

Analiza i prijedlog podešenja diferencijalne zaštite transformatora u paralelnom pogonu

Holec, Domagoj

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:200:367323>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-30**

Repository / Repozitorij:

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



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

Sveučilišni studij

**ANALIZA I PRIJEDLOG PODEŠENJA
DIFERENCIJALNE ZAŠTITE TRANSFORMATORA U
PARALELONOM POGONU**

Diplomski rad

Domagoj Holec

Osijek, 2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju****Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju**

Ime i prezime pristupnika:	Domagoj Holec
Studij, smjer:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. pristupnika, god.	D-1448, 07.10.2022.
JMBAG:	0165077293
Mentor:	prof. dr. sc. Predrag Marić
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
Član Povjerenstva 1:	prof. dr. sc. Predrag Marić
Član Povjerenstva 2:	Ružica Kljajić, univ. mag. ing. el.
Naslov diplomskog rada:	Analiza i prijedlog podešenja diferencijalne zaštite transformatora u paralelnom pogonu
Znanstvena grana diplomskog rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	Tema rezervirana: Domagoj Holec Sumentor iz tvrtke: Dino Masle (H&amp;MV Engineering)
Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	04.09.2024.
Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	Vrlo dobar (4)
Datum obrane diplomskog rada:	23.09.2024.
Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):	Dobar (3)
Ukupna ocjena diplomskog rada:	Vrlo dobar (4)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:	07.10.2024.



FERIT

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

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Osijek, 07.10.2024.

Ime i prezime Pristupnika:

Domagoj Holec

Studij:

Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika

Mat. br. Pristupnika, godina upisa:

D-1448, 07.10.2022.

Turnitin podudaranje [%]:

5

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Analiza i prijedlog podešenja diferencijalne zaštite transformatora u paralelnom pogonu**

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

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. PREGLED PODRUČJA TEME	2
3. ZAŠTITA TRANSFORMATORA	4
3.1. Općenito	4
3.2. Diferencijalna zaštita	8
3.2.1. Uvod	8
3.2.2. Osnovni princip rada	9
3.2.3. Strujna diferencijalna zaštita.....	9
3.2.4. Stabilizirana diferencijalna zaštita	11
3.2.5. Primjer rada diferencijalne zaštite za vrijeme unutarnjeg i vanjskog kvara	13
3.3. Diferencijalna zaštita transformatora	17
3.3.1. Uvod	17
3.3.2. <i>Inrush</i> (potezna struja).....	17
3.3.3. Simpatetski <i>inrush</i>	20
3.3.4. Specifičnosti diferencijalne zaštite transformatora	21
3.3.5. Stabilizacija diferencijalne zaštite za vrijeme <i>inrusha</i>	25
4. SIMULACIJE	28
4.1. Modeliranje mreže	28
4.2. Simulacija diferencijalne zaštite transformatora	28
4.2.1. Osnovni slučaj	28
4.2.2. Kvar unutar zaštitne zone	34
4.2.3. Kvar izvan zaštitne zone	38
4.2.4. Uključenje transformatora – pojava <i>inrusha</i>	42
4.3. Simulacija diferencijalne zaštite transformatora u paralelnom pogonu	47
4.3.1. Paralelni pogon transformatora.....	47
4.3.2. Osnovni slučaj	47
4.3.3. Kvar unutar zaštitne zone	55
4.3.4. Simpatetski <i>inrush</i>	62
5. ZAKLJUČAK	70
LITERATURA	71
SAŽETAK	73
ABSTRACT	74

1. UVOD

Transformatori su, uz generator, najvažniji i najskuplji dijelovi elektroenergetskog sustava. Samim time, njihova je zaštita od velikog značaja. Kako bi se bilo kakva poteškoća na transformatoru smanjila na minimum, zaštita mora biti brza, efektivna i točna.

Glavni je zadatak energetskog transformatora prenijeti veliku količinu energije između dva različita naponska nivoa uz minimalni gubitak energije i uz stalnu frekvenciju. Ako se na energetskom (mrežnom) transformatoru pojavi kvar koji će prekinuti prijenos energije do krajnjeg potrošača, praksa je dodati još jedan transformator u paralelu kako bi se prijenos energije mogao normalno nastaviti. Time se podiže pouzdanost sustava i smanjuju se troškovi održavanja.

Prije povezivanja dvaju transformatora u paralelu potrebno je uzeti u obzir obavezne faktore pri spajanju kao što su: jednaki prijenosni omjer, jednaka grupa spoja i jednaka frekvencija te probleme koji se mogu pojaviti postupkom povezivanja, npr. pojava velike struje magnetiziranja.

U ovom radu opisan je osnovni princip djelovanja diferencijalne zaštite, specifičnosti koje se vežu uz diferencijalnu zaštitu na transformatoru te problematika koja se veže uz spajanje transformatora u paralelu. Teorija je pokrivena simulacijom izrađenom u programskom paketu DIGSILENT (PowerFactory).

2. PREGLED PODRUČJA TEME

Autor literature [1] predlaže diferencijalnu zaštitu energetskog transformatora temeljenu na mreži komponente kvara (eng. FCN – Fault Component Network). Mreža komponente kvara temeljena je na diferencijalnoj snazi komponente kvara (eng. FCDP – Fault Component Differential Power) koja je pak definirana kao aktivna snaga transformatora u mreži komponenti kvara pod različitim uvjetima. Struje tijekom prijelazne pojave uključivanja na mrežu i padovi napona tijekom kvarova ne utječu na postavljenu shemu stoga predložena shema može pouzdano zaštititi transformator i lako se primjenjuje u praksi.

Literatura [2] govori o izazovima s kojima se susreću inženjeri u slučaju da se diferencijalna zaštita izvodi s transformatorima s nestandardnim faznim kutevima spojeva. To se može dogoditi u slučajevima kad su strujni transformatori postavljeni na neobičnim mjestima ili su strujni transformatori i releji povezani u posebnu vrstu spoja. Autor predlaže univerzalnu metodu kompenzacije faznog pomaka kao rješenje spomenutog problema. Metoda kompenzacije faznog pomaka se izvodi uz pomoć naprednih zaštitnih releja za transformator koji pružaju diferencijalnu zaštitu za bilo koji tip transformatora, s bilo kojim faznim pomakom.

Autori literature [3] opisuje poteškoće u projektiranju diferencijalne zaštite za posebne industrijske transformatore koji se često koriste u industrijskim i željezničkim primjenama. Glavni razlog postojanju poteškoća je to što 24-pulsni pretvarački transformatori imaju nestandardni fazni pomak. Ovaj rad predlaže izvođenje diferencijalne zaštite takvih vrsta transformatora uz pomoć standardnih numeričkih releja za zaštitu transformatora i vanjskih posrednih strujnih transformatora.

Literatura [4] bazirana je na poboljšanje pouzdanosti diferencijalne zaštite transformatora kada su u pitanju vanjski kvarovi. Zasićenje strujnih transformatora tijekom vanjskih kvarova može dovesti do opasno visokih omjera diferencijalne i stabilizacijske struje koje mogu uzrokovati neželjeni prekid. Kako bi se izbjegao takav događaj potrebna je preventivna analiza sustava, energetskih transformatora i strujnih transformatora kako bi se postavila zaštita za optimalne performanse.

Literatura [5] predlaže korištenje diskretne valne transformacije koja može pravilno detektirati unutarnje kvarove i druge poremećaje koji su prisutni kao prijelazni događaji. Autor naglašava kako je predložena metoda vrlo brza i precizna te se može koristiti u stvarnom vremenu s niskim računalnim opterećenjem.

Autor literature [6] opisuje digitalnu diferencijalnu zaštitu trofaznog SST transformatora (eng. Solid-State Transformer). Kroz rad korišten je 25kVA trofazni laboratorijski SST transformator te se kao rezultat testiranja digitalne diferencijalne zaštite spomenutog transformatora zaključuje kako je metoda točna, brza i pouzdana neovisno o tome koji je tip kvara u pitanju.

Literatura [7] bavi se postavljanjem diferencijalne zaštite na transformatore s nestandardnim faznim kutevima spojeva. U radu se koristi srednjenaponski impulsni transformator koji je spojen na frekvencijski pretvarač. Obavljene su RTDS simulacije (eng. Real Time Digital Simulation) koje pokazuju osjetljivost i sigurnost diferencijalne zaštite.

Literatura [8] bazira se na diferencijalnoj zaštiti pretvaračkih transformatora (eng. Converter Transformer) koji su uglavnom korišteni za napajanje pojačala, pretvarača ili FACTS uređaja (eng. FACTS - Flexible Alternating Current Transmission System). Testiranje diferencijalne zaštite na ovoj vrsti transformatora obavljeno je uz pomoć OMICRON testnog uređaja i MATLAB/SIMULINK simulacija.

Autor literature [9] bavi se diferencijalnom zaštitom energetskih transformatora u paralelnom pogonu utemeljenom na IEC61850 standardu. Odrađenom je simulacijom došao do zaključka kako do većine kvarova u paralelno spojenim transformatorima dolazi zbog problema s namotajima transformatora. Autor je koristio metode harmonijskog suzdržavanja (eng. harmonic restraint) i blokiranje elemenata (eng. blocking elements) koje su bile uspješne jer omogućuju brzo isključenje prekidača putem GOOSE komunikacije za sve unutarnje kvarove energetskog transformatora uz minimalno kašnjenje u aktiviranju oštećenog transformatora.

3. ZAŠTITA TRANSFORMATORA

3.1. Općenito

Energetski transformator, kao jedan od najbitnijih dijelova elektroenergetskog sustava, smatra se jednim od najskupljih elementima u sustavu prijenosa električne energije te je zbog toga njegova zaštita od velikog značaja. Prema literaturi [10] neki od mogućih kvarova energetskog transformatora su:

1. Međufazni kratki spojevi u transformatoru
2. Kratki spojevi između zavoja iste faze
3. Kratki spojevi sa zemljom namota transformatora

Svaki od njih može prouzročiti određenu komplikaciju koja u konačnici može rezultirati skupim popravkom ili zamjenom transformatora. Zahvaljujući zaštiti transformatora, takve se situacije mogu izbjeći.

U slučaju da kvar na transformatoru nije pravovremeno detektiran (što znači da transformator na vrijeme nije izoliran iz mreže), može se dogoditi situacija u kojoj se kvar proširi i na ostale dijelove sustava što u konačnici može rezultirati kvarovima na drugim transformatorima, vodovima i ostalim elementima u elektroenergetskom sustavu.

Kako bi se prethodno nabrojane situacije izbjegle i kako bi se transformator zaštitio od različitih vrsta kvarova, osmišljene su razne vrste zaštita, od kojih valja izdvojiti najbitnije: [11]

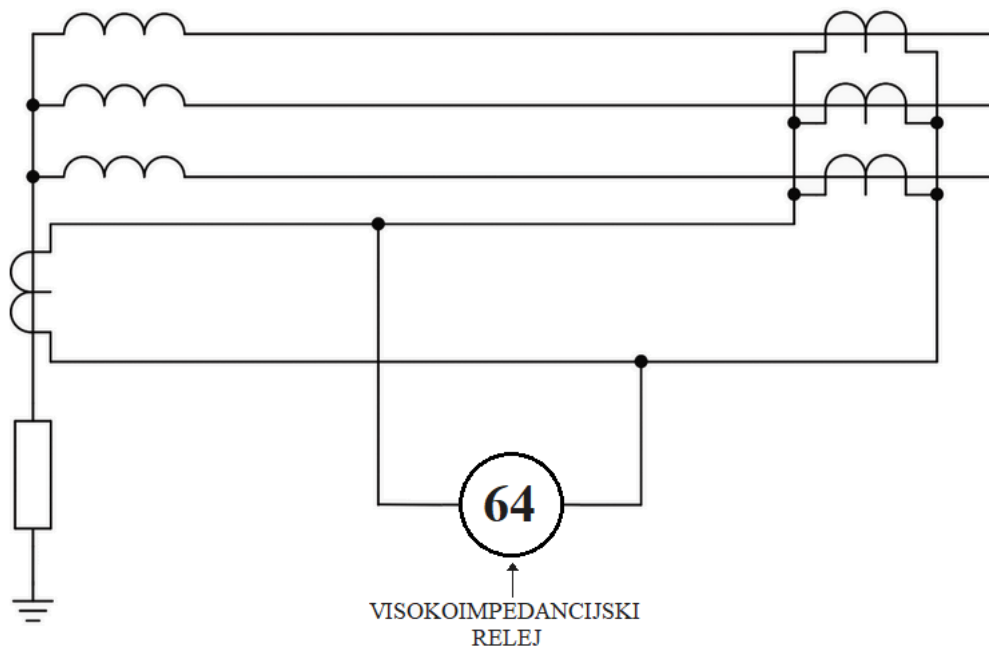
1. Diferencijalna zaštita (ANSI kod: 87)
2. Ograničena zemljospojna zaštita (ANSI kod: 64)
3. Nadstrujna zaštita (ANSI kod: 50/51)
4. Plinska zaštita (Buchholzov relej) (ANSI kod: 63)
5. Termička zaštita (ANSI kod: 49)

Tablica 3.1. predstavlja moguće kvarove na transformatoru te prikladne zaštite za korištenje u slučaju spomenutog kvara. [12]

Tablica 3.1. Prikaz zaštita za određene kvarove. [12]

Tip kvara	Zaštita koja se koristi
Jednopolni kratki spoj na sekundarnom namotu	Diferencijalna, Ograničena zemljospojna
Unutarnji kvar	Diferencijalna, Bucholz
Kvar na jezgri	Diferencijalna, Bucholz
Kvar rezervoara	Diferencijalna, Bucholz
Pregrijavanje	Termička
Međufazni kratki spoj na primarnom namotu	Diferencijalna, Nadstrujna
Jednopolni kratki spoj na primarnom namotu	Diferencijalna, Nadstrujna
Međufazni kratki spoj na sekundarnom namotu	Diferencijalna

Ograničena zemljospojna zaštita (eng. Restricted earth fault protection) vrsta je zaštite koja se koristi za zaštitu od zemljospoja i smatra se nadopunom za konvencionalnu zaštitu transformatora od zemljospoja u kojoj se koristi nadstrujni uređaji. Prikazana je grafički na slici 3.1. Budući da spomenuta konvencionalna zaštita ne pruža dovoljnu zaštitu za namote transformatora, pogotovo kada su u pitanju zvjezdasto spojeni namoti s impedancijski uzemljenim neutralnim vodičem, koristi se ograničena zemljospojna zaštita. To je posebna vrsta zaštite koja se primjenjuje isključivo na jedan namot transformatora te može biti visokoimpedancijskog tipa i niskoimpedancijskog tipa. [11]



Slika 3.1. Ograničena zemljospojna zaštita za zvjezdasti namot transformatora [13]

Ovaj način zaštite učinkovit je za otkrivanje kvarova u području koje pokrivaju strujni mjerni transformatori što u konačnici znači da sustav ne reagira na kvarove izvan zaštitnog područja zemljospojne zaštite.

Nadstrujna zaštita vrsta je zaštite koja koristi osigurače ili zaštitne releje za zaštitu transformatora. Ako su u pitanju energetske transformatori manje snage (do 1MVA), osigurači su dovoljna opcija za njihovu zaštitu, međutim, kod velikih transformatora ($>1\text{MVA}$) za zaštitu od prekomjerne struje potrebni su zaštitni releji i prekidač. [13]

Osigurač mora imati nazivnu vrijednost znatno iznad maksimalne struje opterećenja transformatora kako bi mogao izdržati kratkotrajna opterećenja. Osigurači također moraju moći izdržati struje *inrusha* koje se pojavljuju pri uključivanju transformatora.

Osigurači s visokom prekidnom moći (eng. HRC – High Rupturing Capacity) vrlo su brzi kada rade sa strujama kvara koje imaju veliku vrijednost, no nedostatak pokazuju kada rade sa strujama koje su tri puta manje od njihove nazivne vrijednosti (u tom su slučaju jako spori).

Tablica 3.2. pokazuje potrebne osigurače za zaštitu navedenih transformatora.

Tablica 3.2. Prikaz osigurača za zaštitu različitih transformatora [13]

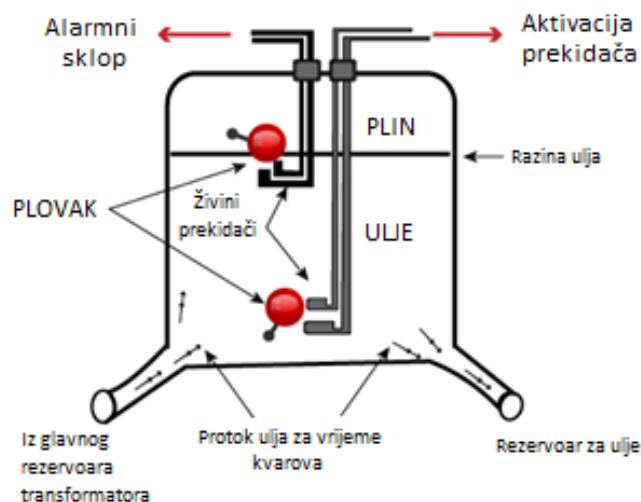
NAZIVNE VRIJEDNOSTI TRANSFORMATORA		OSIGURAČ	
kVA	Struja ukupnog tereta [A]	Nazivna struja [A]	Vrijeme okidanja 3 x Nazivna vrijednost [s]
100	5,25	16	3,0
200	10,5	25	3,0
315	15,8	36	10,0
500	26,2	50	20,0
1000	52,5	90	30,0

Nadstrujna zaštita uz pomoć releja služi za zaštitu velikih transformatora koji su opremljeni sa standardnim upravljačkim prekidačima. Poboljšanja u korištenju zaštitnih releja u odnosu na korištenje osigurača pronalaze se u dvije stavke:

1. Nedostatak brzine koji HRC osigurači imaju pri niskim strujama kvara više ne predstavlja problem
2. Uz element zaštite od prekomjerne struje, dodan je i element za isključivanje u slučaju zemljospoja

Buholzov relej tip je zaštite transformatora koji se koristi za transformatore uronjene u ulje sa snagom većom od 500 kVA. Glavna mu je svrha sprječavanje daljnjeg proširenja nastalog kvara u spomenutom transformatoru.

Kako je prikazano na slici 3.2., sastoji se od dvaju plovaka, od kojih se jedan nalazi na vrhu, a drugi na dnu. Oba plovka praćena su od strane živinih prekidača. Živin prekidač na gornjem plovku povezan je s alarmnim sustavom, dok je s donje strane povezan s prekidačem za isključenje.



Slika 3.2. Grafički prikaz Bucholzovog releja [14]

Bucholov relej funkcionira tako da ako dođe do kvara unutar transformatora, temperatura ulje će se povećati i početi isparavati. Pare koje je stvorilo ulje idu prema gore sve dok ne aktiviraju Bucholov relej i daju potreban alarm osoblju. U slučaju da je kvar veći, što može biti npr. kratki spoj faze sa zemljom, plin će opet isparavati prema gore, no kretanje plina bit će jako veliko i aktivirati donji plovak. Taj će plovak aktivirati donji žvina prekidač koji će isključiti transformator s napajanja. [15]

3.2. Diferencijalna zaštita

3.2.1. Uvod

Diferencijalna zaštita vrsta je zaštite koja u potpunosti odgovara samo na kvarove unutar svoje zaštitne zone. Spomenuta je zaštitna zona definirana uz pomoć lokacije strujnih transformatora. Nije potrebno vremensko usklađivanje s drugim vrstama zaštite, što diferencijalnu zaštitu čini vrlo brzom i efektivnom jer nema dodatnog kašnjenja. Zbog toga se koristi za zaštitu velikih i skupih elemenata mreže, poput energetskih transformatora. [16]

Diferencijalna zaštita smatra se temeljnom relejnom zaštitom energetskog transformatora, dok se ostale zaštite poput nadstrujne, distantne ili termičke smatraju samo nadopunom za diferencijalnu zaštitu. ANSI oznaka diferencijalne zaštite glasi 87T, dok IEC oznaka glasi Id. [10]

Prema literaturi [10] prilikom izvođenja diferencijalne zaštite na energetski transformator, potrebno je uzeti u obzir nekoliko značajki koje, ako nisu ispunjene, mogu direktno utjecati na funkcionalnost diferencijalne zaštite, a to su:

- broj namotaja, način na koji su spojeni i način uzemljenja
- struja magnetiziranja energetskog transformatora
- različite naponske razine na VN i NN strani energetskog transformatora te se upravo zbog tog razloga koriste strujni mjerni transformatori različitih karakteristika i prijenosnih omjera
- fazni pomaci između struja i napona primara i sekundara (i tercijara, ako je u pitanju tronamotni transformator)
- grupa spoja transformatora
- regulacija napona na VN strani energetskog transformatora.

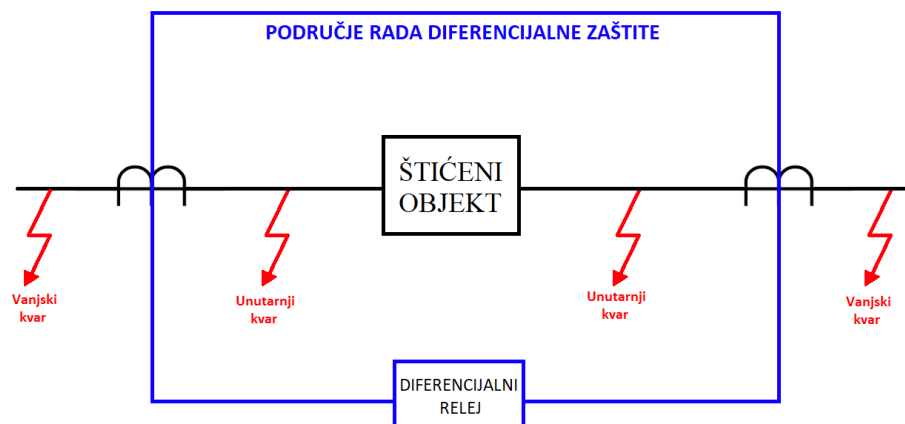
3.2.2. Osnovni princip rada

Diferencijalna zaštita temelji se na Kirchhoffovom zakonu struja koji govori kako suma svih struja koje ulaze ili izlaze iz čvora mora biti jednaka 0, što je prikazano na formuli (3-1).

$$\sum_{i=0}^n i_n = 0 \quad (3-1)$$

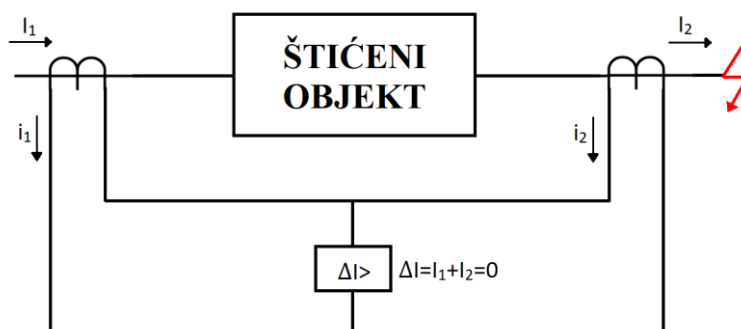
3.2.3. Strujna diferencijalna zaštita

Kao što je ranije naglašeno, diferencijalna zaštita ima strogo definiranu zaštitnu zonu u kojoj funkcioniра, što je prikazano na slici 3.3.



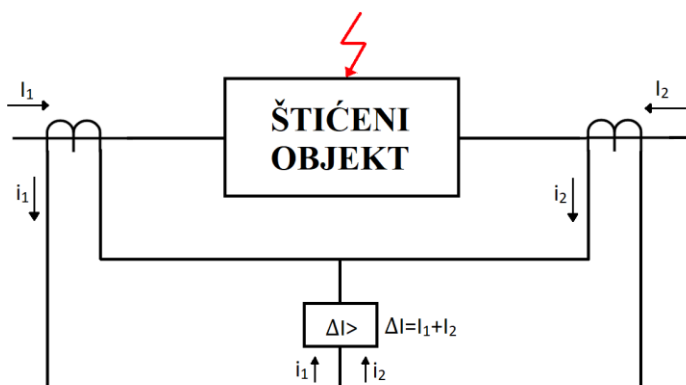
Slika 3.3. Područje rada diferencijalne zaštite [17]

Strujna diferencijalna zaštita smatra se najjednostavnijim te najčešćim oblikom diferencijalne zaštite. U ovom obliku diferencijalne zaštite, strujni mjerni transformatori spojeni su serijski sa šticećenim objektom (u ovom slučaju transformatorom) sa svake strane šticećenog objekta. Postavljaju se na taj način iz razloga kako bi struja mogla normalno teći kroz njih u slučaju vanjskog kvara te kako struja ne bi tekla u diferencijalnu granu gdje je postavljen diferencijalni relej. Smjerovi struja u slučaju vanjskog kvara na diferencijalnoj zaštiti prikazani su na slici 3.4.



Slika 3.4. Smjerovi struja u slučaju vanjskog kvara [18]

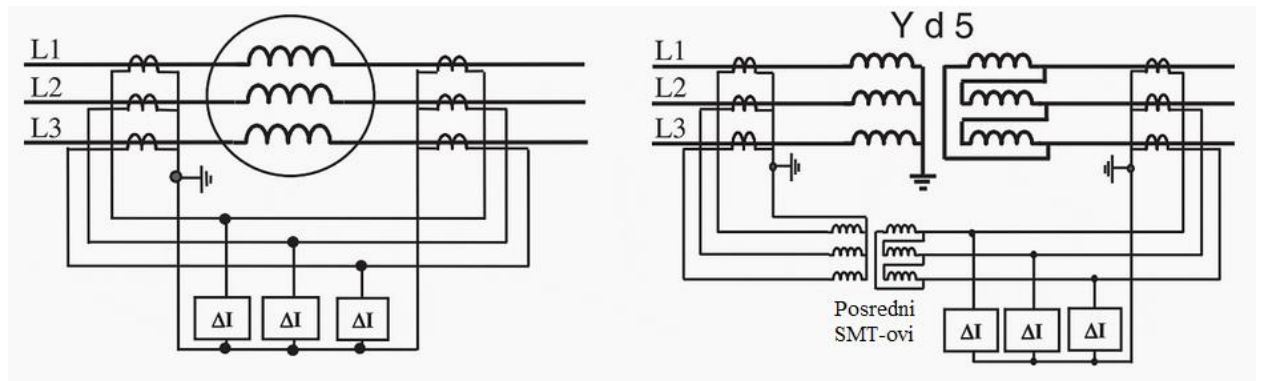
U slučaju unutarnjeg kvara, koji je prikazan na slici 3.5., struje kvara poteći će prema lokaciji kvara. Samim time poteći će struja kroz diferencijalnu granu koja će aktivirati diferencijalni relej i u konačnici izolirati šticećeni objekt iz sustava.



Slika 3.5. Smjerovi struja u slučaju unutarnjeg kvara [18]

Postoji velika razlika ako se priča o zaštiti motora/generatora ili o zaštiti transformatora. Ako je diferencijalnim relejem zaštićen generator ili motor, potrebna su samo dva strujna mjerna transformatora s obje strane šticećenog objekta, dok je kod zaštite transformatora situacija nešto

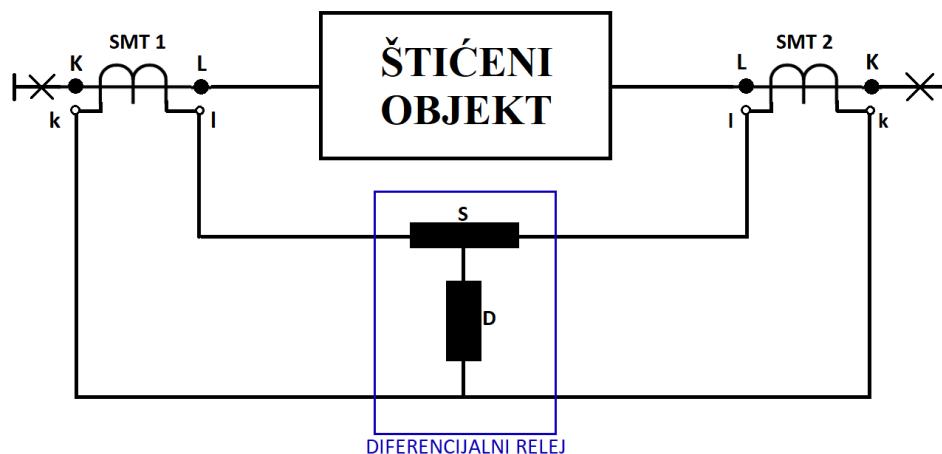
složenija. Shematski prikazi diferencijalne zaštite motora/generatora te diferencijalne zaštite transformatora su prikazani na slici 3.6. Transformatori osim „glavnih“ strujnih mjernih transformatora zahtijevaju i posredne strujne mjerne transformatore koji služe za korekciju vektorske grupe i omjera struja koji se koriste za usporedbu. [16]



Slika 3.6. Diferencijalna zaštita motora/generatora i diferencijalna zaštita transformatora [16]

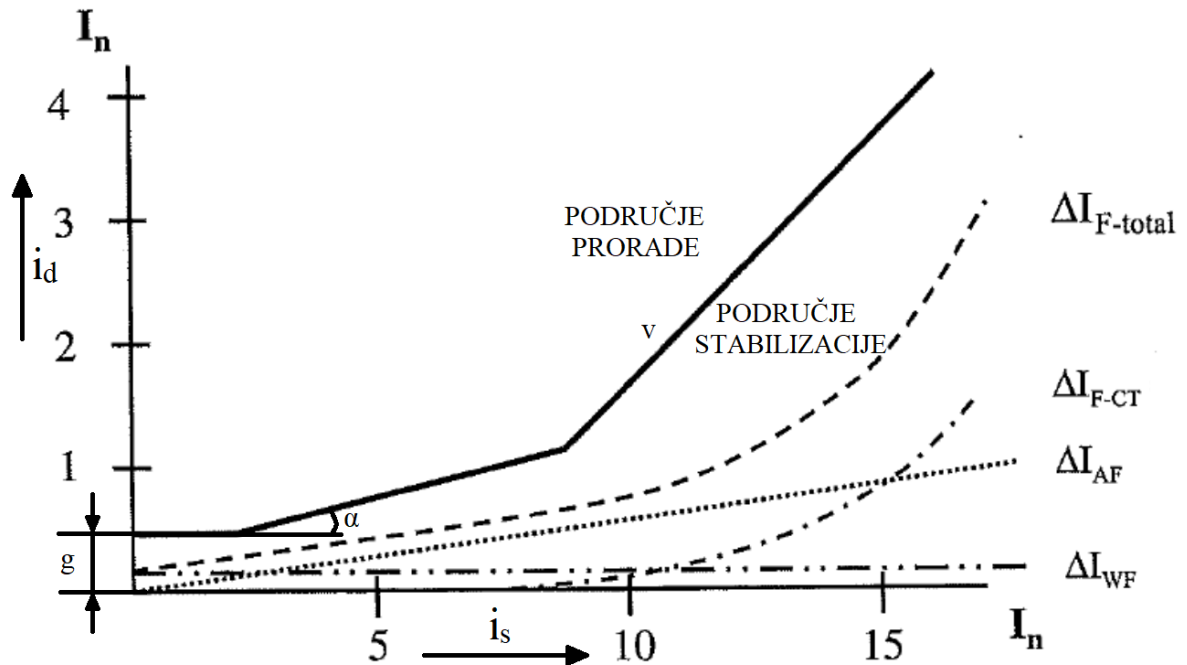
3.2.4. Stabilizirana diferencijalna zaštita

Glavni element diferencijalne zaštite jest diferencijalni relej. Sastoji se od diferencijalne grane i stabilizacijske grane te mu je osnovna svrha usporediti struje koje ulaze i izlaze iz zaštitne zone. Kao što je ranije u tekstu spomenuto, sa svake strane šticeenog objekta nalazi se strujni mjerni transformator na čije se sekundarne strane spaja diferencijalni relej. Na slici 3.7. slovom S označena je stabilizacijska grana, a slovom D diferencijalna grana. [10]



Slika 3.7. Grafički prikaz stabilizirane diferencijalne zaštite [10]

Na slici 3.8. prikazana je proradna karakteristika diferencijalne zaštite na kojoj su prikazane struje koje teku u diferencijalnom releju te diferencijalne struje koje mogu nastati zbog pogreške u transformaciji koje izazovu strujni mjerni transformatori.



Slika 3.8. Proradna karakteristika diferencijalne zaštite [16]

Na slici 3.8. oznake predstavljaju:

i_d – diferencijalna struja, teče kroz diferencijalnu granu diferencijalnog releja

i_s – stabilizacijska struja, teče kroz stabilizacijsku granu diferencijalnog releja

ΔI_{WF} – struja magnetiziranja energetskog transformatora

ΔI_{AF} – struja nastala zbog nesavršenosti strujnih transformatora (eng. mismatch false current)

ΔI_{F-CT} – struja nastala radi različitih prijenosnih omjera strujnih transformatora

$\Delta I_{F-total}$ – ukupna struja nastala radi nesavršenosti elemenata

g – osnovno podešenje → uzima u obzir strujno nezavisne pogreške

v – koeficijent stabilizacije → uzima u obzir strujno zavisne pogreške

Prema literaturi [10] parametri g i v definiraju se prema izrazima:

$$g = \frac{i_d}{i_N} \cdot 100, \text{ pri } i_s = 0 \quad (3-2)$$

$$v = \frac{f\left(\frac{i_s}{i_N} = \alpha\right) - f\left(\frac{i_s}{i_N} = 1\right)}{\alpha - 1} \cdot 100, \text{ pri } \alpha > 1 \quad (3-3)$$

gdje je: f – funkcijska veza oblika $i_d/i_N = f(i_s/i_N)$.

Osnovno podešenje (g) definirano je kao postotak diferencijalne struje i_d u odnosu na nazivnu struju diferencijalnog releja i_N . Podešava se u sljedećem području:

$$g \in [20 - 50] \% \quad (3-4)$$

Koeficijent stabilizacije (v) definiran je prema koeficijentu smjera pravca na proradnoj karakteristici iznad koljena (izraz (3-3)) te se podešava u području naglašenim u izrazu (3-6):

$$v = \tan \alpha \cdot 100 \quad (3-5)$$

$$v \in [20 - 50]\% \quad (3-6)$$

3.2.5. Primjer rada diferencijalne zaštite za vrijeme unutarnjeg i vanjskog kvara

Kao što je ranije u tekstu objašnjeno, princip rada diferencijalne zaštite temelji se na Kirchhoffovom zakonu struja, što bi u ovom kontekstu značilo da struja koja uđe u zaštitnu zonu djelovanja diferencijalne zaštite mora biti iznosom jednaka struji koja izlazi iz zaštitne zone.

Tijekom normalnog pogona sljedeći izrazi moraju biti zadovoljeni:

$$i_d = |\vec{i}_1 + \vec{i}_2| = 0, \quad (3-7)$$

$$i_s = \frac{|\vec{i}_1 + \vec{i}_2|}{2} \quad (3-8)$$

gdje su:

i_s – stabilizacijska struja

i_d – diferencijalna struja

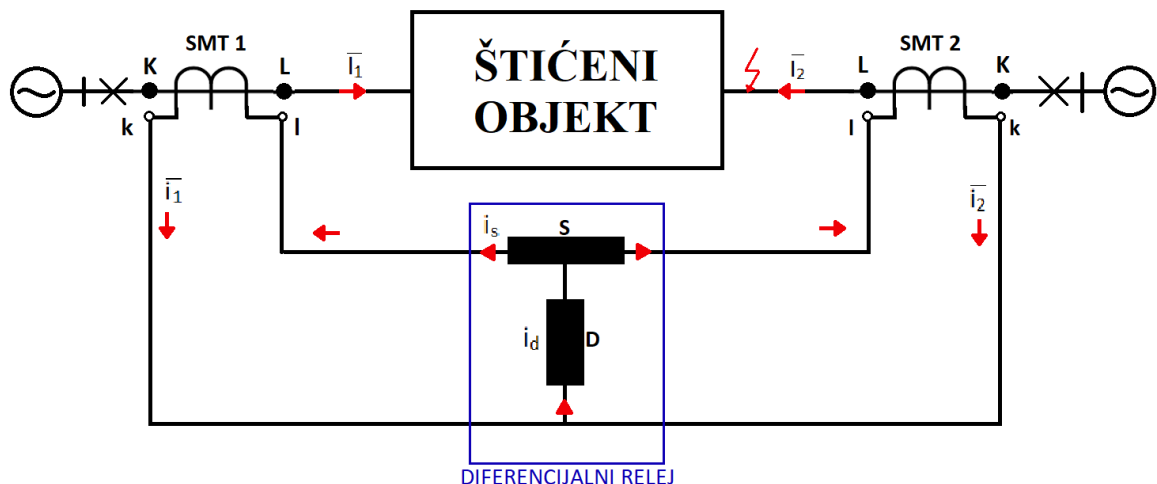
i_1 – struja koja teče na sekundaru SMT-u 1

i_2 – struja koja teče na sekundaru SMT-u 2

Uzevši u obzir sve što je ranije naglašeno, diferencijalna zaštita će reagirati samo u slučajevima kada se kvar nalazi u zaštitnoj zoni, međutim potrebno je uzeti u obzir da uvjeti u praksi nisu savršeni i da je potrebno uzeti u obzir moguće greške.

Moguće greške mogu nastati zbog neusklađenosti strujnih transformatora koji se postavljaju. Budući da su potrebna dva strujna mjerna transformatora, moguće su razlike u prijenosnim omjerima, nazivnim snagama ili klasama točnosti. U visokonaponskim sustavima moguća je pogreška u obliku prevelikog utjecaja struje magnetiziranja transformatora te je zbog toga potrebna dodatna podešenja diferencijalne zaštite. [19]

U primjeru koji je predstavljen na slici 3.9. je štićeni objekt (transformator) napajan s obje strane te se kvar dogodio u zaštitnoj zoni diferencijalne zaštite.



Slika 3.9. Smjerovi struja u primarnom i sekundarnom krugu u slučaju unutarnjeg kvara [10]

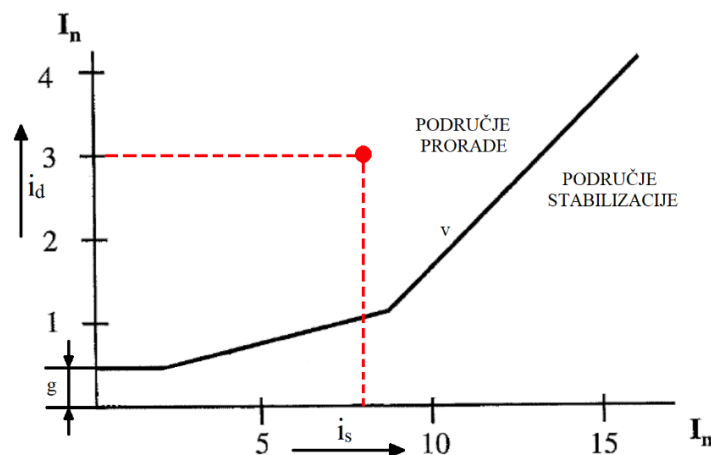
Ako se vrijednosti struja uvrste u izraze za diferencijalnu struju i stabilizacijsku struju, dobije se sljedeće:

$$i_d = |\vec{i}_1 + \vec{i}_2|, \quad (3-9)$$

$$i_s = \frac{|\vec{i}_1 - \vec{i}_2|}{2} \quad (3-10)$$

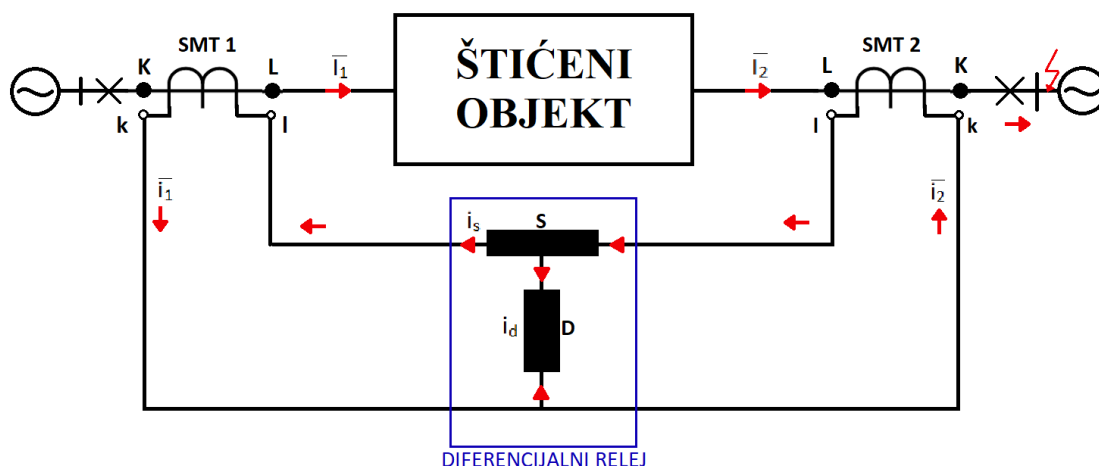
Samim time, diferencijalna struja (i_d) nije jednaka nuli što znači da je diferencijalna zaštita reagirala i da je diferencijalni relej izolirao zaštićeni objekt (transformator) iz mreže.

Ako se situacija prikaže na proradnoj karakteristici diferencijalne zaštite, radna točka će završiti u području prorade kao što je prikazano na slici 3.10.



Slika 3.10. Proradna karakteristika i radna točka diferencijalnog releja u slučaju unutarnjeg kvara [16]

U primjeru na slici 3.11. predstavljena je situacija kada je šticeeni objekt (transformator) također napajan s obje strane, međutim kvar se ovaj put dogodio izvan područja djelovanja diferencijalne zaštite.



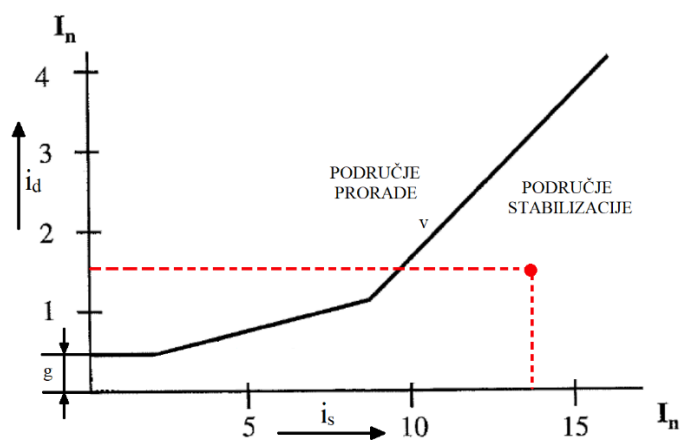
Slika 3.11. Smjerovi struja u primarnom i sekundarnom krugu u slučaju vanjskog kvara [10]

Ako se u sljedećoj situaciji u izraze za stabilizacijsku i diferencijalnu struju unesu vrijednosti, dobije se sljedeće:

$$i_d = |\vec{i}_1 + \vec{i}_2|, \quad (4-11)$$

$$i_s = \frac{|\vec{i}_1 - \vec{i}_2|}{2} \quad (4-12)$$

Ovdje se može zaključiti kako će se distributivna struja smanjivati, dok će se stabilizacijska struja povećavati. Ako se ova situacija pokaže na proradnoj karakteristici diferencijalne zaštite, radna točka završit će u području stabilizacije kao što je prikazano na slici 3.12.



Slika 3.12. Proradna karakteristika i radna točka diferencijalnog releja u slučaju vanjskog kvara [16]

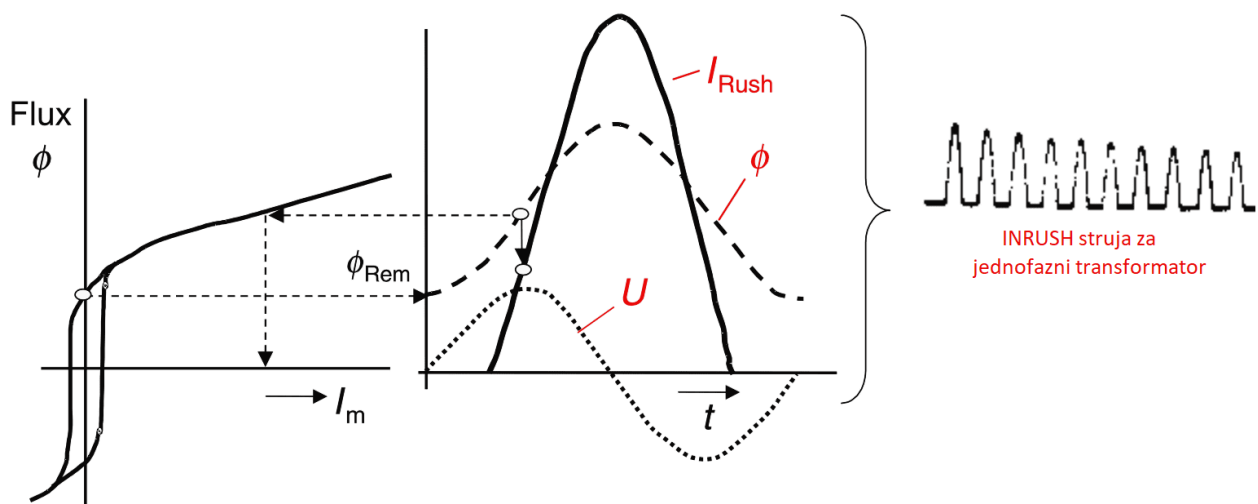
3.3. Diferencijalna zaštita transformatora

3.3.1. Uvod

Diferencijalna zaštita transformatora može služiti kao selektivna zaštita od kvarova sama po sebi te u nekim slučajevima služi kao dopuna Buchholzovoj zaštiti. U pravilu se primjenjuje na transformatorima sa snagom iznad 1 MVA, te je standardna na transformatorima sa snagom preko 5 MVA. Diferencijalna zaštita transformatora sadrži velik broj dodatnih funkcija, kao što su prilagodba prienosnog omjera, prilagodba grupe spoja te stabilizacija u slučaju *inrusha* ili prenapona. Zbog spomenutih funkcija, potrebni su detaljni izračuni prije konfiguracije diferencijalne zaštite. [16]

3.3.2. *Inrush* (potezna struja)

Prilikom uključivanja transformatora, dolazi do jednostrane prenapregnutosti (eng. over-excitation) zbog magnetizma koji je ostao, tj. remanentnog magnetizma (eng. remanence), što uzrokuje protok struje *inrusha* (potezne struje). Tok se ne vraća na nulu kada se transformator ugasi, nego ostaje na točki remanentnog magnetizma Φ_{Rem} (eng. remanence point) koja može biti 80% iznad nominalne indukcije. Kada se transformator ponovno uključi, tok ne počinje rasti od 0, nego počinje rasti od točke remanentnog magnetizma Φ_{Rem} . Može doći do pomaka toka ovisno o trenutku uključivanja transformatora na sinusoidni napon. Izgled krivulje *inrusha* (slika 3.13.) je definiran sinusnim poluvalovima koji opadaju s jako velikom vremenskom konstantnom. [16]



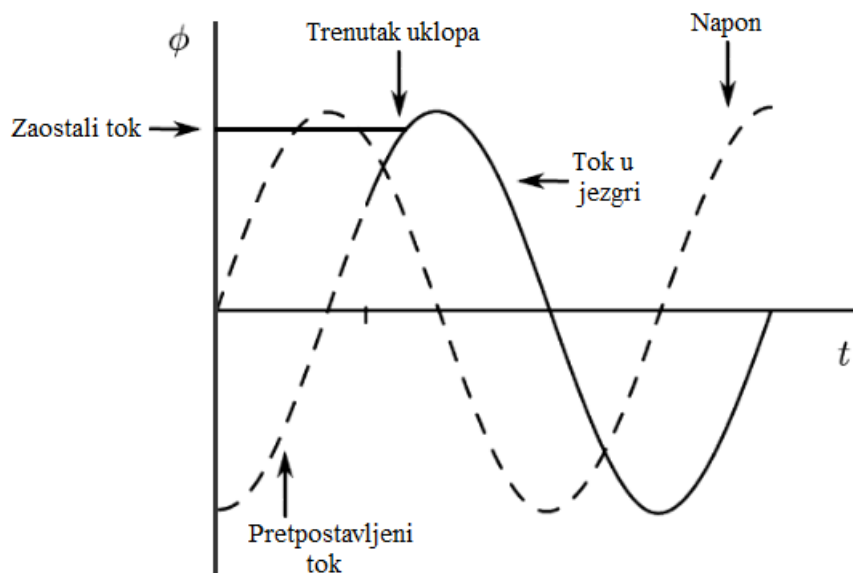
Slika 3.13. Oblik krivulje *inrusha* [16]

Uglavnom je prethodno spomenuta pojava vrlo kratkog trajanja i ne smatra se kvarom na transformatoru, međutim u nekim slučajevima može doći do neplanirane prorade zaštite transformatora i izolacije transformatora iz mreže, što u konačnici znači prekid opskrbe električnom energijom. Da ne bi došlo do tog scenarija, postoje standardne metode koje služe za ograničavanje *inrush*-a (potezne struje).

Prema literaturi [20] postoji 6 najvažnijih metoda ograničavanja potezne struje, a to su:

1. Određivanje optimalnog trenutka uklopa
2. Upravljeni uklop korištenjem pulsno širinske modulacije
3. Sekvencijalno uklapanje faza transformatora
4. Limitiranje struje korištenjem temperaturno osjetljivih otpornika
5. Demagnetiziranje jezgre transformatora
6. Projektiranje transformatora za manje potezne struje

Određivanje optimalnog trenutka uklopa (slika 3.14.) svodi se na uklapanje u trenutku kada je pretpostavljeni tok u jezgri, koji bi postojao da je transformator već uključen, bio jednak zaostalom magnetskom toku. [20]

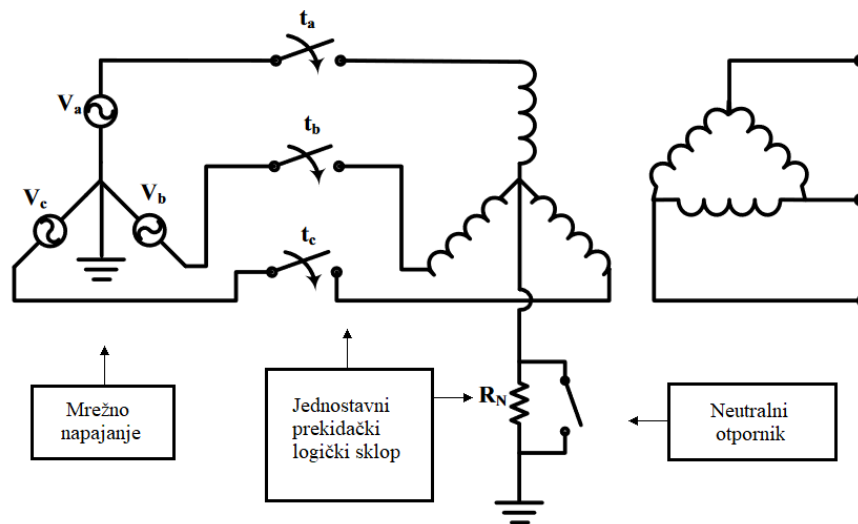


Slika 3.14. Optimalni trenutak uklopa jednofaznog transformatora uz zaostali magnetski tok [21]

Upravljeni uklop korištenjem pulsno širinske modulacija metoda je koja se ostvaruje pulsним širinskim moduliranjem (eng. PWM – Pulse width modulation). Korištenjem kompenzatorskog

PWM načina za generiranje napona, prigušuje se struja uklopa i smanjuje se iskrivljenje harmonika. Budući da se napon upravlja pulsno širinskom modulacijom, njegova se vrijednost postepeno smanjuje dok modificiran napon ne dosegne nulu. U trenutku kada modificirani napon dosegne nulu, stvoreni magnetski tok postaje jednak zaostalom magnetskom toku, pa se napon bez modifikacija propušta, neovisno o trenutnoj vrijednosti njegove sinusoide. [20]

Sekvencijalno uklapanje faza transformatora (slika 3.15.) metoda je u kojoj se koristi neutralni otpornik s optimalnom vrijednosti koji je spojen sa zemljom. U slučaju kada se faze uključuju jedna po jedna, prethodno spomenuti otpornik djeluje kao da je u serijskom spoju s fazom koja se uključuje čime se značajno smanjuje *inrush* struja, tj. potezna struja. [20]



Slika 3.15. Prikaz sekvencijalnog uklapanja faza transformatora [21]

Limitiranje struje korištenjem temperaturno osjetljivih otpornika (NTC sonda) još je jedna od metoda koja se koristi kako bi se ograničila potezna struja. U spomenutoj metodi koriste se NTC otpornici koji imaju karakteristiku da im otpor opada s porastom temperature kojeg je uzrokovala struja koja prolazi. Ovi se otpornici povezuju serijski s primarnim namotom, a zbog visoke vrijednosti početnog otpora ograničavaju *inrush* struju. Kada temperatura raste, otpor otpornika smanjuje svoju vrijednost, čime pad napona na njemu postaje zanemariv i transformator ostaje u pogonu. Veliki je nedostatak NTC otpornika određeno vrijeme koje je potrebno za hlađenje prije ponovnog uključanja koje obično traje oko jednu minutu. [20]

Demagnetiziranje jezgre transformatora metoda je u kojoj se koristi regulacijski transformator kojemu je glavna zadaća (prije uključivanja glavnog transformatora) postepeno povećati napon

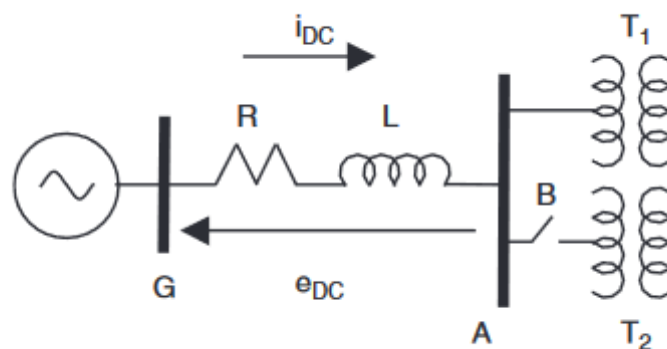
kako bi se magnetizirala jezgra glavnog transformatora, a zatim postepeno smanjivati napon na nulu radi demagnetizacije. Na spomenuti način se uklanja zaostali magnetski tok. [20]

Zadnja je metoda koju je autor u literaturi [20] spomenuo projektiranje transformatora za manje struje *inrusha* u kojoj je napomenuo nekoliko stavki na koje treba obratiti pozornost u slučaju projektiranja. Među nabrojanim je bilo postizanje nižeg nazivnog zasićenja i manjeg magnetskog toka, postizanje veće rasipne reaktancije i obraćanje pažnje na dizajn i smještaj namota.

3.3.3. Simpatetski *inrush*

Obična *inrush* struja koja se može pojaviti na transformatoru može iznositi i do osam puta veću vrijednost nego nazivna struja transformatora. Međutim, problem koju uzrokuje *inrush* struja može se dogoditi i u slučaju kada se transformator uključuje pored transformatora koji je u pogonu već neko vrijeme. Napajani će transformator u trenutku uključivanja novog transformatora imati poprilično veliku struju *inrusha*. [22]

Za primjer će se uzeti strujni krug prikazan na slici 3.16. Transformator T1 je uključen, a transformator T2 uključuje se zatvaranjem prekidača B. Kada se prekidač B zatvori, stvara se *inrush* struja u primaru transformatora T2. *Inrush* struja koja je nastala ima DC komponentu s dugačkom vremenskom konstantom te spomenuta DC komponenta uzrokuje pad napona na otporu prijenosne linije. [11]



Slika 3.16. Jednostavni prikaz strujnog kruga u kojem se događa simpatetski *inrush* [11]

Izlaz generatora čisto je izmjeničan pa na njega neće reagirati pad napona koji je označen na slici 3.16. Samim time da se zaključiti kako će napon sabirnice A dobiti negativnu DC komponentu što rezultira promjenom u magnetskim tokovima u jezgrama oba transformatora. Pretpostavlja se da je transformator T2 imao zasićen magnetski tok koji je doveo do pojave struje *inrusha*. [11]

Inrush struja u transformatoru T2 opada s vremenom, dok *inrush* struja na transformatoru T1 raste. U slučaju da su DC komponente jednake u obje *inrush* struje, ne postoji DC komponenta u struji u prijenosnoj liniji (na izvoru), ali može postojati DC komponenta u strujama magnetiziranja oba transformatora. [11]

Iz razloga što su dva transformatora spojena u paralelu i promatraju se kao cjelina, logičan je način zaštite jedan diferencijalni relej, međutim, upravo zbog pojave simpatetskog *inrusha*, takva praksa nije preporučljiva. Postoji mogućnost da spajanjem novog transformatora diferencijalna zaštita proradi i oba transformatora izolira iz mreže. [11].

3.3.4. Specifičnosti diferencijalne zaštite transformatora

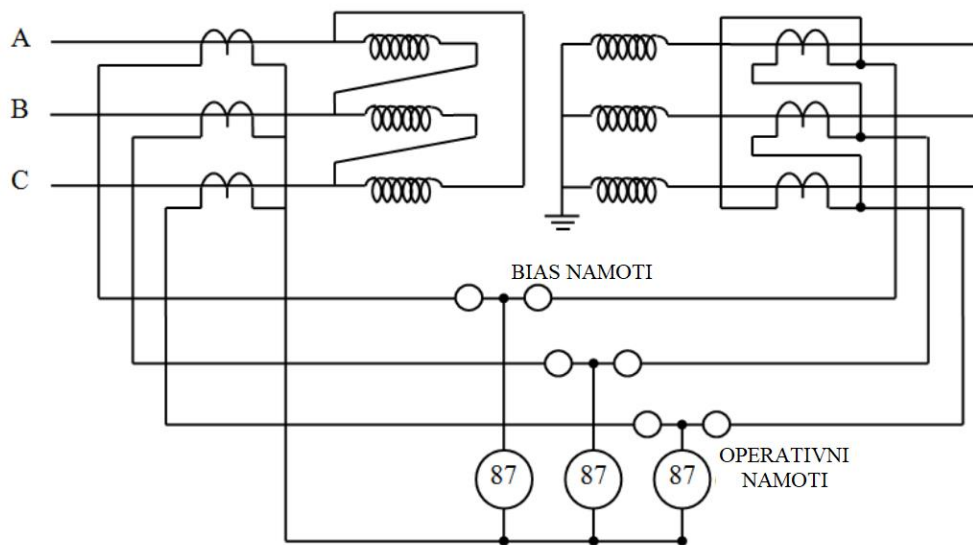
Postavljanje diferencijalne zaštite transformatora zahtijeva posebnu pažnju i uzimanje u obzir velik broj specifičnosti bez kojih diferencijalna zaštita neće funkcionirati. Dalje navedene specifičnosti ključne su za ispravno funkcioniranje diferencijalne zaštite koja u konačnici osigurava pouzdanost i sigurnost u elektroenergetskom sustavu.

1. Nazivne vrijednosti strujnih mjernih transformatora

Nazivne struje primara i sekundara dvonamotnog energetskog transformatora ovisi će o prividnoj snazi transformatora (MVA), dok nazivna struja u tronamotnom energetskom transformatoru ovisi u potpunosti o prividnoj snazi (MVA) odgovarajućeg namota. Strujni mjerni transformatori stoga moraju imati nazivne vrijednosti veće ili jednake od nazivne struje transformatora na koji se spajaju.

2. Spajanje strujnog mjernog transformatora

Strujni mjerni transformatori bi trebali biti postavljeni tako da kompenziraju fazne razlike između linijskih struja na svakoj strani energetskog transformatora. Ako se uzme za primjer transformator koji je spojen kao trokut/zvijezda (koji je prikazan na slici 3.17.), potrebno je korigirati struju koja prolazi kroz transformator zbog faznog pomaka od 30° . Ako se korigiranje struje ne izvrši, diferencijalna zaštita će tu struju prepoznati kao kvar te će diferencijalni relej reagirati. Korigiranje se vrši na sekundarnoj strani strujnih transformatora (na vodičima koji se spajaju na diferencijalni relej) odgovarajućim spajanjem sekundarnih namotaja strujnih transformatora. [13]



Slika 3.17. Diferencijalna zaštita dvonamotnog transformatora u spoju namota trokut-zvijezda [13]

Na slici 3.17. su predstavljeni:

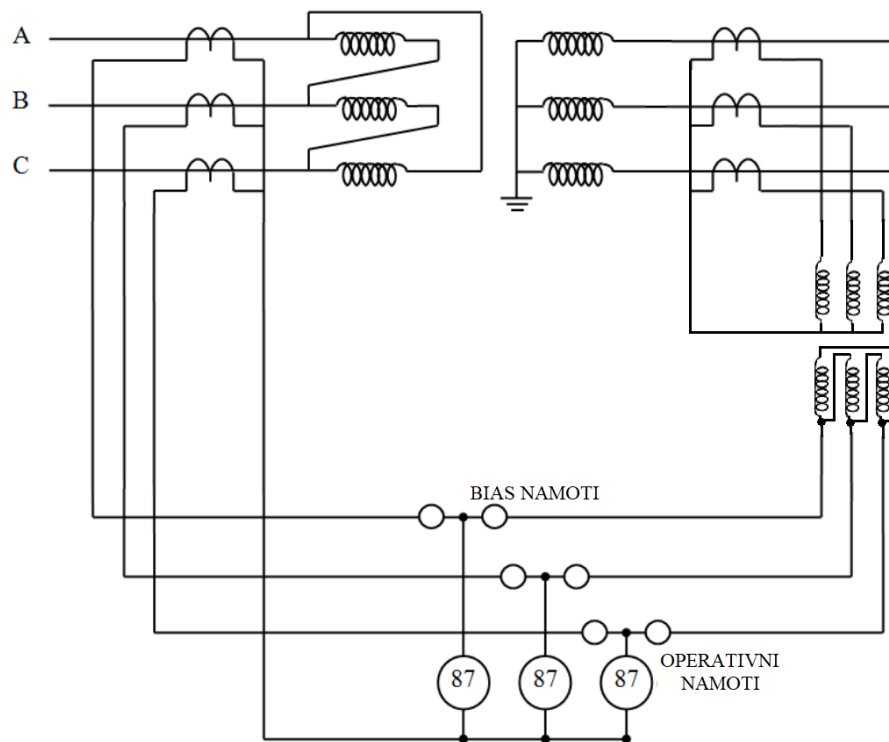
- *Bias* namoti kojima je glavni zadatak smanjiti osjetljivost diferencijalne zaštite na male struje koje nisu posljedica kvara
- Operativni namoti koji detektiraju stvarne razlike u strujama između primara i sekundara transformatora te aktiviraju zaštitu u slučaju kvara

Ako su strujni mjerni transformatori povezani u trokut, njihove nazivne sekundarne struje moraju biti smanjene na $1/\sqrt{3}$ puta nazivne sekundarne struje strujnih transformatora koji su povezani u zvijezdu, kako bi se osiguralo da se struje izvan trokuta mogu izjednačiti sa sekundarnim strujama strujnih transformatora koji su spojeni u zvijezdu. [13]

3. Spajanje međustrujnog transformatora

Kako bi se osiguralo da su primarne i sekundarne struje koje se prenose na zaštitni relej u fazi, tj. da nemaju fazni pomak koji bi mogao dovesti do grešaka u radu releja, elektromehanički i statički zaštitni releji koriste složene spojeve strujnih mjernih transformatora i međustrujnih transformatora. Kod digitalnih i numeričkih zaštitnih releja koristi se jednostavnija konfiguracija gdje su strujni mjerni transformatori spojeni u zvijezdu. U tom se slučaju kompenzacija faznog pomaka obavlja uz pomoć softvera. U slučaju uporabe softvera, jedina je bitna informacija grupa spoja transformatora te se u tom slučaju fazni pomak automatski kompenzira. Međutim, u nekim slučajevima sustavi za kompenzaciju faznog pomaka ne mogu odgovarati spoju namota energetskog transformatora, stoga se u takvim situacijama koristi međustrujni transformator. [12]

U nekim će slučajevima strujni transformatori koji su postavljeni na primar i sekundar energetskog transformatora imati različite omjere, što će izazvati razlike u strujama koje ulaze u relej. U tom slučaju, nužno je korištenje međustrujnih transformatora koji će te struje uskladiti i omogućiti normalan rad diferencijalne zaštite. Jedan od prikaza diferencijalne zaštite transformatora gdje se koriste međustrujni transformatori se nalazi na slici 3.18.



Slika 3.18. Prikaz diferencijalne zaštite dvonamotnog transformatora 11 kV/132 kV koristeći međustrujne transformatore [13]

4. Filtriranje nulte sekvence

Nulta sekvenca je struja ili napon koja se pojavljuje u trofaznom sustavu ako nastupi neki kvar kao što je nesimetrija faza ili kratki spoj jedne faze sa zemljom. Ona se pojavljuje kada su sve tri faze u trofaznom sustavu iste veličine i istog faznog pomaka (nemaju međusobni pomak od 120°). Ako se nulta sekvenca pojavi, diferencijalni relej će reagirati i izolirati transformator iz mreže iako je kvar zapravo nastao izvan zaštitne zone.

U prethodno objašnjenjenu situaciju rješenje je filtriranje nulte sekvence koje se može obaviti na dva načina. Jedan od njih je spajanje strujnih mjernih transformatora na primaru u trokut, zato što takav spoj ne prenosi nultu sekvencu.

Prema literaturi [13] generalno pravilo u spajanju strujnih mjernih transformatora je to da ako je transformator spojen kao zvijezda/zvijezda, strujni transformator na obje strane trebaju biti spojeni u trokut.

Drugi način za filtriranje nulte sekvence je filtriranje uz pomoć softvera zaštitnog releja (ako je u pitanju digitalni ili numerički zaštitni relej).

5. Postavke *bias*-a

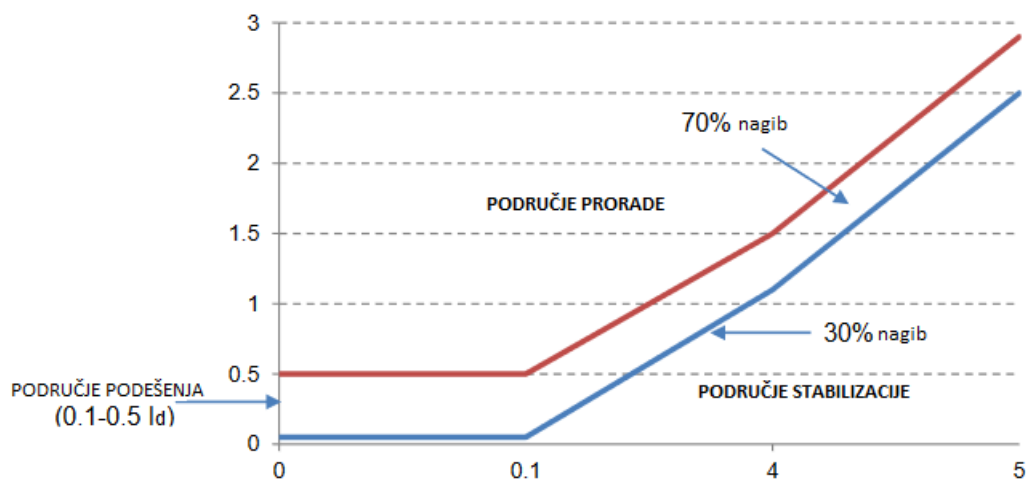
Bias je dodatni element koji se koristi u diferencijalnoj zaštiti transformatora, a glavna mu je funkcija povećati stabilnost diferencijalne zaštite u slučaju da se dogodi kvar izvan zaštitne zone što u konačnici sprječava da diferencijalni relej izolira transformator tijekom takvog kvara. Osim što podiže stabilnost zaštite, *bias* služi i kako bi se izbjeglo aktiviranje diferencijalnog releja u slučaju kada dođe do promjene struja koje mogu biti uzrokovane radom regulacijske preklopke transformatora (eng. tap changer) ili strujnih transformatora.

Karakteristika *bias*-a je uglavnom podijeljena na tri dijela što je prikazano na slici 3.19.

Prvi dio karakteristike postavljen je tako da ignorira male struje (kao što je struja magnetiziranja transformatora). [12]

Drugi dio postavljen je tako da ignorira promjene koje su uzrokovane regulacijskom preklopkom transformatora (tap chargerom).

Treći dio osigurava da diferencijalna zaštita ostane stabilna tijekom velikih kvarova koji su nastali izvan zaštitne zone diferencijalne zaštite.



Slika 3.19. Bias karakteristika [12]

3.3.5. Stabilizacija diferencijalne zaštite za vrijeme *inrusha*

Kao što je ranije u radu objašnjeno, *inrush* (potezna struja) pojava je koja se događa pri uključivanju transformatora te magnetiziranja njegove jezgre. Potezna struja se ne smatra kvarom na transformatoru, no diferencijalni relej može ju smatrati kvarom na transformatoru i zbog toga ga izolirati iz mreže.

Kako bi se spriječilo nepotrebno reagiranje diferencijalne zaštite zbog *inrusha*, osmišljene su razne metode za preveniranje upravo takvih situacija.

1. Metoda odgađanja (eng. Time delay)

Jer je *inrush* prolazno stanje, poteškoće koje on može izazvati se mogu otkloniti malim kašnjenjem tj. metodama odgađanja, a to su: [13]

- Korištenje osigurača „kick-fuse“ – njegova je glavna funkcija preusmjeriti većinu *inrusha*, tj. mora preuzeti poteznu struju na sebe te se ne smije otopiti, u suprotnom će reagirati diferencijalni relej
- Korištenje IDMT releja (eng. inverse definite minimum time relay) ili DDT releja (eng. Direct Transfer Trip) u kojima je moguće prilagoditi vrijeme rada (otprilike odgoda do 120 milisekundi)

2. Detekcija harmonika

Razlika između kvara unutar zaštitne zone diferencijalne zaštite i potezne struje može se pronaći u njihovom valnom obliku. Struja *inrusha* sadrži sve redove harmonika, međutim, promatra se isključivo drugi harmonik zato što je prisutan u svim valnim oblicima *inrusha*. [12]

Drugi harmonik mijenja se prema stupnju zasićenosti jezgre transformatora, ali uvijek ostaje prisutan. U strujama koje predstavljaju struje kvara i zbog kojih bi diferencijalna zaštita trebala reagirati, ne postoji drugi harmonik ili bilo koji drugi parni harmonik. Osim struja kvarova, čak ni distorzijske struje u namotima sa željeznom jezgrom ne sadrže drugi i ostale parne harmonike. [13]

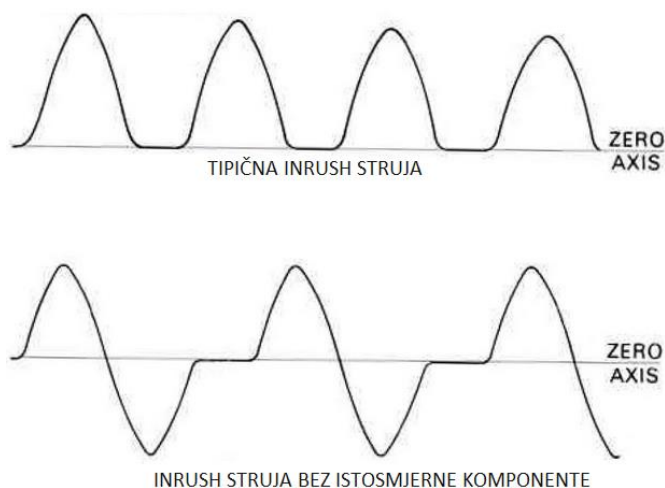
Izlazna struja strujnog transformatora koji je izložen konstantnom napajanju (njegova jezgra je došla do stalnog zasićenja) sadržavat će isključivo neparne harmonike, osim u slučaju da transformator bude zasićen prijelaznom komponentom struje kvara. U tom će slučaju, zasićenje nije simetrično i parni harmonici će se pojaviti u izlaznoj struji. [12]

Navedene činjenice navode na to kako je drugi harmonik osnova za stabiliziranje *bias*-a ako dođe do *inrusha*. Potrebno je uzeti u obzir kako strujni mjerni transformator mora biti dovoljno velik kako harmonici generirani prijelaznim zasićenjem ne bi doveli do odgađanja rada diferencijalnog releja. [13]

Diferencijalna struja se prenosi kroz filter koji „izvlači“ drugi harmonik te onda generira faktor za stabilizaciju zaštitnog releja (eng. Restraining quantity sufficient) koji omogućava zaustavljanje djelovanja diferencijalnog releja radi struje *inrusha*. [13]

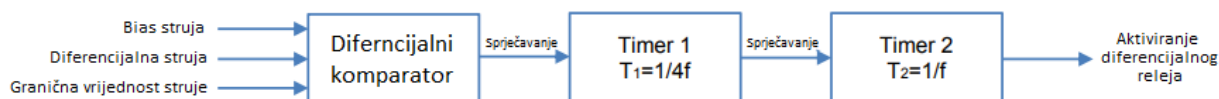
3. Tehnika detektiranja *inrusha* uz pomoć metode otkrivanja razmaka (gap-detecting principle)

Slika 3.20. pokazuje tipičnu *inrush* struju i *inrush* struju bez istosmjerne komponente (eng. offset) te se na njima primjećuje da postoji period kad je iznos struje jednak nula. Trajanje spomenutog razdoblja jedna je četvrtina ciklusa.



Slika 3.20. Grafički prikaz tipične *inrush* struje i *inrush* struje bez istosmjerne komponente

Na temelju te informacije je osmišljena metoda otkrivanja razmaka te se može prikazati uz pomoć blok dijagrama prikazanog na slici 3.21.



Slika 3.21. Blok dijagram metode otkrivanja razmaka (eng.gap-detecting principle) [13]

U blok dijagramu su postavljena dva timera. Jedan od timera postavljen je na vrijednost koji predstavlja period kada je iznos struje *inrusha* jednak nuli. To konkretno znači da će propustiti struju (tj. generirati izlaz) samo u slučaju ako je struja na vrijednosti od nula za vrijeme duže od $1/4f$.

Drugi timer postavljen je na vrijednost $1/f$ iz razloga što je potrebna odgoda jer se nulta vrijednost u *inrush* struji pojavljuje prema kraju ciklusa te je nužno odgoditi rad diferencijalnog releja za $1/f$ sekundi kako bi se osigurala detekcija potencijalnog nultog stanja. [12]

U slučaju da struja ne teče duže od $1/4f$ sekundi, timer T2 drži se resetiranim i ne dopušta diferencijalnom releju da reagira. U slučaju da struja teče duže od $1/4f$ sekundi, timer T1 resetira se te timer T2 daje signal diferencijalnom releju za isključenje u $1/f$ sekundi. [13]

4. SIMULACIJE

4.1. Modeliranje mreže

Modeliranje mreže, kao i obavljanje simulacija je obavljeno u programskom paketu DIGSILENT (eng. Digital Simulator for Electrical Network) u aplikaciji *PowerFactory*. To je vodeća softverska aplikacija za provođenje analiza u području elektroenergetskih sustava, kao što su analize proizvodnje, prijenosa i distribucije električne energije. PowerFactory obuhvaća cijeli spektar funkcionalnosti kao što su simulacija u stvarnom vremenu te praćenje performansi za testiranje i nadzor sustava. [23]

4.2. Simulacija diferencijalne zaštite transformatora

4.2.1. Osnovni slučaj

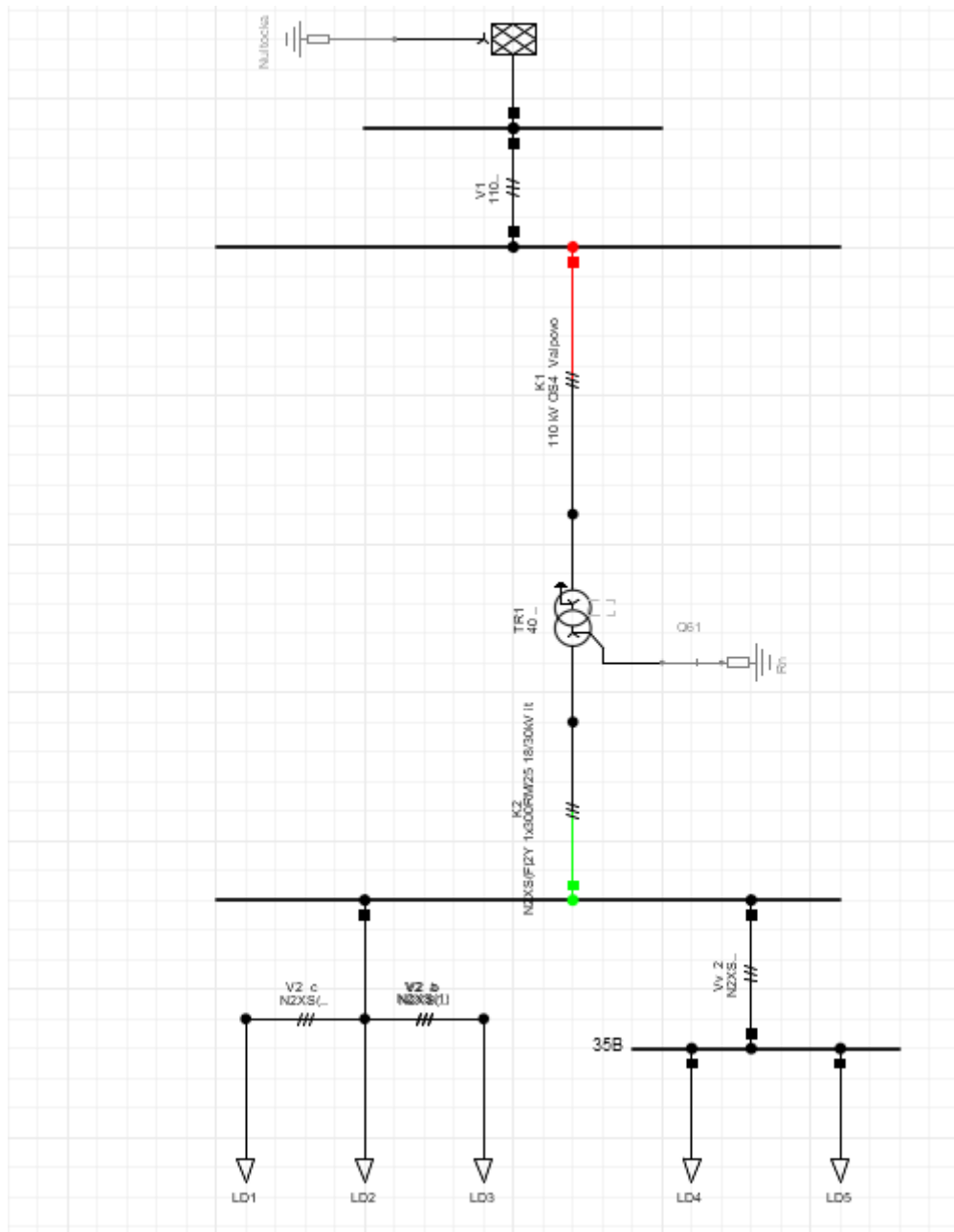
U ovom poglavlju razmatrat će se situacija u kojoj postoji samo jedan transformator koji je zaštićen diferencijalnom zaštitom. Prikaz modela mreže s jednim transformatorom je prikazan na slici 4.2. Spomenuti transformator (TR1) s podacima prikazanim u tablici 3 je štićen diferencijalnim relejem ABB RET650 (slika 4.1.) te će se nadalje u poglavlju prikazati simulacije te pripadajući rezultati u slučajevima kada se kvarovi pojave izvan ili unutar štićenog objekta (energetskog transformatora). Osim dva prethodno spomenuta slučaja, prikazat će se simulacija u kojoj će se u jednom periodu transformator isključiti te nakon nekog vremena ponovno uključiti.

Tablica 4.1. Podaci transformatora TR1

	TR1
Nazivna snaga	50 MVA
Grupa spoja	YNyn0
Prijenosni omjer	110/35 kV
Frekvencija	50Hz
$u_k\%$	11%
$u_{k0}\%$	19,798%
$i_0\%$	0,07%



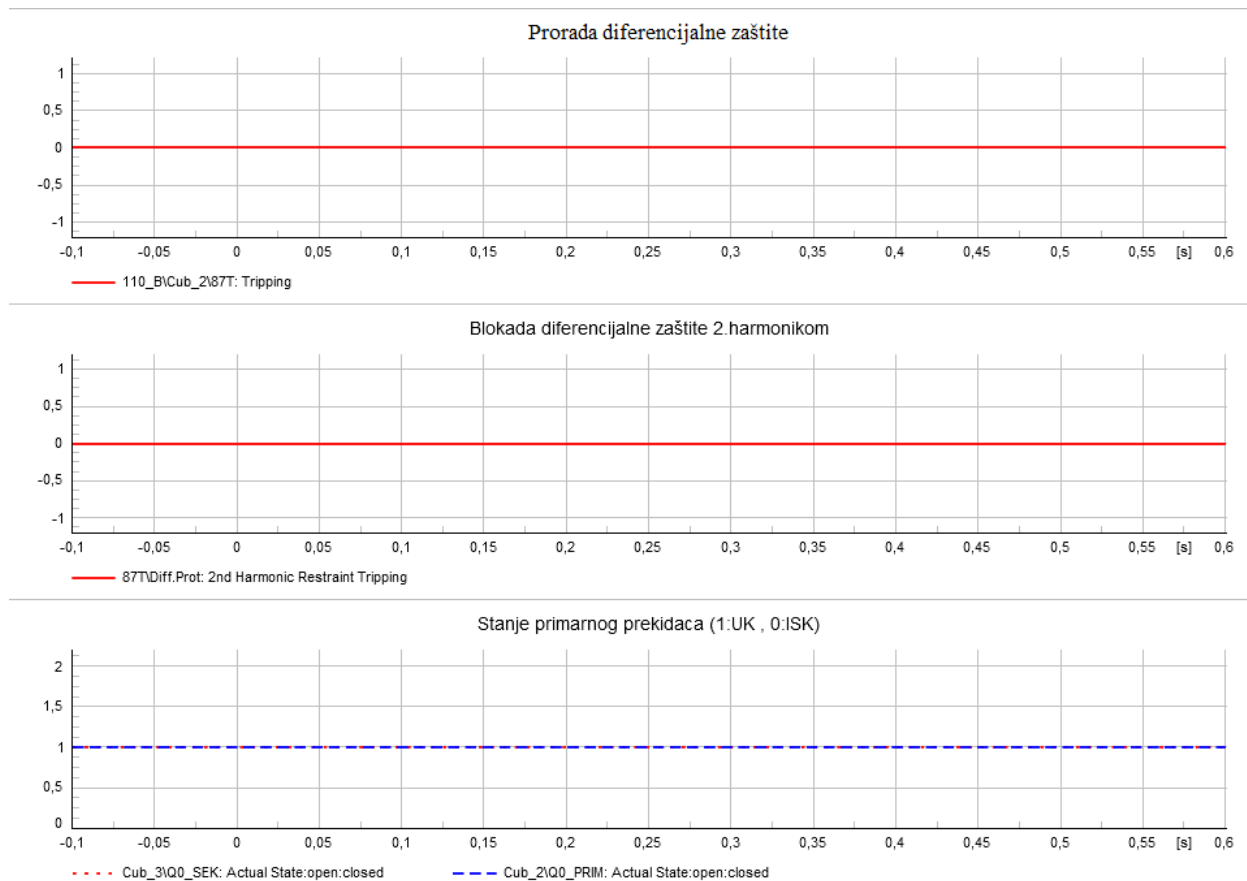
Slika 4.1. Diferencijalni relej ABB RET650 [24]



Slika 4.2. Prikaz osnovnog modela mreže (s jednim transformatorom) u programskom paketu DigSILENT

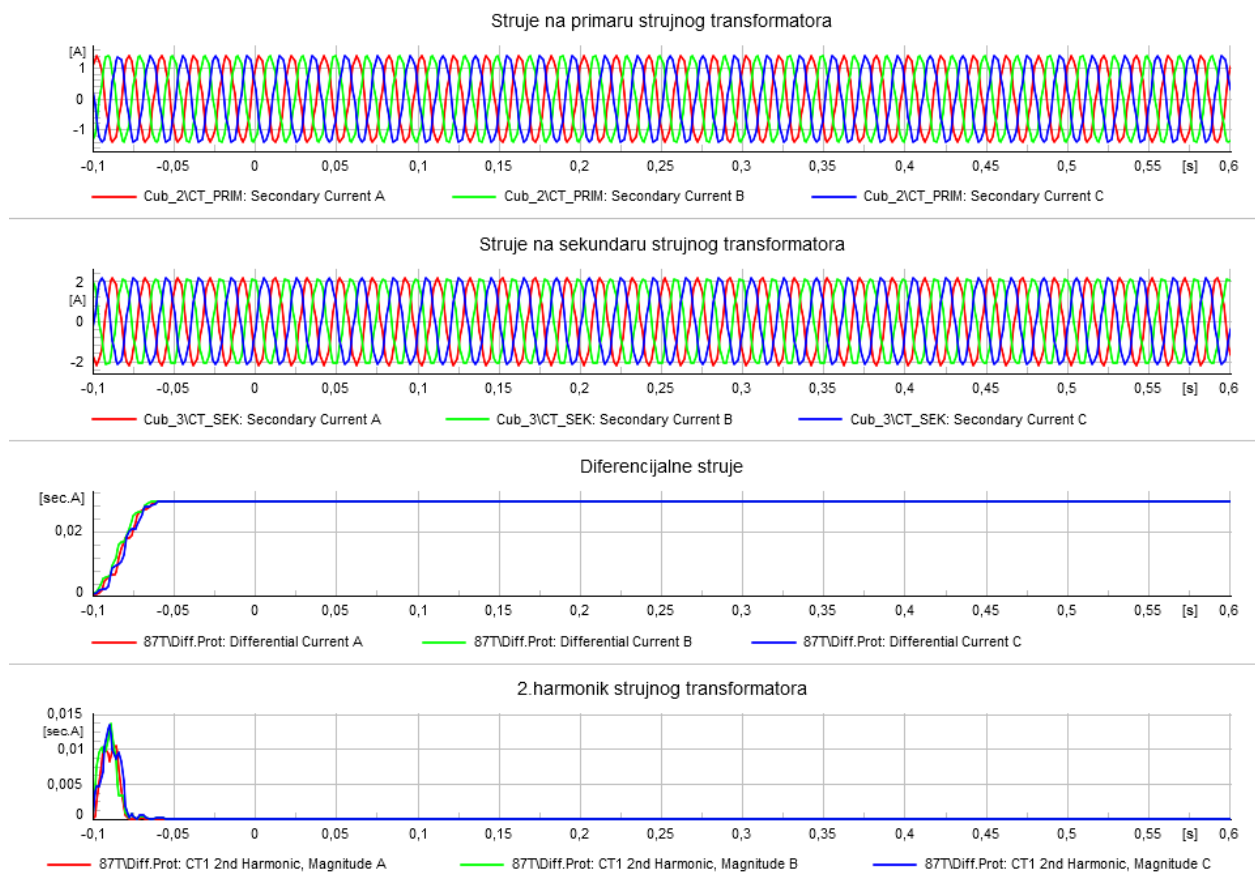
Strujni mjerni transformatori na primarnoj strani imaju prijenosni omjer 300/1A, dok na sekundarnoj strani imaju prijenosni omjer 600/1A.

Pokretanjem simulacije u trajanju od 0,6s u slučaju kada se kvar ne dogodi (stacionarno stanje) dobivaju se rezultati koji su prikazani na slikama 4.3, 4.4, 4.5.



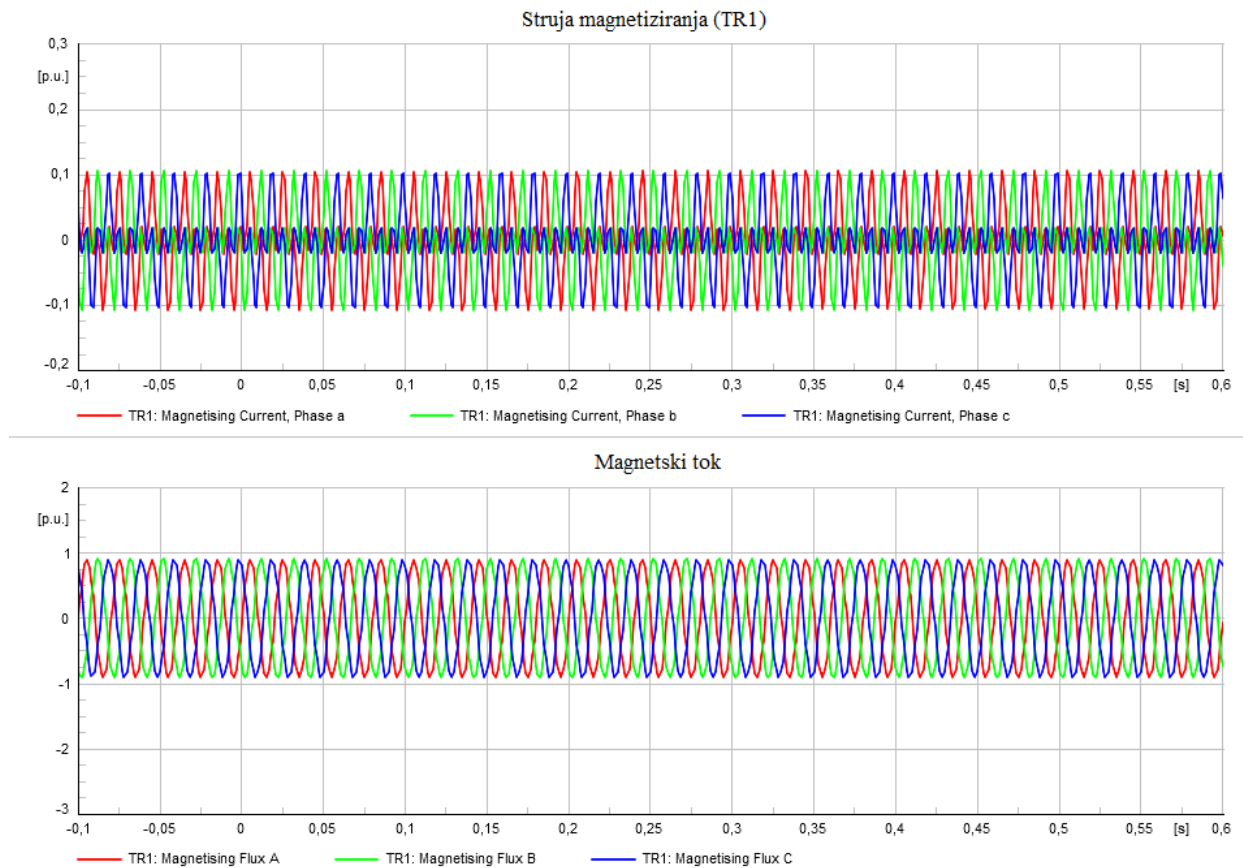
Slika 4.3. Prikaz karakteristike diferencijalnog releja ABB RET650 za vrijeme stacionarnog stanja

Karakteristikama koje su prikazane na slici 4.3. jasno se može uočiti kako diferencijalne zaštita nije profunkcionirala jer nije imala razloga za aktivaciju. Prorada diferencijalne zaštite nalazi se konstantno na 0 što znači da nije zabilježen nikakav kvar ili abnormalnost. Karakteristika na blokadi diferencijalne zaštite drugim harmonikom, također se nalazi na vrijednosti 0 također zato što se kvar nije dogodio. Karakteristika primarnog prekidača nalazi se na vrijednosti 1 jer nije imao potrebu za isključenjem.



Slika 4.4. Prikaz karakteristika struja za vrijeme stacionarnog stanja

Struje na primaru te struje na sekundaru strujnog transformatora (slika 4.4.) su sinusoidne s konstantnom frekvencijom i amplitudom što znači da kvar nije nastupio. Diferencijalne struje rezultat su razlike između primara i sekundara transformatora te bi u idealnom transformatoru trebale biti na iznosu 0. Na prikazanom grafu diferencijalne struje kreću od 0 te se naglo penju na vrijednost kojoj ostaju konstantne što se događa jer modelirani sustav prolazi kroz prijelazno stanje. Stabilizacija diferencijalne struje na konstantnoj i niskoj razini ukazuje na činjenicu da transformator radi u stacionarnom stanju. Četvrti graf pokazuje struje drugog harmonika strujnog transformatora koje se pojavljuju samo na početku simulacije i to u jako kratkom vremenu što se događa zbog prijelaznog stanja modeliranog sustava. Nakon što sustav izađe iz prijelaznog stanja i uđe u stacionarno stanje, struje 2. harmonika postaju zanemarivo male što je vidljivo na grafu.

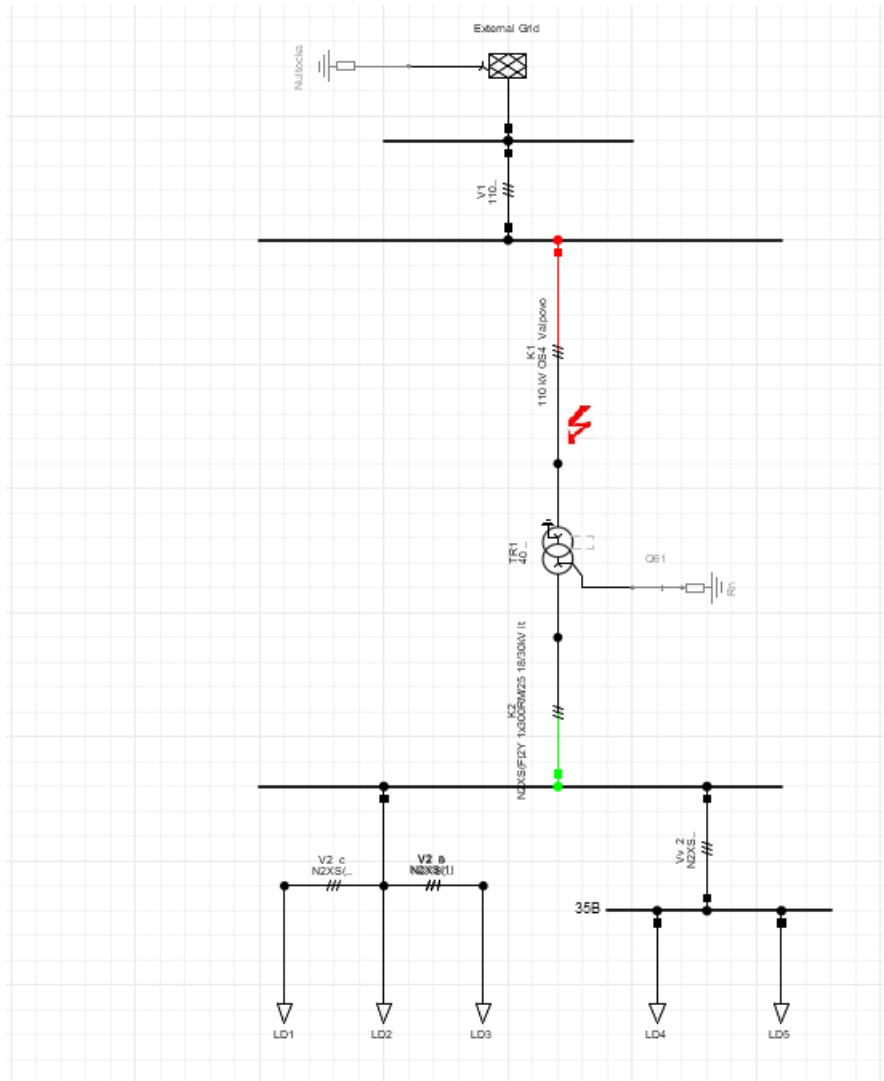


Slika 4.5. Prikaz karakteristika struje magnetiziranja i magnetskog toka za vrijeme stacionarnog stanja

Prvi graf na slici 4.5. prikazuje struje magnetiziranja koje su odgovorne za stvaranje magnetskog toka u jezgri transformatora. Vrijednost ove struje uglavnom je dosta mala u odnosu na nazivnu struju transformatora. U slučaju da struje magnetiziranja imaju odstupanje od idealnog sinusoidalnog oblika to će ukazivati na prisutnost harmonika. Magnetski tok koji je prikazan na drugom grafu ima gotovu jednaku karakteristiku s nešto većom amplitudom. Budući da ni na jednom ni na drugom grafu ne postoji odstupanje od idealnog sinusoidalnog oblika, zaključak je da kvar ne postoji, a samim time i da diferencijalna zaštita nije proradila.

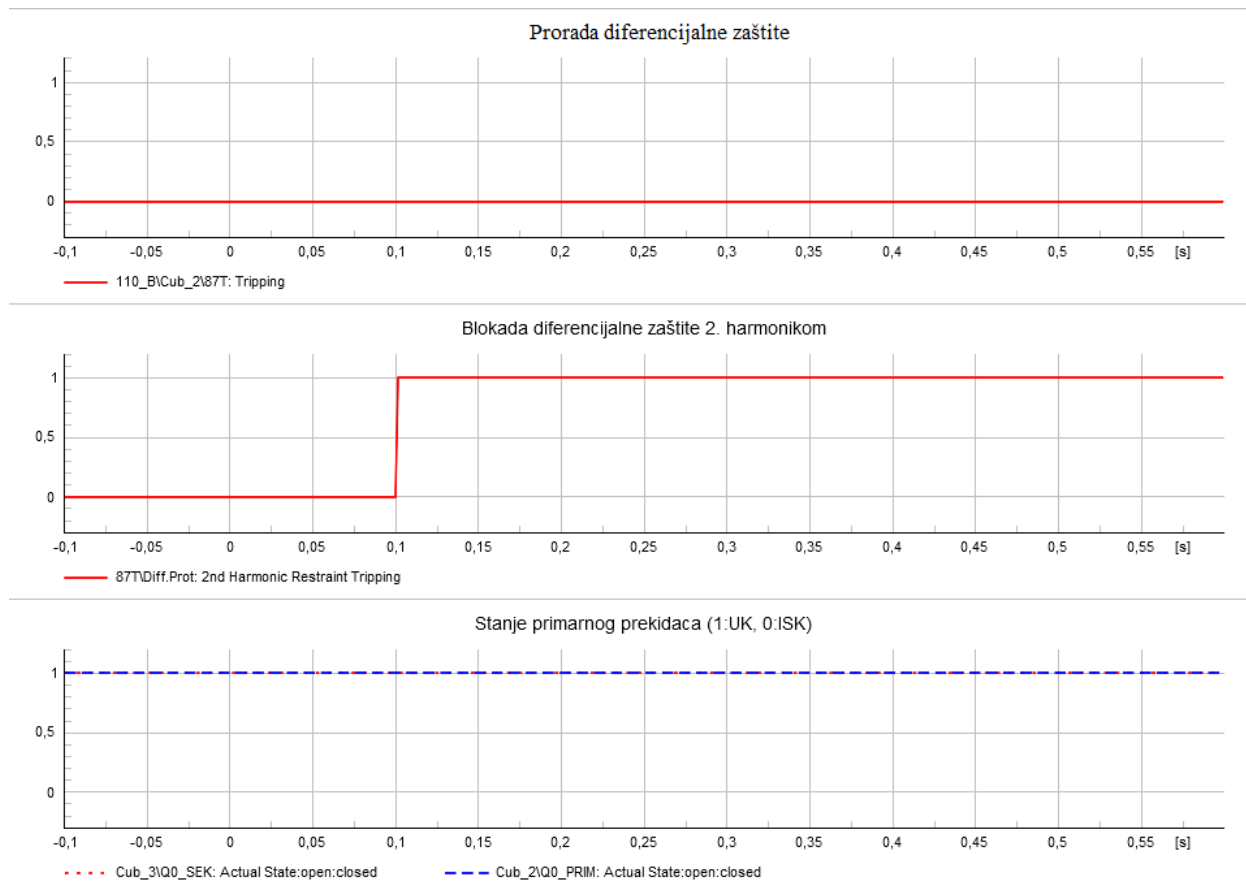
4.2.2. Kvar unutar zaštitne zone

U sljedećem slučaju je prikazana situacija u kojoj se dogodio kvar, tj. kratki spoj unutar zaštitne zone diferencijalne zaštite. Na slici 4.6. prikazana je mreža te mjesto na kojoj se dogodio spomenuti kvar.



Slika 4.6. Prikaz modela mreže (s jednim transformatorom) u slučaju unutarnjeg kvara

Kao što je ranije u radu objašnjeno, diferencijalna zaštita ima svoju zonu u kojoj obavlja funkciju koja je određena lokacijama strujnih transformatora. Kako je prikazano na slici 4.6. kratki spoj se dogodio između dvaju strujnih transformatora te se samim time ovaj kvar klasificira kao unutarnji kvar te je u tom slučaju potrebna pravovremena aktivacija diferencijalne zaštite. Pokretanjem simulacije u trajanju od 0,6s u slučaju kada se kvar dogodi unutar zaštitne zone dobivaju se rezultati koji su prikazani na slikama 4.7., 4.8. i 4.9.

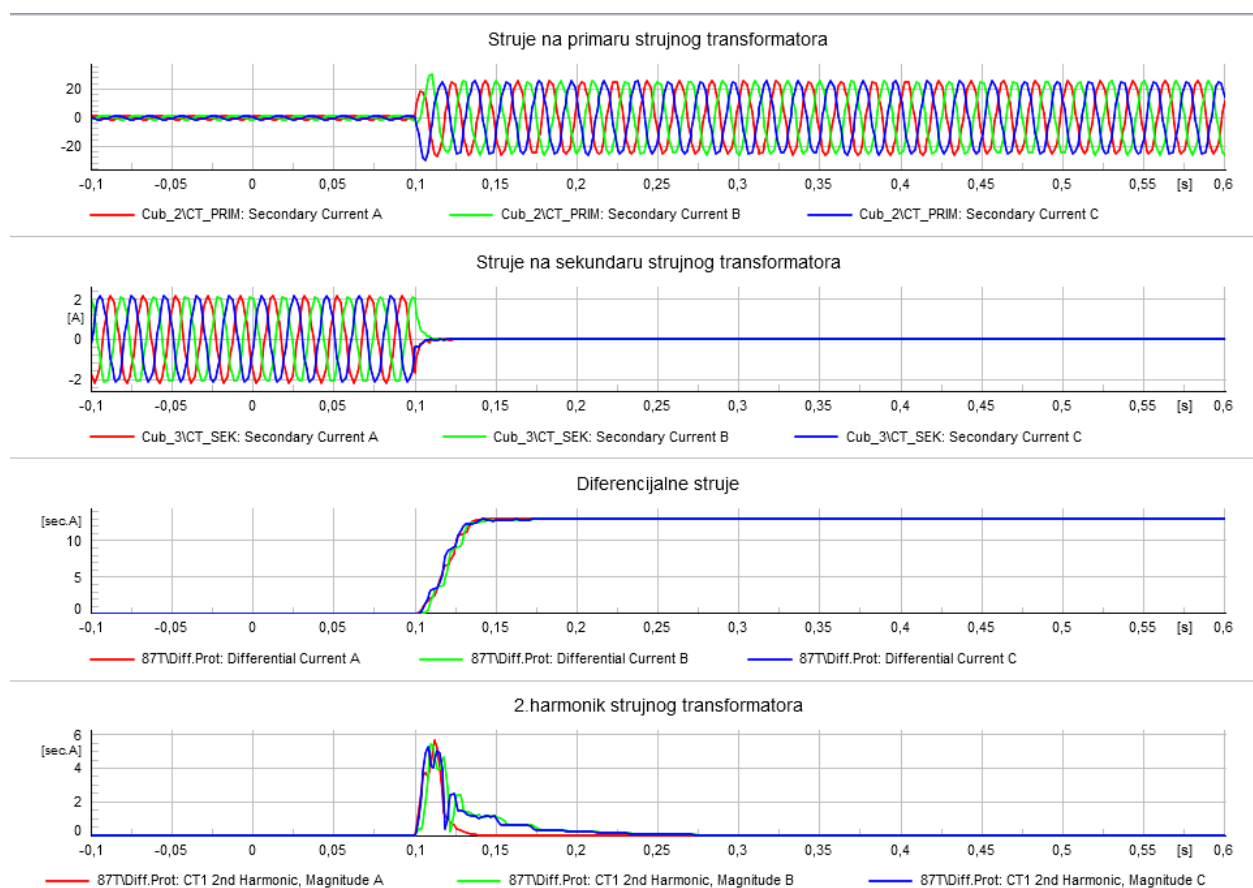


Slika 4.7. Karakteristike diferencijalnog releja u slučaju unutarnjeg kvara

Na slici 4.7. prorada diferencijalne zaštite nalazi se konstantno na 0 što upućuje na činjenicu da se diferencijalna zaštita nije aktivirala, iako je to bilo potrebno zbog pojave unutarnjeg kvara. Karakteristika blokade diferencijalne zaštite drugim harmonikom objašnjava tu situaciju. Kako je prikazano na grafu, kvar se dogodio u 0,1s te je u tom trenutku vrijednost blokade diferencijalne zaštite drugim harmonikom poraslo na vrijednost 1 te tako blokiralo aktivaciju diferencijalne zaštite zbog prisutnosti harmonika.

Blokada diferencijalne zaštite drugim harmonikom (slika 4.7.) u ovom slučaju sprječava aktivaciju diferencijalne zaštite, iako je diferencijalna struja dovoljno velika za aktivaciju. Ovi grafički prikazi najbolje objašnjavaju nepravilno funkcioniranje diferencijalne zaštite zbog prisutnosti viših harmonika.

Struje na primaru strujnog transformatora (slika 4.8.) se do trenutka u kojem nastupa kvar (0,1s) nalaze na niskim vrijednostima, dok u trenutku kvara počinju naglo povećavati svoju amplitudu. Promatrajući karakteristiku, sustav je bio u stabilnom stanju bez značajnog protoka struje kroz transformator. Nagli porast struje koji se dogodio u 0,1s (vrijeme pojave kvara) uzrokuje porast struja zbog niže impedancije sustava koja se pojavila, što u krajnosti rezultira velikim strujama kvara.

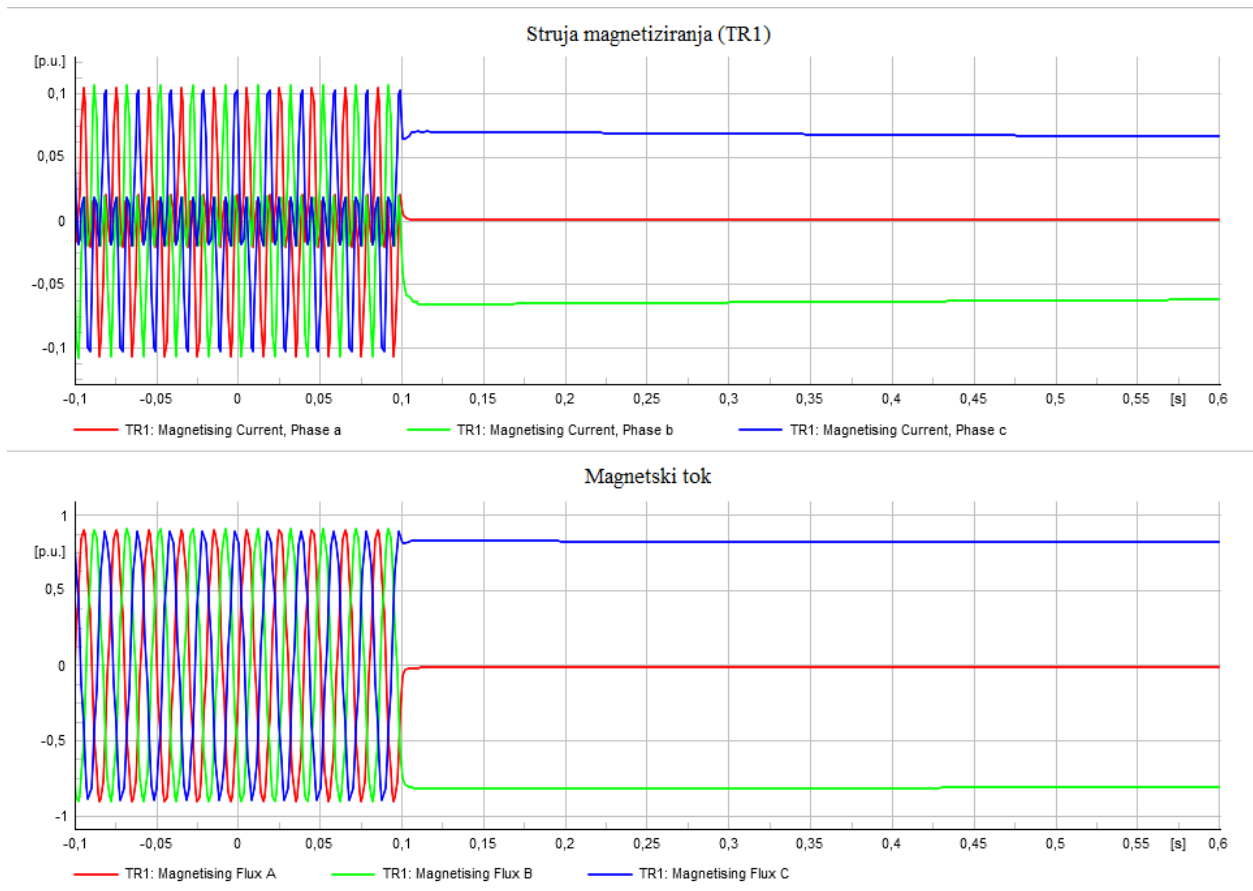


Slika 4.8. Prikaz karakteristika struja u slučaju unutarnjeg kvara

Oscilacije struja na sekundaru strujnog transformatora ukazuju na to da je do trenutka nastupa kvara (0,1s) transformator radio pri stacionarnim uvjetima. Kratki spoj će dovesti do smanjenja inducirane sekundarne struje na vrijednost 0 A odmah nakon kvara.

Diferencijalne struje naglo će porasti u trenutku 0,1s jer se u tom trenutku dogodio veliki nesrazmjer između primarnih i sekundarnih struja (nastupio je kvar) te je samim time zaključak da nagli porast diferencijalne struje ukazuje na trenutak kad se ovaj kvar dogodio.

Kvar koji se dogodi u 0,1s rezultira velikom komponentom drugog harmonika što se prikazuje na karakteristici naglim povećanjem u vrijednostima struja.

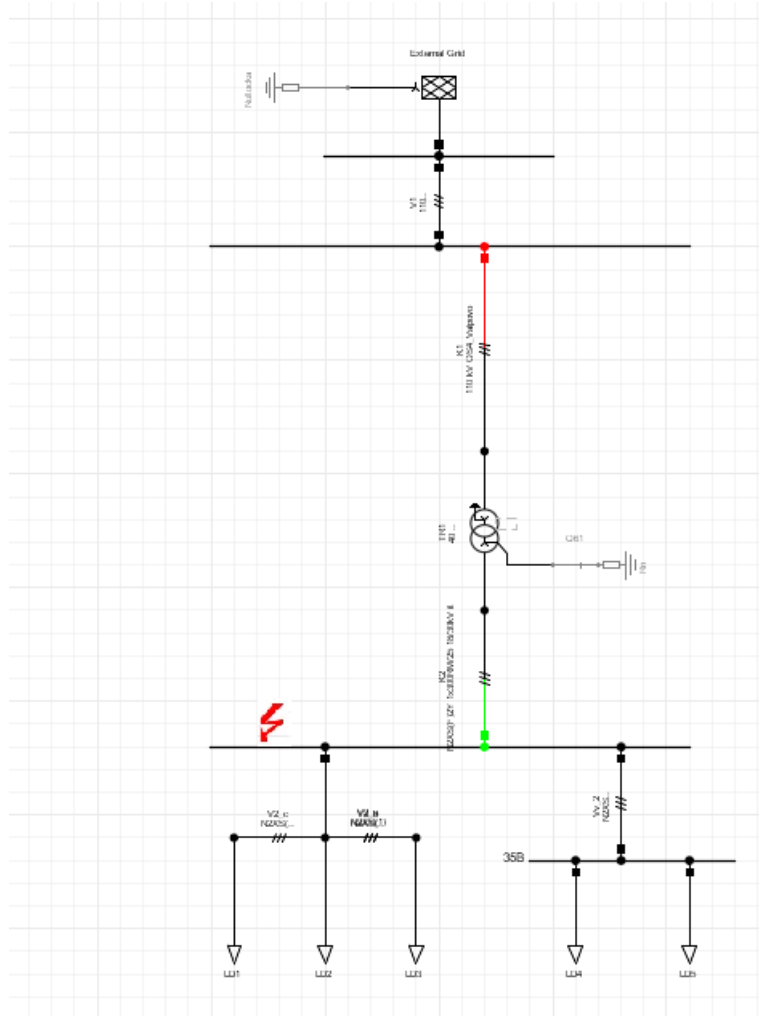


Slika 4.9. Prikaz struje magnetiziranja i magnetskog toka u slučaju unutarnjeg kvara (TR1)

Budući da se kvar dogodio u trenutku 0,1s, u istom trenutku struja magnetiziranja i magnetskog toka (slika 4.9.) prestale su imati sinusoidni oblik te su spomenute veličine poprimile konstantne vrijednosti. To se u ovom slučaju događa zbog kratkog spoja koji je doveo do gubitka napona napajanja transformatora.

4.2.3. Kvar izvan zaštitne zone

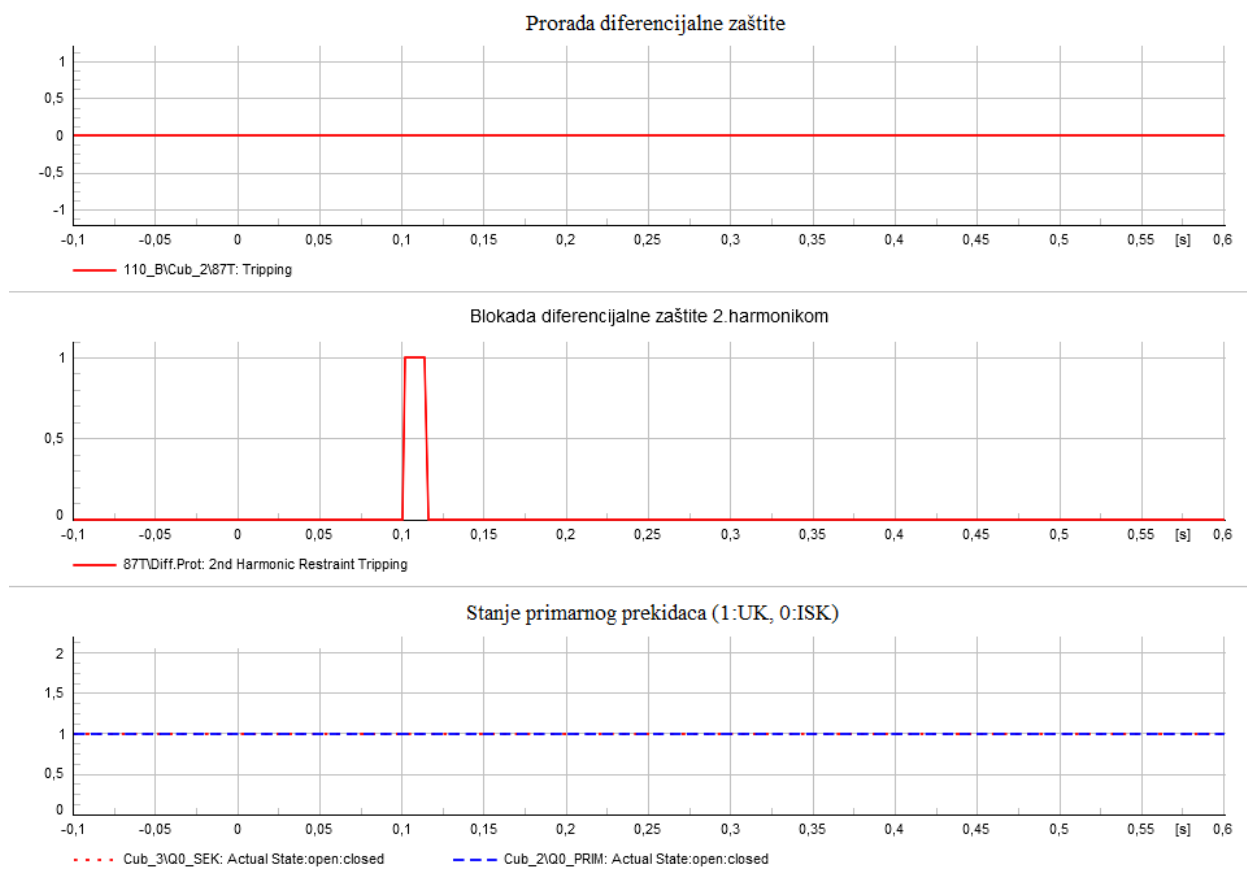
U slučaju koji će se predstaviti dalje u radu, kvar se dogodio izvan zaštitne zone kao što je prikazano na slici 4.10.



Slika 4.10. Prikaz mreže u kojoj se kvar dogodio izvan zaštitne zone diferencijalne zaštite

Kako je objašnjeno u prethodnom poglavlju, ako je kvar nastao izvan zaštitne zone, tj. izvan zone koja je definirana lokacijom strujnih transformatora, diferencijalna zaštita ne bi trebala reagirati. Kvar koji se dogodio bi trebale pokriti druge zaštite, kao što su nadstrujna ili distantna zaštita koje reagiraju na kvarove izvan zaštitne zone diferencijalne zaštite.

Pokretanjem simulacije u trajanju od 0,6s, dobivaju se rezultati ove simulacije u oblicima grafovskih prikaza koji su prikazani na slikama 4.11., 4.12. i 4.13.

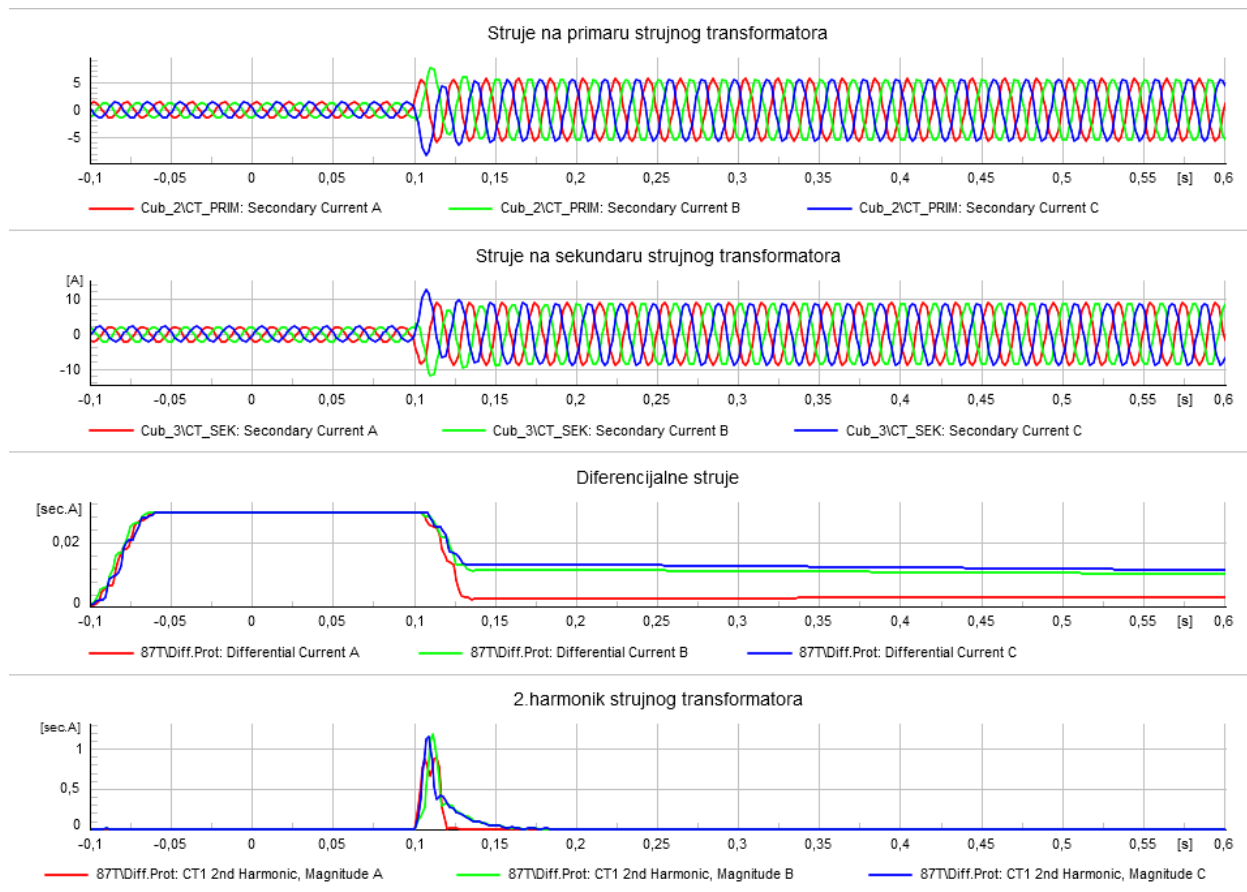


Slika 4.11. Karakteristika diferencijalnog releja u slučaju vanjskog kvara

Kao i u prethodna dva slučaja, prorada diferencijalne zaštite (slika 4.11.) ostaje na vrijednosti 0 zato što nije bilo potrebe za aktivacijom diferencijalne zaštite (kvar se, kao što je ranije naglašeno, dogodio izvan zaštitne zone diferencijalne zaštite).

Vrijednost blokade diferencijalne zaštite drugim harmonikom (slika 4.11.) u trenutku nastupa kvara (0,1s) raste na vrijednost 1 te u trenutku 0,1157s ponovno pada na 0. To se događa jer je blokada detektirala komponente viših harmonika zbog zasićenja jezgre transformatora. U vremenu od 0,1s do 0,1157s blokada je spriječila lažno aktiviranje diferencijalne zaštite te se nakon tog trenutka deaktivirala.

Transformator se nije izolirao ni u jednom trenutku, stoga je primarni prekidač konstantno u zatvorenom položaju.

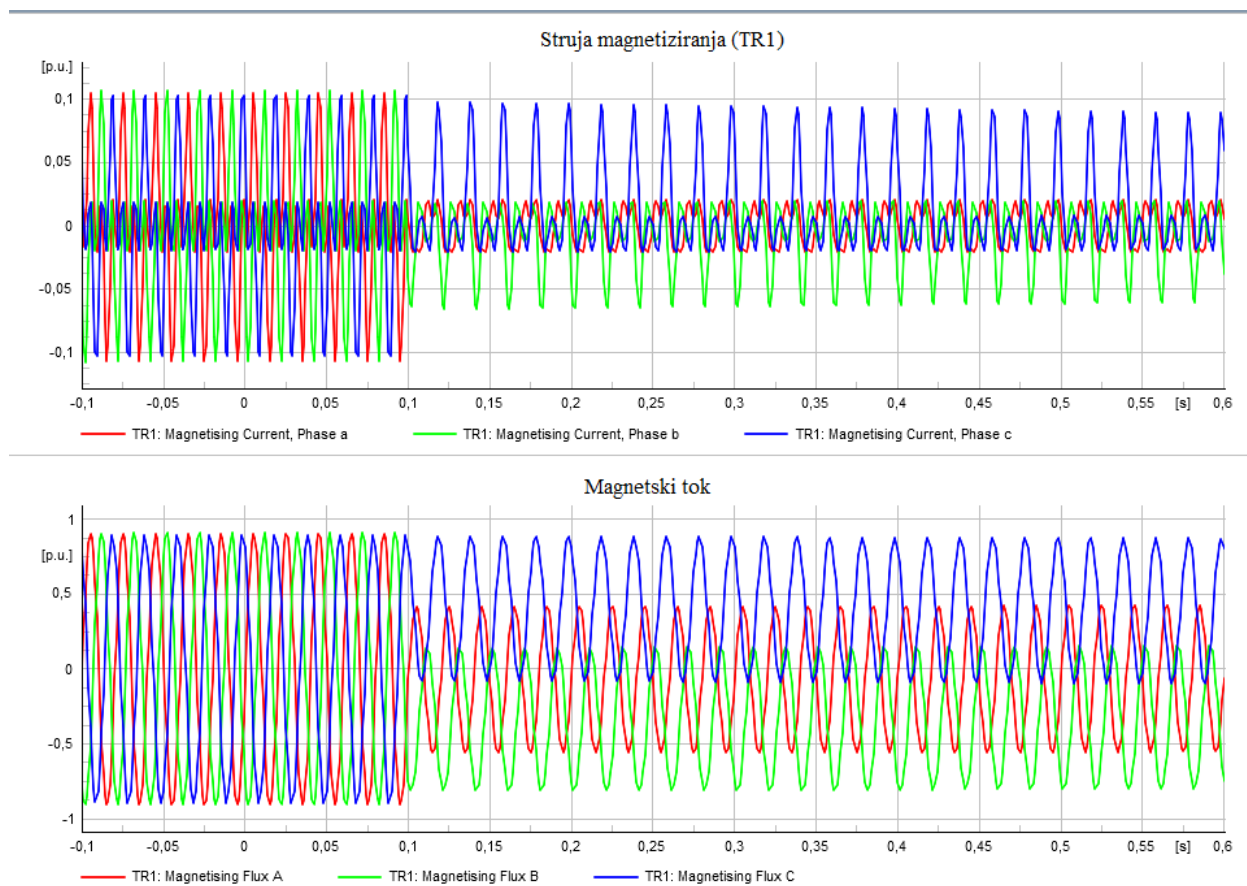


Slika 4.12. Prikaz karakteristika struja u slučaju vanjskog kvara

Struje na primaru i struje na sekundaru strujnog transformatora (slika 4.12.) do trenutka pojave kvara imaju niske vrijednosti te onda u trenutku 0,1s počinju naglo rasti zbog toga što kvar značajno povećava struju u sustavu.

Diferencijalne struje (slika 4.12) počinju naglo rasti u trenutku -0,1s te dolaze na vrijednost 0,209A na kojoj ostaju konstantne do vremena pojave kvara (0,1s). Razlog ovome ponašanju diferencijalnih struja je pojavljivanje drugog harmonika koji izaziva blokadu diferencijalne zaštite. Kada se harmonik smanji, diferencijalne struje počnu padati jer sustav ulazi u stacionarno stanje nakon prijelaznog procesa.

Kao i u prethodnom slučaju, struja drugog harmonika strujnog transformatora (slika 4.12) naglo raste u trenutku pojave kvara (0,1s), međutim, naglo se smanjuje kako se modelirana mreža vreća u stacionarno stanje i harmonici postaju puno manje izraženi.



Slika 4.13. Prikaz struje magnetiziranja (TR1) i magnetskog toka u slučaju vanjskog kvara

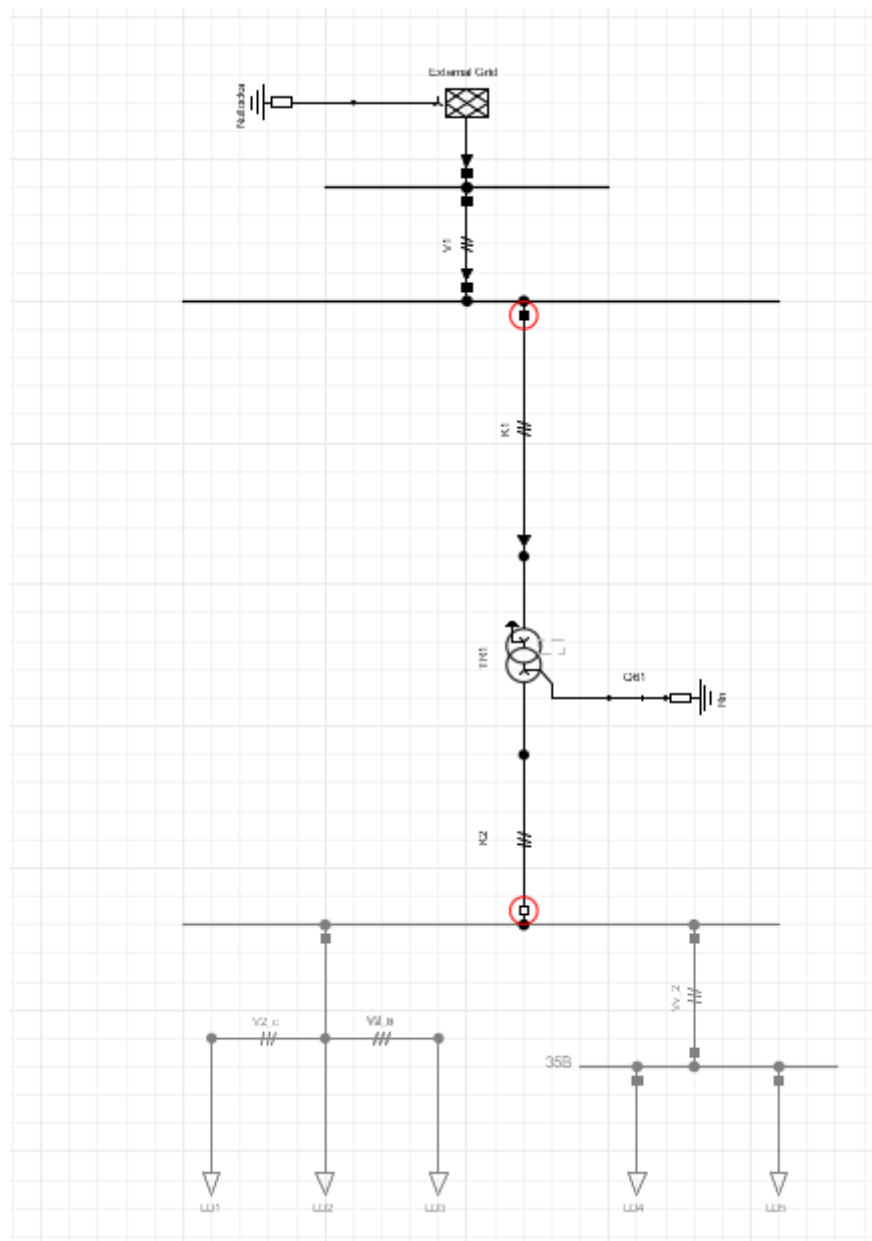
Kako je prikazano na karakteristici na slici 4.13., valni oblici struja magnetiziranja i magnetskog toka promijeniti će se u trenutku 0,1s, tj. trenutku nastupa kvara. Kada se spominje kvar izvan zaštitne zone diferencijalne zaštite, razlog promjene ovih valnih oblika je zasićenje jezgre transformatora.

4.2.4. Uključenje transformatora – pojava *inrusha*

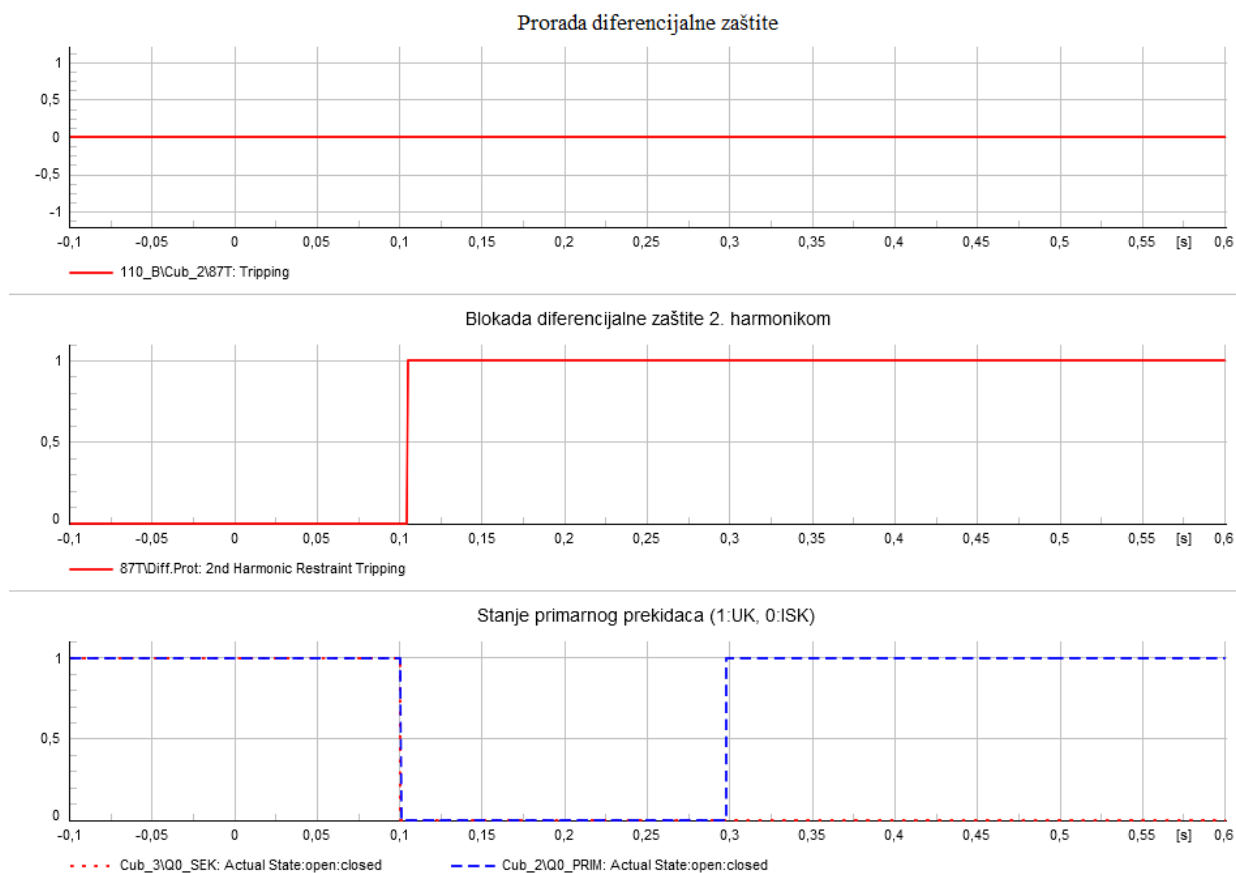
Prethodno u radu je objašnjen fenomen *inrush* struja koji se pojavljuje tijekom magnetizacije jezgre transformatora pri samom paljenju.

U sljedećoj simulaciji koristit će se mreža sa slike 4.14. te će simulacija trajati 0,6s. Potrebno je naglasiti kako će se transformator iz mreže isključiti u trenutku 0,1s te ponovno uključiti u trenutku 0,3s.

Rezultati simulacije su prikazani na slikama 4.15., 4.16., 4.17. i 4.18.

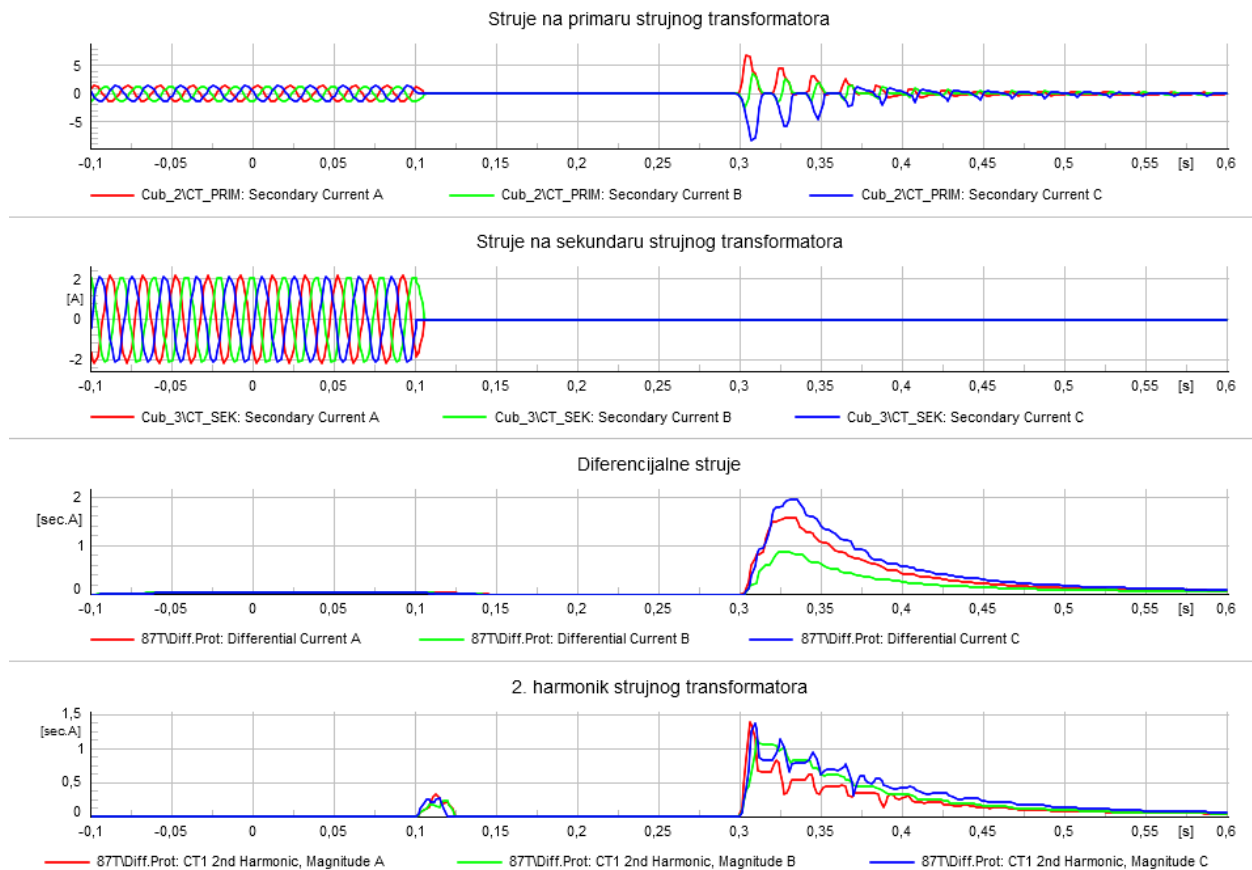


Slika 4.14. Prikaz mreže u kojoj se događa uključenje transformatora



Slika 4.15. Karakteristika diferencijalnog releja za vrijeme uključenja transformatora.

Prema slici 4.15. prorada diferencijalne zaštite nije mijenjala svoju vrijednost zato što diferencijalna zaštita nije detektirala kvar u svojoj zaštitnoj zoni. Blokada diferencijalne zaštite drugim harmonikom je u trenutku isključenja transformatora iz mreže povećala svoju vrijednost s 0 na 1 jer su se pojavile prijelazne pojave zbog isključenja transformatora iz mreže. Stanje primarnog prekidača dokazuje to da je transformator bio isključen u periodu od 0,1s do 0,3s.

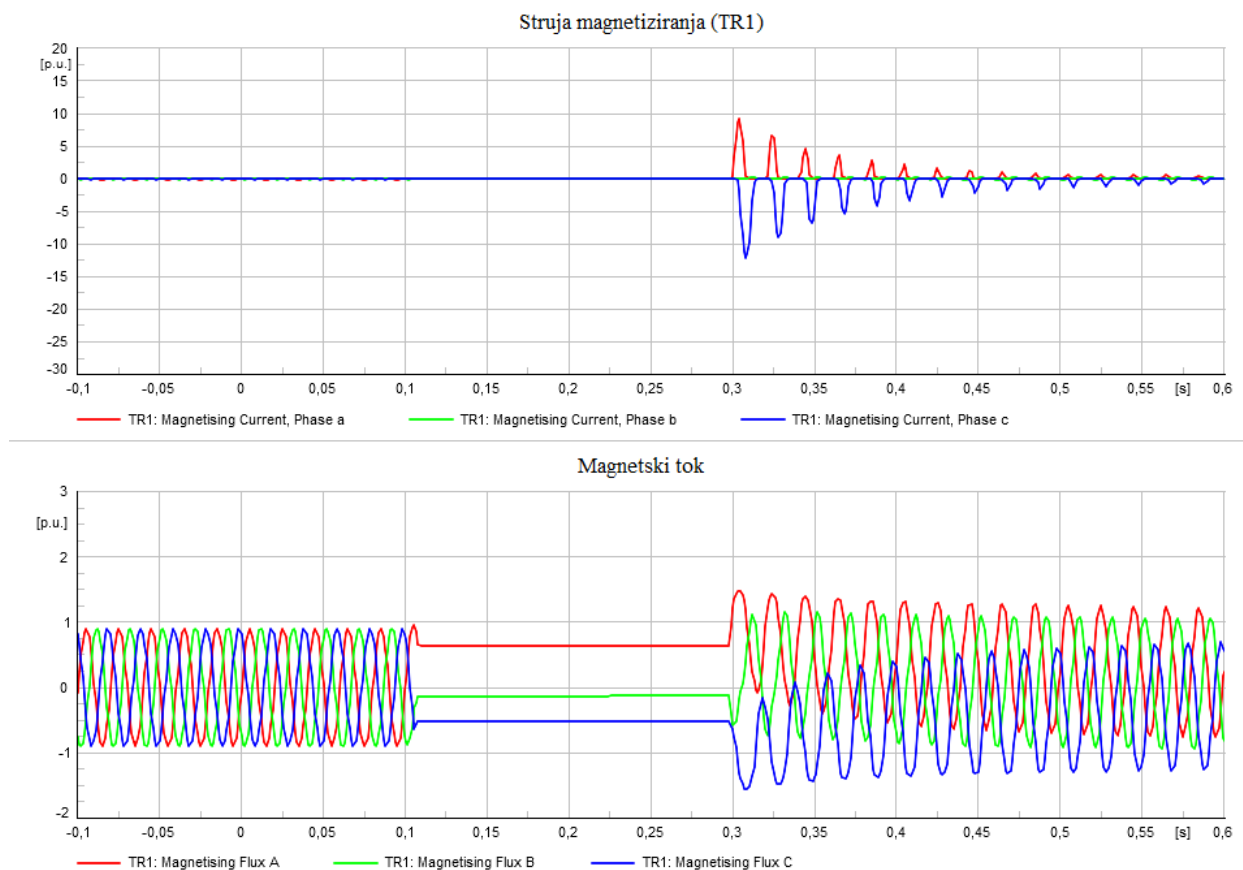


Slika 4.16. Karakteristike struja na transformatoru za vrijeme uključenja transformatora

Karakteristika struja na primaru strujnog transformatora koja je prikazana na slici 4.16. ukazuje na to da je od početka simulacije do trenutka isključenja transformatora, sustav bio u stacionarnom stanju. U periodu 0,1s do 0,3s transformator je isključen te na njemu nema struje kroz primarni namot. Kada se transformator ponovno uključi, pojavljuju se *inrush* struje zbog ponovnog magnetiziranja jezgre.

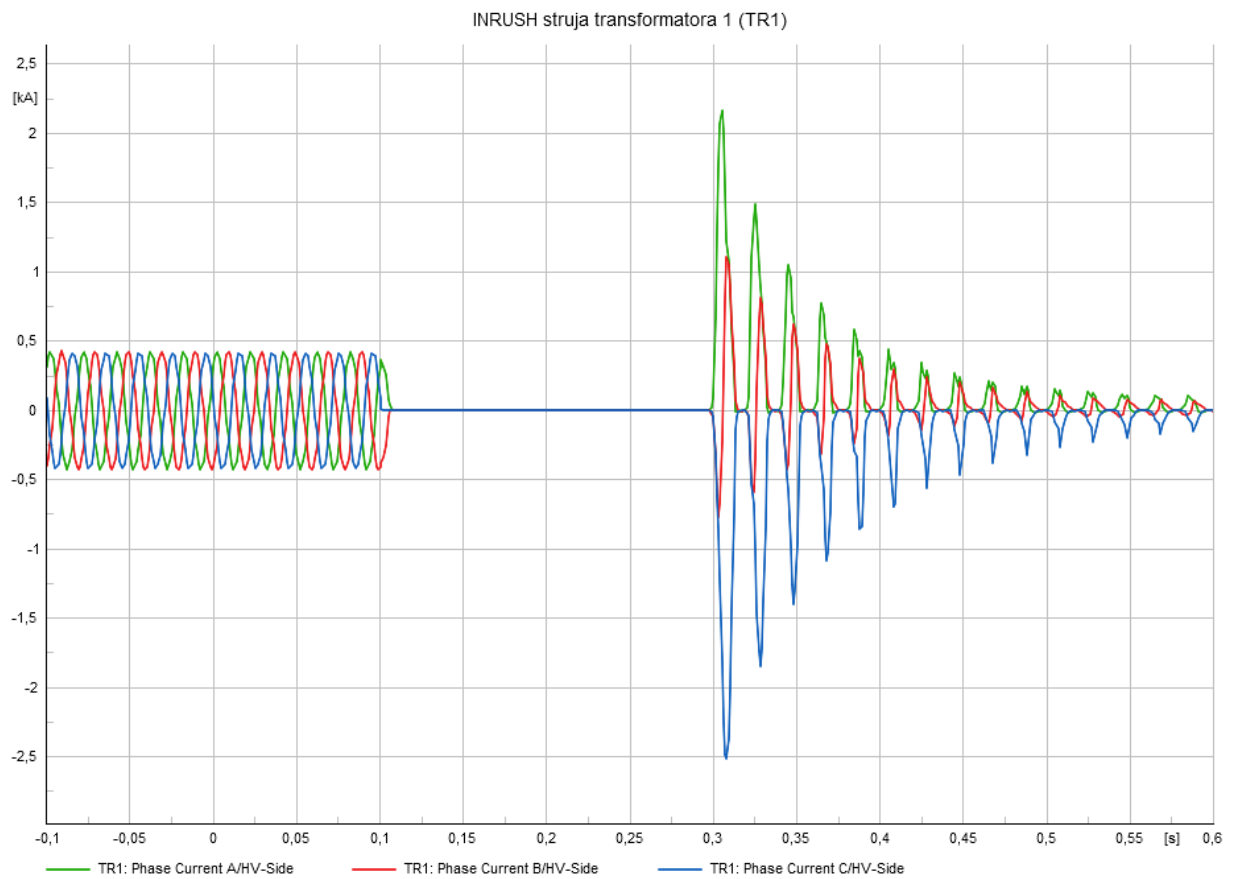
Struja na sekundaru (slika 4.16.) postojat će do trenutka gašenja transformatora i nakon toga će svesti svoju vrijednost na 0.

Diferencijalne struje (slika 4.16), kao i struje drugog harmonika strujnog transformatora povećat će se u periodu kad nastupa *inrush*. Povećanje struje drugog harmonika strujnog transformatora se događa kako bi, naravno, onemogućilo lažno aktiviranje diferencijalne zaštite izazvano strujom *inrusha*.



Slika 4.17. Prikaz struja magnetiziranja i magnetskog toka za vrijeme uključenja transformatora. Početkom simulacije sve do isključenja transformatora iz mreže, struje magnetiziranja (slika 4.17.) imaju sinusni oblik vrlo niske amplitude što ukazuje na stacionarno stanje modeliranog sustava. U periodu dok je transformator isključen, vrijednost tih struja je 0, zbog toga što kroz transformator ne prolazi struja. Naglo se povećanje struja magnetiziranja događa u trenutku ponovnog uključenja transformatora u mrežu, tj. zbog pojave *inrush* struja.

Magnetski tok (slika 4.17.) ima vrijednost od početka simulacije do trenutka isključenja transformatora sinusni valni oblik amplitude 1 p.u.. U periodu od 0,1s do 0,3s, magnetski tok ima konstantni vrijednost zbog ostatka magnetskog toka u jezgri (tj. remanentnog toka). U trenutku uključenja transformatora valni oblici magnetskog toka počinju opet biti sinusni s nešto većom amplitudom nego prije kako bi se jezgra transformatora mogla dovesti u ravnotežu.



Slika 4.18. Prikaz *inrush* struje za vrijeme uključenja transformatora

Slika 4.18. prikazuje *inrush* struju koja se događa ponovnim uključenjem transformatora. U trenutku 0,3s, tj. trenutak ponovnog uključenja transformatora, struja na primaru transformatora naglo raste zbog fenomena *inrush*.

4.3. Simulacija diferencijalne zaštite transformatora u paralelnom pogonu

4.3.1. Paralelni pogon transformatora

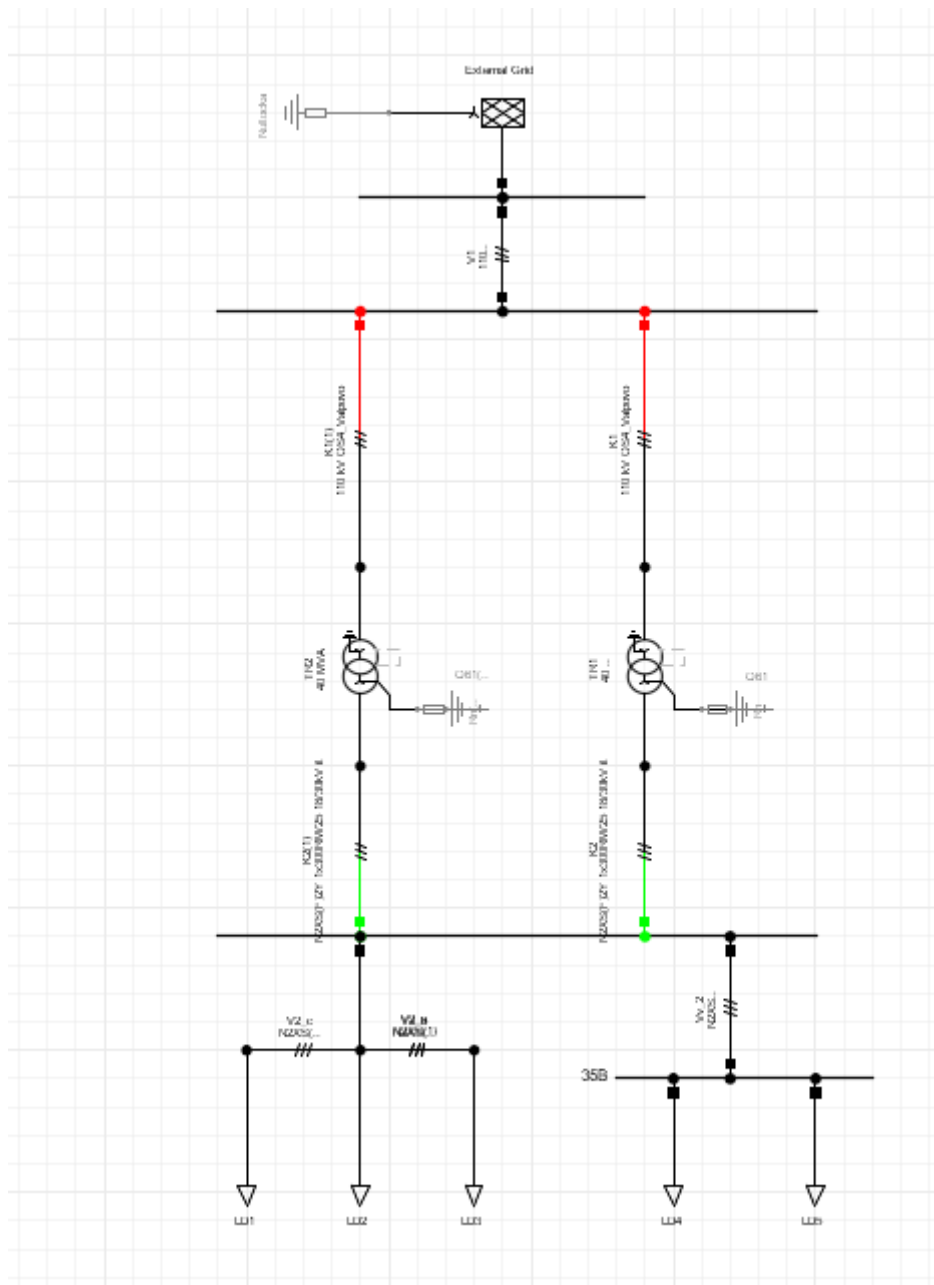
Prema literaturi [25], potrebno je uzeti u obzir nekoliko uvjeta koji moraju biti ispunjeni kako bi transformatori mogli raditi u paralelnom pogonu, a to su:

1. Prijenosni omjeri, tj. omjeri broja zavoja, moraju biti jednaki, a transformatori moraju biti građeni za iste nazivne napone;
2. Fazni pomak istoimenih sekundarnih faza prema istoimenim primarnim fazama mora biti isti;
3. Naponi kratkog spoja (u_k) moraju biti približno jednaki (ne smije biti veća razlika od $\pm 10\%$);
4. Nazivne snage transformatora moraju biti približno jednake.

U praksi se uglavnom koristi nekoliko manjih energetske transformatora povezanih u paralelu nego jedan veliki energetski transformator jer u tom slučaju nije potrebno izolirati cijeli sustav prijenosa energije u slučaju da se na jednom transformatoru dogodi kvar. U tom će slučaju drugi transformator preuzeti teret te tako omogućiti konstantni prijenos energije. [9]

4.3.2. Osnovni slučaj

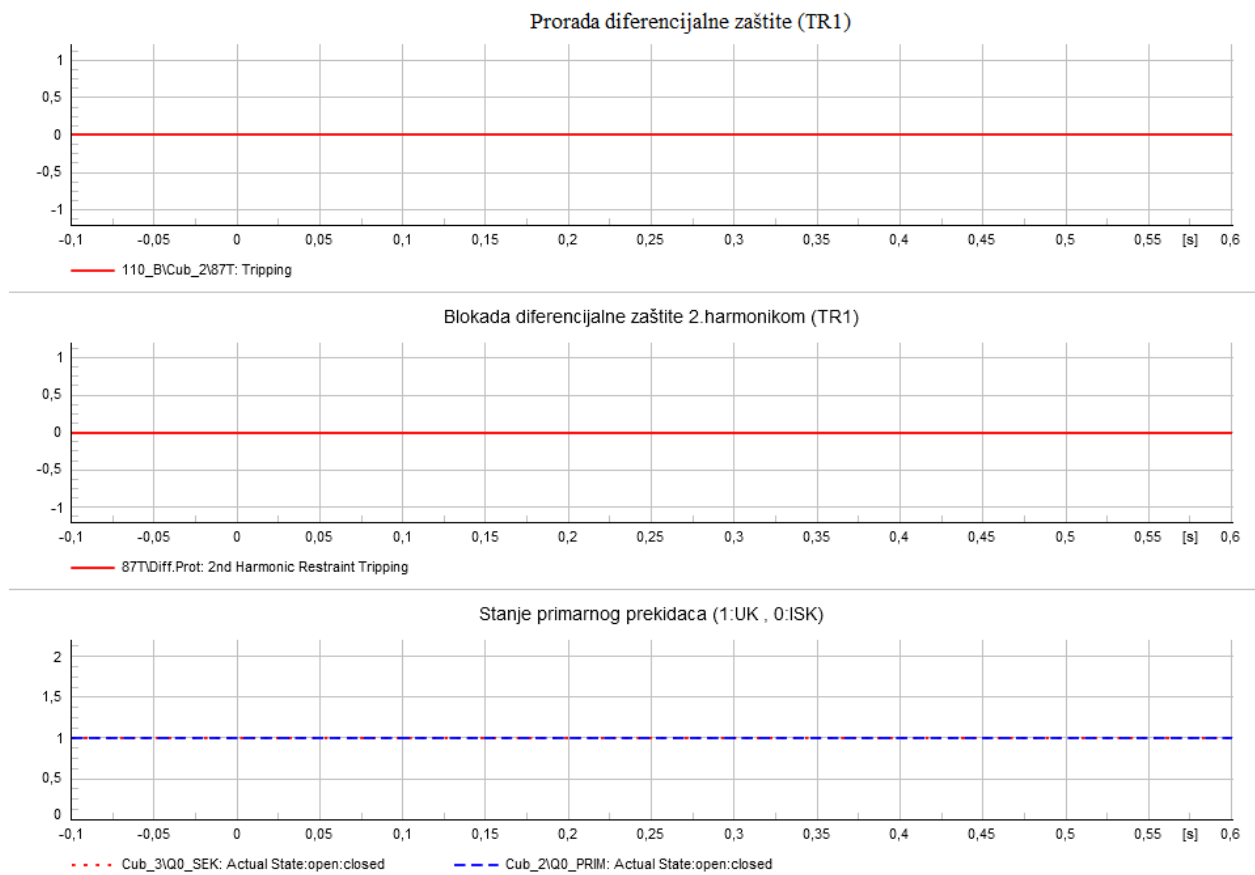
Mreža koja će se nadalje koristiti za izvođenje simulacija je slična kao u prethodnom slučaju, no razlika je u tome što su postavljena dva transformatora (TR2 je istih podataka kao TR1) u paralelni pogon kao što je prikazano na slici 4.19.



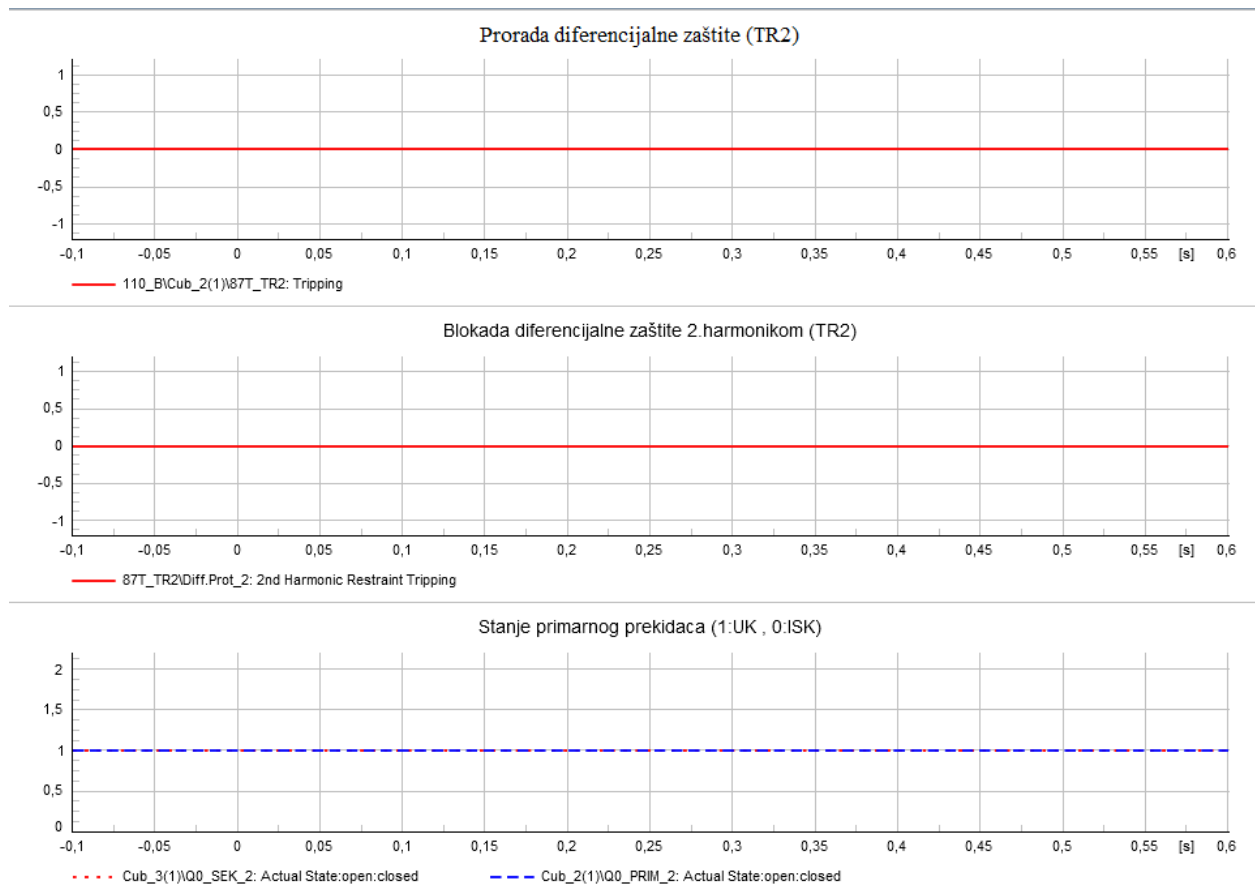
Slika 4.19. Prikaz osnovnog modela mreže s transformatorima u paralelnom pogonu

Slučaj koji će se izvesti u ovom potpoglavlju tiče se situacije kada se kvar ne dogodi uopće, tj. prikazana mreža je u stacionarnom stanju.

Trajanje simulacije je 0,6s, a rezultati spomenute simulacije nalaze se na slikama 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25.



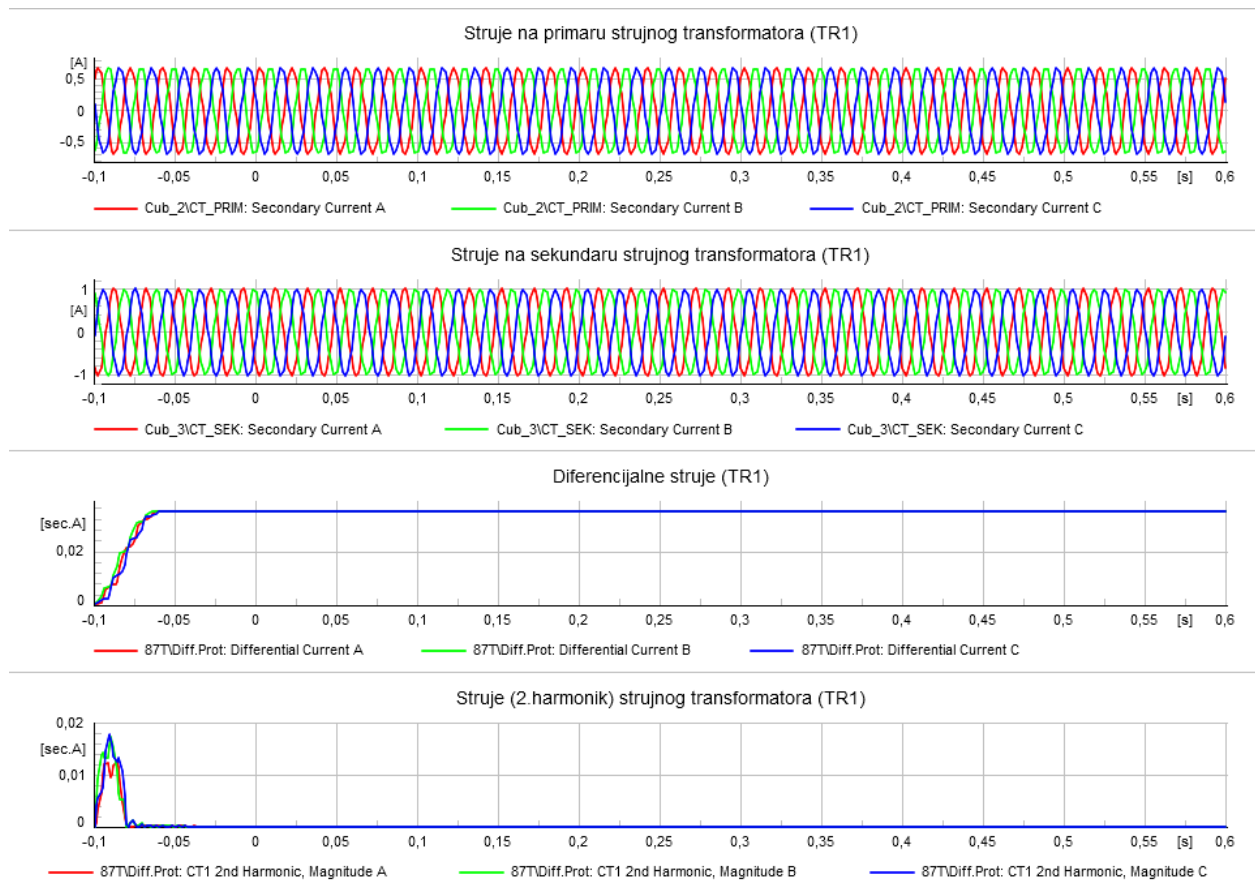
Slika 4.20. Karakteristika diferencijalnog releja transformatora 1 (TR1) za vrijeme stacionarnog stanja



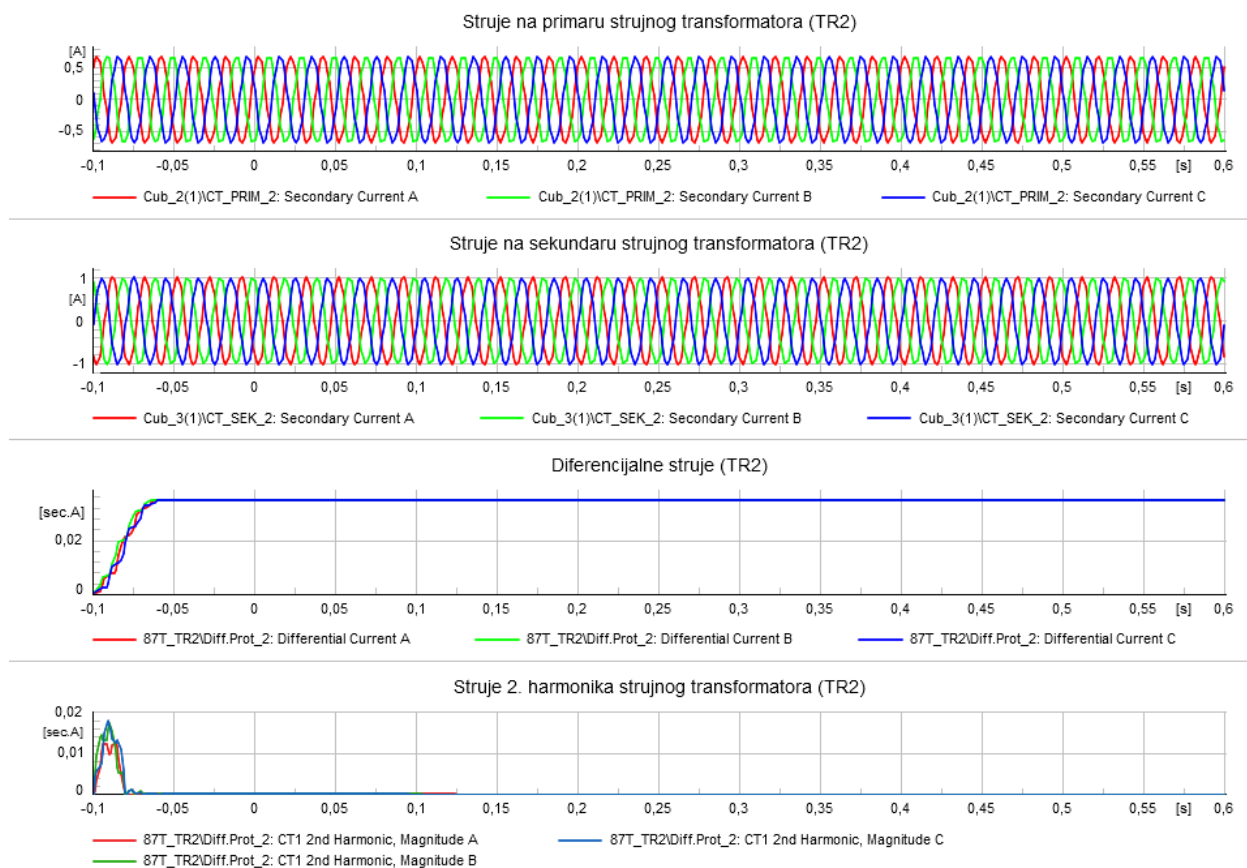
Slika 4.21. Karakteristika diferencijalnog releja transformatora 2 (TR2) za vrijeme stacionarnog stanja

Kao što je prikazano na slikama 4.20. i 4.21. prorada diferencijalne zaštite ni u jednom ni u drugom slučaju ne mijenja svoj iznos nego ostaje konstantno 0 jer nema kvara.

Blokada diferencijalne zaštite drugim harmonikom također nije mijenjala svoju vrijednost ni na jednom od releja transformatora iz razloga što nije nastupio kvar.



Slika 4.22. Prikaz karakteristika struja (TR1) za vrijeme stacionarnog stanja

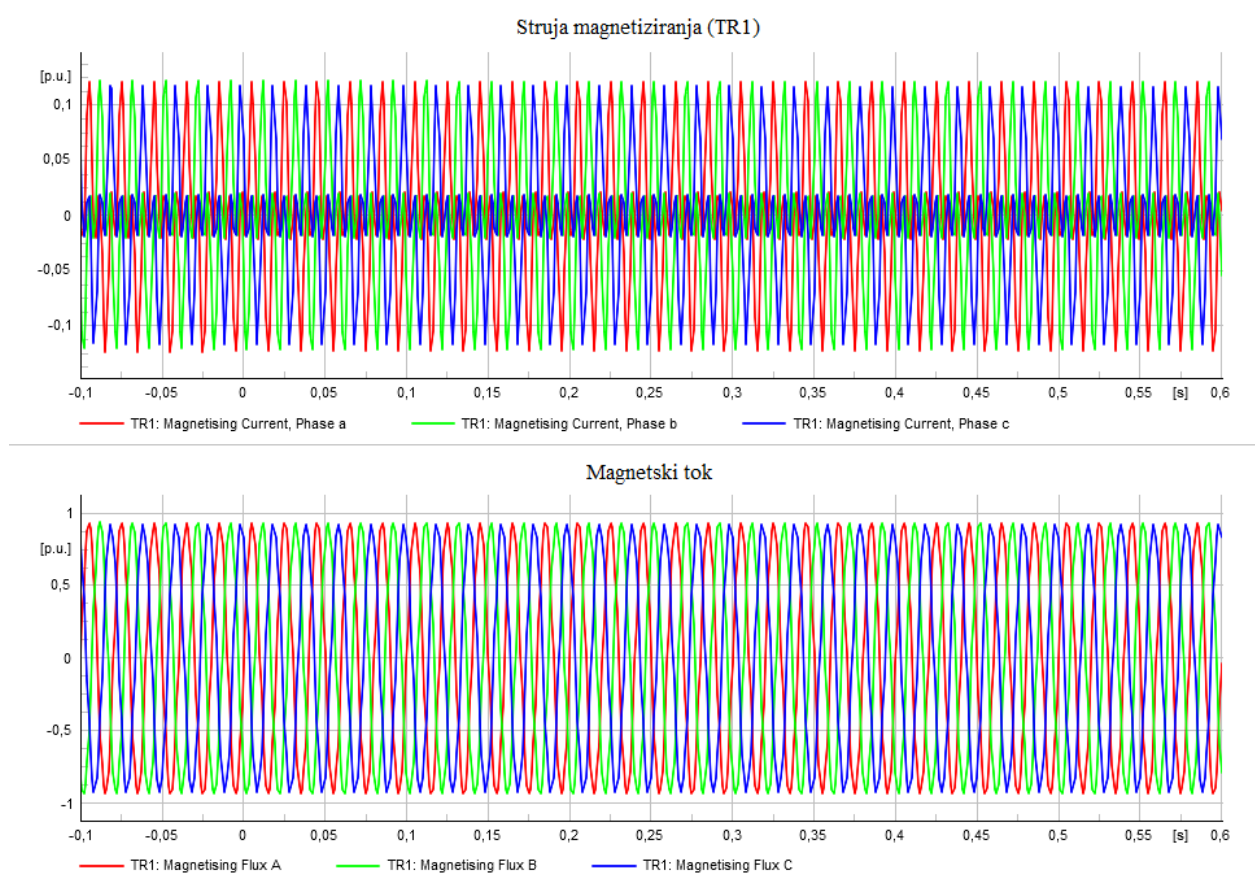


Slika 4.23. Prikaz karakteristika struja (TR2) za vrijeme stacionarnog stanja

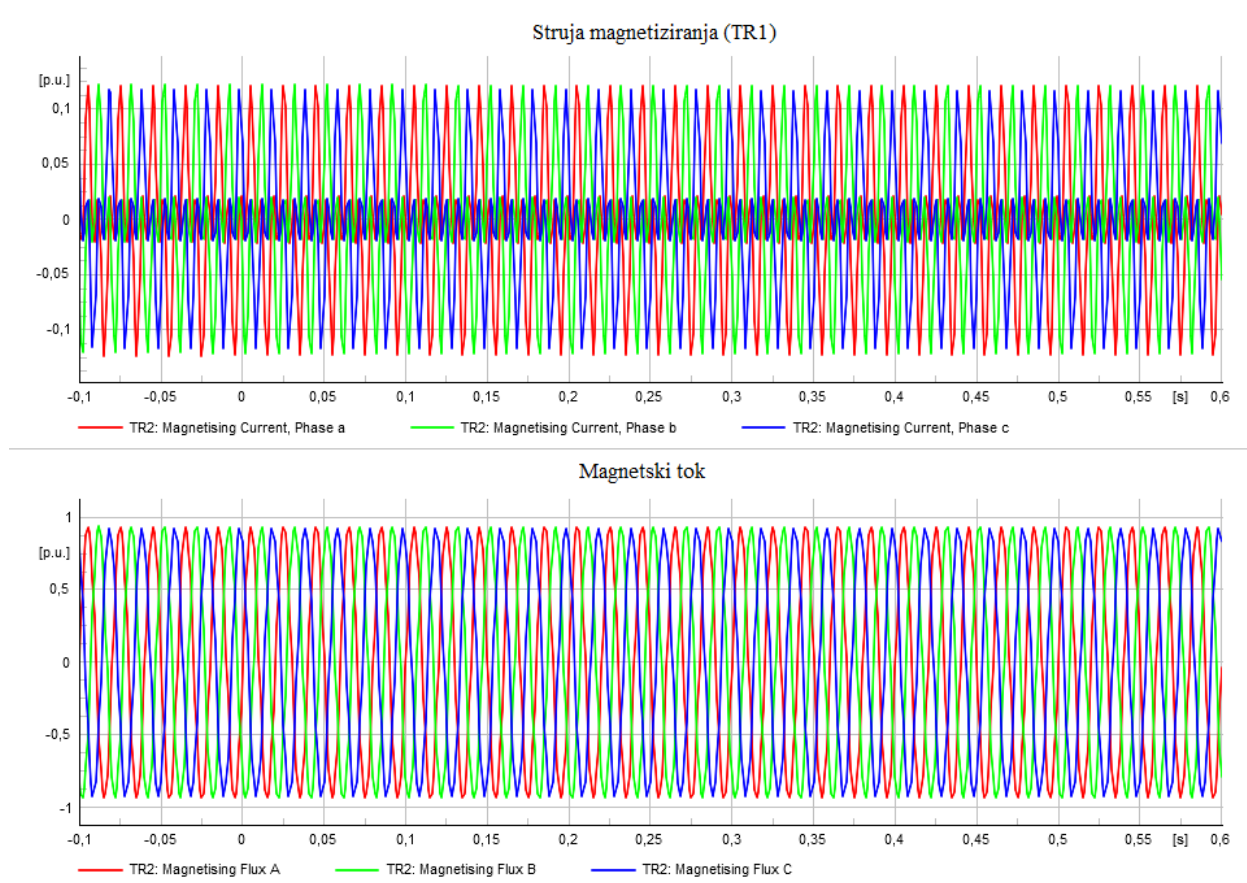
Ako se slike 4.22. i 4.23. usporede sa slikom 4.4 na kojoj je bio prikazan izgled karakteristika struja u slučaju stacionarnog stanja modeliranog sustava kada postoji samo jedan transformator, može se uočiti kako su sve tri slike potpuno iste. Iste su zbog stacionarnog stanja modeliranog sustava.

Diferencijalna će struja kao u prethodnom slučaju (poglavlje 4.2.1.) naglo porasti do određene niske razine na kojoj će ostati konstantna te tako ukazati na činjenicu da je modelirani sustav u stacionarnom stanju.

Na četvrtom grafu koji prikazuje struje drugog harmonika strujnog transformatora može se uočiti kako će spomenute struje naglo porasti i nakon kratkog vremena spustiti se na vrijednost 0 kao i na slici 4.4.



Slika 4.24. Prikaz struje magnetiziranja i magnetskog toka za vrijeme stacionarnog stanja (TR1)

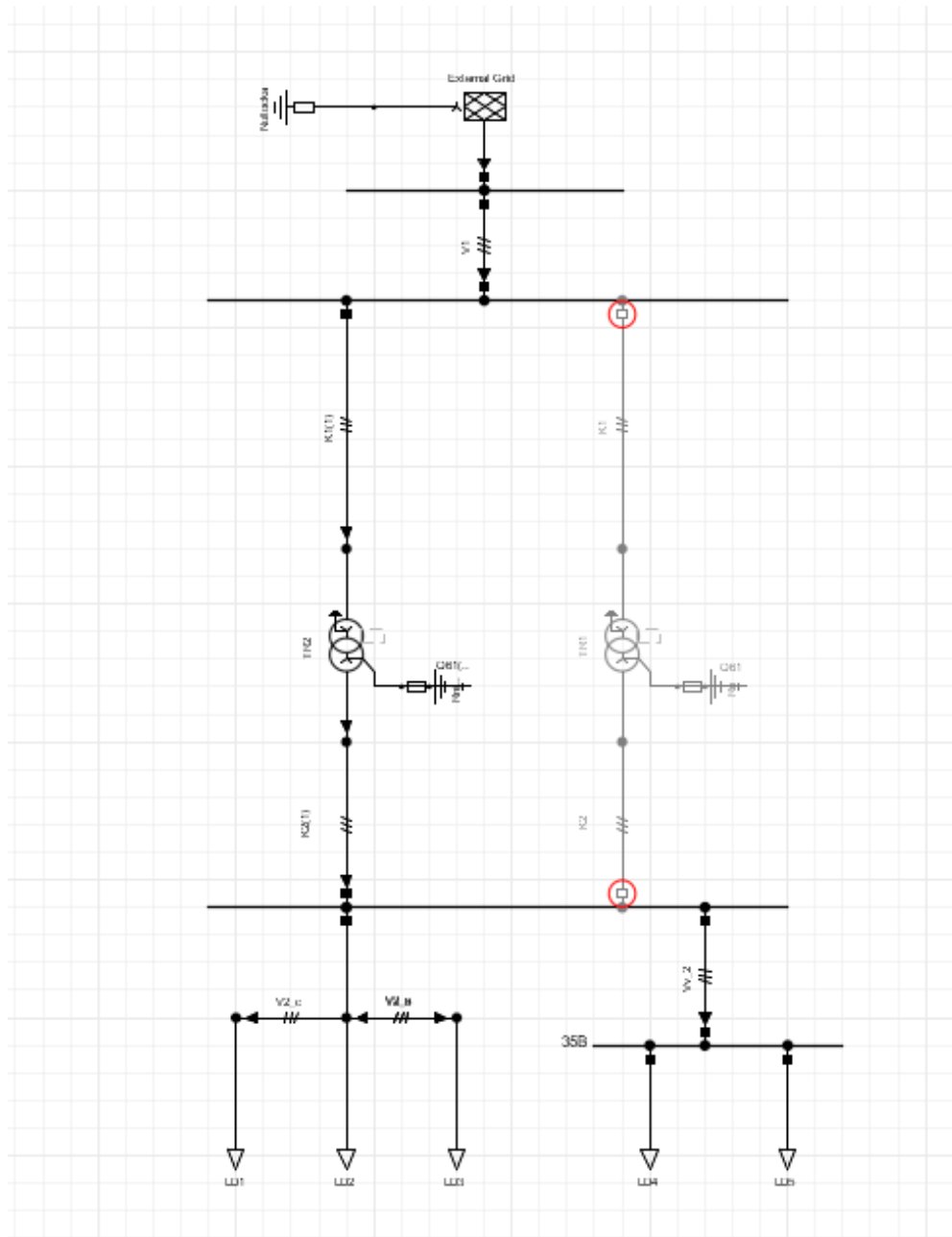


Slika 4.25. Prikaz struje magnetiziranja i magnetskog toka za vrijeme stacionarnog stanja (TR2)

Karakteristike prikazane na slikama 4.24. i 4.25. prikazuju kako trebaju izgledati struje magnetiziranja i magnetski tok u stacionarnom stanju modeliranog sustava. Zaključak toga bi bio da jezgre transformatora TR1 i TR2 nisu zasićene te onda samim time nema harmonika koji bi mogli uzrokovati izobličenje u struji magnetiziranja ili magnetskom toku.

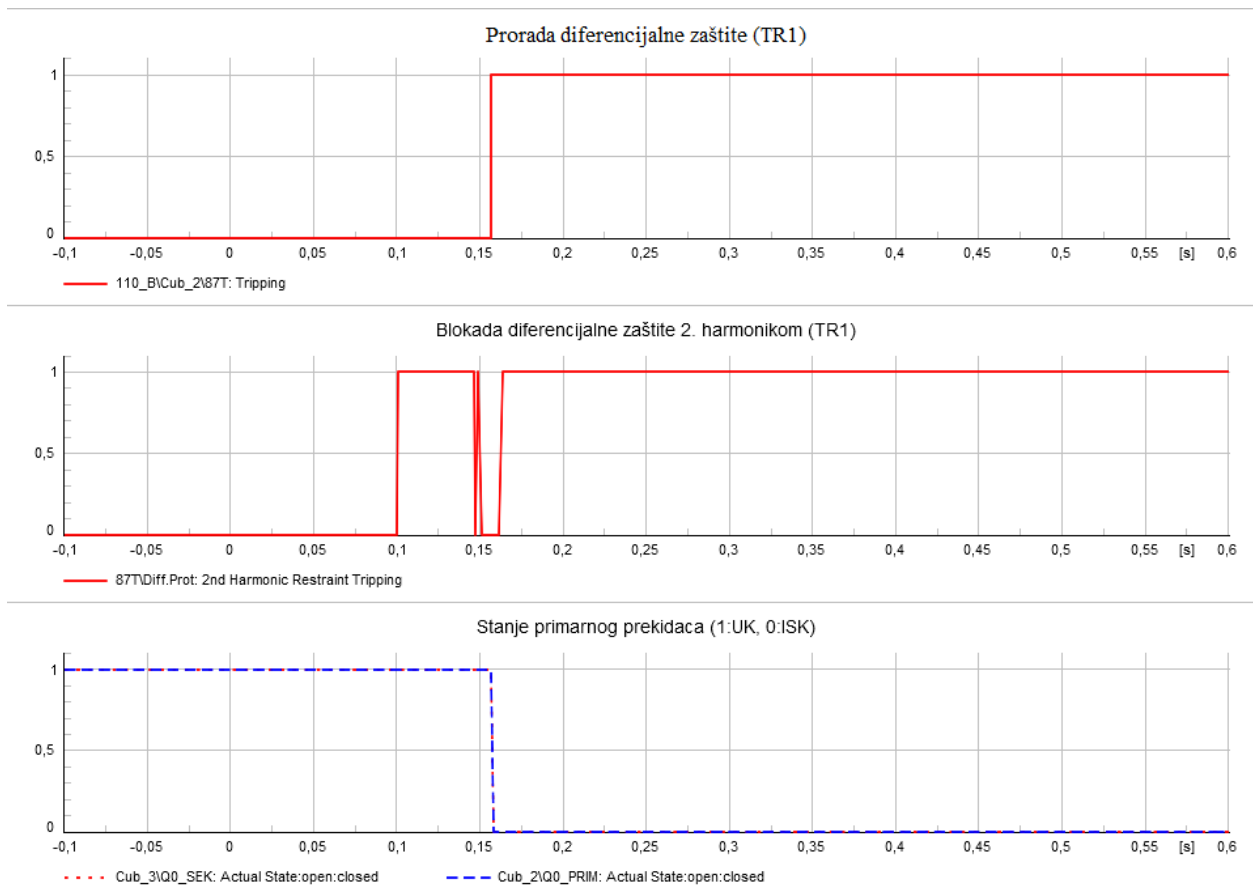
4.3.3. Kvar unutar zaštitne zone

Sljedeća simulacija prikazat će situaciju u kojoj će se koristiti mreža iz osnovnog slučaja, no na spomenutoj mreži nastat će kratki spoj u zaštitnoj zoni diferencijalne zaštite jednog od transformatora što je prikazano na slici 4.26. Simulacija kvara će se izvesti odvajanjem jednog transformatora, dok će drugi transformator preuzeti teret kao što je objašnjeno u teorijskom dijelu.

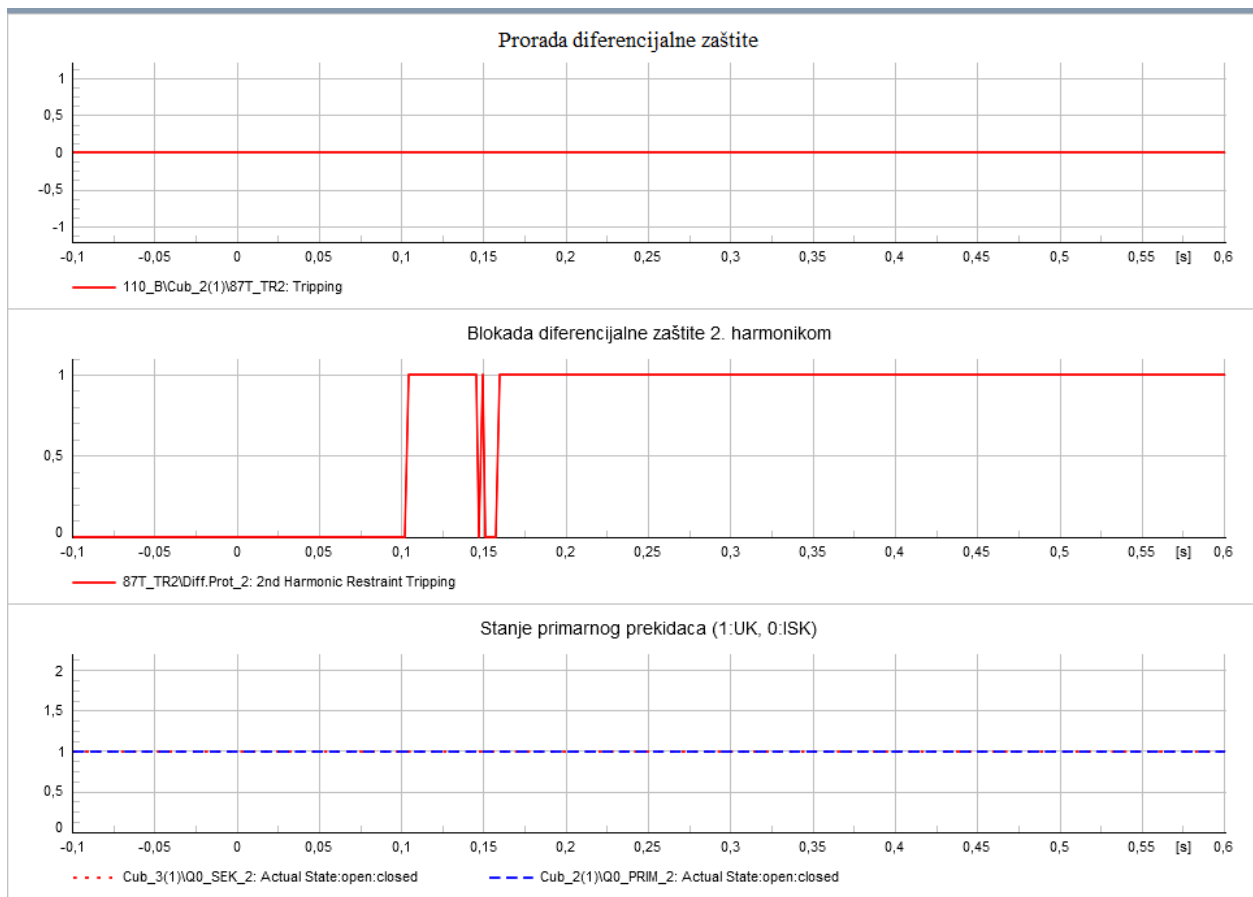


Slika 4.26. Prikaz modela mreže u kojoj se koristi paralelni pogon transformatora za vrijeme unutarnjeg kvara

Simulacija koja slijedi u trajanju je od 0,6s te je potrebno naglasiti da se kvar događa u trenutku 0,1s. Rezultati simulacije se nalaze na slikama 4.27, 4.28, 4.29, 4.30, 4.31, 4.32.



Slika 4.27. Karakteristike diferencijalnog releja na transformatoru 1 (TR1) za vrijeme unutarnjeg kvara



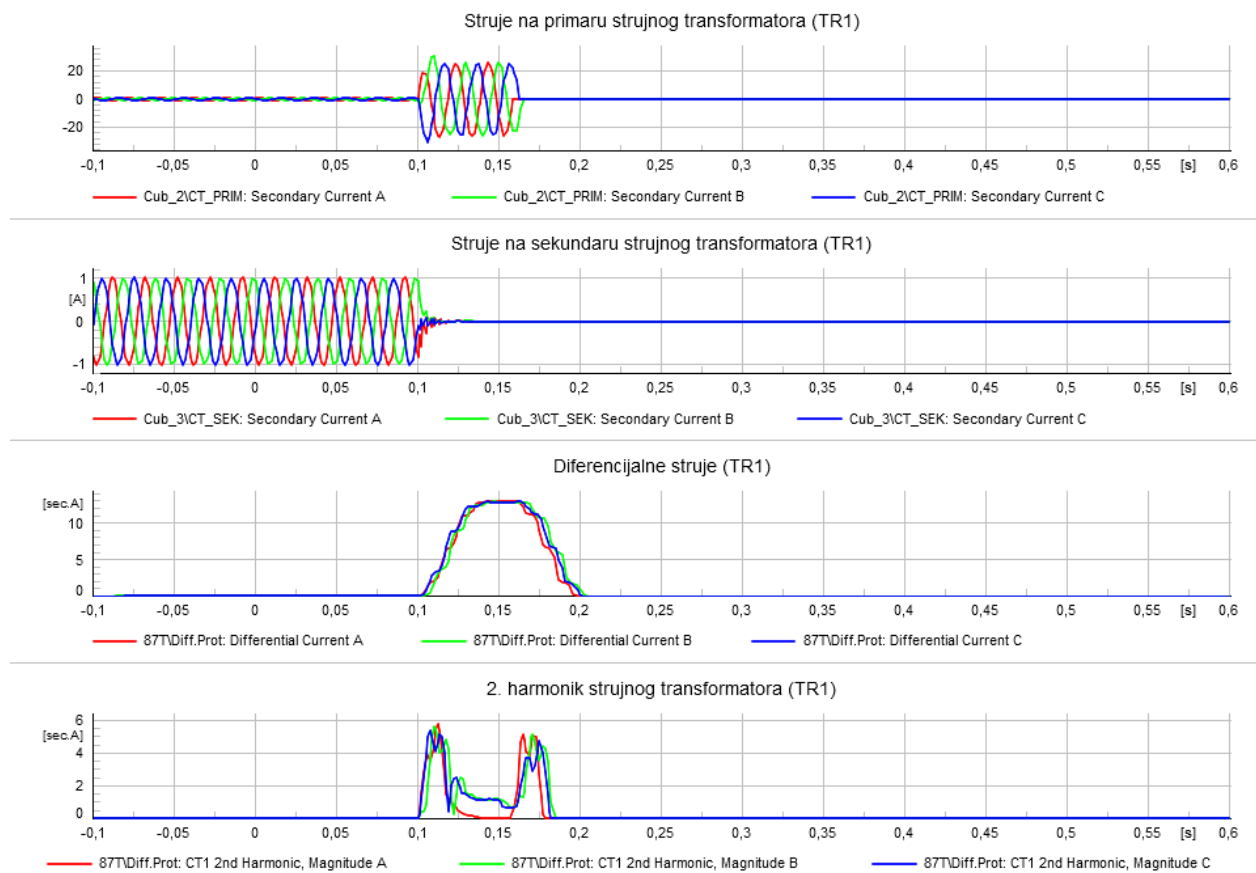
Slika 4.28. Karakteristike diferencijalnog releja na transformatoru 2 (TR2) za vrijeme unutarnjeg kvara

Prorada diferencijalne zaštite transformatora TR1 (slika 4.27.) se do trenutka 0,16s nalazi na vrijednosti 0 nakon čega trenutno poraste na vrijednost 1. To označava trenutak u kojoj je diferencijalna zaštita detektirala kvar unutar zaštitne zone transformatora TR1 te izolirala spomenuti transformator iz mreže. Zaključak tome bi bio da je u trenutku 0,16s došlo do velike razlike između struja primara i sekundara te je diferencijalna zaštita morala biti aktivirana.

U trenutku 0,1s, tj. u trenutku u kojem se dogodio kvar, blokada diferencijalne zaštite (slika 4.27.) drugim harmonikom je povećala svoju vrijednost s 0 na 1 zbog pojave viših harmonika zbog prijelaznih pojava koje su se dogodile u sustavu. Prijelazno stanje traje do trenutka 0,15s te se u tom trenutku blokada deaktivira. Samo 0,01s kasnije, tj. u trenutku 0,16s, blokada se ponovno aktivira zbog pojavljivanja harmonika koji su nastali zbog kvara koji se dogodio.

Stanje primarnog prekidača (slika 4.27.) (na transformatoru TR1) u trenutku 0,16s promjeni se iz zatvoreno u otvoreno (isključuje se) zbog toga što je u tom trenutku diferencijalna zaštita detektirala kvar izolirala transformator iz sustava.

Kako se može vidjeti na modelu mreže, diferencijalna zaštita isključila je samo TR1, dok TR2 ostaje netaknut i nastavlja sa svojim radom. Karakteristike na slici 4.28. upravo to i dokazuju. Prorada diferencijalne zaštite transformatora TR1 ostaje na vrijednosti 0 zbog toga što se kvar dogodio izvan zaštitne zone spomenutog transformatora. Blokada diferencijalne zaštite drugim harmonikom ima identičan izgled kao i kod transformatora TR1 zbog toga što su oba transformatora zahvaćena od strane istih prijelaznih pojava. Iako imaju istu karakteristiku blokade, TR2 nije izoliran iz mreže jer je kvar detektiran unutar zaštitne zone transformatora TR1 te je iz tog razloga teret preuzeo TR2.



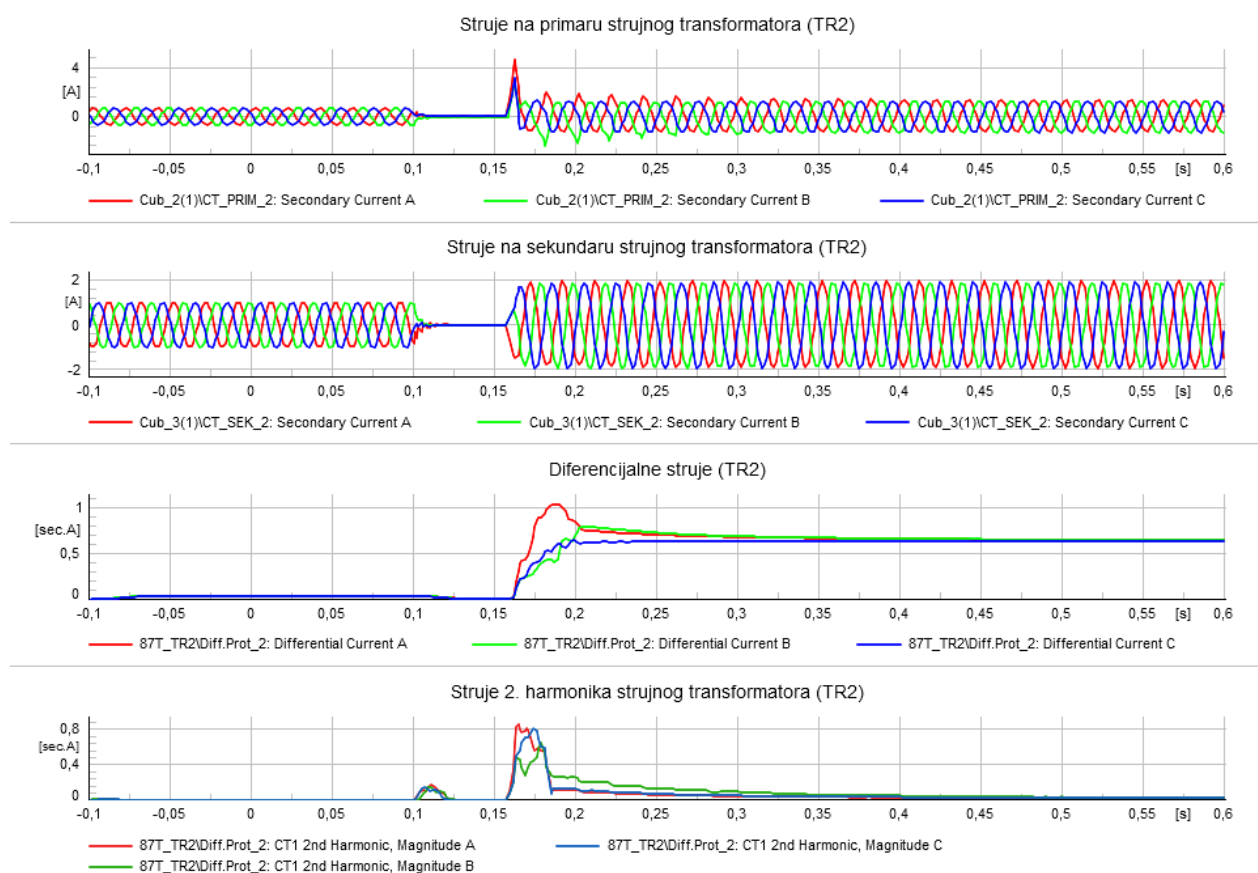
Slika 4.29. Prikaz karakteristika struja (TR1) za vrijeme unutarnjeg kvara u paralelnom pogonu

Kao što je prikazano na slici 4.29., struje na primaru strujnog transformatora su od početka simulacije do trenutka 0,1s (trenutka kad se dogodio kvar) sinusoidnog oblika s niskim vrijednostima amplituda. Od trenutka kad se dogodi kvar do 0,16s, vrijednosti struja narastu na 20 puta veću vrijednost što ukazuje na to da se u sustavu dogodio kvar. Nakon 0,16s struje padaju na vrijednost 0 što ukazuje na to da je diferencijalna zaštita reagirala i da je izolirala transformator iz sustava.

Struje na sekundaru su od početka simulacije do trenutka 0,1s sinusoidnog oblika te nakon tog trenutka vrijednosti struja padaju na 0 jer transformator (TR1) postaje izoliran iz mreže.

Diferencijalne struje (TR1) su do kvara na vrijednosti 0 jer je do tad sustav u stacionarnom stanju te u trenutku kvara (0,1s) rastu na određenu vrijednost jer zaštitni sustav detektira razliku između primarnih i sekundarnih struja. Nakon 0,2s vrijednosti diferencijalne struje opet padaju na 0 zato što je transformator TR1 izoliran od strane diferencijalne zaštite.

Struja drugog harmonika strujnog transformatora je prije kvara na vrijednosti 0A što ukazuje na to da je sustav u stacionarnom stanju. U periodu od 0,1s do 0,18s, struja drugog harmonika raste što ukazuje na pojavu harmonika što je uzrokovano kvarom. Nakon trenutka 0,18s, struja drugog harmonika se vraća na vrijednost 0A jer je transformator TR1 izoliran.

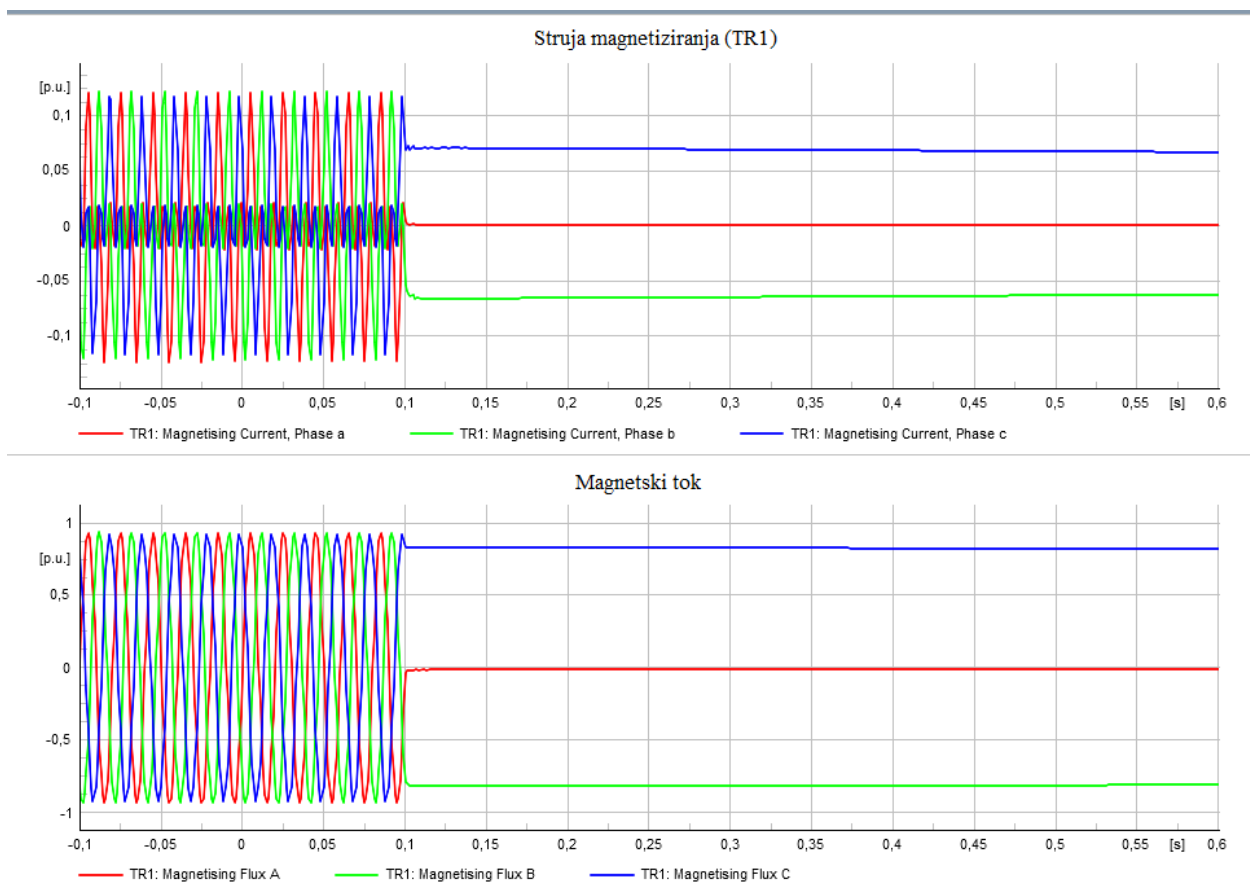


Slika 4.30. Prikaz karakteristika struja (TR2) za vrijeme unutarnjeg kvara u paralelnom pogonu

Od početka simulacije do vremena kvara, struje su na primaru i sekundaru strujnog transformatora (TR2) (slika 4.30.) male i sinusoidnog oblika što ukazuje na stacionarno stanje modeliranog sustava. Period od 0,1s do 0,16s period je izolacije transformatora TR1 te u tom periodu struje na primaru (i sekundaru) padaju na 0 zbog poremećaja izazvanog kvarom na TR1, što je u krajnosti

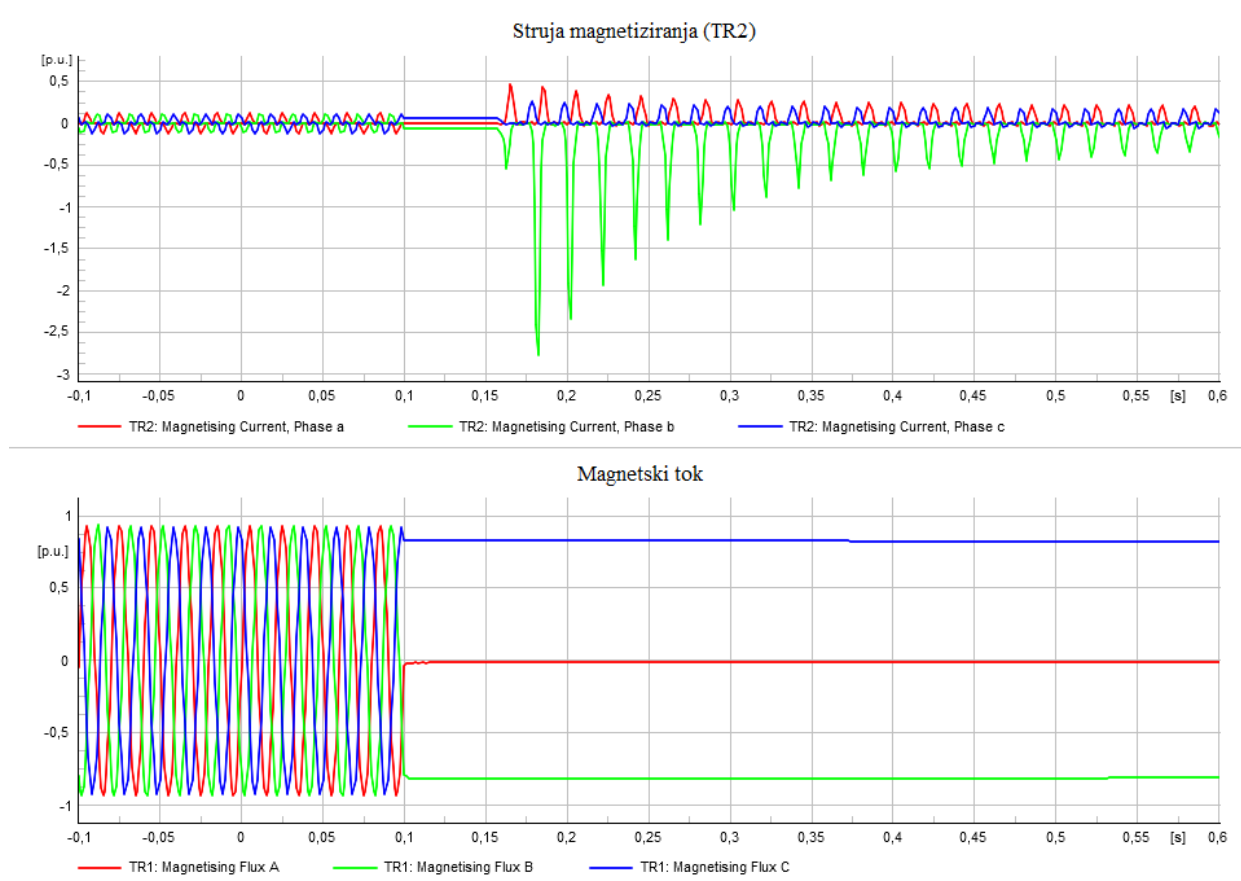
uzrokovalo kratkotrajni prekid. Nakon trenutka 0,16s struje ponovno rastu na još veće sinusne vrijednosti zbog preraspodjele opterećenja nakon što je transformatora TR1 izoliran.

Diferencijalna će struja (slika 4.30.) narasti u trenutku 0,16s zbog spomenute preraspodjele opterećenja te nakon toga ostaje na konstantnoj vrijednosti. Da bi se zaustavilo aktiviranje diferencijalne zaštite na TR2, vrijednosti struje drugog harmonika strujnog transformatora rastu u trenutku 0,16s te tako blokiraju lažno aktiviranje zaštite. Također, struja će drugog harmonika narasti u kratkom periodu kad se dogodi kvar radi poremećaja zbog prijelazne pojave.



Slika 4.31. Prikaz struje magnetiziranja i magnetskog toka za vrijeme unutarnjeg kvara kada su transformatori u paralelnom pogonu (TR1)

Struje magnetiziranja transformatora (TR1) (slika 4.31.) i magnetski tok imaju jako slične karakteristike. Od početka simulacije do trenutka kvara (0,1s) njihovi su valni oblici sinusoidni što ukazuje na to da je sustav u stacionarnom stanju. U trenutku 0,1s struje magnetiziranja i magnetski tok postaju konstantni jer je detektiran kvar. Diferencijalna zaštita izolirat će transformator (TR1) te će struje magnetiziranja i magnetski tok poprimiti ustaljene vrijednosti.



Slika 4.32. Prikaz struje magnetiziranja i magnetskog toka za vrijeme unutarnjeg kvara kada su transformatori u paralelnom pogonu (TR2)

Struje magnetiziranja transformatora (TR2) (slika 4.32.) su od početka simulacije do trenutka 0,1s sinusnog oblika što ukazuje na stacionarno stanje modeliranog sustava. U periodu od 0,1s do 0,16s, struje magnetiziranja su konstantne što ukazuje na utjecaj poremećaja koji je izazvan kvarom na TR1. Nakon 0,16s struje magnetiziranja poprimaju sinusoidne oblike s različitim amplitudama u sve tri faze. Razlog tomu je posljedica različitog opterećenja nakon izolacije transformatora TR1.

Magnetski tok (slika 4.32.) ima gotovu identičnu karakteristiku kao i kod TR1 zato što imaju iste parametre te su spojeni na istu mrežu.

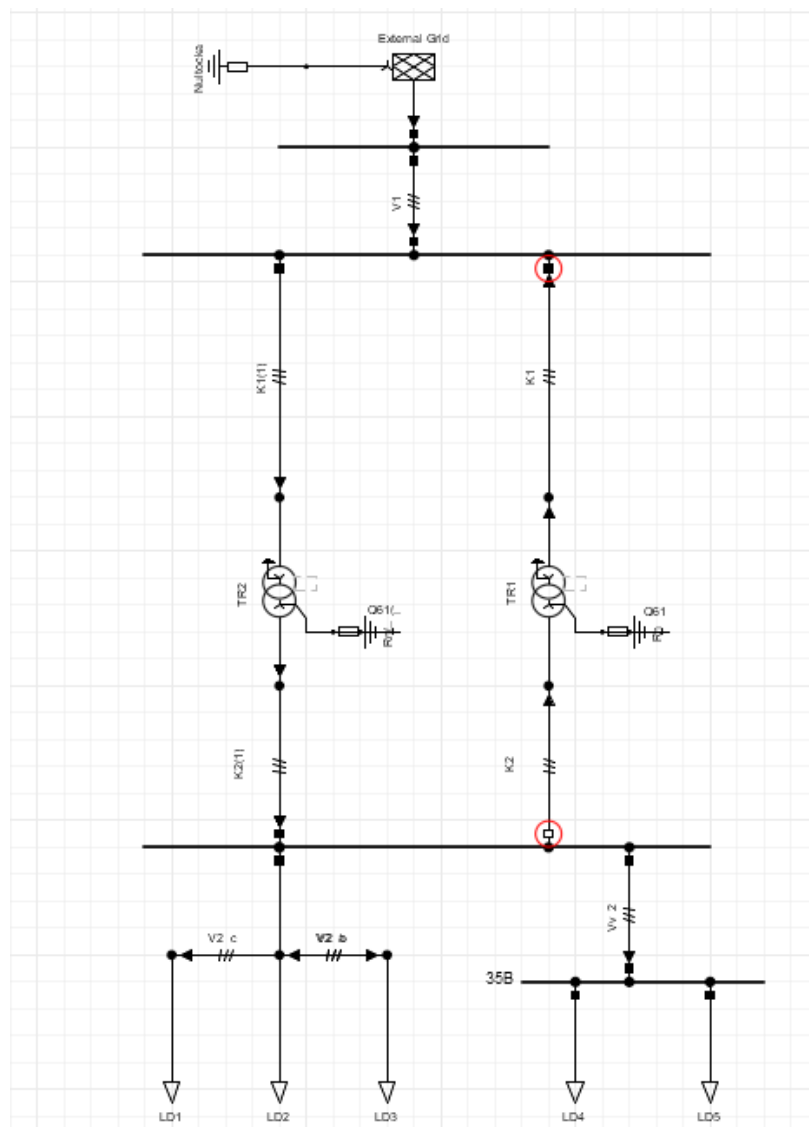
U slučaju kad se kvar dogodi izvan zaštitne zone diferencijalne zaštite transformatora u paralelnom pogonu, dobit će se isti rezultati za transformatore TR1 i TR2 kao i u slučaju kada je bio prisutan samo jedan transformator. (poglavlje 4.2.3.)

Razlog tomu je činjenica da se kvar dogodio izvan zaštitne zone transformatora TR1 i TR2 što znači da ni jedna diferencijalna zaštite neće detektirati kvar, što će rezultirati istim strujama i magnetskim tokovima.

4.3.4. Simpatetski *inrush*

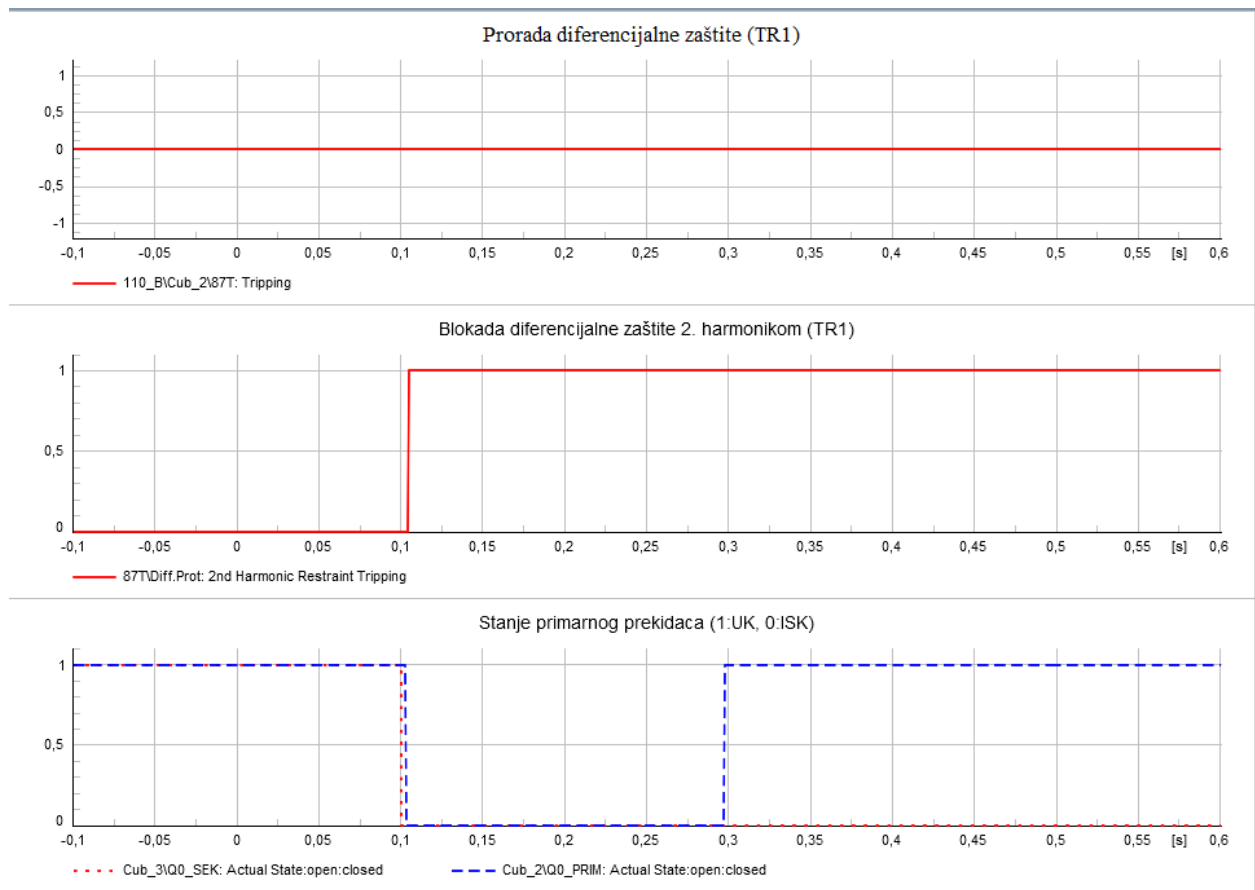
Prethodno u radu je objašnjen fenomen simpatetskog *inrush-a* (poglavlje 3.3.3) dok će se u ovom poglavlju izvesti simulacija koja će ga potvrditi. Kako je ranije objašnjeno, simpatetski *inrush* nastaje kada se transformator uključuje u paralelni pogon. Prethodno napajan transformator će u tom trenutku imati *inrush* struju, odnosno, simpatetsku *inrush* struju.

U sljedećoj simulaciji će se koristiti mreža kao i u prethodnim simulacijama (slika 4.33.). Trajat će 0,6s, no potrebno je naglasiti da će se transformator TR1 isključiti u trenutku 0,1s te ponovno uključiti u 0,3s. Za to vrijeme će transformator TR2 raditi bez prestanka.



Slika 4.33. Prikaz mreže u kojoj se događa uključenje transformatora TR1

Rezultati simulacije se nalaze na slikama 4.34, 4.35., 4.36, 4.37., 4.38, 4.39. i 4.40.

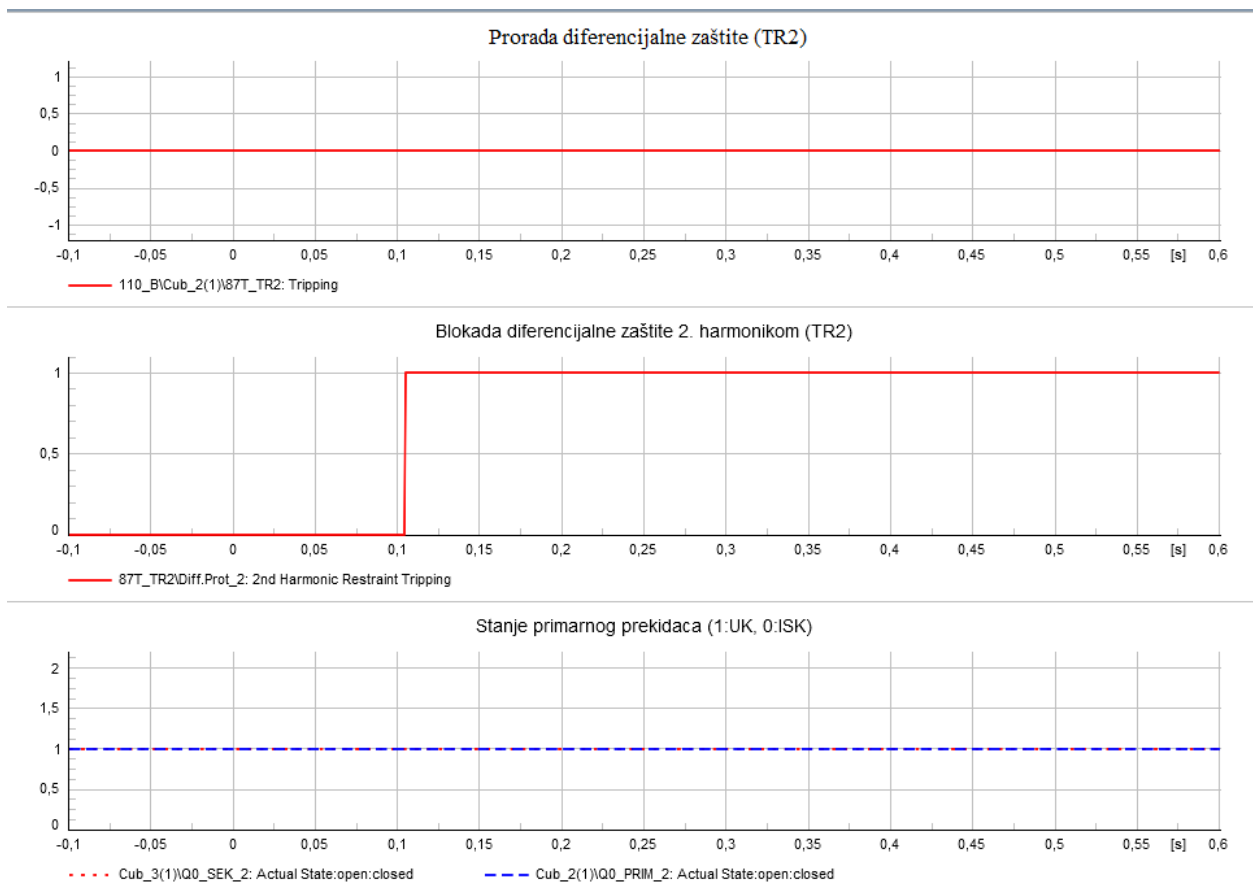


Slika 4.34. Karakteristike diferencijalnog releja na transformatoru 1 (TR1) za vrijeme uključjenja transformatora TR1

Prorada diferencijalne zaštite transformatora TR1 (slika 4.34.) se ne pomiče sa svoje vrijednosti (0) zato što se uključivanje i isključivanje transformatora ne smatra kvarom koji bi aktivirao proradu diferencijalne zaštite.

Od početka simulacije do trenutka 0,1s blokada diferencijalne zaštite drugim harmonikom (slika 4.40.) drži vrijednost 0 nakon čega naglo raste na vrijednost 1. Razlog tomu je isključivanje i ponovno uključivanje transformatora TR1 koje uzrokuje *inrush* struju koja sadrži značajan drugi harmonik. Kako ne bi došlo do lažnog aktiviranja diferencijalne zaštite, blokada ostaje aktivirana do kraja simulacije.

Stanje primarnog prekidača (slika 4.34.) dokazuje kako se je transformator TR1 isključio u trenutku 0,1s te se ponovno uključio u 0,3s.

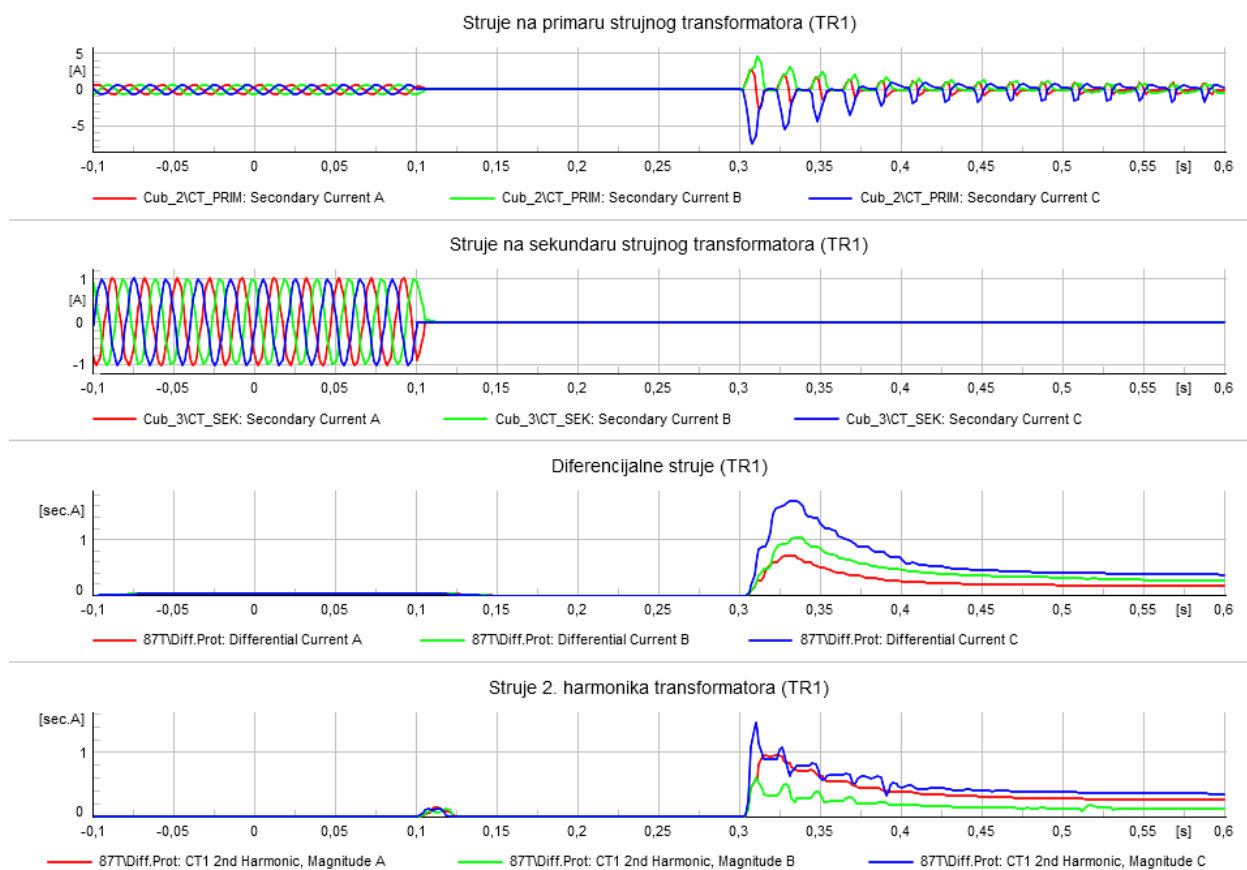


Slika 4.35. Karakteristike diferencijalnog releja na transformatoru 2 (TR2) za vrijeme uključenja transformatora TR1

Prorada diferencijalne zaštite transformatora TR2 (slika 4.35.) kao i kod transformatora TR1 ne mijenja svoju vrijednost što znači da se kvar nije dogodio ni u zaštitnoj zoni diferencijalne zaštite na transformatoru TR2.

Blokada diferencijalne zaštite drugim harmonikom (slika 4.35.) identične je karakteristike kao i kod transformatora TR1 jer oba transformatora prolaze kroz iste promjene u sustavu zbog *inrush* struje uzrokovane uključivanjem/isključivanjem transformatora TR1.

Primarni prekidač na transformatoru TR2 (slika 4.35.) ostaje zatvoren cijelu simulaciju zato što TR2 mora biti cijelo vrijeme uključen.



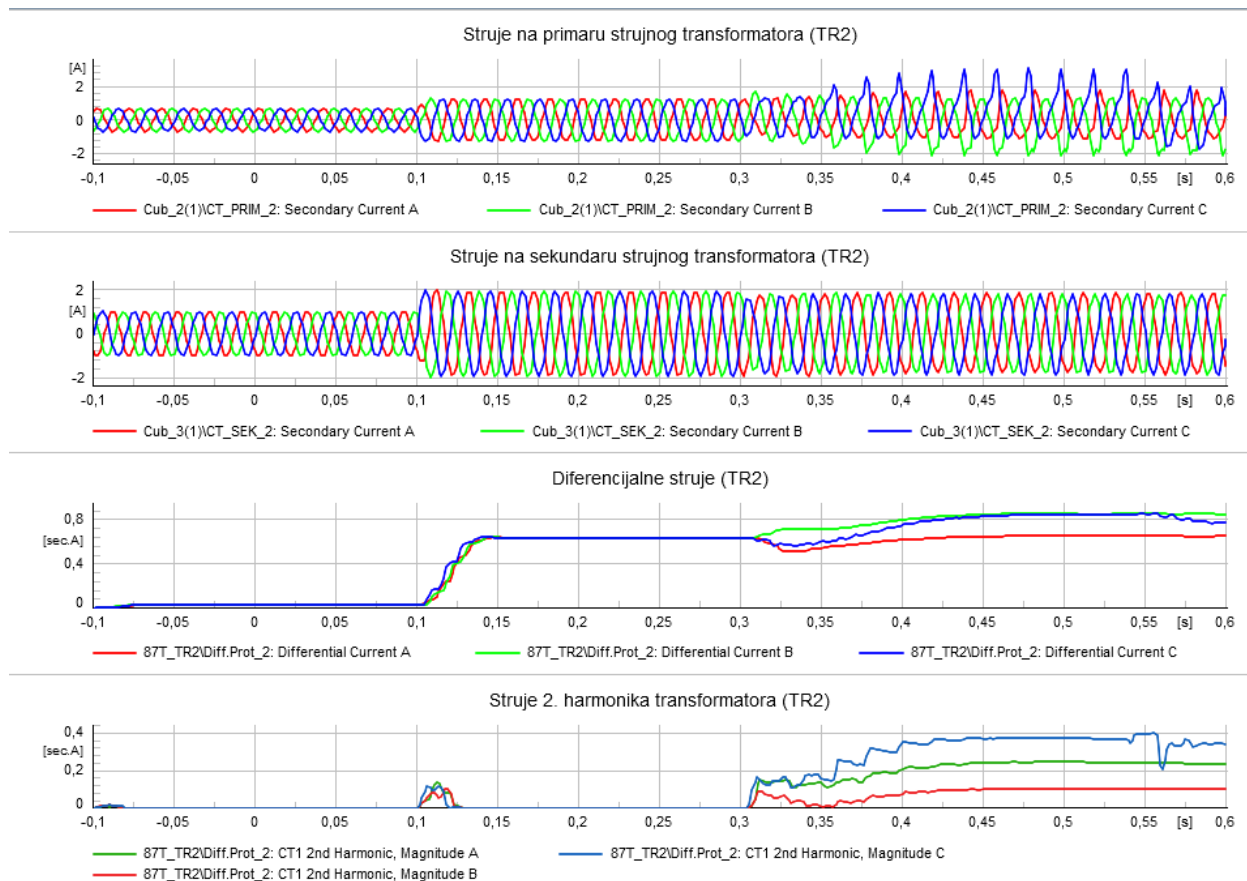
Slika 4.36. Prikaz karakteristika struja (TR1) za vrijeme uključenja transformatora TR1

Struje na primaru strujnog transformatora na transformatoru TR1 (slika 4.36.) imaju sinusni oblik do isključenja koje se dogodi u 0,1s jer prikazani sinusni val manjih amplituda ukazuje na stacionarno stanje modeliranog sustava. Nakon toga vrijednost struje pada na 0 jer se transformator isključuje i nema protoka struje kroz primar te tako ostaju do trenutka 0,3s kada se transformator TR1 ponovno uključuje u mrežu. Nakon 0,3s sinusni oblik se nastavlja sa nešto većom amplitudom što je utjecaj *inrush* struje koja se je javila zbog uključenja transformatora.

Struje na sekundaru strujnog transformatora (slika 4.36.) u trenutku 0,1s poprimaju vrijednost 0A zbog toga što je transformator TR1 izoliran iz mreže.

Diferencijalna struja (slika 4.36.) od početka simulacije do trenutka 0,3s je na vrijednosti 0A nakon čega će postepeno rasti zbog prethodno spomenute *inrush* struje.

Kako bi se zaštitilo lažno aktiviranje diferencijalne zaštite struja drugog harmonika strujnog transformatora raste u trenutku 0,3s jer *inrush* struje sadrže značajnu komponentu drugog harmonika.



Slika 4.37. Prikaz karakteristika struja (TR2) za vrijeme uključenja transformatora TR1

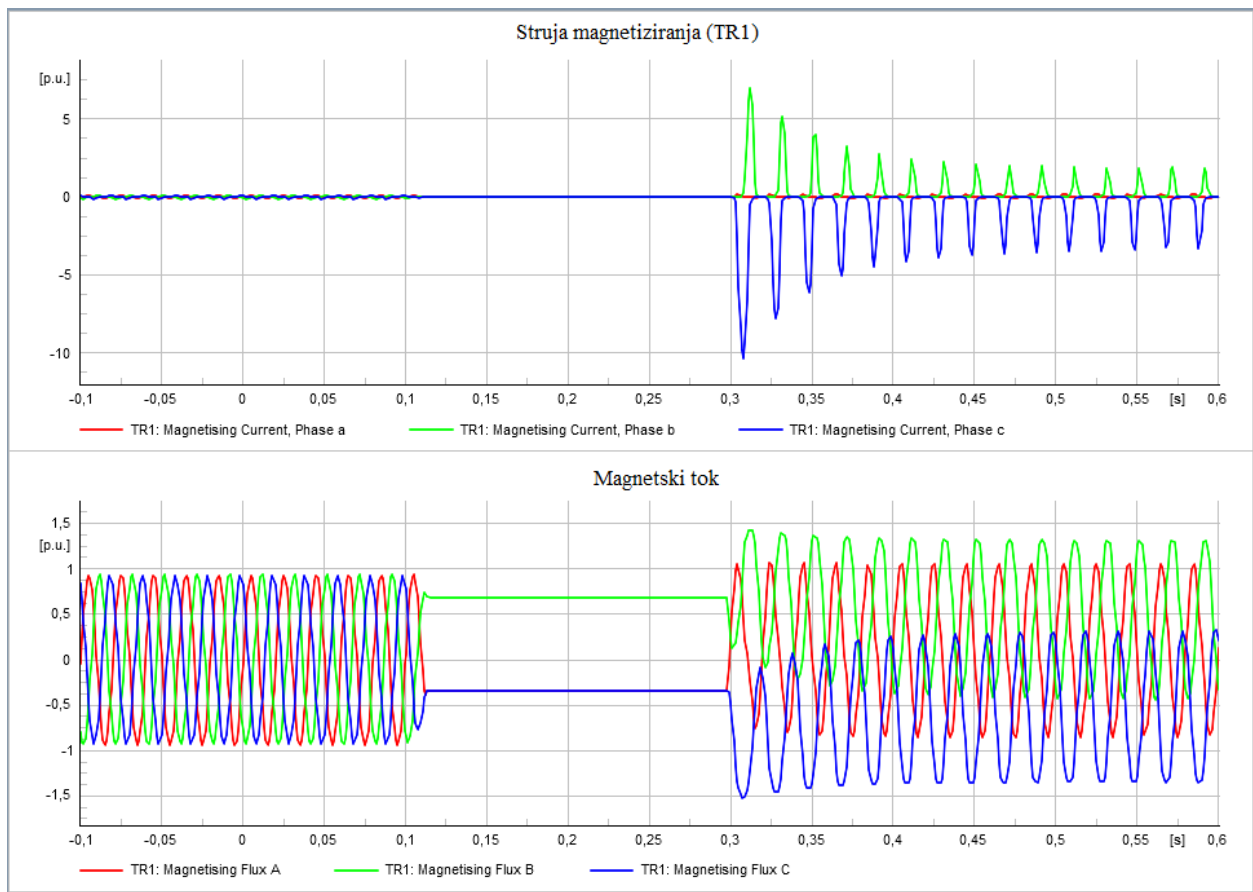
Struje na primaru strujnog transformatora (slika 4.37.) koji je spojen na transformator TR2 imaju struju sinusoidnog oblika manje amplitude do isključivanja transformatora TR1 iz mreže nakon čega naglo rastu na nešto veću amplitudu zbog preraspodjele opterećenja.

Struje na sekundaru strujnog transformatora (slika 4.37.) također će povećati svoju amplitudu u trenutku 0,1s iz jednakog razloga kao i struja na primaru strujnog transformatora (preraspodjela opterećenja).

Diferencijalna će struja (slika 4.37.) početi postepeno rasti u trenutku isključivanja transformatora TR1 zbog preraspodjele opterećenja i strujnih uvjeta. Dodatno će porasti u trenutku uključivanja transformatora TR1 zbog utjecaja *inrush* struja.

Struja drugog harmonika strujnog transformatora (TR2) (slika 4.37.) povećat će se u trenutku ponovnog uključivanja transformatora TR1 u sustav zbog pojave *inrush* struje.

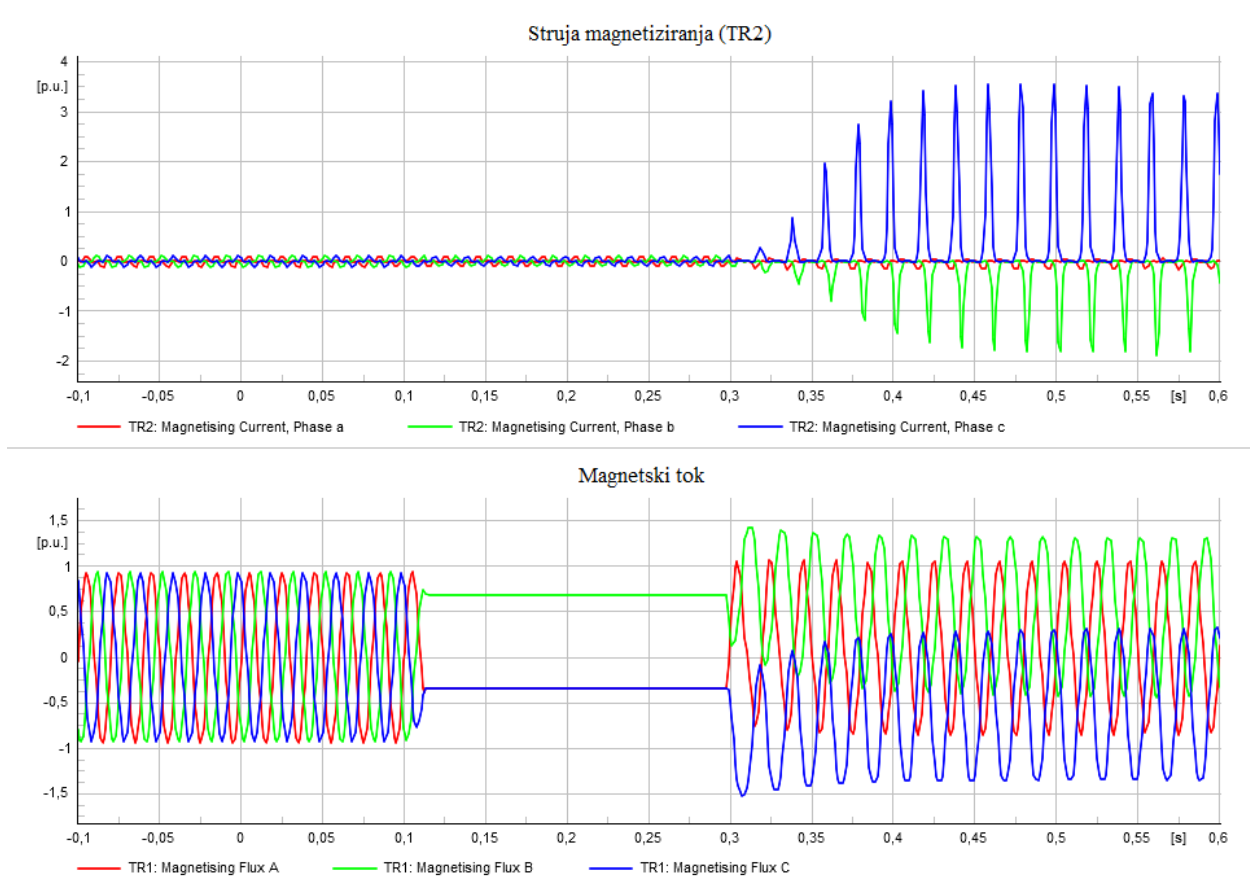
Ove struje koje su prikazane najbolje opisuju simpatetski *inrush*. Zbog ponovnog uključivanja transformatora TR1 u mrežu u trenutku 0,3s, diferencijalne struje na transformatoru TR2 naglo će povećati svoju vrijednost, a samim time i struja drugog harmonika strujnog transformatora.



Slika 4.38. Struje magnetiziranja transformatora i magnetski tok za vrijeme uključenja transformatora TR1 (TR1)

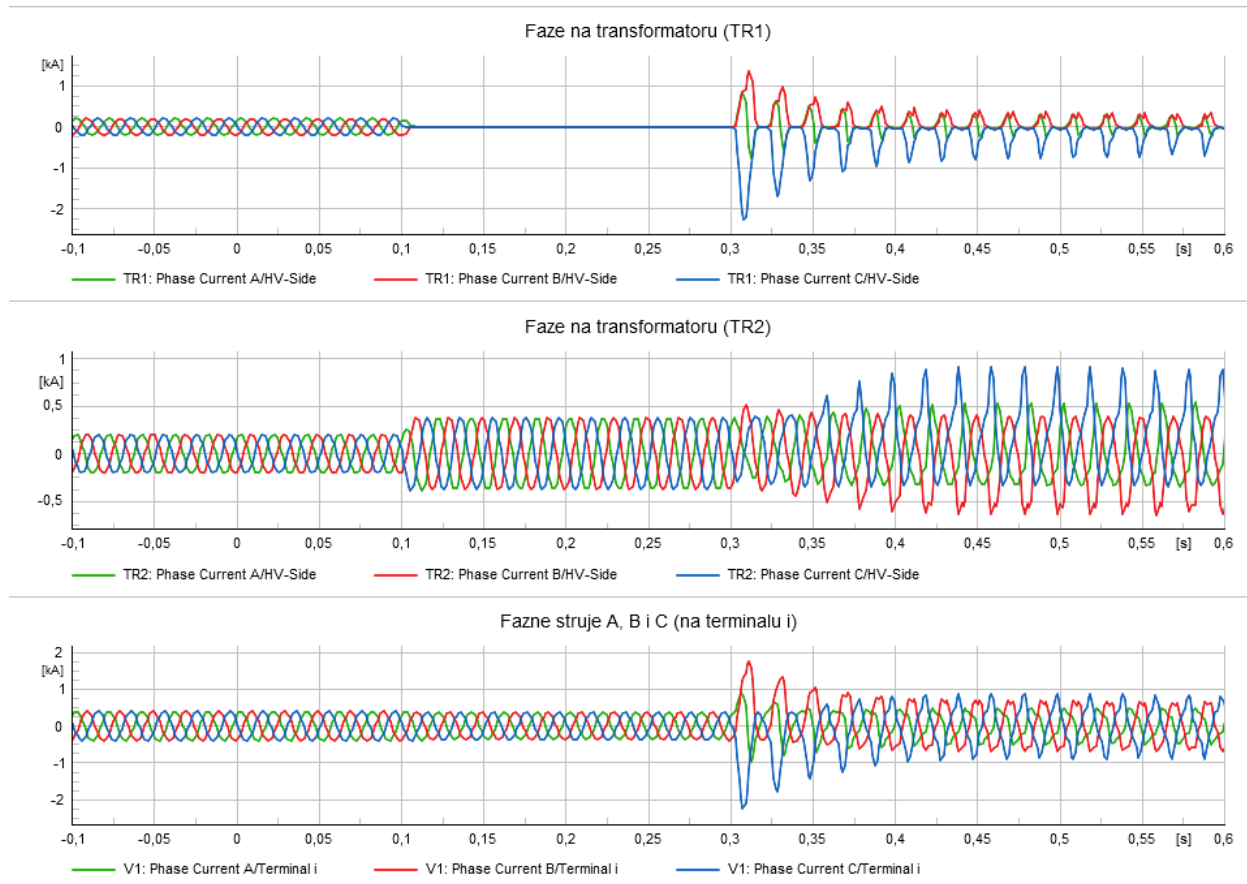
Struje magnetiziranja na transformatoru TR1 (slika 4.38.) niskih su vrijednosti do trenutka isključenja transformatora TR1 iz mreže. Do ponovnog uključenja, struje magnetiziranja padaju na vrijednost 0. Kada se transformator TR1 ponovno uključi u mrežu počinje nagli rast u fazama b i c, dok faza a ima sinusni oblik vrlo niske amplitude. To se događa zbog fenomena *inrush*-a koji se je javio pri ponovnom uključenju transformatora u mrežu.

Od početka simulacije do isključenja transformatora TR1 magnetski su tokovi (slika 4.38.) sinusoidnog oblika jednakih amplituda što upućuje na činjenicu da je modelirani sustav u stacionarnom stanju. U vremenu kad je isključen transformator, magnetski tokovi padaju na konstantnu vrijednost. Nakon ponovnog uključenja transformatora TR1 amplitude magnetiziranog toka će se povećati zbog simpatetskog *inrush*a koji djeluje na oba transformatora jer su spojeni na zajedničku mrežu.



Slika 4.39. Struje magnetiziranja transformatora i magnetski tok za vrijeme uključenja transformatora TR1 (TR2)

Struje magnetiziranja transformatora TR2 (slika 4.39.) bit će sinusoidnog oblika niže amplitude do trenutka 0,3s kada se transformator TR1 ponovno uključuje u mrežu. Naglo će se povećati amplitude (uglavnom u fazama b i c) zbog prethodno spomenutog simpatetskog *inrusha*.



Slika 4.40. *Inrush* struje na transformatorima za vrijeme uključenja transformatora TR1

Slika 4.40. prikazuje fenomen simpatetskog *inrusha* kada se transformator TR1 uključuje dok je transformator TR2 u neprekidnom radu. Može se uočiti kako u trenutku 0,3s (ponovno uključenje transformatora) na fazama sekundara transformatora TR1 amplitude naglo rastu što je izazvano *inrushom*. Ako se pogleda graf ispod, koji prikazuje faze na sekundaru transformatora TR2, u trenutku pojavljivanja *inrush* struje na prvom grafu, uočava se dodatni porast faza zbog kojeg je odgovoran simpatetski *inrush* koji se je pojavio u mreži i koji je utjecao na transformator TR2 (koji je u neprekidnom radu).

5. ZAKLJUČAK

Cilj diplomskog rada bio je analizirati diferencijalnu zaštitu transformatora u paralelnom pogonu. Kroz simulacije koje su odrađene u programskom paketu DIgSILENT *Power Factory* dobiveni su rezultati koji su prikazali mogućnosti i potencijalne poteškoće pri takvom načinu rada.

Provedene simulacije dovele su do zaključka kako će diferencijalna zaštita ispravno funkcionirati u uvjetima stacionarnog stanja, kao i u slučajevima kada se pojave kvarovi unutar ili izvan zaštitne zone.

U slučaju s jednim transformatorom, kao i u slučaju s paralelno spojenim transformatorima, diferencijalna zaštita uvijek je izolirala transformator iz sustava, ako se kvar dogodio unutar zaštitne zone. Ipak, u oba slučaja, a posebno kod paralelnog pogona, uočeno je da prisutnost viših harmonika može ometati rad zaštite.

Simulacije su pokazale kako se u slučaju paralelnog pogona transformatora mogu dogoditi komplikacije kao što su: simpatetski *inrush*, asimetrična raspodjela struja te pojava viših harmonika za vrijeme prijelaznih pojava.

Iz dobivenih se rezultata može zaključiti kako je optimizacija blokade harmonika jedna od najvažnijih aktivnosti pri instaliranju diferencijalne zaštite. Razlog tomu je činjenica da bi se diferencijalna zaštita lažno aktivirala gotovo u svakom prikazanom slučaju (sustav često može prolaziti kroz prijelazne pojave), no blokada harmonika je takav scenarij onemogućila.

LITERATURA

- [1] Peng F., Gao H., Huang J., Guo Y., Liu Y., Zhanh Y.; Power Differential Protection for Transformer Based on Fault Component Network, IEEE transactions on power delivery, vol. 38, no. 4, kolovoz, 2023
- [2] Sevov L., Zhang Z., Voloh I., Cardenas J.,; Differential Protection for Power Transformers With Non-Standard Phase Shifts, 2011 64th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, USA, 2011.
- [3] Gajić Z., Differential Protection for Special Industrial Transformers, IEEE, Transactions on power delivery, vol. 22, no. 4, str (2126-2131), listopad 2007.
- [4] Sevov L., Khan U., Zhang Z., Enhancing power transformer differential protection to improve security and dependability, IEEE Transactions on industry applications, vol. 53, no. 3, svibanj 2017
- [5] R. P. Medeiros, F. B. Costa, K. M. Silva, Power Transformer Differential Protection Using the Boundary Discrete Wavelet Transform, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 31, no 5. str. (2083 - 2095), listopad 2016.
- [6] S. A. Saleh, Senior, E. Ozkop, Digital Differential Protection for 3 ϕ Solid-State Transformers, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no.4, str. (3474.-3486.), kolovoz 2021.
- [7] Sevov L., Kennedy S., Paes R., Ostojić P., Differential protection for medium voltage pulse transformers, IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC), rujanj 2014.
- [8] Solak K., Rebizant W., Schiel L., Differential Protection of Converter Transformers, 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Grandior Hotel Prague Conference Center, Prague, Češka, svibanj 2016.
- [9] Shangase N., Ratshitanga M., Mnguni M., Parallel Power Transformer Current Differential Protection Scheme Based on IEC61850 Standard, IEEE PES/IAS PowerAfrica, Cape Town, Južnoafrička Republika, 2023.
- [10] Sarajčev P., Kosor R., Zaštita u elektroenergetskom sustavu, Predavanja, Sveučilište u Splitu
- [11] Urden E., IEEE (ANSI) Device Number 16 - Ethernet Switches and Routers, 61st Annual Conference for Protective Relay Engineers, travanj 2008.

- [12] Lackovic V., Power Transformer Protection, Continuing Education and Development, Inc., Course No:E06-003,
- [13] Alstom T&D Protection and Control, Protective Relays Application Guide, 1987.
- [14] Geek For Geeks, pristupljeno 1.9.2024., dostupno na: <https://www.geeksforgeeks.org/buchholz-relay/>
- [15] Electrical Easy, Bucholz Relay – Construction,, Working, pristupljeno 1.9.2024., dostupno na: <https://www.electriceasy.com/2014/06/buchholz-relay-construction-working.html>
- [16] Ziegler G., Numerical Differential Protection, SIEMENS, Second Edition, Nuremberg, 2012.
- [17] Arapoglou N., Siderakis K., Differential Protection Schemes and Techniques for Power Transformers – Educational Aspects, *11th International Conference on Deregulated Electricity Market Issues in South-Eastern Europe*, Heraklion, Kreta, Grčka, rujan 2016.
- [18] Csanyi E., Three basic principles of differential protection you should properly understand, Electrical Engineering Portal, pristupljeno 1.9.2024., dostupno na: <https://electrical-engineering-portal.com/three-basic-principles-differential-protection>
- [19] Matacin M., Diferencijalna zaštita transformatora, Diplomski rad, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci, 2020.
- [20] Marković I., Đuran T., Meštrović Z., Potezna struja transformatora, Polytechnic&Design, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Vol.6, No.1, 2018.
- [21] Petrović G., Kilić T., Bego O., Smanjenje udarnih struja uklopa trofaznog energetskog transformatora, Energija, Vol 57., br.3, str (350-367.), 2008.
- [22] Kulkarni S.V., Khaparde S.A., Transformer Engineering Design Technology, Second Edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.
- [23] DiGSILENT PowerFactory, pristupljeno 27.8.2024. dostupno na: <https://www.digsilent.de/en/>
- [24] Hitachi Energy, Maintenance release of Relion® 650 series version 1.1, 2020., pristupljeno: 1.9.2024., dostupno na: <https://www.hitachienergy.com/news-and-events/product-releases/2020/06/2020-06-22-mr-relion-650-series-version-1-1-1-1-0-11>
- [25] Dolenc A., Transformatori I i II, Sveučilište u Zagrebu, Elektrotehnički fakultet, Zagreb, 1987.

SAŽETAK

Analiza i prijedlog podešenja diferencijalne zaštite transformatora u paralelnom pogonu

Ovaj diplomski rad bavi se analizom diferencijalne zaštite transformatora, s posebnim osvrtom na problematiku pri povezivanju transformatora u paralelni pogon.. Diferencijalna zaštita predstavlja temeljnu relejnu zaštitu energetske (mrežnog) transformatora koja odgovara isključivo na kvarove koji se događaju unutar njezine zaštitne zone. Kroz rad su objašnjene osnovne karakteristike diferencijalne zaštite, posebni diferencijalne zaštite transformatora te fenomeni *inrusha* i simpatetskog *inrusha*.

Simulacije su izvršene koristeći programski paket DIGSILENT (Power Factory) u kojem su prikazani rezultati simulacija za različite scenarije. Spomenuti scenariji prikazuju unutarnje i vanjske kvarove te postupak uključivanja transformatora.

Dobiveni rezultati simulacija potvrdili su važnost pravilnog podešenja diferencijalne zaštite transformatora u paralelnom pogonu te prikazali mogućnosti i potencijalne poteškoće pri njezinom korištenju.

Ključne riječi: diferencijalna zaštita, transformator, paralelni pogon, simulacija, DIGSILENT Power Factory, *inrush*, simpatetski *inrush*, zaštitna zona, unutarnji kvar, vanjski kvar, energizacija

ABSTRACT

Analysis and proposal of differential protection of transformers in parallelly operation

This thesis analyses the differential protection of transformers with special emphasis on problems that may occur when transformers are connected in parallel. Differential protection represents the basic relay protection of the power transformer which, responds only to the malfunctions that occur within its protection zone. The thesis also explains the basic characteristics of differential protection, the peculiarities of transformer differential protection, and the phenomena of inrush and sympathetic inrush.

The simulations were performed using the DIGSILENT software package (Power Factory) in which the simulation results for different situations are presented. The mentioned situations show internal and external malfunctions and the process of energizing the transformer.

The obtained results of the simulations confirmed the importance of the correct settings of the differential protection of the transformer in parallel operation and presented the possibilities and potential difficulties in its use.

Keywords: differential protection, transformer, parallel operation, simulation, DIGSILENT Power Factory, inrush, sympathetic inrush, protection zone, internal malfunction, external malfunction, energization