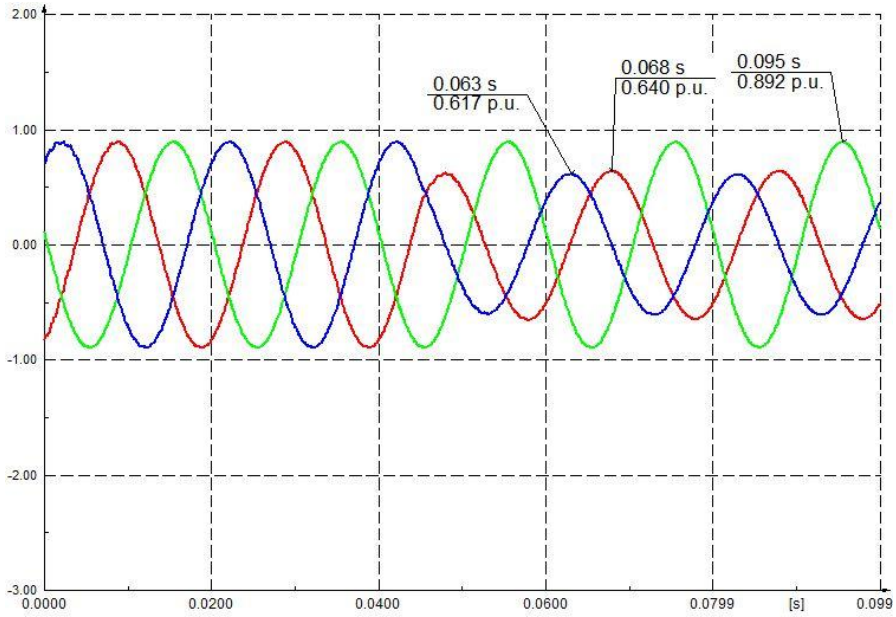
Promatramo li daljnju propagaciju kvara dolazimo do transformatora 20/0.4 kV u Dyn0 spoju. Valni oblici napona na primaru tog transformatora su slijedeći:



Sl. 3.35. *Valni oblici napona pojedinih faza na primaru 20/0.4 kV za jednofazni kratki spoj*

Može se uočiti da su valni oblici na primaru transformatora 20/0.4 kV jednaki onima na sekundaru transformatora 35/20 kV.

Naponi na sekundaru transformatora 20/0.4 kV:

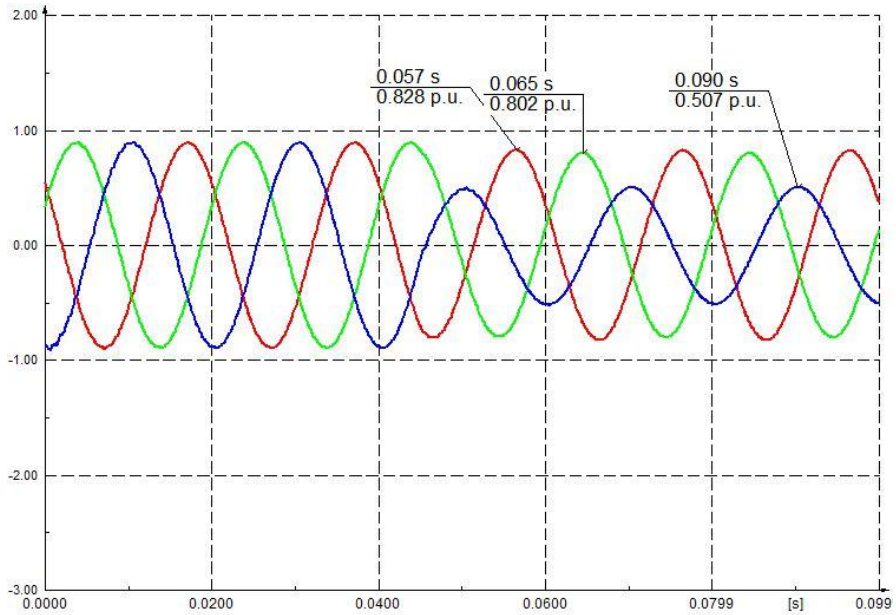


Sl. 3.36. *Valni oblici napona pojedinih faza na sekundaru 20/0.4 kV za jednofazni kratki spoj*

U ovakvom spoju transformatora, valni oblici napona na sekundaru slijede valne oblike napona na primaru.

Kako su valni oblici na sekundaru transformatora 35/20 kV u ovoj simulaciji uvijek isti, a zbog toga i na primaru transformatora 20/.04 kV prikazivati će se samo valni oblici napona na sekundaru transformatora 20/0.4 kV jer se oni mijenjaju uslijed promjene satnog broja.

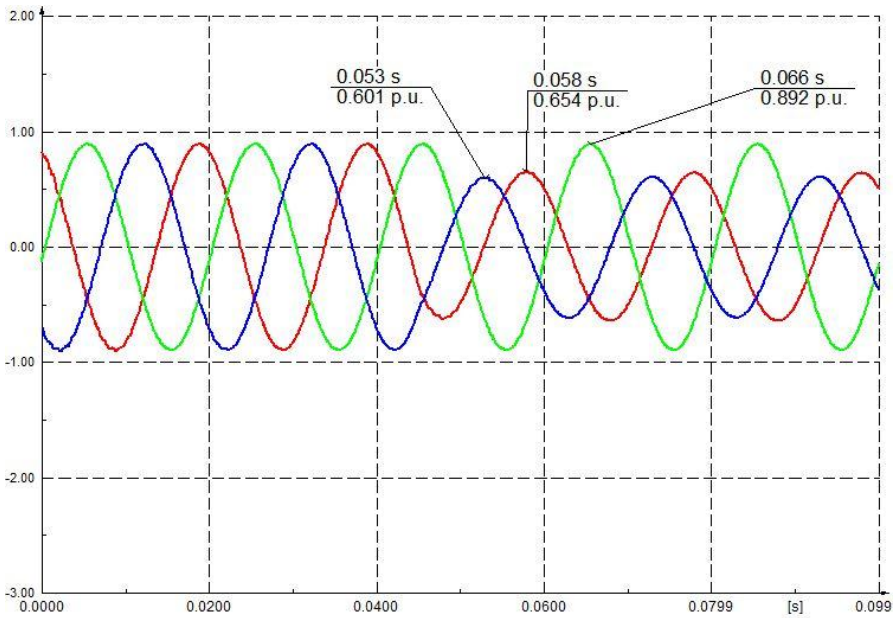
Valni oblici napona na sekundaru transformatora 20/0.4 kV za Dyn5 spoj:



Sl. 3.37. *Valni oblici napona pojedinih faza na sekundaru 20/0.4 kV za jednofazni kratki spoj*

Postoje prigušenja u sve tri faze, a u fazi C je to prigušenje najizraženije i iznosi 0.5 p.u..

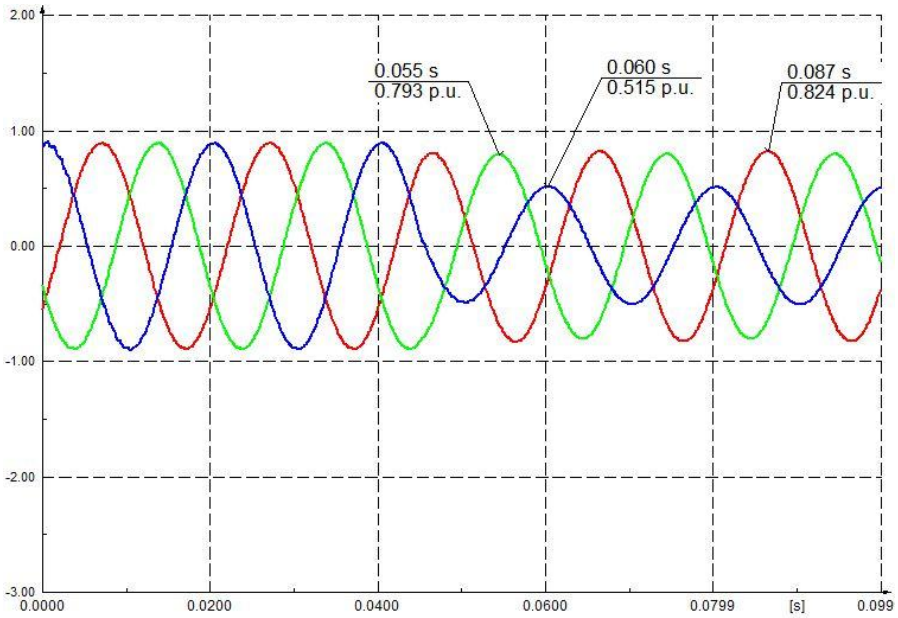
Valni oblici napona za spoj Dyn6:



Sl. 3.38. *Valni oblici napona pojedinih faza na sekundaru 20/0.4 kV za jednofazni kratki spoj*

Ponovno imamo prigušenje u samo dvije faze, a jedna ostaje kao i prije kratkog spoja, kao i na slici 3.36. odnosno Dyn0 spoju.

Valni oblici napona za spoj Dyn11:



Sl. 3.39. *Valni oblici napona pojedinih faza na sekundaru 20/0.4 kV za jednofazni kratki spoj*

Prigušenja u sve tri faze, naročito u fazi C, kao i u slučaju transformatora u spoju Dyn5.

Tablia 3.1. *Opis valnih oblika napona na primaru i sekundaru*

Spoj transformatora	Vrsta kvara	Primar	Sekundar
Yy0, Yyn0, Yny0, Dd0	Jednofazni kratki spoj	Prekid u jednoj fazi. Preostale teže vrijednosti linijskog naponu	Prigušenje u svim fazama. U jednoj jako izraženo, do 0.4 p.u.
	Dvofazni kratki spoj uz istovremeni dodir sa zemljom	U dvije faze prekid, jedna teži vrijednosti linijskog napona	Prigušenje u svim fazama. U jednoj izraženo, do 0.37 p.u.
	Dvofazni kratki spoj	Jedna faza zdrava, dvije prigušene.	Valni oblik na primaru isti kao i na sekundaru

Dy1, Yd1, Ynd1, Dyn1	Jednofazni kratki spoj	Prekid u jednoj fazi. Preostale teže vrijednosti linijskog naponu.	Dvije faze prigušene i jedna zdrava.
	Dvofazni kratki spoj uz istovremeni dodir sa zemljom	U dvije faze prekid, jedna teži vrijednosti linijskog napona.	Prekid u jednoj i prigušenje u preostale dvije.
	Dvofazni kratki spoj	Jedna faza zdrava, dvije prigušene.	Prekid u jednoj i prigušenje u preostale dvije.

U tablici 3.1. sažeto su prikazani podaci dobiveni provođenjem prvog dijela simulacije.

4. ZAKLJUČAK

Usporedimo li rezultate simulacije u poglavlju 3.1. sa vrijednostima iz slika 2.17. – 2.19. može se uočiti da su rezultati simulacije približno jednaki onima opisanima u teoriji. Propadi i pomaci u fazi pojavljuju se u onim fazama u kojima su predviđeni. Odstupanja su relativno mala, a do njih dolazi zbog utjecaja ostalih elemenata mreže.

Za vrijeme trajanja kratkog spoja, pratimo li valne oblike napona kroz mrežu, vidljivo je da transformatori utječu jedan na drugog što se tiče valnih oblika. Svaki transfomator će na svoj način utjecati na valne oblike napona ovisno o tipu spoja i satnom broju. Tako možemo znati kakav će biti valni oblik napona u slučaju kvara ako znamo kakvog su tipa transformatori na koje je spojen element mreže kojeg promatramo što može pomoći pri projektiranju zaštite sustava na osnovi napona.

Transformatori sa satnim brojevima 0, 2, 4 imaju iste valne oblike, samo se mijenja redoslijed faza u kojima su izraženi propadi. Također, transformatori sa satnim brojevima 1, 3, 5 imaju međusobno iste valne oblike, ali različite od 0, 2, 4 i promjenu u redoslijedu faza u kojima se javljaju propadi. Nakon satnog broja 5 ciklus se ponavlja.

LITERATURA

[1] H. Požar, Visoko naponska rasklopna postrojenja, Tehnička knjiga, 1973. Zagreb

[2] L. Josza, Analiza elektroenergetskog sustava, predlošci za predavanja ETFOS

[3] M. Bačić, Kratki spojevi u mreži, materijali s predavanja, Elektroindustrijska i obrtnička škola, Rijeka, kvalifikacijski doktorski ispit, dostupno na: http://mabacic.eios.hr/oo/ks.pdf, pristupljeno 16.04.2016.

[4] K. Meštrović, Tehnike prekidanja struje, materijali s predavanja, Tehničko veleučilište u Zagrebu, dostupno na: http://seminar.tvz.hr/materijali/materijali13/13E04.pdf, pristupljeno 16.04.2016.

[5] Z. Baus, Elektroenergetska postrojenja, materijali s predavanja ETFOS

[6] K. Meštrović, Sklopni aparati, materijali s predavanja, FER, dostupno na:https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Sklopni_aparati_Kratki_spoj.pdf, pristupljeno 16.04.2016.

[7] Z. Klaić, Kvaliteta napona, predlošci za predavanja ETFOS

[8] R. Jerčić, Analiza vertikalne propagacije naponskog poremećaja kroz prijenosnu mrežu elektroenergetskog sustava, FER, kvalifikacijski doktorski ispit,dostupno na: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/KDI,_Roko_Jercic.pdf, pristupljeno 16.04.2016.

[9] G. Knežević, K. Fekete, Z. Klaić, Journal of Energy Technology, Vol. 7. Issue 1., veljača 2014.

[10] M. Thu Aung, J. Milanović, The influence of transformer Winding connections on the propagation of the voltage sags, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21. Issue 1., 2006.

[11] M. H. J. Bollen, Characterisation of voltage sags experienced by three-phase adjustable speed drives, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12. Issue 4., 1997.

[12] Eloktrosklop d.o.o.,dostupno na: http://www.elektrosklop.hr/tehnicki-podaci/oznacavanje-i-spojevi/

[13] Z. Maljković, Elektromehaničke i električne pretvorbe energije, predlošci za predavanja, FER

[14] S. Ravlić, Uzemljenje zvjezdišta transformatora mreža srednjeg napona, FER, kvalifikacijski doktorski ispit, dostupno na: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/KDI_Sonja_Ravlic.pdf, pristupljeno 16.04.2016.

SAŽETAK

Ključne riječi: naponski propad, kratki spoj, transformator, satni broj, propagacija napona

Na modelu elektroenergetske mreže izvršene su simulacije različith vrsta kratkih spojeva u svrhu analize propagacije naponskih propada. Promjenom vrste spoja i satnog broja transformatora prikazano je kako pojedini transformator utječe na valne oblike napona za vrijeme kvara i kako se valni oblici mijenjaju kroz cijelu mrežu, od 110 kV sabirnice do potrošača, za najčešće korištene tipove transformatora za određene naponske razine.

ABSTRACT

TITLE: PROPAGATION OF VOLTAGE SAGS AND SHORT CIRCUIT CURRENT DUE TO THE DIFFERENT VECTOR GROUPS OF TRANSFORMER

Key words: voltage sags, short circuit, transformer, phase displacement, voltage propagation

Simulations of a different short circuit types were carried out on the part of energy grid, in voltage sags propagation analysis purpose. It has been shown the influence of an each transformer on the voltage waveforms during the failure by changing the transformer type and transformer phase displacement, and also, change in the voltage waveforms through the whole grid, from 110 kV bus to the consumers, for most frequently used transformer types according to the respective voltage levels.

ŽIVOTOPIS

Josip Bilandžić rođen je 20. lipnja 1992. godine u Našicama. Osnovnu školu pohađao je u Feričancima, a nakon osnovne upisuje Srednju školu Isidora Kršnjavog u Našicama, smjer tehničar za elektroniku gdje se počinje zanimati za elektrotehniku, a posbeno za elektroniku. U srednjoj školi pohađao je školsko natjecanje iz fizike i županijsko iz osnova elektrotehnike. Nakon završetka srednje škole, 2011. godine upisuje sveučilišni preddiplomski studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu Osijek i nakon prve godine opredjeljuje se za smjer elektroenergetika. 2014. godine završava sveučilišni preddiplomski studij elektrotehnike te iste godine upisuje diplomski studij smjer elektroenergetika na Elektrotehničkom fakultetu Osijek.

_____

(Potpis studenta)