



ICES  
VIŠJA STROKOVNA ŠOLA

Diplomsko delo višješolskega strokovnega študija  
Program: Inženir elektroenergetike  
Modul: Elektroenergetska učinkovitost in električne  
inštalacije

## **Nesimetrije napetosti na distribucijskem omrežju SN/NN**

Mentor: mag. Jože Kragelj, univ. dipl. inž. el.  
Lektorica: Polona Hadalin Baša, univ. dipl. slov.

Kandidatka: Anja Vičič

Ljubljana, junij 2021

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorju mag. Jožetu Kraglju, univ. dipl. inž. el., somentorjema Antonu Majcnu, univ. dipl. inž. el., in Francu Prepeluhu, univ. dipl. inž. el., ter mag. Georgiju Zlatarevu.

Za pomoč in nasvete pri izdelavi diplomskega dela se zahvaljujem podjetju Kolektor Etra d.o.o. in Petru Ogrincu, inž. el. energ. za možnost opravljanja meritev na izbranem transformatorju; podjetju Kolektor Igin d.o.o., mag. Aleksandru Krašovcu in Andražu Kraglju za pripravo zaščitnega IED za izvedbo meritev; podjetju Elektro Ljubljana d.d., Mitju Kosu in Angelu Mihelčiču za izposajo potrebnih komponent (merilnih transformatorjev in ostale potrebne opreme) za izvedbo meritev v podjetju Kolektor Etra d.o.o. ter podjetju Elektro Maribor d.d. za enopolno shemo. Hvala tudi Ani Urh in Dejanu Jogerju.

Zahvaljujem se tudi lektorici Poloni Hadalin Baša, ki je diplomsko delo jezikovno in slovnično pregledala.

Posebej se zahvaljujem očetu Milanu Vičiču za vso potrpežljivost in podporo v času šolanja ter mami Katarini Pranklin in stari mami Ljubici Vugrinec za vse spodbudne besede.

## IZJAVA

Študentka Anja Vičič izjavljam, da sem avtorica tega diplomskega dela, ki sem ga napisala pod mentorstvom mag. Jožeta Kraglja, univ. dipl. inž. el., in somentorjev Antona Majcna, univ. dipl. inž. el., in Franca Prepeluha, univ. dipl. inž. el.

Skladno s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorski in sorodnih pravicah dovoljujem objavo tega diplomskega dela na spletni strani šole.

Dne \_\_\_\_\_

Podpis: \_\_\_\_\_

## **POVZETEK**

V elektroenergetskih sistemih se, zlasti v srednje napetostnih distribucijskih omrežjih, pojavi stanje prekinjene faze. To so lahko prekinjen vodnik, slab stik ali pregorela varovalka na SN-prostih vodih. V nekaterih primerih je prekinitev faze lahko na kontaktu samega odklopnika. Naštete napake obravnavamo kot serijske okvare, ostale okvare so prečne okvare kot faza-faza, faza-zemlja in faza-faza-zemlja. Poleg tega je prekinjeno fazo na primarni strani SN-transformatorja zelo težko zaznati na sekundarni NN-strani, saj na SN-strani nimamo ustrezne opreme (tokovniki, napetosniki).

Zaznavanje serijskih okvar je odvisno od tipa jedra in vezne skupine transformatorja ter stopnje obremenitve na NN-strani. Problematika prekinitve ali pretrg vodnika povzroči tudi nevarnost za ljudi in živali, ki so naključno na mestu okvare, saj vodnik ostane pod napetostjo in nobena zaščita ne deluje na izklop oziroma signalizira okvaro v nadzorne centre distribucije.

Tako stanje lahko povzroči veliko materialno škodo, ne samo zaradi izpada dobave električne energije, ampak tudi večje motnje na strani potrošnikov, saj so take napetostne razmere nedopustne za normalno obratovanje.

## **KLJUČNE BESEDE**

- prekinitev faze
- nesimetrija napetosti
- simetrične komponente
- meritve nesimetrij napetosti in tokov

## **ABSTRACT**

The event of interrupted phase line occurs, especially in medium voltage distribution networks. This can be a broken conductor, poor contact, or a blown fuse on the MV overhead lines. There are some cases, the phase interruption is at the contact of the circuit breaker. These faults are considered serial faults. Other faults, such as short circuit phase-phase, phase-earth, and phase-phase-earth are parallel faults. The broken conductor fault on the MV side of the transformer is difficult to detect on the LV side because there is no appropriate protection equipment on the MV side (voltage and current instrument transformers).

The detection of series faults depends on the type of core, connecting group, and the load of the transformer. A broken conductor is also a danger to people and animals that are accidentally at the point of failure because the phase conductor remains energized and no protection device acts on shutdown or signals the failure to the control center.

This can cause material damage, not only due to the disruption of supply on the part of consumers but also unacceptable voltage conditions for normal operation.

## **KEYWORDS**

- Broken conductor
- Voltage asymmetry
- Symmetrical components
- Measurement of voltage and current asymmetry

## KAZALO

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | UVOD .....   | 1  |
| 1.1   | Predstavitev problema.....   | 1  |
| 1.2   | Cilji DIPLOMSKEGA DELA .....   | 1  |
| 1.3   | Predstavitev okolja .....  | 1  |
| 1.4   | Predpostavke in omejitve .....   | 2  |
| 1.5   | Metode dela .....  | 2  |
| 2     | SPLOŠNO O DISTRIBUCIJSKIH TRANSFORMATORJIH.....  | 2  |
| 3     | TRIFAZNI TRANSFORMATORJI .....   | 6  |
| 3.1   | Tristebno jedro .....  | 7  |
| 3.3   | Vezave in označbe .....  | 8  |
| 3.4   | Obratovanje trifaznega transformatorja .....   | 9  |
| 3.4.1 | Simetrična trifazna obremenitev .....  | 9  |
| 3.4.2 | Enofazna obremenitev brez ničlovoda na primarni strani.....  | 10 |
| 4     | ANALIZA RAZMER PO PREKINITVI FAZE NA PRIMARJU TRANSFORMATORJA SN/NN.....   | 12 |
| 4.1   | Prekinitev faze L1 na primarni strani transformatorja Yzn5.....  | 13 |
| 4.2   | Prekinitev faze L2 na primarni strani transformatorja Yzn5.....  | 15 |
| 5     | PRIKAZ IZRAČUNA PO METODI SIMETRIČNIH KOMPONENT .....  | 17 |
| 5.1   | Predstavitev prekinitve faze L1 na primarni strani transformatorja s pomočjo teorije simetričnih komponent za Yzn5.....  | 17 |
| 5.1.1 | Simetrične komponente na sekundarni strani .....   | 18 |
| 5.1.2 | Rekompozicija komponent v fazorje napetosti na sekundarni strani .....   | 18 |
| 5.1.3 | Razdelitev tokov s pomočjo simetričnih komponent pri prekinitvi faze L1  | 20 |
| 5.1.4 | Izhodišče na primarni strani.....  | 20 |
| 5.1.5 | Izračunamo simetrične komponente .....   | 20 |
| 5.2   | Predstavitev prekinitve faze L2 na primarni strani transformatorja s pomočjo teorije simetričnih komponent za Yzn5.....  | 22 |
| 5.3   | Predstavitev prekinitve faze L1 na primarni strani transformatorja s pomočjo teorije simetričnih komponent za Dyn5 ..... | 25 |
| 5.3.1 | Predstavitev prekinitve faze L1 na primarni strani transformatorja s pomočjo teorije simetričnih komponent za Dyn5.....  | 25 |
| 5.4   | Modeliranje prekinitve faze za Dyn5 s PSCAD-programsko opremo .....  | 30 |
| 5.4.1 | Simulacijski model.....  | 31 |
| 5.4.2 | Simulacije obratovalnih stanj .....  | 31 |
| 6     | MERITVE NESIMETRIJE U IN I PO PREKINITVI FAZE NA PRIMARJU SN/NN-TRANSFORMATORJU .....                                    | 39 |
| 6.1   | Meritve na transformatorju Yzn5 za različna obratovalna stanja in prekinitve faz na primarni strani transformatorja..... | 40 |
| 7     | IZRAČUN SEKUNDARNIH VREDNOSTI FAZORJEV U, I PO METODI SIMETRIČNIH KOMPONENT .....  | 48 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 7.1   | Izračun simetričnih komponent na sekundarju TRANSFORMATORJA v primeru prekinitve zunanje faze (L1) na primarni strani transformatorja .....  | 48 |
| 7.1.1 | Nesimetrija tokov – prekinitev faze L1 na primarni strani transformatorja  | 48 |
| 7.1.2 | Nesimetrija napetosti – prekinitev faze L1 na primarni strani transformatorja .....  | 51 |
| 7.2   | Izračun simetričnih komponent na sekundarju TRANSFORMATORJA v primeru prekinitve NOTRANJE faze (L2) na primarni strani transformatorja ..... | 55 |
| 7.2.1 | Nesimetrija tokov – prekinitev faze L2 na primarni strani transformatorja  | 55 |
| 7.2.2 | Nesimetrija napetosti – prekinitev faze L2 na primarni strani transformatorja .....  | 58 |
| 8     | SKLEP .....  | 62 |
| 9     | LITERATURA.....  | 64 |

## KAZALO SLIK

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Slika 1:  | TP na drogu, (Vir: lastni) .....   | 3  |
| Slika 2:  | Enočrtna shema TP Kopitnik (Vir: Elektro Ljubljana d.d.) .....   | 4  |
| Slika 3:  | Enočrtna shema sodobne TP na drogu SN/NN (Vir: Elektro Maribor d.d) ....   | 5  |
| Slika 4:  | Tristebni transformator in tudi kazalčni diagram faznih napetosti in magnetnih pretokov, (Vir: Miljavec Damijan in Jereb Peter (2005). Električni stroji, temeljna znanja) ..... | 8  |
| Slika 5:  | Vezna skupina Yzn5, (Vir: lastni) .....  | 9  |
| Slika 6:  | Vezava enofazno obremenjenega TP Dyn, ki na primarni strani nima ničlovoda, (Vir: lastni) .....  | 11 |
| Slika 7:  | Vezava enofazno obremenjenega TP Yzn, ki na primarni strani nima ničlovoda, (Vir: lastni) .....  | 12 |
| Slika 8:  | Prekinitev faze L1 na primarni strani transformatorja Yzn5, (Vir: lastni) .....  | 13 |
| Slika 9:  | Kazalčni diagram napetosti na sponkah in navitjih po prekinitvi zunanje faze L1, (Vir: lastni) .....   | 14 |
| Slika 10: | Kazalčni diagram napetosti na sponkah in navitjih po prekinitvi notranje faze L2 (Vir: lastni) .....   | 16 |
| Slika 11: | Kazalčni diagram napetosti na sekundarni strani po prekinitvi zunanje faze L1, (Vir: lastni) .....   | 19 |
| Slika 12: | Kazalčni diagram napetosti in tokov primarni in sekundarni strani po prekinitvi zunanje faze L1, (Vir: lastni) .....   | 21 |
| Slika 13: | Kazalčni diagram napetosti na sekundarni strani po prekinitvi zunanje faze L1 (Vir: lastni) .....  | 24 |
| Slika 14: | Vezna skupina Dyn5, (Vir: lastni) .....  | 25 |
| Slika 15: | Prekinitev faze L1 na primarni strani transformatorja Dyn5, (Vir: lastni) ...  | 26 |
| Slika 16: | Navitji 1UV in 1WU na sliki sta vezani zaporedno na isto medfazno napetost $U_{vw}$ , (Vir: lastni).....   | 26 |
| Slika 17: | Navitje 1VW dobi polno napetost, (Vir: lastni) .....   | 27 |

|   |    |
|---|----|
| Slika 18: Prikaz razporeditev napetosti pri prekinitvi faze v trikotu, (Vir: lastni) .....  | 28 |
| Slika 19: Simulacijsko omrežje in transformator Dyn5, (Vir: PSCAD) .....  | 31 |
| Slika 20: Prikaz fazorjev faznih in medfaznih napetosti na primarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN v praznem teku, (Vir: PSCAD) .....                                | 32 |
| Slika 21: Prikaz fazorjev faznih in medfaznih napetosti na sekundarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN v praznem teku, (Vir: PSCAD) .....                              | 32 |
| Slika 22: Trifazni transformator s trifaznim bremenom na sekundarju 3 x 7 kW, (Vir: PSCAD) .....  | 33 |
| Slika 23: Prikaz fazorjev faznih in medfaznih napetosti na primarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 3 x 7 kW, (Vir: PSCAD) .....   | 33 |
| Slika 24: Prikaz fazorjev faznih in medfaznih napetosti na sekundarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 3 x 7 kW, (Vir: PSCAD) ..... | 34 |
| Slika 25: Prikaz faznih tokov na sekundarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 3 x 7 kW, (Vir: PSCAD) .....                           | 34 |
| Slika 26: Trifazni transformator s trifaznim bremenom na sekundarju breme = 25 kW ( $\cos\varphi = 0.95$ ) in prekinjeno fazo L1, (Vir: PSCAD) .....                                      | 35 |
| Slika 27: Prikaz fazorjev faznih in medfaznih napetosti na primarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L1 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 25 kW .....                    | 35 |
| Slika 28: prikaz fazorjev faznih tokov na primarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L1 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 25 kW, (Vir: PSCAD) .....                       | 36 |
| Slika 29: prikaz fazorjev faznih in medfaznih napetosti na sekundarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L1 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 25 kW, (Vir: PSCAD) .....    | 36 |
| Slika 30: prikaz fazorjev faznih tokov na sekundarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L1 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 25 kW, (Vir: PSCAD) .....                     | 37 |
| Slika 31: Trifazni transformator s trifaznim bremenom na sekundarju breme = 25 kW ( $\cos\varphi=0.95$ ) in prekinjeno fazo L2, (Vir: PSCAD) .....  | 37 |
| Slika 32: prikaz fazorjev faznih in medfaznih napetosti na primarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 25 kW, (Vir: PSCAD) .....      | 38 |
| Slika 33: prikaz fazorjev faznih tokov na primarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 25 kW, (Vir: PSCAD) .....                       | 38 |
| Slika 34: prikaz fazorjev faznih in medfaznih napetosti na sekundarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 25 kW, (Vir: PSCAD) .....    | 39 |
| Slika 35: prikaz fazorjev faznih tokov na primarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L1 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 25 kW, (Vir: PSCAD) .....                       | 39 |
| Slika 36: Vezava merilne opreme, (Vir: lastni) .....  | 41 |
| Slika 37: IED - numerični zaščitni terminal 7SJ85 Siemens, (Vir: lastni) .....  | 42 |
| Slika 38: TR Yzn5, 50kVA, 20/0,4 kV, (Vir: lastni) .....  | 43 |



|   |    |
|---|----|
| Slika 39: Napisna tablica TR, (Vir: lastni).....  | 43 |
| Slika 40: Merilno vezje v laboratoriju Kolektor Etra, (Vir: lastni) .....               | 44 |
| Slika 41: Prekinitev faze L1 na primarni strani transformatorja Yzn5, (Vir: lastni) ... | 44 |
| Slika 42: Prekinitev faze L2 na primarni strani transformatorja Yzn5, (Vir: lastni) ... | 46 |

## **KAZALO TABEL**

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1: Legenda slike Simulacijsko omrežje in transformator Dyn5, (Vir: PSCAD) ..... | 31 |
| Tabela 2: Prekinitev L1: Tabela Sigra in oznake IEC, (Vir: SIGRA) .....                | 45 |
| Tabela 3: Prekinitev L2, Tabela Sigra in oznake IEC, (Vir: SIGRA) .....                | 47 |
| Tabela 4: Tabela Sigra – tokovi, prekinitev L1, (Vir: SIGRA) .....                     | 51 |
| Tabela 5: Tabela Sigra – napetosti, prekinitev L1, (Vir: SIGRA) .....                  | 55 |
| Tabela 6: Tabela Sigra – tokovi, prekinitev L2, (Vir: SIGRA) .....                     | 58 |
| Tabela 7: Tabela Sigra – napetosti, prekinitev L2, (Vir: lastni) .....                 | 62 |

## KRATICE IN AKRONIMI

|           |  |
|-----------|--|
| SN        | srednja napetost   |
| NN        | nizka napetost   |
| EE        | električna energija  |
| TP        | transformatorska postaja   |
| IED       | intelligent electronic device (angl.), inteligentna elektronska naprava  |
| Yzn5      | vezava transformatorja   |
| Dyn5      | vezava transformatorja   |
| DEES      | distribucijski elektroenergetski sistem  |
| NIT       | napetostni instrumentni transformator  |
| TIT       | tokovni instrumentni transformator   |
| Re        | realna os  |
| Im        | imaginarna os  |
| PSCAD     | Power Systems Computer Aided Design (angl.), simulacijski program za simulacijo elektromagnetnih prehodnih pojavov |
| EMTDC     | Electro-Magnetic Transients with DC (angl.), elektromagnetni prehodni pojavi z enosmerno komponento                |
| EIMV      | Elektroinštitut Milan Vidmar   |
| IEC       | International Electrotechnical Commission (angl.)  |
| ANSI 46BC | zaščita pri prekinitvi faze  |

## Simboli

|                       |                                       |
|-----------------------|---------------------------------------|
| L1, L2, L3            | faza                                  |
| R                     | ohmska upornost                       |
| $\underline{I}$       | fazor toka                            |
| $\underline{U}$       | fazor napetosti                       |
| $\underline{I}_{(1)}$ | pozitivna komponenta                  |
| $\underline{I}_{(2)}$ | negativna komponenta                  |
| $\underline{I}_{(0)}$ | nična komponenta                      |
| $\cos\varphi$         | faktor delavnosti oziroma faktor moči |
| $\underline{a}$       | enotski vektor                        |

# 1 UVOD

## 1.1 PREDSTAVITEV PROBLEMA

Za vse uporabnike elektrodistribucijskega omrežja predstavlja nihanje napetosti in tokov veliko težavo, prav tako pa predstavlja težavo tudi elektrodistribucijskim podjetjem, ki so zavezana, da bodo vzdrževala konstantno napetost za vse uporabnike ne glede na lokacijo merilnega mesta. V zadnjem času se na distribucijsko omrežje priključuje veliko naprav za proizvodnjo električne energije, kar posledično še otežuje vzdrževanje konstantne napetosti oziroma preprečevanje nesimetrij napetosti v distribucijskem omrežju. V diplomskem delu se osredotočamo na nesimetrije tokov in napetosti, povzročene zaradi izpada ene faze na primarni sredjenapetostni strani transformatorja. Težava zaznave izpada ene faze na primarni strani je pomanjkanje merilnih naprav oziroma merilnih transformatorjev na primarni strani transformatorja.

## 1.2 CILJI DIPLOMSKEGA DELA

Cilji diplomskega dela so ovrednotiti nesimetrije tokov in napetosti zaradi prekinitve vodnika na primarni strani transformatorja s pomočjo opravljenih meritev na transformatorju v podjetju Kolektor Etra in na podlagi simulacij izpada ene faze, s katerimi smo pridobili parametre na sredjenapetostni in nizkonapetostni strani transformatorja. Rezultate smo potrdili z izračuni s simetričnimi komponentami, ki se uporabljajo za izračun nesimetrije napetosti in tokov.

## 1.3 PREDSTAVITEV OKOLJA

Nihanje napetosti oziroma nesimetrije napetosti se pojavljajo v distribucijskem omrežju. V diplomskem delu smo obravnavali nihanje napetosti oziroma nesimetrije napetosti na srednji napetosti 20 kV in nizki napetosti 400 V.

Sistemske operater distribucijskega omrežja SODO d.o.o. je v Sloveniji pooblastil pet podjetji, ki v njegovem imenu upravljajo in vzdržujejo distribucijsko omrežje. Ta podjetja so Elektro Ljubljana d.d., Elektro Primorska d.d., Elektro Maribor d.d., Elektro Gorenjska d.d. in Elektro Celje d.d. Zaradi pokrajinske raznolikosti v Sloveniji se podjetja srečujejo z različnimi izzivi, da zagotavljajo kakovostno oskrbo z električno energijo končnim odjemalcem.

## 1.4 PREDPOSTAVKE IN OMEJITVE

V delu predpostavljamo, da nihanje napetosti oziroma nesimetrija napetosti in tokov povzroča težave končnim odjemalcem električne energije ter negativno vpliva na delovanje in življenjsko dobo strojev ter vseh drugih električnih naprav. Izmerili smo nesimetrije napetosti in tokov ter določili, kakšne so vrednosti nesimetrije napetosti glede na obravnavan izpad določene faze na primarni strani transformatorja in odziv na NN-strani transformatorja.

Omejitve pri izdelavi diplomskega dela so se pojavile predvsem iz naslova različnih transformatorjev oziroma njihovih vezav, ki jih uporabljajo distribucijska omrežja, vendar smo težavo uspešno rešili s pomočjo simulacij in meritev v laboratoriju. Meritev na živem omrežju ni bilo mogoče izvesti.

## 1.5 METODE DELA

V teoretičnem delu diplomskega dela je uporabljena opisovalna metoda, ki predstavi distribucijske trifazne transformatorje in pojav nesimetrij na distribucijskem omrežju, ki jih v praktičnem delu obravnavamo po metodi simetričnih komponent.

V praktičnem delu je uporabljena tudi sintetična metoda, saj skozi diplomsko delo razčlenimo delovanje vsake faze in vodnika posebej v naravnem stanju ali stanju pri prekinitvi enega vodnika, kar se skozi izračune oziroma meritve ponovno obravnava kot združeno stanje, ki nas zanima.

## 2 SPLOŠNO O DISTRIBUCIJSKIH TRANSFORMATORJIH

V SN-distribucijskih sistemih so pogosto vgrajeni manjši transformatorji, na primer manjši kot 1000 kVA. Transformatorji so na SN-strani zaščiteni samo s SN-varovalkami z udarno iglo, ki deluje na izklop SN-odklopnika. Izpad ene ali dveh faz na SN-strani povzroči tudi nesimetrijo na NN-strani. Primer pregretja SN-varovalke ali prekinitve vodnika lahko zaznamo samo na NN-strani, ker na SN nimamo vgrajenih NIT. Detekcija na NN-strani je, zaradi prekinitve faze na SN-strani, problematična pri nizkih obremenitvah na NN-strani. Težava nastane pri trifaznih porabnikih, posebej velja to pri asinhronih motorjih. Verodostojna detekcija bi bazirala na podlagi uporabe simetričnih komponent: inverzni komponenti napetosti  $\underline{U}_{(2)}$  in inverzni komponenti tokov  $\underline{I}_{(2)}$ .

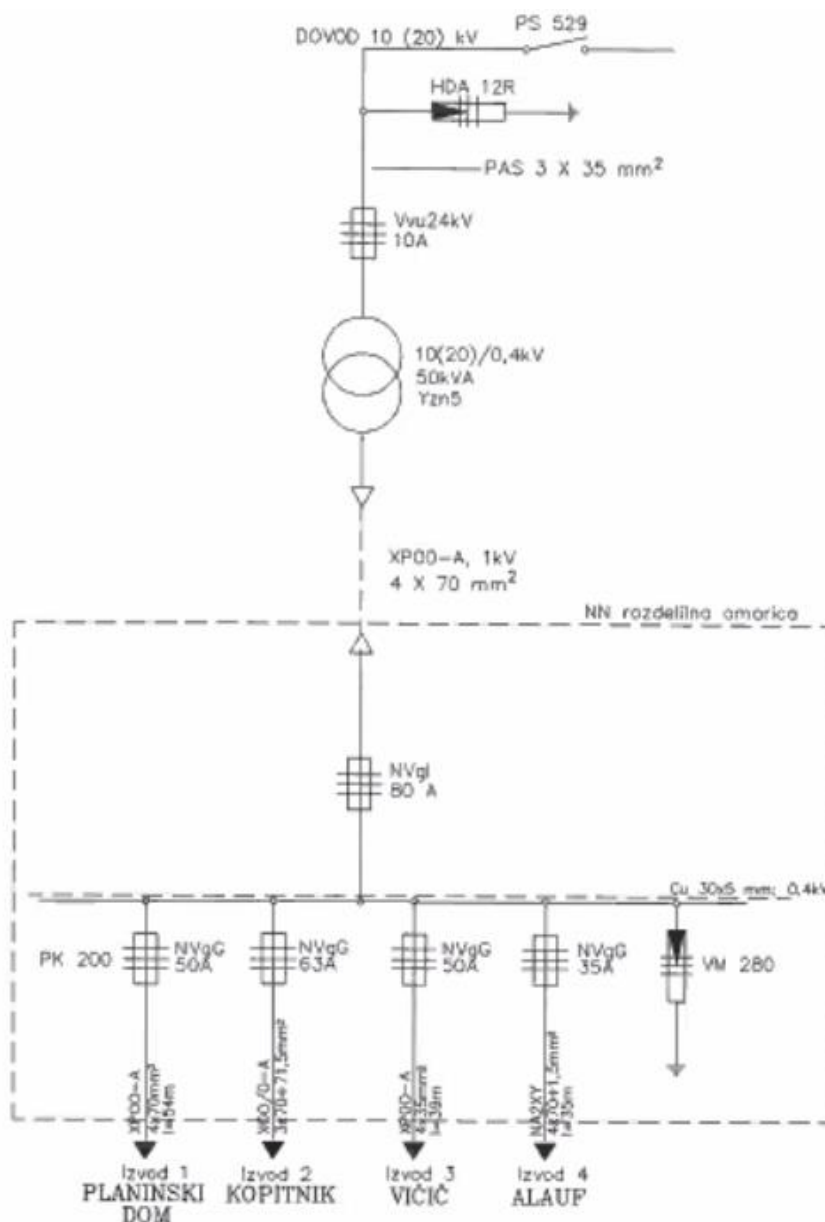
V slovenskem distribucijskem omrežju uporabljamo transformatorje, ki imajo moč manjšo od 250 kVA SN/NN v vezavi Yzn5. Zvezdišče na SN-transformatorju ni ozemljeno. Za večje transformatorje od 250 kVA SN/NN pa v vezavi Dyn5. Na NN-

strani je zvezdišče vedno ozemljeno. Vezava Yzn5 zaradi enofaznih porabnikov na NN-strani dopušča trajno obremenitev v ničlovod z nazivnim tokom. Dejansko lahko pri nižjih obremenitvah, tudi do 50 %, transformator normalno deluje ure in ure, morda tudi dlje, s sprejemljivo uravnoteženimi napetostmi in tokovi na NN-strani, medtem ko je na SN-strani faza prekinjena. Obstoječa standardna oprema v zgoraj navedenih TP ne vsebuje opreme s tehnologijo na osnovi simetričnih komponent, zato omenjene prekinitve ne moremo zaznati. Slika 1 prikazuje TP na drogu.



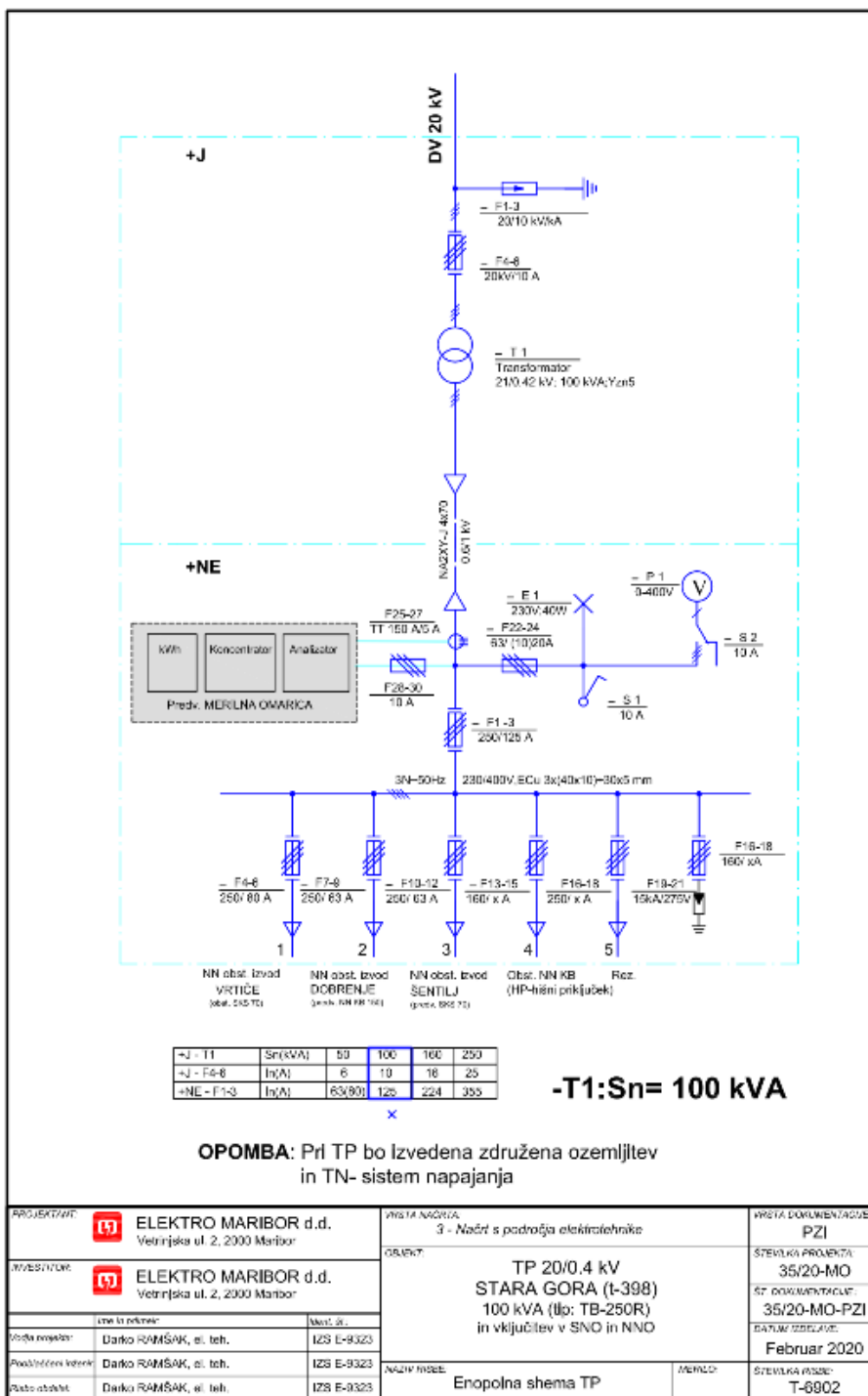
*Slika 1: TP na drogu  
(Vir: lastni)*

V NN-omaricah TP na drogu, predstavljene na sliki 2, so bile do nedavnega le varovalke in prenapetostni odvodniki, včasih pa tudi števcji električne energije, vendar ga v tej omarici na sliki ni.



Slika 2: Enočrtna shema TP Kopitnik,  
(Vir: Elektro Ljubljana d.d.)

Slika 3 prikazuje enočrtno shemo TP na drogu SN/NN 100 kVA, vezave Yzn5 z najnovejšo opremo na sekundarni strani.



Slika 3: Enočrtna shema sodobne TP na drogu SN/NN (Vir: Elektro Maribor d.d.)

Sodobna TP na drogu je opremljena z dodatno merilno omarico, ki vsebuje sodobni digitalni števec, komunikator in analizador. Slednji omogoča daljinski nadzor kakovosti

električne energije ter javljanje alarmov in anomalije obratovalnih veličin v realnem času.

Pričujoče diplomsko delo predstavlja možne rešitve nadgradnje zaščitnega sistema za take izredne primere anomalij, kot je prekinitev vodnika na SN-strani, ki se manifestira na NN-strani. IED-naprava mora vsebovati algoritem na osnovi simetričnih komponent, ki v realnem času zazna inverzno komponento napetosti in toka. Za te primere bi zaščita omogočila zanesljivo detekcijo v realnem času, daljinsko javljanje v centre vodenje ter ukrepanje, skladno z obratovalnimi navodili. V nadaljnjem razvoju programske opreme bi lahko ta zaščita omogočila tudi odklop voda in preprečila nevarno stanje na terenu.

Anomalija ob prekinitve faze se lahko pojavi tudi pri razpršenih virih pridobivanja energije: bioplinarne ter sončne in vetrne elektrarne, ki se nahajajo na podeželskih ali oddaljenih območjih, kjer je velika možnost nastanka prekinitve faze na SN-distribucijskem omrežju.

Sprva se lahko zdi, da bo prekinjena faza na primarni strani transformatorja povzročila dovolj veliko nesimetrijo na sekundarni strani, ki jo je mogoče zaznati na NN-strani. Nesimetrija toka in napetosti na sekundarni strani je odvisna od konfiguracije navitja in včasih od konstrukcije jedra. Pri transformatorjih v vezavi Yzn5 z neozemljenim zvezdiščem na SN-strani bi prekinjena faza povzročila večjo nesimetrijo napetosti in tokov, ki jih je mogoče zaznati. Medtem ko je pri vezavi YN z ozemljenim SN-zvezdiščem nesimetrijo bistveno težje zaznati, zlasti pri majhnih obremenitvah. Ozemljeno zvezdišče YN pa ni praksa v slovenskem DEES.

### 3 TRIFAZNI TRANSFORMATORJI

Elektroenergetski sistem delimo na nizkonapetostni, sredjenapetostni in visokonapetostni sistem. Nizkonapetostni sistemi za široko potrošnjo ima ničelni vodnik, da lahko priključimo tudi enofazne odjemalce. Visokonapetostni in sredjenapetostni sistemi so načeloma brez ničlovoda. Sisteme različnih napetosti med seboj povežemo s transformatorji. Transformator z dvema ali več navitij z elektromagnetno indukcijo pretvarja sistem izmenične napetosti in toka, v drug sistem napetosti ter toka, navadno drugačnih velikosti in iste frekvence. Najpogosteje so trifazni transformatorji zgrajeni z enim železnim jedrom, ki ima navitja za vse tri faze. Takšna izvedba trifaznega transformatorja je najcenejša. V posebnih primerih pa namesto enega trifaznega transformatorja uporabimo tri enofazne, za vsako fazo po en transformator. Primer uporabe treh enofaznih transformatorjev je pri največjih močeh, kadar je en trifazni transformator prevelik, da bi ga lahko transportirali od mesta izdelave do mesta delovanja.

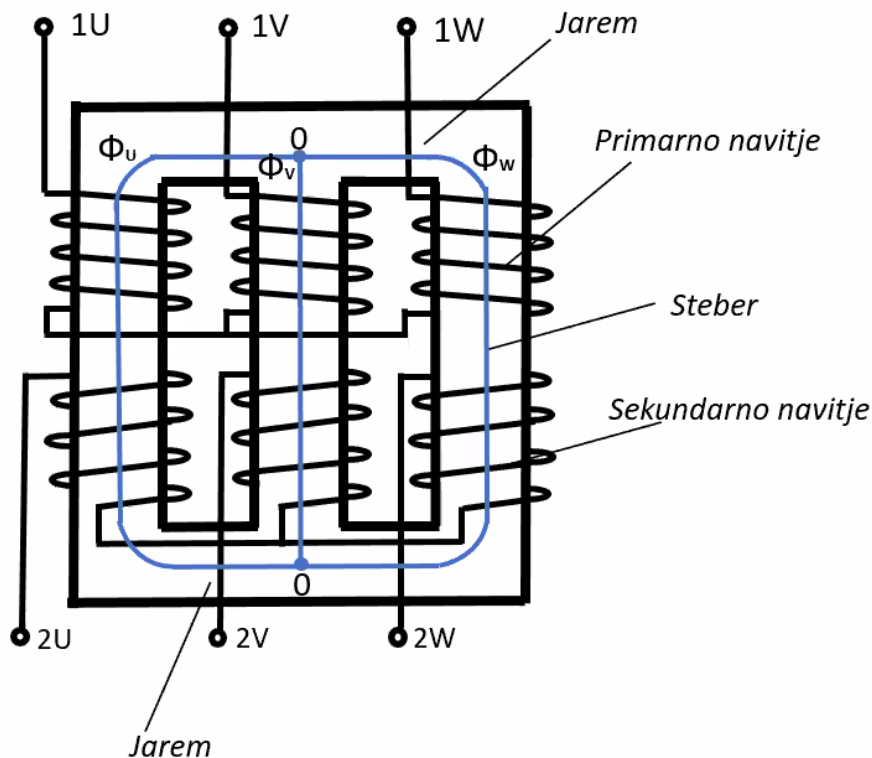


### 3.1 TRISTEBRNO JEDRO

Za trifazne transformatorje manjših in srednjih moči se večinoma uporablja tristébrno jedro. Petstébrno jedro se uporablja samo v primerih največjih moči transformatorja.

Na sliki 4 je predstavljen tristébrni transformator. Vsi trije stebri so zgoraj in spodaj magnetno povezani z jarmom. Vsak steber je nekakšen enofazni transformator, kot smo ga omenili v tretjem poglavju. Vsakemu primarnemu navitju vsilimo eno od faznih napetosti trifaznega sistema  $U_U$ ,  $U_V$  in  $U_W$ . Vsaka od teh napetosti v svojem stebru povzroči magnetni pretok  $\phi_U$ ,  $\phi_V$  in  $\phi_W$ . Magnetna polja oziroma magnetni pretoki nastanejo zaradi napetostnega ravnotežja in so fazno premaknjeni od svojih napetosti za četrto periodo oziroma  $90^\circ$ . Na sliki 4 je predstavljen tudi kazalčni diagram faznih napetosti in magnetnih pretokov. Trifazni sistem napetosti je simetričen, vsota vseh treh faznih napetosti pa je enaka nič. Prav tako je simetričen trifazni sistem magnetnih pretokov, če so primarna navitja na vseh treh stebrih enaka. Vsota vseh treh magnetnih pretokov je tudi enaka nič. Ta vsota se tvori v obeh točkah 0 na zgornjem in spodnjem jarmu, kot je razvidno iz slike 4. To pomeni, da v vsakem trenutku priteče v točko 0 toliko magnetnega pretoka, kot ga tudi odteče. Med točkama 0 za prevajanje ničelnega pretoka ni potreben »magnetni ničlovod«.

Trifazni transformatorji s tremi stebri omogočajo trdno gradnji jedra in navitji in so danes najbolj razširjena oblika. Oblikovati jih je mogoče za vse napetosti in tokove, z njimi pa lahko izpolnimo tudi vse zahteve po izkoristku, izgubah in kratkostični napetosti. So najcenejši, izdelujejo pa jih proizvajalci po celem svetu.



Slika 4: Tristebni transformator in kazalčni diagram faznih napetosti ter magnetnih pretokov,

(Vir: Miljavec, Damijan in Jereb, Peter (2005). Električni stroji, temeljna znanja)

### 3.3 VEZAVE IN OZNAČBE

Pri trifaznih transformatorjih lahko primarna in sekundarna navitja vežemo na različne načine. Najpogosteje uporabljamo vezave zvezda, trikot in cikcak. Druge vezave najdemo samo pri transformatorjih za posebne namene, na primer vezavo »V« pri merilnih transformatorjih. Vezavo transformatorja in priključke, ki pripadajo posameznemu navitju, ugotovimo po oznaki vezave transformatorja ter oznakah priključkov.

Oznaka priključka transformatorja je sestavljena iz dveh znakov:

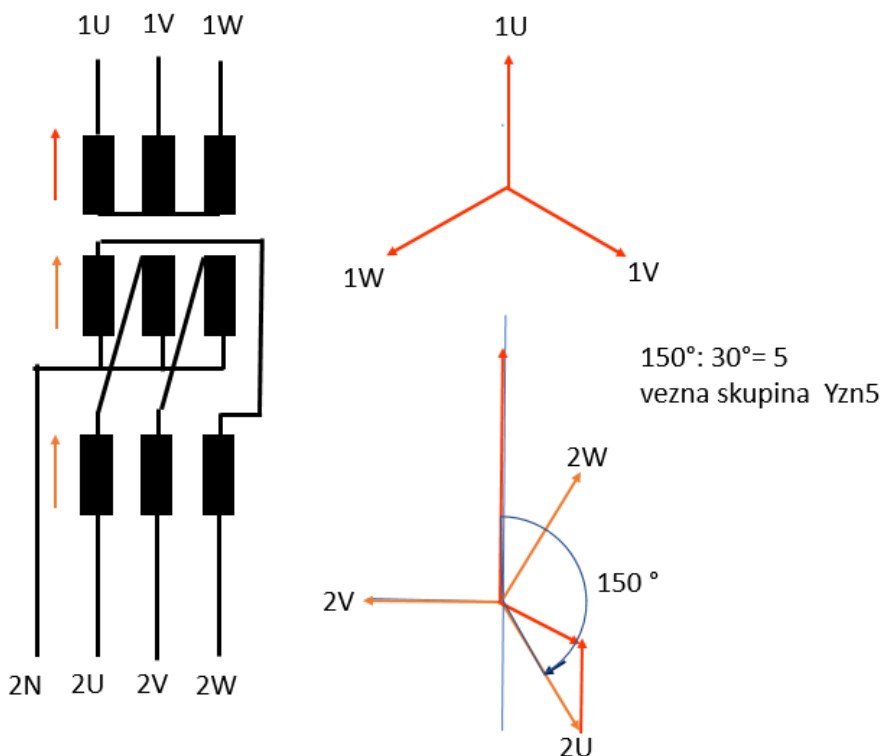
Primer oznak dvonavitnega transformatorja: **1U/1V/1W–2U/2V/2W**

- prvi znak – številka – navitje
 

|   |  |
|---|--|
| 1 | 1. navitje – na primer visoko napetostno navitje |
| 2 | 2. navitje – na primer nizko napetostno navitje  |
| 3 | 3. navitje                                       |

- drugi znak – črka – priključek vodnika
  - U na linijski vodnik L1
  - V na linijski vodnik L2
  - W na linijski vodnik L3
  - N na ničelni vodnik N

Primer vezne skupine Yzn5 je prikazan na sliki 5.



Slika 5: Vezna skupina Yzn5,  
(Vir: lastni)

### 3.4 OBRATOVANJE TRIFAZNEGA TRANSFORMATORJA

#### 3.4.1 Simetrična trifazna obremenitev

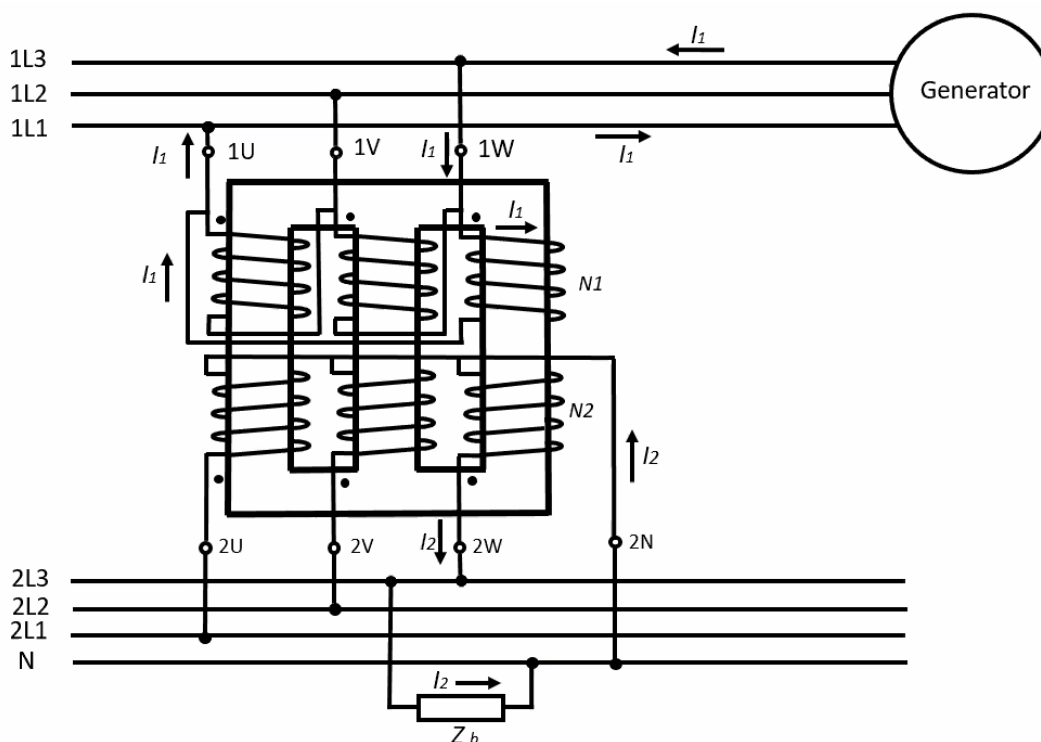
Najenostavnejši primer obratovanja trifaznega transformatorja je simetrična trifazna obremenitev na sekundarni strani. Pri tem je primarna stran transformatorja priključena na simetrični trifazni sistem napetosti. Transformator obratuje kot trije enofazni transformatorji. Trifazni omrežji primarne in sekundarne strani sta lahko brez ali z ničlovodom. Za vezno skupino izberemo tisto, ki ustreza glede fazne številke oziroma faznega premika med primarno in sekundarno stranjo.

### 3.4.2 Enofazna obremenitev brez ničlovoda na primarni strani

Transformatorji, ki napajajo štirivodna nizkonapetostna potrošniška omrežja, so pri nas 400 V medfazne in 230 V fazne napetosti. Medtem ko so na primarni strani priključena na visokonapetostno omrežje, na primer 20 kV medfazne napetosti. Na sekundarni strani potrebujemo ničlovod za priključek enofaznih porabnikov. Na visokonapetostni strani omrežje nima ničlovoda. To so običajne zahteve nizkonapetostnih potrošniških omrežji. Za nizkonapetostna omrežja z ničlovodom, ki ga lahko obremenimo z nazivnim tokom, uporabljamo transformator vezave Yzn ali Dyn.

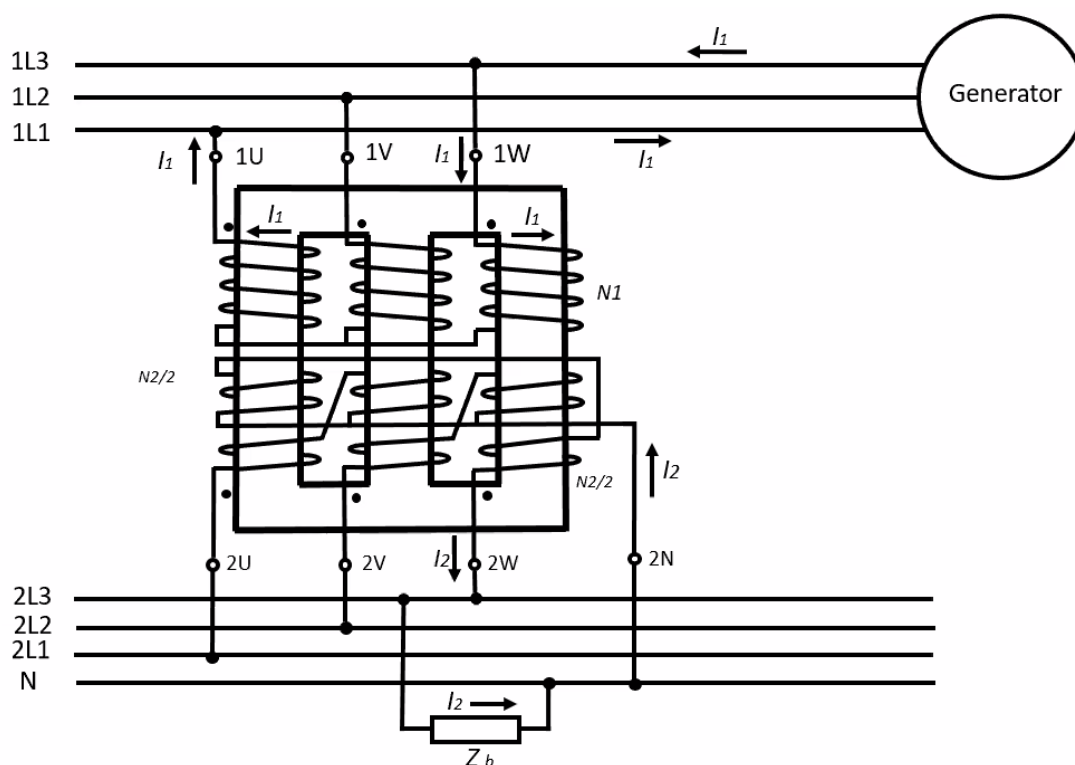
*V skladu z Miljavcem in Jerebom (2005) je na sliki 6 »vezava enofazno obremenjenega transformatorja Dyn, ki na primarni strani nima ničlovoda. To je za primarno trikot navitje naravno, saj nima ničlišča.*

*Sekundarni enofazni bremenski tok  $I_2$  vzbuja desni steber z  $I_2 N_2$ . Na istem stebru je trikotna veja primarnega navitja, v kateri teče tok  $I_1$ , in s tem je vzpostavljeno ravnotežje  $I_2 N_2 = I_1 N_1$ . Primarni bremenski tok  $I_1$  priteka v navitje preko priključka  $1W$ , nato pa teče preko trikotne zveze do priključka  $1U$ . Tok  $I_1$  tako teče iz generatorja po linijskem vodniku  $1L_3$  in se vrača po linijskem vodniku  $1L_1$ . Po navitjih levega in srednjega stebra ne tečejo nobeni bremenski tokovi. Samo primarno in sekundarno navitje desnega stebra vodita bremenski tok. Na vseh treh stebrih je sedaj vzpostavljeno ravnotežje amperovojev.«*



Slika 6: Vezava enofazno obremenjenega TP Dyn, ki na primarni strani nima ničlovoda,  
(Vir: lastni)

V skladu z Miljavcem in Jerebom (2005) je na sliki 7 »transformator vezne skupine Yzn, ki na primarni strani nima ničlovoda, na sekundarni strani pa ima priključen ničlovod in enofazno breme  $Z_b$ . Sekundarni bremenski tok  $I_2$  teče od ničlovoda 2N v polovično sekundarno navitje levega stebra in naprej v polovično sekundarno navitje desnega stebra do priključitve 2W in v bremenski upor. Na vsakem stebru povzroči magnetno vzbujanje  $I_2 \frac{N_2}{2}$ , vendar v nasprotnih smereh, saj sta polovični navitji vezani v nasprotnih smereh. Na primarni strani teče primarni bremenski tok  $I_1$  in s tem kompenzira vzbujanje sekundarnega bremenskega toka  $I_1 N_1 = I_2 \frac{N_2}{2}$ . Kompenzira ga v veji navitja 1U levega stebra in v veji navitja 1W desnega stebra. Priteka po linijskem vodniku primarnega omrežja 1L1 in 1L3 ter generatorja. Magnetna vzbujanja bremenskih tokov so kompenzirana na vsakem stebru in nič ne motijo trifazne simetrije magnetnih polj v jedru transformatorja. Ravno tako bremenska toka ne vplivata na trifazno simetrijo induciranih napetosti. Transformatorju vezne skupine Yzn lahko obremenimo ničlovod z enofaznim bremenskim tokom nazivne velikosti. Sekundarno enofazno obremenitev spremeni transformator vezave Yzn v dvofazno na primarni strani.«



Slika 7: Vezava enofazno obremenjene TP Yzn, ki na primarni strani nima ničlovoda, (Vir: lastni)

Pri povezavi omrežij, ki imajo na eni strani ničlovod, na drugi strani pa ga nimajo, moramo vedno uporabljati transformatorje veznih skupin Dyn ali Yzn, čeprav so dražji kot transformatorji vezave Yy. Transformator vezave Yyn ne more prenašati enofazne obremenitve s tokom v ničlovodu, kar pa transformatorja vezave Dyn in Yzn lahko. Med njima pri manjših močeh izberemo vezavo Yzn, pri večjih močeh pa Dyn, ker sta v teh primerih cenejša.

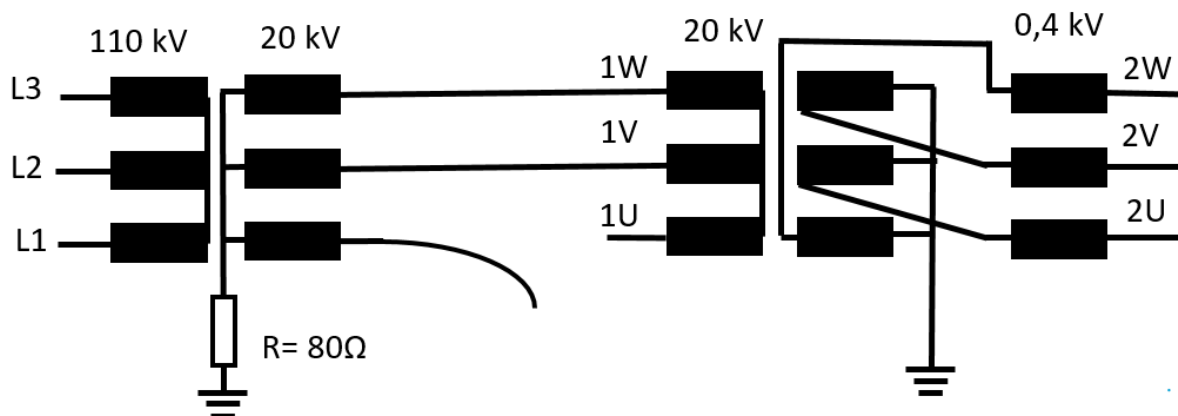
## 4 ANALIZA RAZMER PO PREKINITVI FAZE NA PRIMARJU TRANSFORMATORJA SN/NN

Analiza nesimetrije na transformatorju Yzn5 je bil osnovni cilj diplomskega dela, ker smo teoretični del preverjali in potrdili s praktičnimi meritvami na transformatorju Yzn5.

Za transformator vezave Dyn5 ni bilo možnosti izvedbe praktičnih meritev, zato je bila poleg analize nesimetrije po metodi simetričnih komponent s pomočjo strokovnjakov EIMV dodatno izvedena simulacija s PSCAD-programskim paketom.

#### 4.1 PREKINITEV FAZE L1 NA PRIMARNI STRANI TRANSFORMATORJA YZN5

V našem primeru je jedro standardni tristebni evropski tip.



Slika 8: Prekinitev faze L1 na primarni strani transformatorja Yzn5,  
(Vir: lastni)

Ker ničlišče v vezavi Y na primarni strani ni ozemljeno, se ob prekinitvi faze na SN-omrežju pojavi neobičajni pretok fluksov na posameznih stebrih. Navitja so imela prej simetrične fazne napetosti in flukse, ki zagotavljajo napetost v zvezdišču enako 0 V. Po prekinitvi faze L1 do sponke 1U na transformatorju je napetost na primarnem navitju 1U enaka potencialu zvezdišča (slika 8). Zaradi priključene medfazne napetosti  $\underline{U}_{1vw}$  in neozemljenega zvezdišča se v tuljavah 1V in 1W, glede na priključeno medfazno napetost  $\underline{U}_{1vw}$  (navitji sta vezani zaporedno preko neozemljenega zvezdišča), inducirajo polovične fazne napetosti  $\underline{U}_{1v}$  in  $\underline{U}_{1w}$ . V tej točki je na zvezdišče priključeno tudi navitje 1U, ki pa dobi polovično napetost od obeh faznih napetosti  $\underline{U}_{1v}$  ali  $\underline{U}_{1w}$ , vendar nima toka, ker je faza prekinjena. Zato lahko sklepamo, da sta tudi medfazni napetosti  $\underline{U}_{1uv}$  in  $\underline{U}_{1uw}$  enaki omenjenim faznim. Toka, ki napajata transformator, sta v protifazi ( $\underline{I}_{1v}$  in  $-\underline{I}_{1w}$ ).

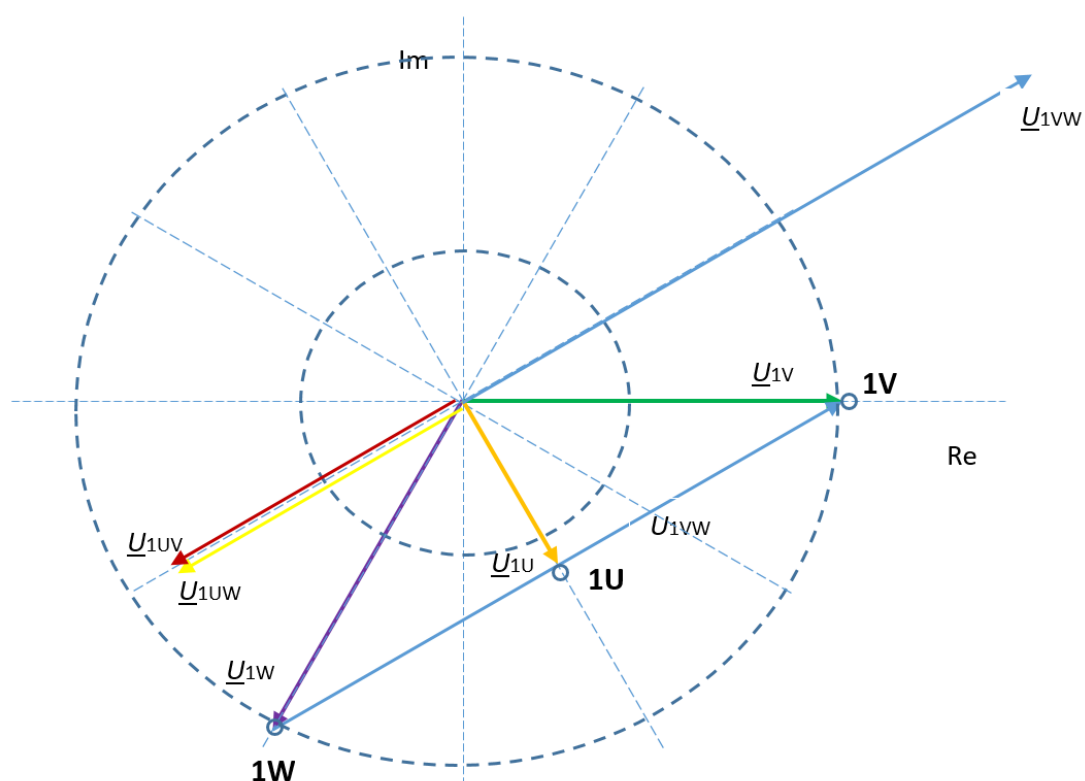
$$\underline{U}_{1v} = \underline{U}_{1w} = -\frac{1}{2} \underline{U}_{1vw}$$

$$\underline{U}_{1u} = \underline{U}_{1v} + \underline{U}_{1w} = \frac{1}{4} \underline{U}_{1vw}$$

$$\underline{U}_{1uv} = \underline{U}_{1uw} = -\frac{1}{2} \underline{U}_{1vw}$$

$$\underline{U}_{1u} = \underline{U}_{1uv} + \underline{U}_{1v}$$

$$\underline{I}_{1v} = -\underline{I}_{1w} \text{ (180}^\circ\text{)}, \underline{I}_{1u} = 0$$



Slika 9: Kazalčni diagram napetosti na sponkah in navitjih po prekinitvi zunanje faze L1, (Vir: lastni)

Legenda:

Fazne napetosti (fazorji):

- $\underline{U}_{1U}$
- $\underline{U}_{1V}$
- $\underline{U}_{1W}$
- $\underline{U}_{2U}$
- $\underline{U}_{2V}$
- $\underline{U}_{2W}$

Medfazne napetosti (fazorji):

- $\underline{U}_{1UW}$
- $\underline{U}_{1VW}$
- $\underline{U}_{1UV}$

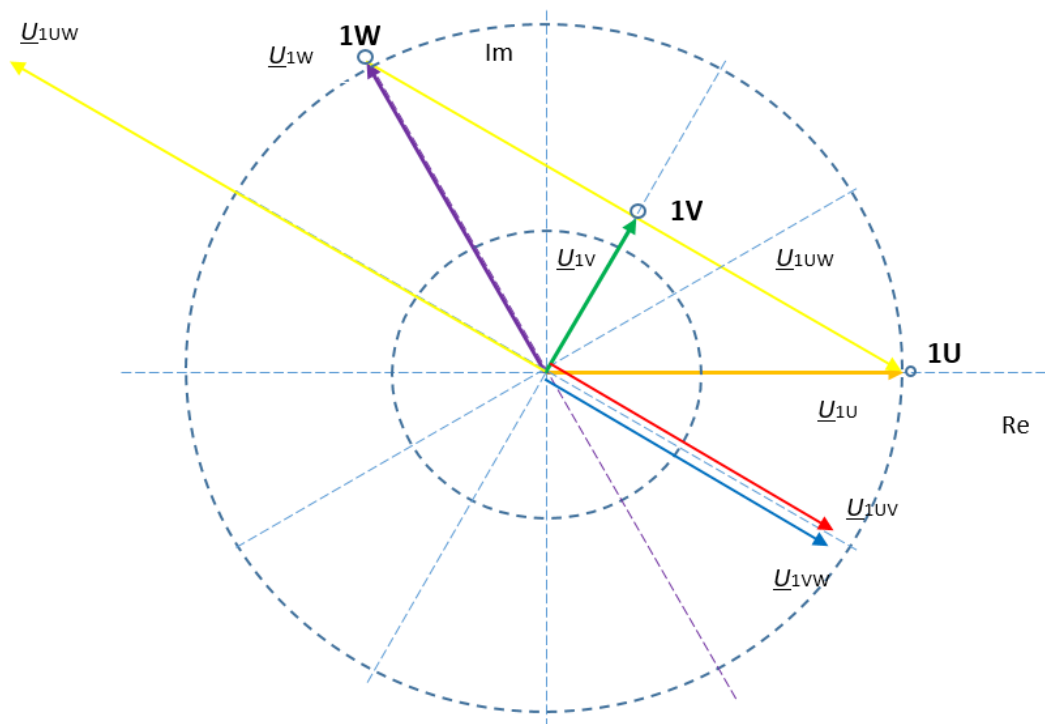
Na sekundarni strani vezave z-cikcak se inducirana napetost pojavi samo v stebrih 1V in 1W. Navitje na stebri 1U ne prispeva nobene napetosti. Kot rezultat take nesimetrije fluksov dobimo polno fazno napetost samo v stebri, kjer nastopata fluksa faz L2-V in L3-W. To je seveda odvisno od vezne skupine transformatorja. V našem



primeru je na sekundarni strani (Yzn5) fazna premaknitev  $150^\circ$ . Iz sheme vezne skupine lahko ugotovimo, da sta na sekundarni strani polovični napetosti v fazah L1-2U in L3-2W, medtem ko je v fazi L2-2V polna fazna napetost glede na prestavno razmerje. Sekundarna fazna napetost  $\underline{U}_{2V}$  je v protifazi ( $180^\circ$ ) proti  $\underline{U}_{2U}$  in  $\underline{U}_{2W}$ . Glede na možno obremenitev sekundarja se nesimetrične fazne napetosti še dodatno spremenijo zaradi priključenih potrošnikov tako, da se pojavi tudi sofazna komponenta toka  $3\underline{I}_{(0)}$  v ničlovodu. Sekundarni trifazni sistem pa ni simetričen in stabilen, ker zaradi prekinitve faze na primarni strani transformatorja nimamo trifaznega vrtilnega polja.

#### 4.2 PREKINITEV FAZE L2 NA PRIMARNI STRANI TRANSFORMATORJA YZN5

Podobne razmere dobimo ob prekinitvi faze L2 do sponke 1V na transformatorju Yzn5. V tem primeru je napajalna napetosti  $\underline{U}_{1UW}$  priključena na sponke transformatorja L1-1U in L3-1W. Medfazna napetost poganja fluks v stebrih U in W, medtem ko je napetost na srednjem stebri  $\underline{U}_{1V}$  enaka napetosti zvezdišča. Ker je zvezdišče brez potenciala zemlje, nastane serijska povezava med tuljavama U in W, zvezdišče pa dobi polovico fazne napetosti  $\underline{U}_{1U}$ . To pomeni, da sta inducirani fazni napetosti  $\underline{U}_{1U}$  in  $\underline{U}_{1W}$  polovični proti priključenim medfaznim napetostim  $\underline{U}_{UW}$ . Na sekundarni strani manjkajoča faza  $\underline{U}_{1V}$  povzroča nesimetrijo fluksov in induciranih napetosti. Glede na vezavo Yzn5 lahko iz sheme vezne skupine vidimo edino polno fazno napetost v fazi L3- $\underline{U}_{2W}$  na sekundarni strani transformatorja. Napetosti L2- $\underline{U}_{2U}$  in L3- $\underline{U}_{2W}$  pa sta polovični in obrnjeni za  $180^\circ$ . To seveda velja v praznem teku ali za manjše simetrično breme. Pri nesimetričnih enofaznih obremenitvah sekundarja se toki in napetosti še dodatno spreminjajo glede na karakter potrošnikov. V vsakem primeru pa trifazni porabniki ne dobijo pravih vrednosti in morajo biti proti nenormalnim razmerami ustrezno zaščiteni.



Slika 10: Kazalčni diagram napetosti na sponkah in navitjih po prekinitvi notranje faze L2, (Vir: lastni)

Legenda:

Fazne napetosti (fazorji):

- $\underline{U}_{1U}$
- $\underline{U}_{1V}$
- $\underline{U}_{1W}$
- $\underline{U}_{2U}$
- $\underline{U}_{2V}$
- $\underline{U}_{2W}$

Medfazne napetosti (fazorji):

- $\underline{U}_{1UW}$
- $\underline{U}_{1VW}$
- $\underline{U}_{1UV}$

## 5 PRIKAZ IZRAČUNA PO METODI SIMETRIČNIH KOMPONENT

S pomočjo simetričnih komponent bomo preverili fazorje napetosti na primarni strani.

### 5.1 PREDSTAVITEV PREKINITVE FAZE L1 NA PRIMARNI STRANI TRANSFORMATORJA S POMOČJO TEORIJE SIMETRIČNIH KOMPONENT ZA Yzn5

Priključena napetost na sponkah našega transformatorja L2-1V in L3-1W je medfazna napetost  $\underline{U}_{1VW}$ .

Za simetrične komponente potrebujemo fazne vrednosti:

Izhodišče  $\underline{U}_{1V} = 1$ ,  $\underline{U}_{1W} = \underline{a}^2$ ,  
 $\underline{U}_{1U} = ?$  v stanju prekinitve faze L1-1U

Priključena medfazna napetost:

$$\underline{U}_{1VW} = \underline{U}_{1V} - \underline{U}_{1W} = 1 - \underline{a}^2 = \sqrt{3} e^{j30^\circ}$$

Iščemo napetost  $\underline{U}_{1U}$  na sponki 1U, ki je ločena od vira, oziroma fazor neozemljenega zvezdišča.

Splošno velja:

$$\underline{U}_{1UV} = \underline{U}_{1U} - \underline{U}_{1V} \text{ oziroma } \underline{U}_{1U} = \underline{U}_{1UV} + \underline{U}_{1V}$$

Iz predhodne predpostavke ugotovljamo, da so fazne in medfazne napetosti polovica priključene medfazne  $\underline{U}_{1VW}$  in obrnjene za  $180^\circ$ , zato je lahko:

$$\underline{U}_{1UV} = \underline{U}_{1VW} = -\frac{1}{2} (1 - \underline{a}^2)$$

Napetost  $\underline{U}_{1V}$  smo postavili v izhodišče  $0^\circ$  in vrednost 1, zato je:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{1U} &= -\frac{1}{2} (1 - \underline{a}^2) + 1 = \frac{1}{2} (1 + \underline{a}^2) \\ \underline{U}_{1U} &= -\frac{1}{2} \underline{a} \end{aligned}$$

Ko imamo fazorje faznih napetosti, lahko izračunamo simetrične komponente.

$\underline{U}_{(1)}$  ( $V_1$ ) je direktna ali pozitivna komponenta:

$$\underline{U}_{(1)} = \frac{1}{3} (\underline{U}_{1U} + \underline{a} \underline{U}_{1V} + \underline{a}^2 \underline{U}_{1W})$$

$$\underline{U}_{(1)} = \frac{1}{3} \left( -\frac{1}{2} \underline{a} + \underline{a} \cdot 1 + \underline{a}^2 \underline{a}^2 \right) = \frac{1}{2} \underline{a}$$

$\underline{U}_{(2)}$  ( $V_2$ ) je inverzna ali negativna komponenta:

$$\underline{U}_{(2)} = \frac{1}{3} (\underline{U}_{1U} + \underline{a}^2 \underline{U}_{1V} + \underline{a} \underline{U}_{1W})$$

$$\underline{U}_{(2)} = \frac{1}{3} \left( -\frac{1}{2} \underline{a} + \underline{a}^2 \cdot 1 + \underline{a} \underline{a}^2 \right) = -\frac{1}{2} \underline{a}$$

$\underline{U}_{(0)}$  je nična komponenta ( $V_0$ ), ki je zaradi neizvedenega zvezdišča enaka 0.

### 5.1.1 Simetrične komponente na sekundarni strani

Komponente premaknemo na sekundarno stran skladno z vezno skupino Yzn5 za  $150^\circ$ , in sicer direktno komponento v desno, inverzno  $150^\circ$  v levo in dobimo komponente napetosti, označene z \*. Prestavna razmerja primar sekundar niso upoštevana.

$$\underline{U}_{(1)}^* = \frac{1}{2} \underline{a} \rightarrow \frac{1}{2} (e^{j120^\circ} \cdot e^{-j150^\circ}) = \frac{1}{2} e^{-j30^\circ} = \frac{1}{2} (1 - \underline{a})$$

$$\underline{U}_{(2)}^* = -\frac{1}{2} \underline{a} \rightarrow \frac{1}{2} (e^{-j60^\circ} \cdot e^{j150^\circ}) = \frac{1}{2} e^{j90^\circ} = \frac{1}{2} (\underline{a} - \underline{a}^2)$$

\*Komponente na sekundarni strani.

### 5.1.2 Rekompozicija komponent v fazorje napetosti na sekundarni strani

$$\underline{U}_{2U} = \underline{U}_{(1)}^* + \underline{U}_{(2)}^*$$

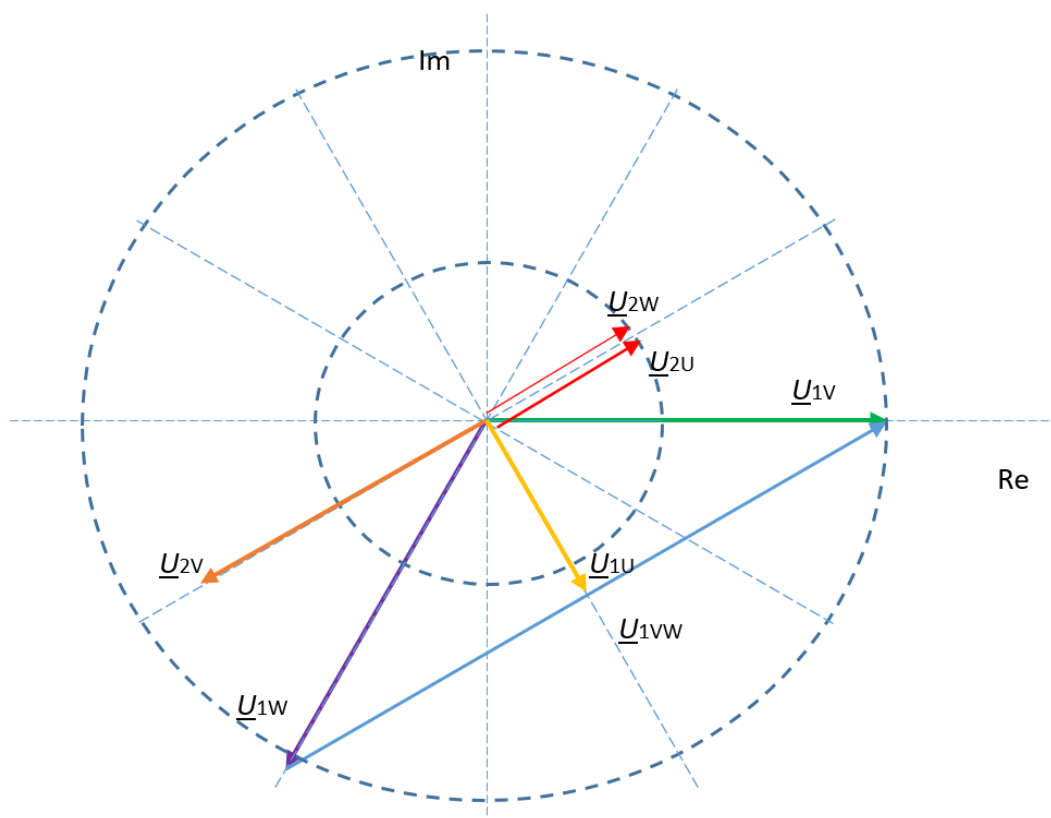
$$\underline{U}_{2U} = \frac{1}{2} (1 - \underline{a} + \underline{a} - \underline{a}^2) = \frac{1}{2} (1 - \underline{a}^2) = \frac{1}{2} e^{j30^\circ}$$

$$\underline{U}_{2V} = \underline{a}^2 \underline{U}_{(1)}^* + \underline{a} \underline{U}_{(2)}^*$$

$$\underline{U}_{2V} = \underline{a}^2 \frac{1}{2} (1 - \underline{a}) + \underline{a} \frac{1}{2} (\underline{a} - \underline{a}^2) = (\underline{a}^2 - 1) = e^{-j150^\circ}$$

$$\underline{U}_{2W} = \underline{a} \underline{U}_{(1)}^* + \underline{a}^2 \underline{U}_{(2)}^*$$

$$\underline{U}_{2W} = \underline{a} \frac{1}{2} (1 - \underline{a}^2) + \underline{a}^2 \frac{1}{2} (\underline{a} - \underline{a}^2) = \frac{1}{2} (1 - \underline{a}^2) = \frac{1}{2} e^{j30^\circ}$$



Slika 11: Kazalčni diagram napetosti na sekundarni strani po prekinitvi zunanje faze L1, (Vir: lastni)

Legenda:

Fazne napetosti (fazorji):

- $\underline{U}_{1U}$
- $\underline{U}_{1V}$
- $\underline{U}_{1W}$
- $\underline{U}_{2U}$
- $\underline{U}_{2V}$
- $\underline{U}_{2W}$

Medfazne napetosti (fazorji):

- $\underline{U}_{1UW}$
- $\underline{U}_{1VW}$
- $\underline{U}_{1UV}$

Na sekundarni strani dobimo polno fazno napetost v fazi L2 oziroma na sponki 2V, medtem ko sta napetosti na sponkah 2U in 2W obrnjeni za  $180^\circ$  in polovične vrednosti.

### 5.1.3 Razdelitev tokov s pomočjo simetričnih komponent pri prekinitvi faze L1

Po ugotovitvi napetostnih razmer smo na sekundarni strani priključili ohmsko breme enakih moči (2 kW) ter izmerili toke na primarni in sekundarni strani. Na sekundarni strani so zato toki in napetosti v fazi: in sicer v fazi L2 je polna fazna napetost in tudi dvojni tok, medtem ko sta napetosti in tokova v ostalih dveh fazah v protifazi in polovične vrednosti.

### 5.1.4 Izhodišče na primarni strani

Pri simetričnem ohmskem bremenu na sekundarni strani so bile na primarni strani priključeni fazi L2 in L3. Tok v prekinjeni fazi je  $I_{L1} = 0$ .

Izhodišče za primarni tok v fazi L2 je bil izmerjen fazor toka  $I_{1V}$  je  $\frac{1}{2} e^{j30^\circ} = \frac{1}{2} (1 - \underline{a}^2)$ .

V fazi L3 pa je bil tok za  $180^\circ$  obrnjen in enake velikosti  $I_{1W}$  je  $\frac{1}{2} e^{-j150^\circ} = \frac{1}{2} (\underline{a}^2 - 1)$ .

### 5.1.5 Izračunamo simetrične komponente

$$I_{(1)} = \frac{1}{3} (I_{1U} + \underline{a} I_{1V} + \underline{a}^2 I_{1W}) = \frac{1}{3} (0 + \frac{1}{2} \underline{a} (1 - \underline{a}^2) + \frac{1}{2} \underline{a}^2 (\underline{a}^2 - 1))$$

$$I_{(1)} = \frac{1}{2} \underline{a} = \frac{1}{2} e^{j120^\circ}$$

$$I_{(2)} = \frac{1}{3} (I_{1U} + \underline{a}^2 I_{1V} + \underline{a} I_{1W}) = \frac{1}{3} (0 + \underline{a}^2 (1 - \underline{a}^2) + \underline{a} (\underline{a}^2 - 1)) =$$

$$I_{(2)} = -\frac{1}{2} \underline{a} = \frac{1}{2} e^{-j60^\circ}$$

$$I_{(0)} = 0$$

Po premaknitvi faze glede na vezno skupino Yzn5 ( $150^\circ$ ) dobimo direktno komponento:

$$I_{(1)}^* = \frac{1}{2} e^{j120^\circ} \cdot e^{-j150^\circ} = \frac{1}{2} e^{-j30^\circ}$$

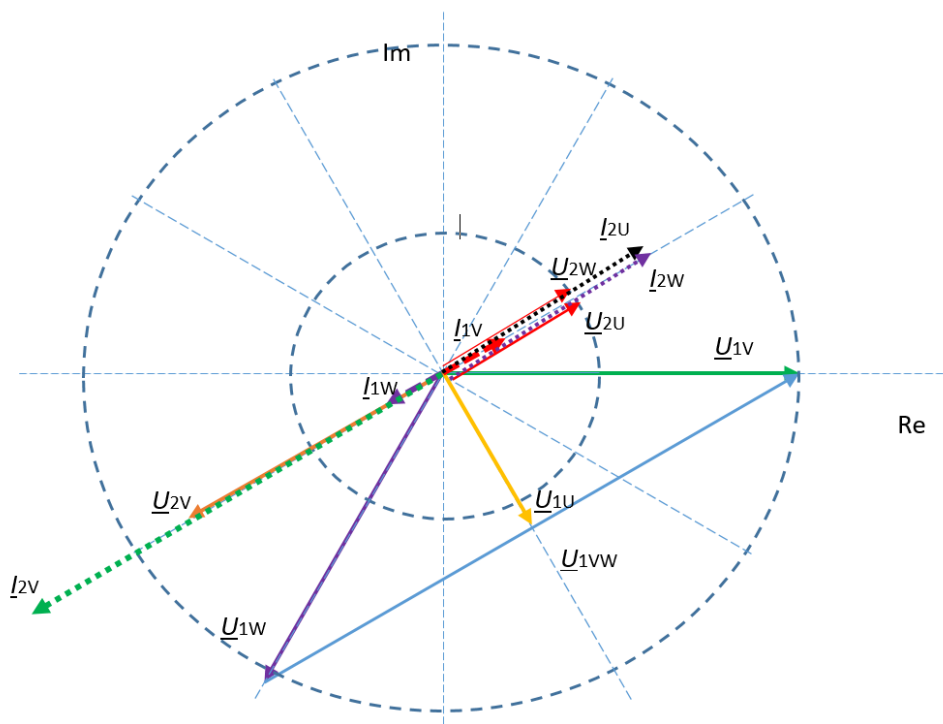
$$I_{(2)}^* = \frac{1}{2} e^{-j60^\circ} \cdot e^{j150^\circ} = \frac{1}{2} e^{j90^\circ}$$

Rekompozicija komponent tokov na sekundarni strani:

$$I_{2U} = I_{(1)}^* + I_{(2)}^* = \frac{1}{2} ((1 - \underline{a}) + (\underline{a} - \underline{a}^2)) = \frac{1}{2} (1 - \underline{a}^2) = \frac{1}{2} e^{j30^\circ}$$

$$I_{2V} = \underline{a}^2 I_{(1)}^* + \underline{a} I_{(2)}^* = \frac{1}{2} (\underline{a}^2 (1 - \underline{a}) + \underline{a} (\underline{a} - \underline{a}^2)) = \underline{a}^2 - 1 = e^{-j150^\circ}$$

$$I_{2W} = \underline{a} I_{(1)}^* + \underline{a}^2 I_{(2)}^* = \frac{1}{2} (\underline{a} (1 - \underline{a}) + \underline{a}^2 (\underline{a} - \underline{a}^2)) = \frac{1}{2} (1 - \underline{a}^2) = \frac{1}{2} e^{j30^\circ}$$



Slika 12: Kazalčni diagram napetosti in tokov na primarni in sekundarni strani po prekinitvi zunanje faze L1, (Vir: lastni)

Legenda:

Fazne napetosti (fazorji):

- $\underline{U}_{1U}$
- $\underline{U}_{1V}$
- $\underline{U}_{1W}$
- $\underline{U}_{2U}$
- $\underline{U}_{2V}$
- $\underline{U}_{2W}$

Medfazne napetosti (fazorji):

- $\underline{U}_{1UW}$
- $\underline{U}_{1VW}$
- $\underline{U}_{1UV}$

Fazni toki (fazorji):

$$\begin{aligned} & \text{-----} \underline{I}_{1V} \\ & \text{-----} \underline{I}_{1W} \\ & \text{-----} \underline{I}_{2U} \\ & \text{-----} \underline{I}_{2V} \\ & \text{-----} \underline{I}_{2W} \end{aligned}$$

Rezultati sekundarnih tokov so skladni s pričakovanimi vrednostmi, ki so zaradi ohmskega bremena v fazi z napetostmi.

Podobne razmere delitve tokov in napetosti dobimo tudi pri prekinitvi faze L2 s tem, da dobimo na sekundarni strani polno napetost in tok v fazi L3, v ostalih pa polovične vrednosti v protifazi.

## 5.2 PREDSTAVITEV PREKINITVE FAZE L2 NA PRIMARNI STRANI TRANSFORMATORJA S POMOČJO TEORIJE SIMETRIČNIH KOMPONENT ZA Yzn5

V primeru prekinitve faze L2 do sponke 1V določimo izhodiščne vrednosti.

Priključena napetost  $\underline{U}_{1UW}$  napaja transformator na sponkah 1U in 1W, sponka 1V je odprta.

Predpostavimo, da je naše izhodišče napetost  $\underline{U}_{1U}$  faze L1 v izhodišču  $0^\circ$ .

Napetosti na dovodu  $\underline{U}_{1U} = 1$ ;  $\underline{U}_{1W} = \underline{a}$ ;  $\underline{U}_{1V} = ?$ .

Če želimo izračunati fazor napetosti na sponki 1V, ki je ločena od vira, predpostavimo, da se zvezdišče dvigne na potencial sponke 1V. Dobimo razmere kot pri zgornjem primeru, ko so fazne vrednosti polovične proti priključeni medfazni napetosti  $\underline{U}_{1U} = \underline{U}_{1W} = -\frac{1}{2}\underline{U}_{1UW}$  in hkrati tudi enake medfaznim  $\underline{U}_{1UV}$  in  $\underline{U}_{1VW}$ , vendar v protifazi:

$$\underline{U}_{1UW} = \underline{U}_{1W} - \underline{U}_{1U} = \underline{a} - 1 = \sqrt{3} e^{j150^\circ}$$

Iščemo napetost na sponki 1V  $\underline{U}_{1V}$ . Medfazna napetost  $\underline{U}_{1VW}$  je enaka polovici priključeni napetosti  $\underline{U}_{1UW}$ , vendar v protifazi. Zato zapišemo splošno enačbo:

$$\underline{U}_{1VW} = \underline{U}_{1V} - \underline{U}_{1W}$$

$$\underline{U}_{1V} = \underline{U}_{1VW} + \underline{U}_{1W}$$

$$\underline{U}_{1V} = -\frac{1}{2}(\underline{a} - 1) + \underline{a} = -\frac{1}{2}(\underline{a} + 1) = -\frac{1}{2}\underline{a}^2$$



Nato izračunamo simetrične komponente napetosti:

$$\underline{U}_{(1)} = \frac{1}{3} (\underline{U}_{1U} + \underline{a} \underline{U}_{1V} + \underline{a}^2 \underline{U}_{1W})$$

$$\underline{U}_{(1)} = \frac{1}{3} (1 - \frac{1}{2} \underline{a}^3 + \underline{a}^3) = \frac{1}{2} = \frac{1}{2} e^{j0^\circ}$$

$$\underline{U}_{(2)} = \frac{1}{3} (\underline{U}_{1U} + \underline{a}^2 \underline{U}_{1V} + \underline{a} \underline{U}_{1W})$$

$$\underline{U}_{(2)} = \frac{1}{3} (1 + \underline{a}^2 (-\frac{1}{2} \underline{a}^2) + \underline{a} \underline{a})$$

$$\underline{U}_{(2)} = -\frac{1}{2} \underline{a} = \frac{1}{2} e^{-j60^\circ}$$

$$\underline{U}_{(0)} = 0$$

Glede na vezno skupino Yzn5 za sekundarne vrednosti potrebujemo premaknitev faz za 150°.

In sicer  $\underline{U}_{(1)}$  v desno  $\underline{U}_{(2)}$  v levo. Dobimo:

$$\underline{U}_{(1)}^* = \frac{1}{2} e^{j0^\circ} \cdot e^{-j150^\circ} = e^{-j150^\circ} = \frac{1}{2} (\underline{a}^2 - 1)$$

$$\underline{U}_{(2)}^* = \frac{1}{2} e^{-j60^\circ} \cdot e^{j150^\circ} = \frac{1}{2} e^{j90^\circ} = \frac{1}{2} (\underline{a} - \underline{a}^2)$$

$$\underline{U}_{(0)} = 0$$

Rekompozicija komponent v fazorje napetosti na sekundarni strani:

$$\underline{U}_{2U} = \underline{U}_{(1)}^* + \underline{U}_{(2)}^*$$

$$\underline{U}_{2U} = \frac{1}{2} (\underline{a}^2 - 1) + \frac{1}{2} (\underline{a} - \underline{a}^2) = \frac{1}{2} (\underline{a} - 1) = \frac{1}{2} e^{j150^\circ}$$

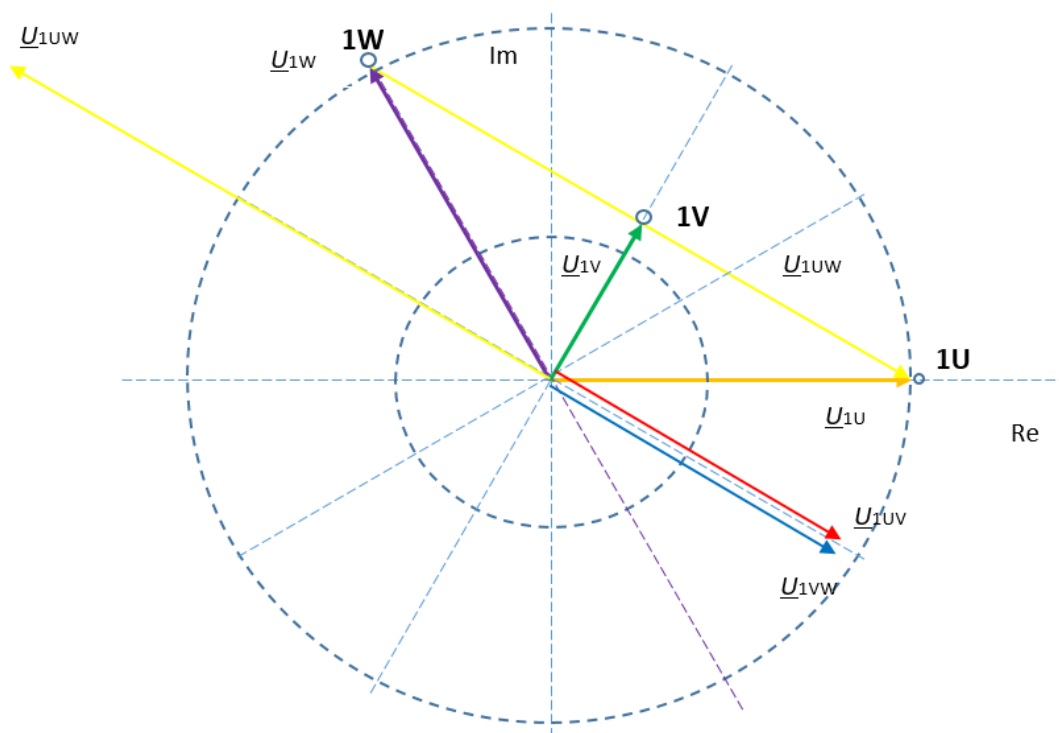
$$\underline{U}_{2V} = \underline{a}^2 \underline{U}_{(1)}^* + \underline{a} \underline{U}_{(2)}^*$$

$$\underline{U}_{2V} = \underline{a}^2 \frac{1}{2} (\underline{a}^2 - 1) + \underline{a} \frac{1}{2} (\underline{a} - \underline{a}^2) = \frac{1}{2} (\underline{a} - 1) = \frac{1}{2} e^{j150^\circ}$$

$$\underline{U}_{2W} = \underline{a} \underline{U}_{(1)}^* + \underline{a}^2 \underline{U}_{(2)}^*$$

$$\underline{U}_{2W} = \underline{a} \frac{1}{2} (\underline{a}^2 - 1) + \underline{a}^2 \frac{1}{2} (\underline{a} - \underline{a}^2) = (1 - \underline{a}) = e^{-j30^\circ}$$

Na sekundarni strani dobimo polno fazno napetost v fazi L3 oziroma na sponki 2W, medtem ko sta napetosti na sponkah 2U in 2V obrnjeni za 180° in polovične vrednosti.



Slika 13: Kazalčni diagram napetosti na sekundarni strani po prekinitvi zunanje faze L1, (Vir: lastni)

Legenda:

Fazne napetosti (fazorji):

- $\underline{U}_{1U}$
- $\underline{U}_{1V}$
- $\underline{U}_{1W}$
- $\underline{U}_{2U}$
- $\underline{U}_{2V}$
- $\underline{U}_{2W}$

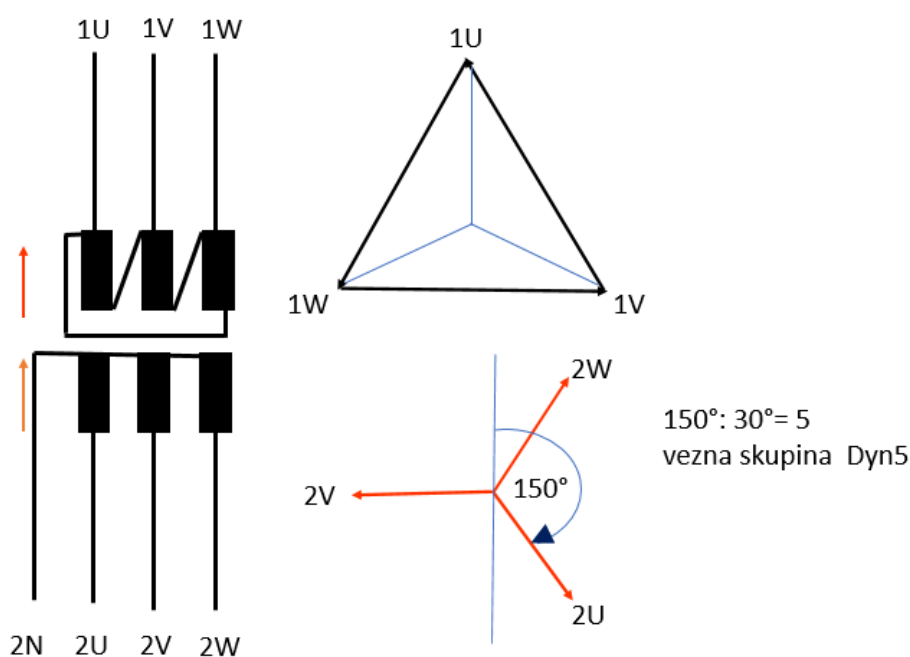
Medfazne napetosti (fazorji):

- $\underline{U}_{1UW}$
- $\underline{U}_{1VW}$
- $\underline{U}_{1UV}$

### 5.3 PREDSTAVITEV PREKINITVE FAZE L1 NA PRIMARNI STRANI TRANSFORMATORJA S POMOČJO TEORIJE SIMETRIČNIH KOMPONENT ZA Dyn5

Za transformator vezave Dyn5 ni bilo možnosti izvedbe praktičnih meritev, zato je bila poleg analize nesimetrije po metodi simetričnih komponent s pomočjo strokovnjakov EIMV dodatno izvedena simulacija s PSCAD- programskim paketom.

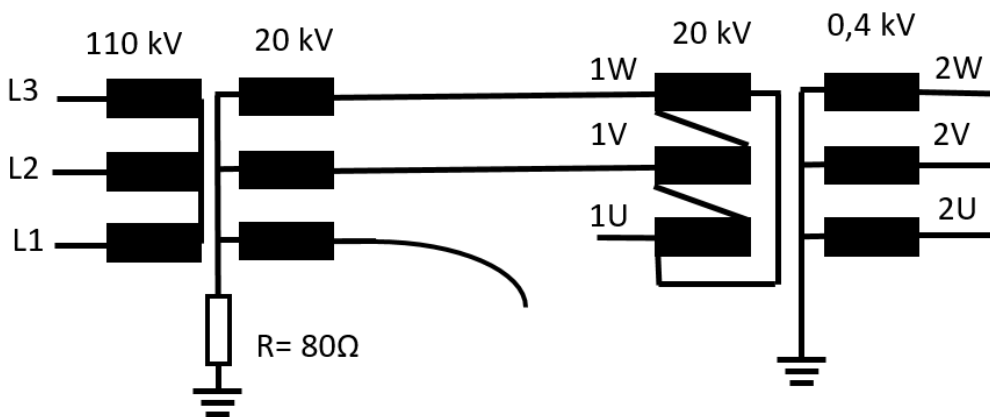
Transformator v vezavi Dyn5 je prikazan na sliki 14.



Slika 14: Vezna skupina Dyn5,  
(Vir: lastni)

#### 5.3.1 Predstavitev prekinitve faze L1 na primarni strani transformatorja s pomočjo teorije simetričnih komponent za Dyn5

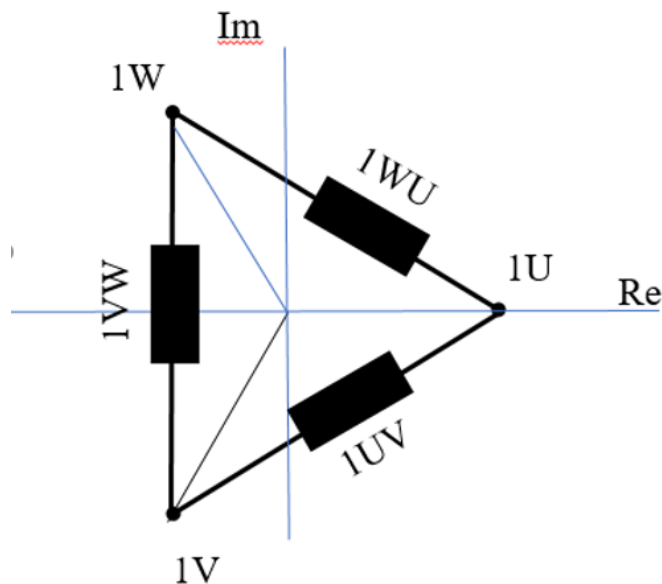
Na sliki 15 je prikazan primer prekinitve faze L1 na primarni strani transformatorja Dyn5.



Slika 15: Prekinitev faze L1 na primarni strani transformatorja Dyn5, (Vir: lastni)

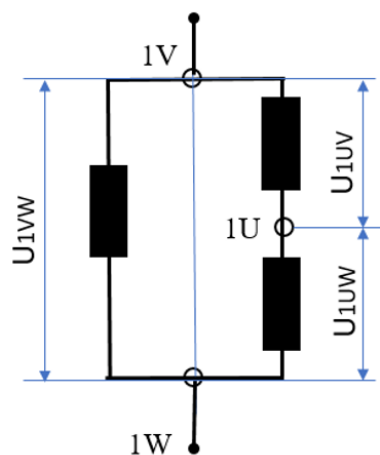
Navitji 1UV in 1WU, predstavljeni na sliki 16, sta vezani zaporedno na isto medfazno napetost  $\underline{U}_{vw}$ . Navitje 1VW dobi polno napetost (slika 17), zato se v tem stebru pojavi celotni fluks, ki se po ostalih dveh vrača s polovično vrednostjo.

### Navitja

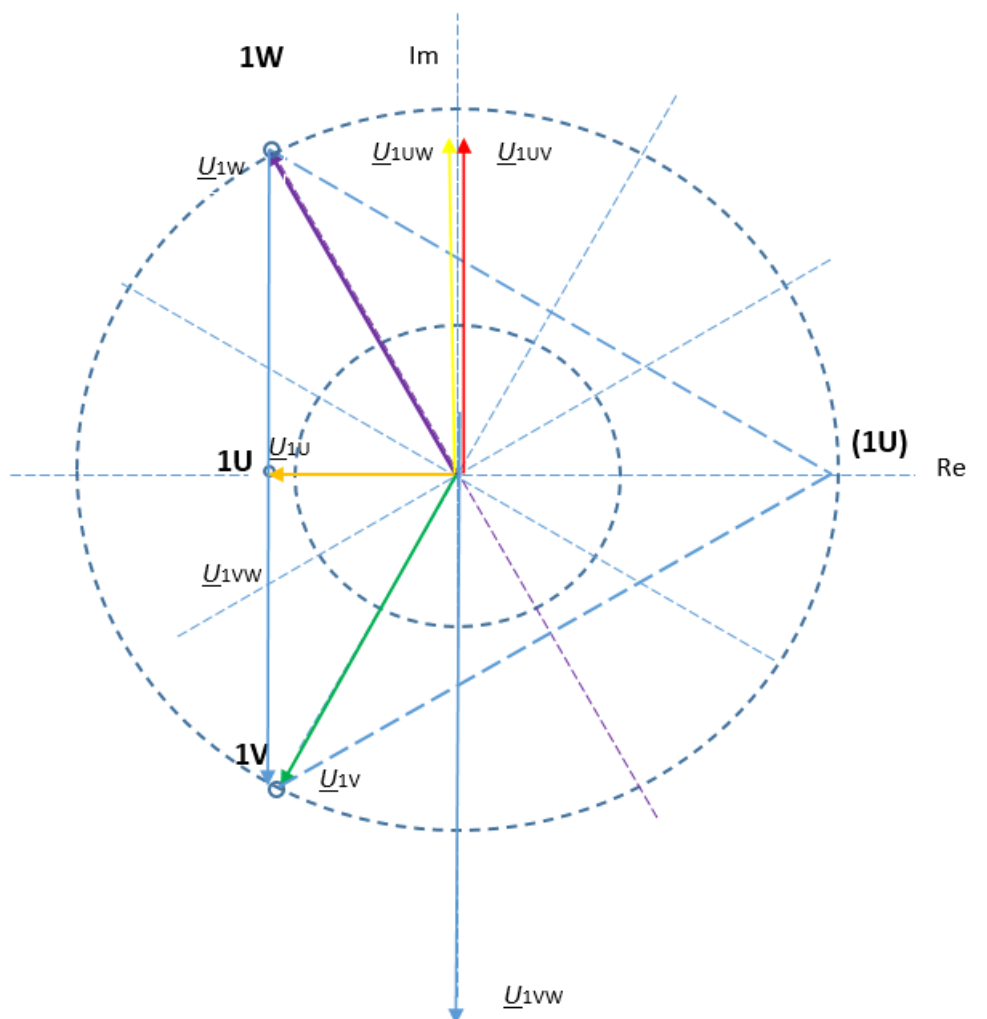


Slika 16: Navitji 1UV in 1WU sta vezani zaporedno na isto medfazno napetost  $\underline{U}_{vw}$ , (Vir: lastni)

## Razporeditev napetosti



Slika 17: Navitje 1 VW dobi polno napetost,  
(Vir: lastni)



Slika 18: Razporeditev napetosti pri prekinitvi faze v trikotu,  
(Vir: lastni)

Legenda:

Fazne napetosti (fazorji):

- $\underline{U}_{1U}$
- $\underline{U}_{1V}$
- $\underline{U}_{1W}$
- $\underline{U}_{2U}$
- $\underline{U}_{2V}$
- $\underline{U}_{2W}$

Medfazne napetosti (fazorji):

- $\underline{U}_{1UW}$
- $\underline{U}_{1VW}$
- $\underline{U}_{1UV}$

**1U** – Normalno stanje napetosti brez nesimetrije pred prekinitvijo.

Za računanje s simetričnimi komponentami potrebujemo fazne vrednosti, ki jih v trikotu ni. Zato si pomagamo z navideznimi vrednostmi, ki jih dobimo pri neozemljenih sistemih. Predpostavimo enotne veličine simetričnih komponent 1,  $\underline{a}$ ,  $\underline{a}^2$ , tako da je iskana fazna napetost  $\underline{U}_{L1}$  v realni osi kompleksne ravnine  $\underline{U}_{1U} = e^{j0^\circ}$ .

Na sponkah primarne strani transformatorja imamo stanje:

$$\underline{U}_{1V} = \underline{a}^2 \text{ in } \underline{U}_{1W} = \underline{a}$$

Priključena medfazna napetost je fazor  $\underline{U}_{1VW} = \underline{U}_{1V} - \underline{U}_{1W} = \underline{a}^2 - \underline{a} = -j\sqrt{3}$ .

Po prekinitvi faze L1 dobimo v protifazi polovične medfazne napetosti v navitjih:

$$\underline{U}_{1UV} = \underline{U}_{1WU} = -\frac{1}{2}(\underline{a}^2 - \underline{a})$$

Zato napišemo:

$$\underline{U}_{1WU} = \underline{U}_{1W} - \underline{U}_{1U}$$

$$\underline{U}_{1U} = \underline{U}_{1WU} + \underline{U}_{1W} = -\frac{1}{2}(\underline{a}^2 - \underline{a}) + \underline{a} = -\frac{1}{2}$$

Zdaj lahko računamo simetrične komponente:

$$\underline{U}_{(1)} = \frac{1}{3}(\underline{U}_{1U} + \underline{a}\underline{U}_{1V} + \underline{a}^2\underline{U}_{1W})$$

$$\underline{U}_{(1)} = \frac{1}{3}\left(-\frac{1}{2} + \underline{a}^3 + \underline{a}^3\right) = \frac{1}{2} = \frac{1}{2}e^{j0^\circ}$$

$$\underline{U}_{(2)} = \frac{1}{3}(\underline{U}_{1U} + \underline{a}^2\underline{U}_{1V} + \underline{a}\underline{U}_{1W})$$

$$\underline{U}_{(2)} = \frac{1}{3}\left(-\frac{1}{2} + \underline{a} + \underline{a}^2\right)$$

$$\underline{U}_{(2)} = -\frac{1}{2} = \frac{1}{2}e^{j180^\circ}$$

$$\underline{U}_{(0)} = 0 - \text{V trikotni vezavi ni nične komponente.}$$

Za vezavo Dyn5 se sekundarne veličine premaknejo za  $150^\circ$ :

$$\underline{U}_{(1)}^* = \frac{1}{2}e^{j0^\circ} \cdot e^{-j150^\circ} = \frac{1}{2}e^{-j150^\circ} = \frac{1}{2}(\underline{a}^2 - 1)$$

$$\underline{U}_{(2)}^* = \frac{1}{2} e^{-j180^\circ} \cdot e^{j150^\circ} = \frac{1}{2} e^{j30^\circ} = \frac{1}{2} (1 - \underline{a})$$

Rekompozicija napetosti na sekundarni strani Dyn5:

$$\underline{U}_{2U} = \underline{U}_{(1)}^* + \underline{U}_{(2)}^*$$

$$\underline{U}_{2U} = \frac{1}{2} (\underline{a}^2 - 1) + \frac{1}{2} (1 - \underline{a}^2) = -\frac{1}{2} (\underline{a}^2 - \underline{a}) = -\frac{1}{2} e^{j90^\circ}$$

$$\underline{U}_{2V} = \underline{a}^2 \underline{U}_{(1)}^* + \underline{a} \underline{U}_{(2)}^*$$

$$\underline{U}_{2V} = \underline{a}^2 \frac{1}{2} (\underline{a}^2 - 1) + \underline{a} \frac{1}{2} (1 - \underline{a}) = (\underline{a} - \underline{a}^2) = e^{j90^\circ}$$

$$\underline{U}_{2W} = \underline{a} \underline{U}_{(1)}^* + \underline{a}^2 \underline{U}_{(2)}^* e^{j150^\circ}$$

$$\underline{U}_{2W} = \underline{a} \frac{1}{2} (\underline{a}^2 - 1) + \underline{a}^2 \frac{1}{2} (\underline{a} - \underline{a}^2) = -\frac{1}{2} (\underline{a}^2 - \underline{a}) = -\frac{1}{2} e^{j90^\circ}$$

Na sekundarni strani dobimo polno fazno napetost v fazi L2 oziroma na sponki 2V, medtem ko sta napetosti na sponkah 2U in 2W obrnjeni za 180° in polovične vrednosti.

V poglavju smo dokazali, da se pri prekinitvi faze v SN-omrežju pojavijo enake razmere simetričnih komponent na sekundarni strani SN/NN-transformatorja, ne glede na vezno skupino: Yzn5 in Dyn5.

## 5.4 MODELIRANJE PREKINITVE FAZE ZA Dyn5 S PSCAD-PROGRAMSKO OPREMO

PSCAD je simulacijski program za simulacijo elektromagnetnih prehodnih pojavov. Lastnik programa je Hydro Manitoba Ltd. PSCAD (angl. Power Systems Computer Aided Design) in predstavlja grafični uporabniški vmesnik za oblikovanje omrežja ter vizualizacijo prehodnih pojavov, sami izračuni pa temeljijo na jedru EMTDC (angl. Electro-Magnetic Transients with DC). Tako grafični vmesnik kot računsko jedro sta združena v enem programu – PSCAD.

V delu so narejene simulacije na trifaznem transformatorju Dyn5 za različna obratovalna stanja in prekinitve faz na primarni strani transformatorja.



### 5.4.1 Simulacijski model

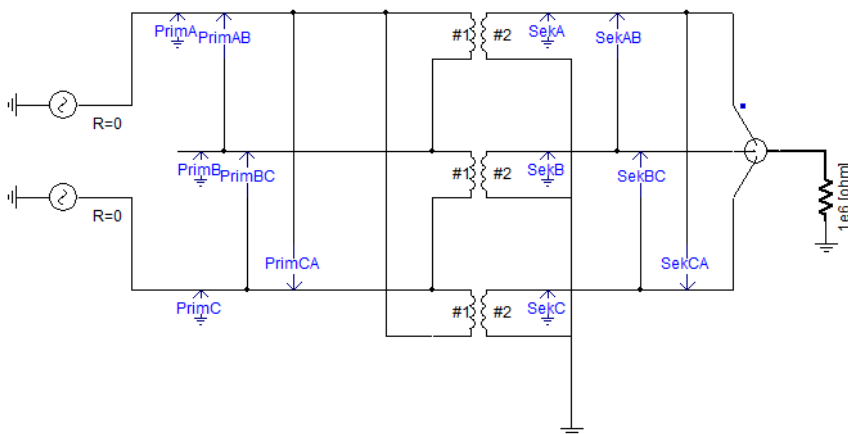
Simulacijski model omrežja je prikazan na sliki 5.7, kjer je prikazan trifazni transformator moči 50 kVA, 20/0,4 kV, vezna skupina Dyn5, ki je priključen na SN-omrežje 20 kV. Na 0,4 kV strani so priključena razne velikosti bremen.

### 5.4.2 Simulacije obratovalnih stanj

Na simulacijskem modelu omrežja smo obravnavali napetostne razmere za naslednje simulacije:

- prazni tek trifaznega transformatorja,
- trifazni transformator s trifaznim bremenom na sekundarju  $3 \times 7$  kW,
- trifazni transformator s trifaznim bremenom na sekundarju 50 % = 25 kW.

Simulacija 1, trifazni transformator obratuje v praznem teku.



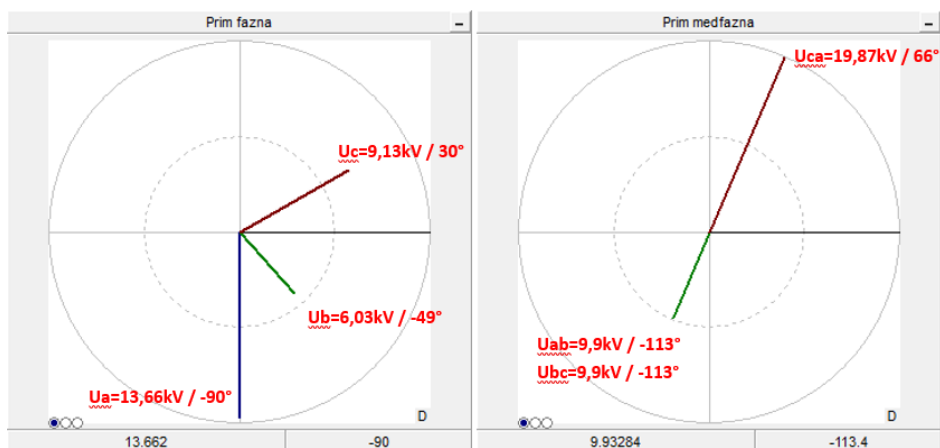
Slika 19: Simulacijsko omrežje in transformator Dyn5, (Vir: PSCAD)

| Primarne medfazne vrednosti                              | Sekundarne fazne vrednosti                            | Sekundarne medfazne vrednosti                            |
|--|---|--|
| $\underline{U}_{1UV} = \text{Prim}_{AB} = 20 \text{ kV}$ | $\underline{U}_{2U} = \text{Sek}_A = 0,23 \text{ kV}$ | $\underline{U}_{2UV} = \text{Sek}_{AB} = 0,4 \text{ kV}$ |
| $\underline{U}_{1VW} = \text{Prim}_{BC} = 20 \text{ kV}$ | $\underline{U}_{2V} = \text{Sek}_B = 0,23 \text{ kV}$ | $\underline{U}_{2VW} = \text{Sek}_{BC} = 0,4 \text{ kV}$ |
| $\underline{U}_{1WU} = \text{Prim}_{CA} = 20 \text{ kV}$ | $\underline{U}_{2W} = \text{Sek}_C = 0,23 \text{ kV}$ | $\underline{U}_{2WU} = \text{Sek}_{CA} = 0,4 \text{ kV}$ |

Tabela 1: Legenda slike Simulacijsko omrežje in transformator Dyn5, (Vir: PSCAD)

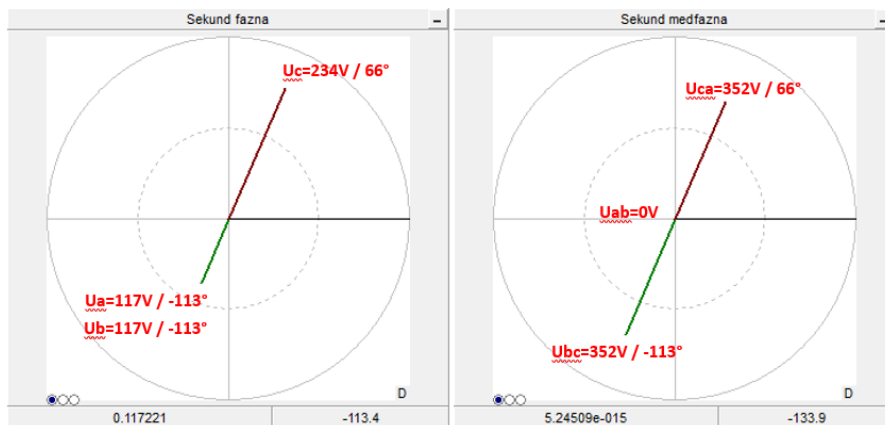
Odprte sponke na sekundarju modeliramo z bremenom  $10^6 \Omega$ .

Na sliki 20 so prikazani fazorji faznih in medfaznih napetosti na primarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN v praznem teku.



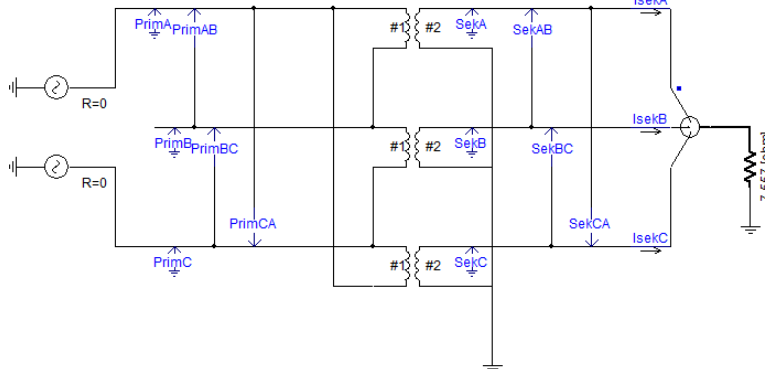
Slika 20: Fazorji faznih in medfaznih napetosti na primarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN v praznem teku, (Vir: PSCAD)

Na sliki 21 so prikazani fazorji faznih in medfaznih napetosti na sekundarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN v praznem teku.



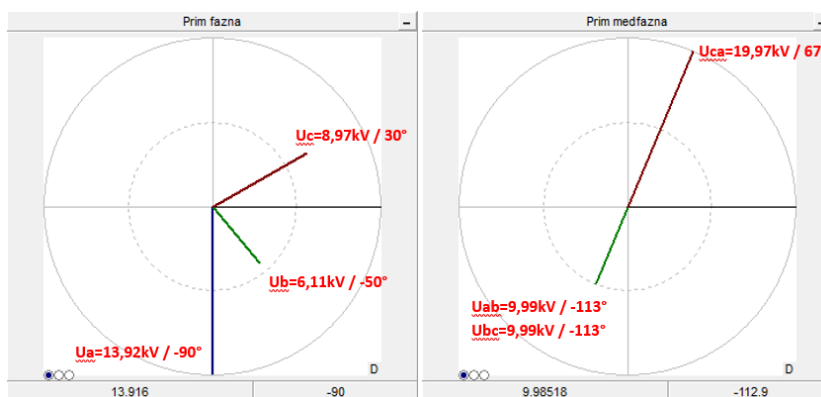
Slika 21: Fazorji faznih in medfaznih napetosti na sekundarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN v praznem teku, (Vir: PSCAD)

Simulacija 2, trifazni transformator s trifaznim bremenom na sekundarju  $3 \times 7 \text{ kW}$ , je prikazana na sliki 22.



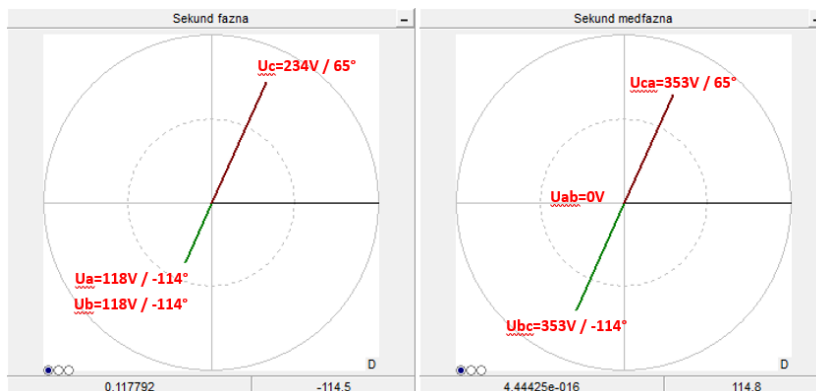
Slika 22: Trifazni transformator s trifaznim bremenom na sekundarju  $3 \times 7 \text{ kW}$ , (Vir: PSCAD)

Na sliki 23 so prikazani fazorji faznih in medfaznih napetosti na primarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju  $3 \times 7 \text{ kW}$ .



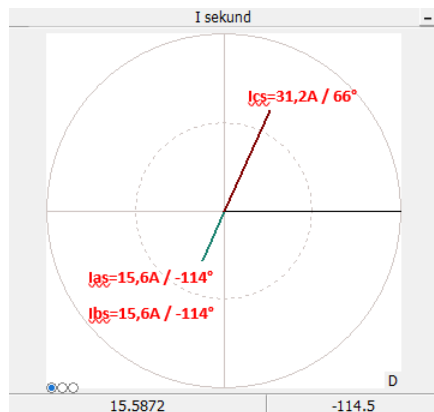
Slika 23: Fazorji faznih in medfaznih napetosti na primarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju  $3 \times 7 \text{ kW}$ , (Vir: PSCAD)

Na sliki 24 so prikazani fazorji faznih in medfaznih napetosti na sekundarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 3 × 7 kW.



Slika 24: Fazorji faznih in medfaznih napetosti na sekundarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 3 × 7 kW, (Vir: PSCAD)

Na sliki 25 je prikaz faznih tokov na sekundarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 3 × 7 kW.



Slika 25: Fazni tokovi na sekundarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 3 × 7 kW, (Vir: PSCAD)

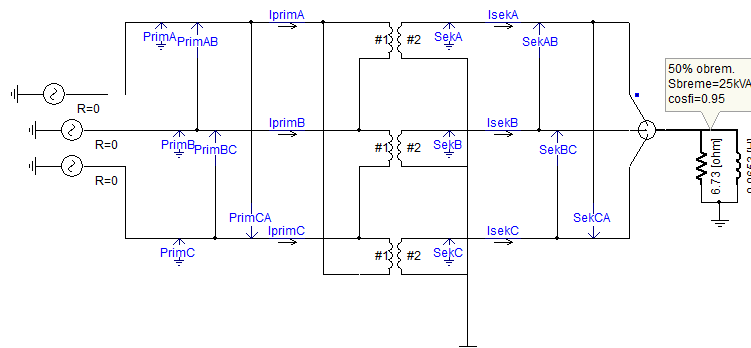
Izračunane moči na sekundarju:

$$P_a = 1,836 \text{ kW}$$

$$P_b = 1,836 \text{ kW}$$

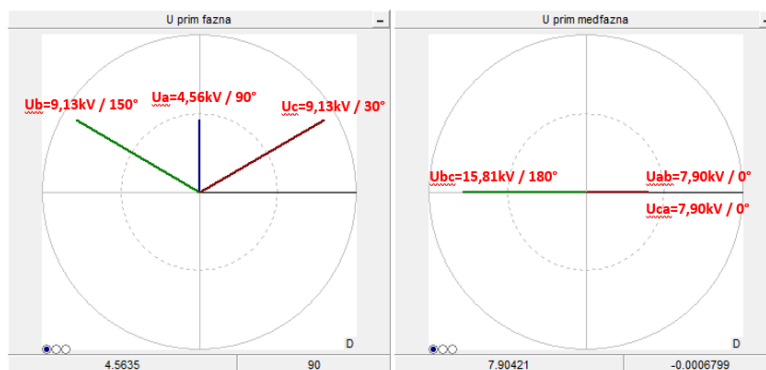
$$P_c = 7,344 \text{ kW}$$

Simulacija 3, trifazni transformator s trifaznim bremenom na sekundarju breme = 25 kW ( $\cos\phi = 0,95$ ) in prekinjeno fazo L1, je prikazana na sliki 26.



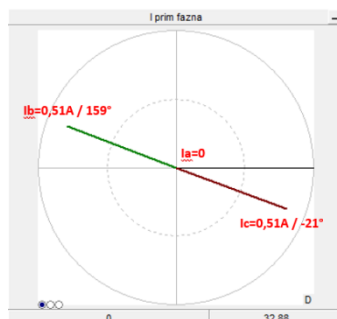
Slika 26: Trifazni transformator s trifaznim bremenom na sekundarju breme = 25 kW ( $\cos\phi = 0,95$ ) in prekinjeno fazo L1, (Vir: PSCAD)

Na sliki 27 so prikazani fazorji faznih in medfaznih napetosti na primarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L1 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 25 kW.



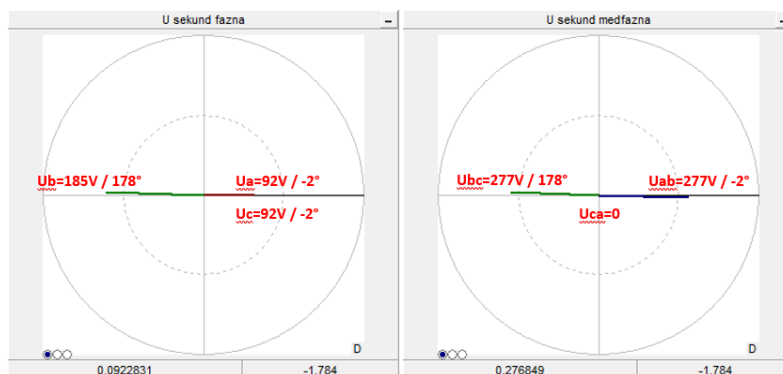
Slika 27: Fazorji faznih in medfaznih napetosti na primarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L1 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 25 kW (Vir: PSCAD)

Na sliki 28 so prikazani fazorji faznih tokov na primarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L1 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 25 kW.



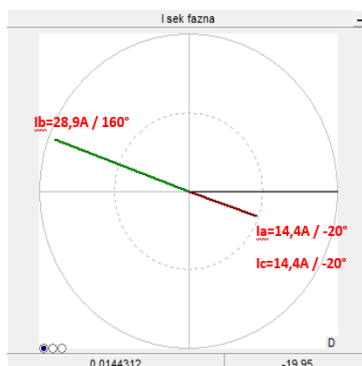
Slika 28: Fazorji faznih tokov na primarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L1 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 25 kW,  
(Vir: PSCAD)

Na sliki 29 so prikazani fazorji faznih in medfaznih napetosti na sekundarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L1 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 25 kW.



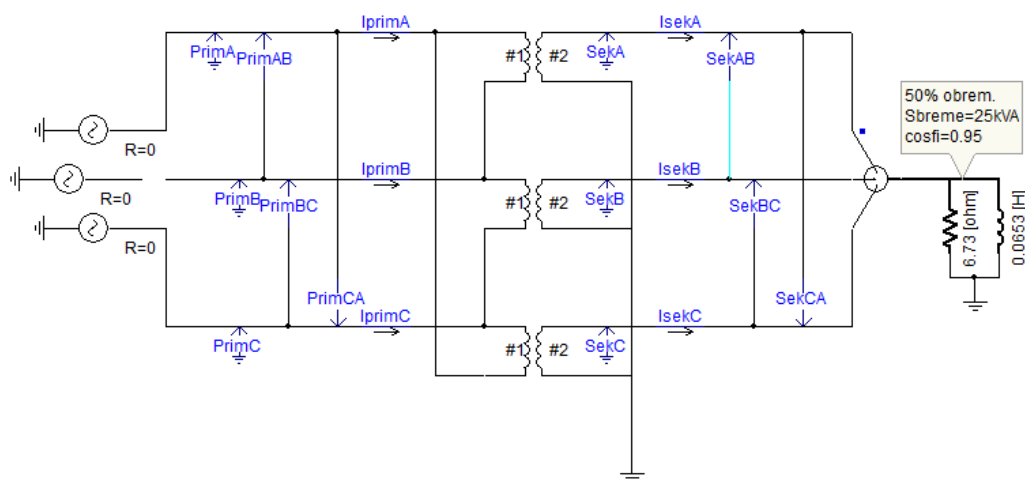
Slika 29: Fazorji faznih in medfaznih napetosti na sekundarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L1 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 25 kW,  
(Vir: PSCAD)

Na sliki 30 so prikazani fazorji faznih tokov na sekundarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L1 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 25 kW.



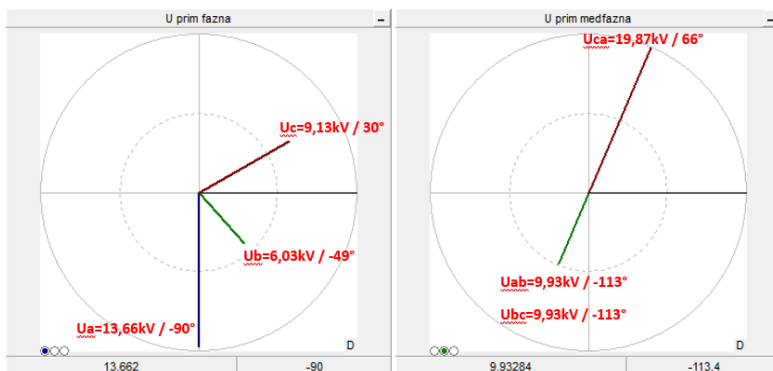
Slika 30: Fazorji faznih tokov na sekundarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L1 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 25 kW, (Vir: PSCAD)

Simulacija 3.1, trifazni transformator s trifaznim bremenom na sekundarju breme = 25 kW ( $\cos\varphi = 0,95$ ) in prekinjeno fazo L2, je prikazan na sliki 31.



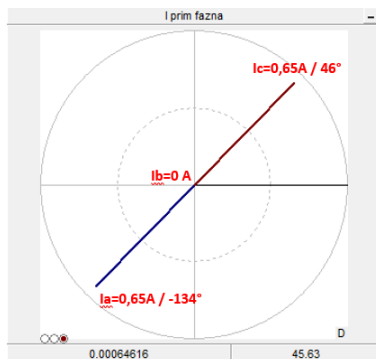
Slika 31: Trifazni transformator s trifaznim bremenom na sekundarju breme = 25 kW ( $\cos\varphi = 0,95$ ) in prekinjeno fazo L2, (Vir: PSCAD)

Na sliki 32 so prikazani fazorji faznih in medfaznih napetosti na primarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 25 kW.



Slika 32: Fazorji faznih in medfaznih napetosti na primarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 25 kW, (Vir: PSCAD)

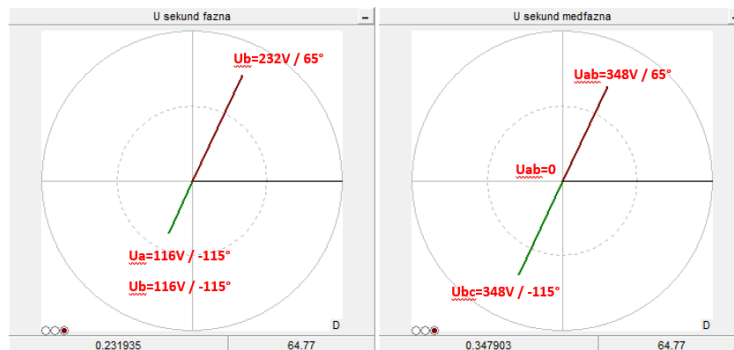
Na sliki 33 so prikazani fazorji faznih tokov na primarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 25 kW.



Slika 33: Fazorji faznih tokov na primarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 25 kW, (Vir: PSCAD)

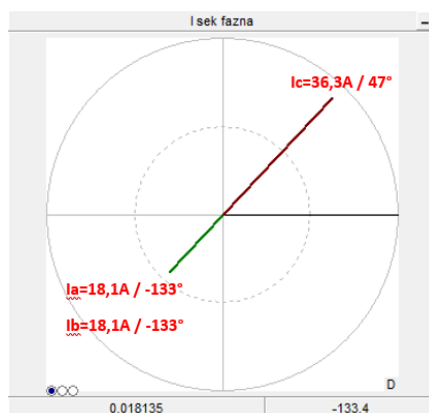


Na sliki 34 so prikazani fazorji faznih in medfaznih napetosti na sekundarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 25 kW.



Slika 34: Fazorji faznih in medfaznih napetosti na sekundarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 25 kW, (Vir: PSCAD)

Na sliki 35 so prikazani fazorji faznih tokov na sekundarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L2 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 25 kW.



Slika 35: Fazorji faznih tokov na primarni strani transformatorja pri prekinitvi faze L1 na SN s trifaznim bremenom na sekundarju 25 kW, (Vir: PSCAD)

## 6 MERITVE NESIMETRIJE $\underline{U}$ IN $\underline{I}$ PO PREKINITVI FAZE NA PRIMARJU SN/NN-TRANSFORMATORJU

Nesimetrična obremenitev/prekinitvev faze na primarju transformatorja je vzrok za napetostne in tokovne nesimetrije na NN-strani transformatorja.

V merilnici podjetja Kolektor Etra v Ljubljani (Črnuče) je bilo omogočeno izvajanje meritev prekinitve faze na primarni strani na dejanskem transformatorju 20/0,4 kV, 50 kVA, vezave Yzn5.

Transformator je bil priključen na izvor tri fazne napetosti v merilnici:  $3 \times 20/\sqrt{3}$  kV. Najprej smo verificirali vezavo v praznem teku. Izmerili smo veličine  $\underline{U}$  in  $\underline{I}$  na primarni in sekundarni strani transformatorja s pomočjo IED-numeričnega zaščitnega terminala 7SJ85 Siemens.

Nadalje je bilo priključeno približno simetrično ohmsko breme 2 kW/fazo na sekundarni strani transformatorja.

Nadalje smo izvedli dve meritvi nesimetričnega stanja prekinitve faze L1 in L2 na 20 kV strani. Raziskali smo razmere na sekundarni strani s pomočjo simetričnih komponent.

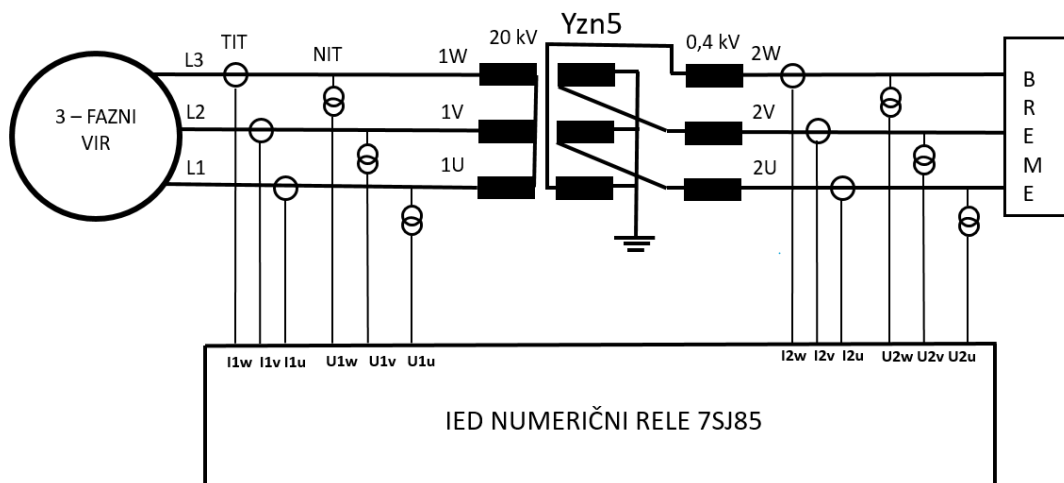
Meritve so bile skladne s pričakovanimi rezultati.

## **6.1 MERITVE NA TRANSFORMATORJU Yzn5 ZA RAZLIČNA OBRATOVALNA STANJA IN PREKINITVE FAZ NA PRIMARNI STRANI TRANSFORMATORJA**

V laboratorij podjetja Kolektor Etra smo pripeljali potrebno merilno opremo in IED-zaščitni rele za izvedbo meritev. Merilna oprema je bila izposojena od Elektro Ljubljana d.d. in EIMV ter nekaj stvari od podjetja Kolektor Etra. Po uspešni vezavi improviziranih bremen, skupaj s transformatorjem in porabniki, smo meritve opravili – prvo brez prekinitve faz. Sledila je odstranitev zunanje faze, ki simulira izpad te faze; nadaljevali smo z meritvami izpada notranje faze. Rezultate meritev smo odčitavali na IED-releju, ki je bil programsko nastavljen, da nam prikazuje vrednosti v obliki, potrebne za izračun s simetričnimi komponentami. IED-rele omogoča izklopno funkcijo, poleg tega pa tudi kronološki zapis dogodka in oscilografski zapis – analogne vrednosti, ki jih prek SIGRA-programске opreme pretvorimo v simetrične komponente.

Vezava merilne opreme je prikazana na sliki 36.

Merjenec Yzn5:

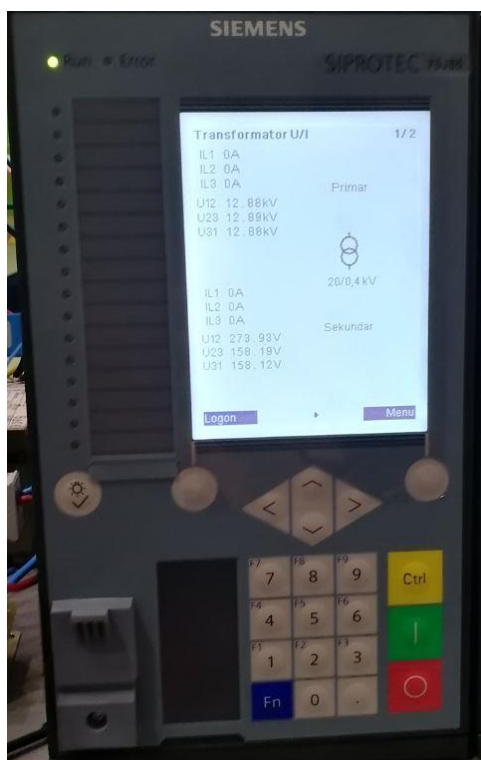


Slika 36: Vezava merilne opreme,  
(Vir: lastni)

Spisek merilne opreme:

- trifazni vir 20 kV,
- NIT:  $20/\sqrt{3}/0,1/\sqrt{3}$  kV,
- $TIT_{20kV}$ : 25/5 A,
- $NIT_{0,4kV}$ : 230/100 V,
- $TIT_{0,4kV}$ : 100/5 A,
- zaščitni rele: 7SJ85 Siemens.

Zaščitni rele 7SJ85 je inteligentna elektronska naprava, proizvajalca Siemens, in je namenjen za zaščito distribucijskih elektroenergetskih omrežij, predstavljen na sliki 37. V našem primeru smo ga uporabili za zajem napetosti in tokov na primarni in sekundarni strani merjenega trifaznega transformatorja SN/NN. Zajete posnetke meritev/oscilografije smo analizirali s programskim paketom SIGRA/Siemens. Programska oprema SIGRA je univerzalno inženirsko orodje za parametrizacijo, zagon in delovanje vseh naprav SIPROTEC 5. Njegov inovativni uporabniški vmesnik vsebuje kontekstno občutljiva navodila. Preprosta povezava z napravo prek USB-ja omogoča preprosto in učinkovito delo z IED-relejem.



Slika 37: IED-numerični zaščitni terminal 7SJ85 Siemens  
(Vir: lastni)

Diplomsko delo obravnava distribucijske trifazne transformatorje SN/NN. Pri analizi prekinitve faze v trifaznih transformatorjih potrebujemo osnovno razumevanje različnih načinov izdelave transformatorjev, zlasti konstrukcije jedra. V našem primeru je obravnavan transformator 50 kVA, 20/ 0,4 kV, vezne skupine Yzn5, prikazan na sliki 38.



Slika 38: Transformator Yzn5, 50 kVA, 20/0,4 kV,  
(Vir: lastni)

Na sliki 39 je predstavljena napisna tablica s podatki transformatorja.

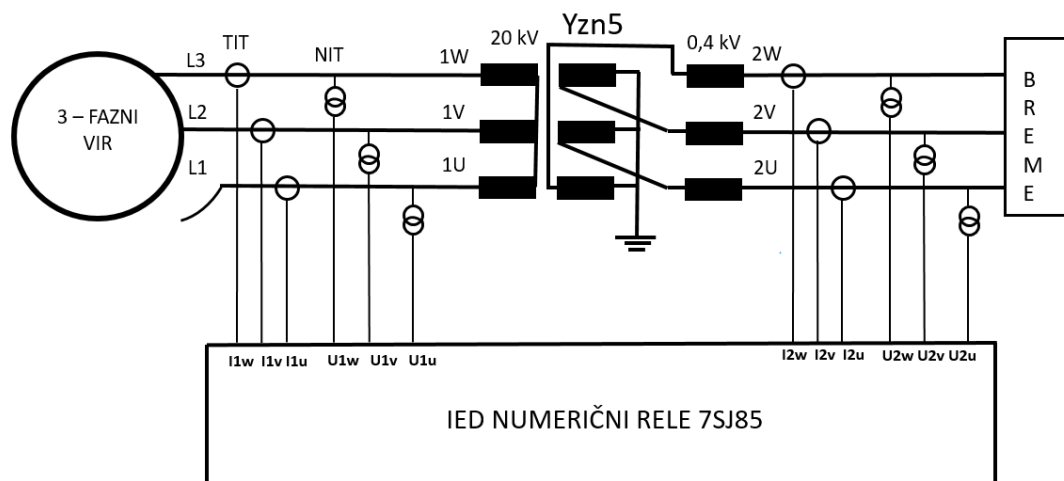
| Tip               |                                  | 7HTIM 50-21           |                           | VN stran - 1U, 1V, 1W |           |
|-------------------|----------------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|-----------|
| Nazivna moč [kVA] | 50                               | Izolacijski nivo [kV] | LI/AC 125/50              |                       |           |
| Standard          | SIST EN 50464-1                  | 1                     | 22050                     |                       | V         |
| Vezava            | Yzn5                             | Hlajenje              | KNAN                      | 2                     | 21525 V   |
| Frekvenca [Hz]    | 50                               | Uk [%]                | 4,37                      | 3                     | 21000 V   |
| Po [W]            | 88                               | Pk [W]                | 1055                      | 4                     | 20475 V   |
| Skup. masa [kg]   | 440                              | Masa dielek. [kg]     | 120                       | 5                     | 19950 V   |
| Material navitja: | Baker                            |                       |                           |                       | 1,37 A    |
| Material jedra:   | Hladno valjana transf. pločevina |                       | NN stran - 2U, 2V, 2W, 2N |                       |           |
| Masa bakra [kg]   | 78                               | Masa pločev. [kg]     | 135                       | Izolacijski nivo [kV] | LI/AC -/3 |
| Leto izdelave     | 2018                             | Serijska št.          | 82785                     | 420                   | V 68,7 A  |
| IZDELANO V EU     |                                  | 3819-T4               |                           |                       |           |

Slika 39: Napisna tablica transformatorja,  
(Vir: lastni)



Slika 40: Merilno vezje v laboratoriju podjetja Kolektor Etra, (Vir: lastni)

Prekinitev faze L1 na primarni strani transformatorja Yzn5 je prikazana na sliki 41.



Slika 41: Prekinitev faze L1 na primarni strani transformatorja Yzn5, (Vir: lastni)

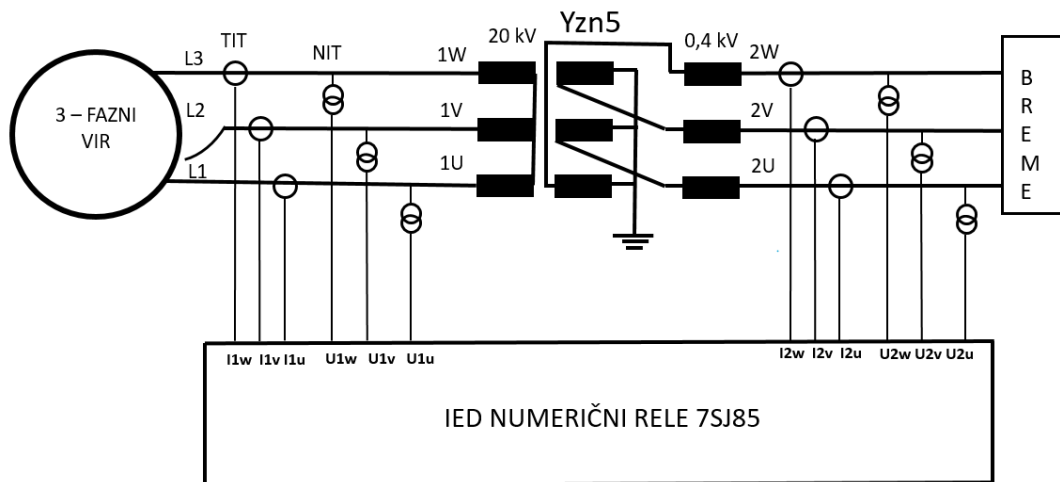
V tabeli 2 so prikazane efektivne vrednosti fazorjev napetosti in tokov primarne in sekundarne strani TR, ki jih je IED registriral pri prekinitvi faze L1 na primarni strani transformatorja Yzn5.

| Oznake IEC            | <b>Prekinitev zunanje faze</b>   |           |         |
|-----------------------|--|-----------|---------|
|                       | Tabela SIGRA<br>Referenca : napetost <u>faza B</u> (primar)<br><br><div style="background-color: #f0f0f0; padding: 5px;"> <span style="color: yellow; font-weight: bold;">Cursor 1: -1102,0 ms</span> </div> |           |         |
|                       | Measuring Signal   | Value     | Phase   |
| $\underline{I}_{L3}$  | K1:Primar Tok:I C  | 118,93 mA | -150,3° |
| $\underline{I}_{L1s}$ | K2:Sekundar Tok:IA   | 4,1091 A  | 28,8°   |
| $\underline{I}_{L2}$  | K1:Primar Tok:I B  | 121,42 mA | 29,2°   |
| $\underline{I}_{L2s}$ | K2:Sekundar Tok:I B  | 8,4816 A  | -151,4° |
| $\underline{I}_{L1}$  | K1:Primar Tok:IA   | 5,0701 mA | 47,8°   |
| $\underline{I}_{L3s}$ | K2:Sekundar Tok:IC   | 4,0854 A  | 28,9°   |
| $\underline{U}_{L1}$  | K1:Primar Nap:V A  | 5,7015 kV | -72,6°  |
| $\underline{U}_{L1s}$ | K2:Sekundar Nap:V A  | 140,33 V  | 28,6°   |
| $\underline{U}_{L2}$  | K1:Primar Nap:V B  | 11,784 kV | 0,0°    |
| $\underline{U}_{L2s}$ | K2:Sekundar Nap:V B  | 250,05 V  | -150,9° |
| $\underline{U}_{L3}$  | K1:Primar Nap:V C  | 11,541 kV | -122,1° |
| $\underline{U}_{L3s}$ | K2:Sekundar Nap:V C  | 109,52 V  | 29,2°   |

Tabela 2: Prekinitev L1; tabela SIGRA in oznake IEC,  
(Vir: SIGRA)



Prekinitev faze L2 na primarni strani transformatorja Yzn5 je prikazana na sliki 42.



Slika 42: Prekinitev faze L2 na primarni strani transformatorja Yzn5,  
(Vir: lastni)



V tabeli 3 so prikazane efektivne vrednosti fazorjev napetosti ter tokov primarne in sekundarne strani TR, ki jih je IED registriral pri prekinitvi faze L2 na primarni strani transformatorja Yzn5.

| Oznake IEC            | Prekinitev notranje faze                             |           |         |
|-----------------------|--|-----------|---------|
|                       | Tabela SIGRA<br>Referenca : napetost faza A (primar) |           |         |
|                       | Cursor 1: -1102,0 ms                                 |           |         |
|                       | Measuring Signal                                     | Value     | Phase   |
| $\underline{I}_{L3}$  | K1:Primar Tok:I C                                    | 121,32 mA | 151,1°  |
| $\underline{I}_{L1s}$ | K2:Sekundar Tok:IA                                   | 3,9824 A  | 151,1°  |
| $\underline{I}_{L2}$  | K1:Primar Tok:I B                                    | 0,7589 mA | -124,9° |
| $\underline{I}_{L2s}$ | K2:Sekundar Tok:I B                                  | 4,0296 A  | 150,8°  |
| $\underline{I}_{L1}$  | K1:Primar Tok:IA                                     | 116,09 mA | -28,8°  |
| $\underline{I}_{L3s}$ | K2:Sekundar Tok:I C                                  | 8,7476 A  | -29,4°  |
| $\underline{U}_{L1}$  | K1:Primar Nap:V A                                    | 11,957 kV | 0,0°    |
| $\underline{U}_{L1s}$ | K2:Sekundar Nap:V A                                  | 135,19 V  | 151,0°  |
| $\underline{U}_{L2}$  | K1:Primar Nap:V B                                    | 5,8703 kV | 66,6°   |
| $\underline{U}_{L2s}$ | K2:Sekundar Nap:V B                                  | 116,77 V  | 150,7°  |
| $\underline{U}_{L3}$  | K1:Primar Nap:V C                                    | 11,732 kV | 120,6°  |
| $\underline{U}_{L3s}$ | K2:Sekundar Nap:V C                                  | 251,63 V  | -28,7°  |

Tabela 3: Prekinitev L2; tabela SIGRA in oznake IEC,  
(Vir: SIGRA)

## 7 IZRAČUN SEKUNDARNIH VREDNOSTI FAZORJEV $\underline{U}$ , $\underline{I}$ PO METODI SIMETRIČNIH KOMPONENT

### 7.1 IZRAČUN SIMETRIČNIH KOMPONENT NA SEKUNDARJU TRANSFORMATORJA V PRIMERU PREKINITVE ZUNANJE FAZE (L1) NA PRIMARNI STRANI TRANSFORMATORJA

Za izhodišče izračuna smo uporabili registrirane primarne vrednosti napetosti in tokov na IED 7SJ85 Siemens.

#### 7.1.1 Nesimetrija tokov – prekinitev faze L1 na primarni strani transformatorja

$$\underline{I}_{L1} = 5,07 \angle 47,00^\circ \text{ mA}$$

$$\underline{I}_{L2} = 121 \angle 29,00^\circ \text{ mA}$$

<

$$\underline{I}_{L3} = 118 \angle -150,00^\circ \text{ mA}$$

Pozitivni direktni sistem:

$$\underline{I}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_{L1} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{L2} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{L3})$$

$$\underline{I}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (5,070 \cdot (\cos 47^\circ + j \sin 47^\circ) + (-0,5 + j0,866) \cdot 121 \cdot (\cos 29^\circ + j \sin 29^\circ) + (-0,5 - j0,866) \cdot 118 \cdot (\cos -150^\circ + j \sin -150^\circ))$$

$$\underline{I}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (5,070 \cdot (0,682 + j0,731) + (-0,5 + j0,866) \cdot 121 \cdot (0,875 + j0,485) + (-0,5 - j0,866) \cdot 118 \cdot (-0,866 - j0,5))$$

$$\underline{I}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (3,458 + j3,706) + (-0,5 + j0,866) \cdot (105,875 + j58,685) + (-0,5 - j0,866) \cdot (-102,188 - j59)$$

$$\underline{I}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (3,458 + j3,706 - 52,938 - j29,343 + j91,688 - 50,821 + 51,094 + j29,5 + j88,495 - 51,094)$$

$$\underline{I}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (-100,301 + j184,046)$$

$$\underline{I}_{(1)} = -33,434 + j61,349 = 69,87 \angle 118,59^\circ \text{ mA}$$

Inverzni sistem:

$$\underline{I}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_{L1} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{L2} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{L3}) =$$

$$\underline{I}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (5,070 \cdot (\cos 47^\circ + j \sin 47^\circ) + (-0,5 - j0,866) \cdot 121 \cdot (\cos 29^\circ + j \sin 29^\circ) + (-0,5 + j0,866) \cdot 118 \cdot (\cos -150^\circ + j \sin -150^\circ))$$

$$\underline{I}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (5,070 \cdot (0,682 + j0,731) + (-0,5 - j0,866) \cdot 121 \cdot (0,875 + j0,485) + (-0,5 + j0,866) \cdot 118 \cdot (-0,866 - j0,5))$$

$$\underline{I}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (3,458 + j3,706) + (-0,5 - j0,866) \cdot (105,875 + j58,685) + (-0,5 + j0,866) \cdot (-102,188 - j59)$$

$$\underline{I}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (3,458 + j3,706 - 52,938 - j29,343 - j91,688 + 50,821 + 51,094 + j29,5 - j88,495 + 51,094)$$

$$\underline{I}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (103,529 - j176,32)$$

$$\underline{I}_{(2)} = 34,510 - j58,773 = 68,1556 \angle -59,58^\circ \text{ mA}$$

Nična komponenta:

$$\underline{I}_{(0)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_{L1} + \underline{I}_{L2} + \underline{I}_{L3})$$

$$\underline{I}_{(0)} = \frac{1}{3} \cdot (3,458 + j3,706 + 105,875 + j58,685 - 102,188 - j59)$$

$$\underline{I}_{(0)} = \frac{1}{3} \cdot (7,145 + j3,391)$$

$$\underline{I}_{(0)} = 2,382 + j1,130 = 4,144 \angle 54,91^\circ \text{ mA}$$

Premaknitev tokov na sekundarno stran: direktni ( $-150^\circ$ ) in inverzni ( $+150^\circ$ )

\*Komponente na sekundarni strani.

$$\underline{I}_{(1)}^* = (-33,434 + j61,349) \cdot (\cos -150^\circ + j \sin -150^\circ)$$

$$\underline{I}_{(1)}^* = (-33,434 + j61,349) \cdot (-0,866 - j0,5)$$

$$\underline{I}_{(1)}^* = 28,954 + j16,717 - j53,128 + 30,675$$

$$\underline{I}_{(1)} = 59,629 - j36,411 = 69,867 \angle -31,41^\circ \text{ mA}$$

Z upoštevanjem prestave tokov na sekundarni strani dobimo vrednosti:

$$\underline{I}_{(1)s}^* = 4,19 \angle -31,41^\circ \text{ A}$$

$$\underline{I}_{(2)}^* = (34,510 - j58,773) \cdot (\cos 150^\circ + j \sin 150^\circ)$$

$$\underline{I}_{(2)}^* = (34,510 - j58,773) \cdot (-0,866 + j0,5)$$

$$\underline{I}_{(2)}^* = -29,886 + j17,255 + j50,897 + 29,387$$

$$\underline{I}_{(2)}^* = -0,499 + j68,152 = 68,154 \angle 90,42^\circ \text{ mA}$$

Z upoštevanjem prestave tokov na sekundarni strani dobimo vrednosti:

$$\underline{I}_{(2)s}^* = 4,09 \angle 90,42^\circ \text{ A}$$

Rekompozicija:

$$\underline{I}_{L1} = \underline{I}_{(1)}^* + \underline{I}_{(2)}^*$$

$$\underline{I}_{L1} = 59,629 - j36,411 - 0,499 + j68,152$$

$$\underline{I}_{L1} = 59,130 + j31,741 = 67,111 \angle 28,23^\circ \text{ mA}$$

Z upoštevanjem prestave tokov na sekundarni strani dobimo vrednosti:

$$\underline{I}_{L1s} = 4,03 \angle 28,23^\circ \text{ A}$$

$$\underline{I}_{L2} = \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(1)}^* + \underline{a} \cdot \underline{I}_{(2)}^*$$

$$\underline{I}_{L2} = (-0,5 - j0,866) \cdot (59,629 - j36,411) + (-0,5 + j0,866) \cdot (-0,499 + j68,152)$$

$$\underline{I}_{L2} = -29,815 + j18,206 - j51,639 - 31,532 + 0,250 - j34,076 - j0,432 - 59,020$$

$$\underline{I}_{L2} = -120,117 - j67,941 = 138,00 \angle -150,51^\circ \text{ mA}$$

Z upoštevanjem prestave tokov na sekundarni strani dobimo vrednosti:

$$\underline{I}_{L2s} = 8,28 \angle -150,51^\circ \text{ A}$$

$$\underline{I}_{L3} = \underline{a} \cdot \underline{I}_{(1)}^* + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(2)}^*$$

$$\underline{I}_{L3} = (-0,5 + j0,866) \cdot (59,629 - j36,411) + (-0,5 - j0,866) \cdot (-0,499 + j68,152)$$

$$\underline{I}_{L3} = -29,815 + j18,206 + j51,639 + 31,532 + 0,250 - j34,076 + j0,432 + 59,020$$

$$\underline{I}_{L3} = 60,987 + j36,201 = 70,92 \angle 30,69^\circ \text{ mA}$$

Z upoštevanjem prestave tokov na sekundarni strani dobimo vrednosti:

$$\underline{I}_{L3s} = 4,25 \angle 30,69^\circ \text{ A}$$

Preverjanje rezultatov meritev na IED-terminalu:

|                       |                       |          |         |
|-----------------------|-----------------------|----------|---------|
| $\underline{I}_{L1s}$ | K2: Sekundar Tok: I A | 4,1091 A | 28,8°   |
| $\underline{I}_{L2s}$ | K2: Sekundar Tok: I B | 8,4816 A | -151,4° |
| $\underline{I}_{L3s}$ | K2: Sekundar Tok: I C | 4,0854 A | 28,9°   |

Tabela 4: Tabela SIGRA; tokovi, prekinitiv L1,  
(Vir: SIGRA)

V okviru toleranc se izračunane vrednosti skladajo z izmerjenimi v IED-numerični zaščitni napravi Siemens 7SJ85.

### 7.1.2 Nesimetrija napetosti – prekinitiv faze L1 na primarni strani transformatorja

Za izhodišče izračuna smo uporabili registrirane primarne vrednosti napetosti in tokov na IED 7SJ85 Siemens.

$$\underline{U}_{L1} = 5,700 \angle -72,00^\circ \text{ kV}$$

$$\underline{U}_{L2} = 11,78 \angle 00,00^\circ \text{ kV}$$

$$\underline{U}_{L3} = 11,54 \angle -122,00^\circ \text{ kV}$$

Pozitivni (direktni) sistem:

$$\underline{U}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_{L1} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{L2} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{L3})$$

$$\underline{U}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (5,700 \cdot (\cos-72^\circ + j\sin-72^\circ) + (-0,5 + j0,866) \cdot 11,78 \cdot (\cos0^\circ + j\sin0^\circ) + (-0,5 - j0,866) \cdot 11,54 \cdot (\cos-122^\circ + j\sin-122^\circ))$$

$$\underline{U}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (5,700 \cdot (0,309 - j0,951) + (-0,5 + j0,866) \cdot 11,78 \cdot (1 + j0) + (-0,5 - j0,866) \cdot 11,54 \cdot (-0,530 - j0,848))$$

$$\underline{U}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (1,761 - j5,421) + (-0,5 + j0,866) \cdot 11,78 + (-0,5 - j0,866) \cdot (-6,116 - j9,786)$$

$$\underline{U}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (1,761 - j5,421 - 5,89 + j10,201 + 3,058 + j4,893 + j5,296 - 8,475)$$

$$\underline{U}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (-9,546 + j14,969)$$

$$\underline{U}_{(1)} = -3,182 + j4,990 = 5,92 \angle 122^\circ \text{ kV}$$

Inverzni sistem:

$$\underline{U}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_{L1} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{L2} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{L3}) =$$

$$\underline{U}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (5,700 \cdot (\cos-72^\circ + j\sin-72^\circ) + (-0,5 - j0,866) \cdot 11,78 \cdot (\cos0^\circ + j\sin0^\circ) + (-0,5 + j0,866) \cdot 11,54 \cdot (\cos-122^\circ + j\sin-122^\circ))$$

$$\underline{U}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (5,700 \cdot (0,309 - j0,951) + (-0,5 - j0,866) \cdot 11,78 \cdot (1 + j0) + (-0,5 + j0,866) \cdot 11,54 \cdot (-0,530 - j0,848))$$

$$\underline{U}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (1,761 - j5,421 + (-0,5 - j0,866) \cdot 11,78 + (-0,5 + j0,866) \cdot (-6,116 - j9,786))$$

$$\underline{U}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (1,761 - j5,421 - 5,89 - j10,201 + 3,058 + j4,893 - j5,296 + 8,475)$$

$$\underline{U}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (7,404 - j16,025)$$

$$\underline{U}_{(2)} = 2,468 - j5,342 = 5,88 \angle -65^\circ \text{ kV}$$

Nični sistem:

$$\underline{U}_{(0)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_{L1} + \underline{U}_{L2} + \underline{U}_{L3})$$

$$\underline{U}_{(0)} = \frac{1}{3} \cdot (1,761 - j5,421 + 11,78 - 6,116 - j9,786)$$

$$\underline{U}_{(0)} = \frac{1}{3} \cdot (7,425 - j15,207)$$

$$\underline{U}_{(0)} = 2,475 - j5,069 = 15,41 \angle -80,76^\circ \text{ kV}$$

Premaknitev napetosti na sekundarno stran: direktni ( $-150^\circ$ ) in inverzni ( $+150^\circ$ ).

\*Komponente na sekundarni strani.

$$\underline{U}_{(1)}^* = (-3,182 + j4,990) \cdot (\cos -150^\circ + j \sin -150^\circ)$$

$$\underline{U}_{(1)}^* = (-3,182 + j4,990) \cdot (-0,866 - j0,5)$$

$$\underline{U}_{(1)}^* = 2,756 + j1,591 - j4,321 + 2,495$$

$$\underline{U}_{(1)}^* = 5,251 - j2,73 = 5,92 \angle -27,47^\circ \text{ kV}$$

Z upoštevanjem prestavnega razmerja  $20/0,4 = 50$  dobimo na sekundarni strani vrednosti:

$$\underline{U}_{(1)}^*_{s} = 118 \angle -27,47^\circ \text{ V}$$

$$\underline{U}_{(2)}^* = (2,468 - j5,342) (\cos 150^\circ + j \sin 150^\circ)$$

$$\underline{U}_{(2)}^* = (2,468 - j5,342) \cdot (-0,866 + j0,5)$$

$$\underline{U}_{(2)}^* = -2,137 + j1,234 + j4,626 + 2,671$$

$$\underline{U}_{(2)}^* = 0,534 + j5,860 = 5,88 \angle 84,79^\circ \text{ kV}$$

Z upoštevanjem prestavnega razmerja  $20/0,4 = 50$  dobimo na sekundarni strani vrednosti:

$$\underline{U}_{(2)}^*_{s} = 117 \angle 84,79^\circ \text{ V}$$

Rekompozicija:

$$\underline{U}_{L1} = \underline{U}_{(1)}^* + \underline{U}_{(2)}^*$$

$$\underline{U}_{L1} = 5,251 - j2,73 + 0,534 + j5,860$$

$$\underline{U}_{L1} = 5,785 + j3,13 = 6,55 \angle 28,53^\circ \text{ kV}$$

Z upoštevanjem prestavnega razmerja  $20/0,4 = 50$  dobimo na sekundarni strani vrednosti:

$$\underline{U}_{L1s} = 131 \angle 28,53^\circ \text{ V}$$

$$\underline{U}_{L2} = \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{(1)}^* + \underline{a} \cdot \underline{U}_{(2)}^*$$

$$\underline{U}_{L2} = \underline{a}^2 \cdot (5,251 - j2,73) + \underline{a} \cdot (0,534 + j5,860)$$

$$\underline{U}_{L2} = (-0,5 - j0,866) \cdot (5,251 - j2,73) + (-0,5 + j0,866) \cdot (0,534 + j5,860)$$

$$\underline{U}_{L2} = -2,626 + j1,365 - j4,547 - 2,364 - 0,267 - j2,93 + j0,462 - 5,075$$

$$\underline{U}_{L2} = -10,332 - j5,65 = 11,78 \angle -151,33^\circ \text{ kV}$$

Z upoštevanjem prestavnega razmerja  $20/0,4 = 50$  dobimo na sekundarni strani vrednosti:

$$\underline{U}_{L2s} = 235,52 \angle -151,33^\circ \text{ V}$$

$$\underline{U}_{L3} = \underline{a} \cdot \underline{U}_{(1)}^* + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{(2)}^*$$

$$\underline{U}_{L3} = (-0,5 + j0,866) \cdot (5,251 - j2,73) + (-0,5 - j0,866) \cdot (0,534 + j5,860)$$

$$\underline{U}_{L3} = -2,626 + j1,365 + j4,547 + 2,364 - 0,267 - j2,93 - j0,462 + 5,075$$

$$\underline{U}_{L3} = 4,546 + j2,52 = 5,20 \angle 29,00^\circ \text{ kV}$$

Z upoštevanjem prestavnega razmerja  $20/0,4 = 50$  dobimo na sekundarni strani vrednosti.

$$\underline{U}_{L3s} = 103,96 \angle 29,00^\circ \text{ V}$$



Preverjanje rezultatov meritev:

|                       |                       |          |         |
|-----------------------|-----------------------|----------|---------|
| $\underline{U}_{L1s}$ | K2: Sekundar Nap: V A | 140,33 V | 28,6°   |
| $\underline{U}_{L2s}$ | K2: Sekundar Nap: V B | 250,05 V | -150,9° |
| $\underline{U}_{L3s}$ | K2: Sekundar Nap: V C | 109,52 V | 29,2°   |

Tabela 5: Tabela SIGRA; napetosti, prekinitve L1,  
(Vir: SIGRA)

V okviru toleranc so izračunane vrednosti skladne z izmerjenimi vrednostmi na IED-  
numerični zaščitni napravi Siemens 7SJ85.

## 7.2 IZRAČUN SIMETRIČNIH KOMPONENT NA SEKUNDARJU TRANSFORMATORJA V PRIMERU PREKINITVE NOTRANJE FAZE (L2) NA PRIMARNI STRANI TRANSFORMATORJA

Za izhodišče izračuna smo uporabili registrirane primarne vrednosti napetosti in tokov  
na IED 7SJ85 Siemens.

### 7.2.1 Nesimetrija tokov – prekinitve faze L2 na primarni strani transformatorja

$$\underline{I}_{L1} = 116 \angle -28^\circ \text{ mA}$$

$$\underline{I}_{L2} = 0 \text{ mA}$$

$$\underline{I}_{L3} = 121 \angle 151^\circ \text{ mA}$$

Pozitivni (direktni) sistem:

$$\underline{I}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_{L1} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{L2} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{L3})$$

$$\underline{I}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (116 \cdot (\cos -28^\circ + j \sin -28^\circ) + (-0,5 + j0,866) \cdot 0 \cdot (\cos -125^\circ + j \sin -125^\circ) + (-0,5 - j0,866) \cdot (121 \cdot (\cos 151^\circ + j \sin 151^\circ)))$$

$$\underline{I}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (116 \cdot (0,883 - j0,469) + (-0,5 + j0,866) \cdot 0 \cdot (-0,574 - j0,819) + (-0,5 - j0,866) \cdot (121 \cdot (-0,875 + j0,485)))$$

$$\underline{I}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot ((102,428 - j54,404) + (-0,5 + j0,866) \cdot 0 + (-0,5 - j0,866) \cdot (-105,875 + j58,685))$$

$$\underline{I}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (102,428 - j54,404 + 52,938 - j29,343 + j91,688 + 50,821)$$

$$\underline{I}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (206,187 + j7,941)$$

$$\underline{I}_{(1)} = 68,729 + j2,637 = 68,78 \angle 2,20^\circ \text{ mA}$$

Inverzni sistem:

$$\underline{I}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_{L1} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{L2} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{L3})$$

$$\underline{I}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (116 \cdot (\cos -28^\circ + j\sin -28^\circ) + (-0,5 - j0,866) \cdot 0 \cdot (\cos -125^\circ + j\sin -125^\circ) + (-0,5 + j0,866) \cdot (121 \cdot (\cos 151^\circ + j\sin 151^\circ)))$$

$$\underline{I}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (116 \cdot (0,883 - j0,469) + (-0,5 - j0,866) \cdot 0 \cdot (-0,574 - j0,819) + (-0,5 + j0,866) \cdot (121 \cdot (-0,875 + j0,485)))$$

$$\underline{I}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (102,428 - j54,404) + (-0,5 - j0,866) \cdot 0 + (-0,5 + j0,866) \cdot (-105,875 + j58,685))$$

$$\underline{I}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (102,428 - j54,404 + (-0,5 + j0,866) \cdot (-105,875 + j58,685))$$

$$\underline{I}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (102,428 - j54,404 + 52,938 - j29,343 - j91,688 - 50,821)$$

$$\underline{I}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (104,545 - j175,435)$$

$$\underline{I}_{(2)} = 34,848 - j58,478 = 68,07 \angle -59,21^\circ \text{ mA}$$

Premaknitev tokov na sekundarno stran: direktni ( $-150^\circ$ ) in inverzni ( $+150^\circ$ ).

\*Komponente na sekundarni strani.

$$\underline{I}_{(1)}^* = (68,729 + j2,637) \cdot (\cos -150^\circ + j\sin -150^\circ)$$

$$\underline{I}_{(1)}^* = (68,729 + j2,637) \cdot (-0,866 - j0,5)$$

$$\underline{I}_{(1)}^* = -59,519 - j34,365 - j2,284 + 1,319$$

$$\underline{I}_{(1)}^* = -58,200 - j36,649 = 68,78 \angle -147,80^\circ \text{ mA}$$

Z upoštevanjem prestave tokov na sekundarni strani dobimo vrednosti:

$$\underline{I}_{(1)}^*{}_s = 4,13 \angle -147,80^\circ \text{ A}$$

$$\underline{I}_{(2)}^* = (34,848 - j58,478) \cdot (\cos 150^\circ + j \sin 150^\circ)$$

$$\underline{I}_{(2)}^* = (34,848 - j58,478) \cdot (-0,866 + j0,5)$$

$$\underline{I}_{(2)}^* = -30,178 + j17,424 + j50,642 + 29,239$$

$$\underline{I}_{(2)}^* = -0,939 + j68,066 = 68,07 \angle 90,79^\circ \text{ mA}$$

Z upoštevanjem prestave tokov na sekundarni strani dobimo vrednosti:

$$\underline{I}_{(2)}^*{}_s = 4,08 \angle 90,79^\circ \text{ A}$$

Rekompozicija:

$$\underline{I}_{L1} = \underline{I}_{(1)}^* + \underline{I}_{(2)}^*$$

$$\underline{I}_{L1} = -58,200 - j36,649 - 0,939 + j68,066$$

$$\underline{I}_{L1} = -59,139 + j31,417 = 66,97 \angle 152,02^\circ \text{ mA}$$

Z upoštevanjem prestave tokov na sekundarni strani dobimo vrednosti:

$$\underline{I}_{L1s} = 4,02 \angle 152,02^\circ \text{ A}$$

$$\underline{I}_{L2} = \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(1)}^* + \underline{a} \cdot \underline{I}_{(2)}^*$$

$$\underline{I}_{L2} = (-0,5 - j0,866) \cdot (-58,200 - j36,649) + (-0,5 + j0,866) \cdot (-0,939 + j68,066)$$

$$\underline{I}_{L2} = 29,100 + j18,325 + j50,401 - 31,738 + 0,470 - j34,033 - j0,813 - 58,945$$

$$\underline{I}_{L2} = -61,583 + j33,88 = 70,29 \angle 151,18^\circ \text{ mA}$$

Z upoštevanjem prestave tokov na sekundarni strani dobimo vrednosti:

$$\underline{I}_{L2s} = 4,22 \angle 151,18^\circ \text{ A}$$

$$\underline{I}_{L3} = \underline{a} \cdot \underline{I}_{(1)}^* + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(2)}^*$$

$$\underline{I}_{L3} = (-0,5 + j0,866) \cdot (-58,200 - j36,649) + (-0,5 - j0,866) \cdot (-0,939 + j68,066)$$

$$\underline{I}_{L3} = 29,100 + j18,325 - j50,401 + 31,738 + 0,470 - j34,033 + j0,813 + 58,945$$

$$\underline{I}_{L3} = 120,253 - j65,296 = 136,84 \angle -28,50^\circ \text{ mA}$$

Z upoštevanjem prestave tokov na sekundarni strani dobimo vrednosti:

$$\underline{I}_{L3s} = 8,21 \angle -28,50^\circ \text{ A}$$

Preverjanje rezultatov meritev:

|                       |                       |          |        |
|-----------------------|-----------------------|----------|--------|
| $\underline{I}_{L1s}$ | K2: Sekundar Tok: I A | 3,9824 A | 151,1° |
| $\underline{I}_{L2s}$ | K2: Sekundar Tok: I B | 4,0296 A | 150,8° |
| $\underline{I}_{L3s}$ | K2: Sekundar Tok: I C | 8,7476 A | -29,4° |

Tabela 6: Tabela SIGRA; tokovi, prekinitev L2,  
(Vir: SIGRA)

V okviru toleranc so izračunane vrednosti skladne z izmerjenimi vrednostmi na IED-  
numerični zaščitni napravi Siemens 7SJ85.

### 7.2.2 Nesimetrija napetosti – prekinitev faze L2 na primarni strani transformatorja

Za izhodišče izračuna smo uporabili registrirane primarne vrednosti napetosti in tokov  
na IED 7SJ85 Siemens.

$$\underline{U}_{L1} = 12,00 \angle 0,0^\circ \text{ kV}$$

$$\underline{U}_{L2} = 5,90 \angle 66^\circ \text{ kV}$$

$$\underline{U}_{L3} = 11,70 \angle 120^\circ \text{ kV}$$

Pozitivni (direktni) sistem:

$$\underline{U}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_{L1} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{L2} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{L3}) =$$

$$\underline{U}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (12 \cdot (\cos 0^\circ + j \sin 0^\circ)) + (-0,5 + j0,866) \cdot 5,90 \cdot (\cos 66^\circ + j \sin 66^\circ) + (-0,5 - j0,866) \cdot 11,70 \cdot (\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ)$$

$$\underline{U}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (12 \cdot (1 - j0) + (-0,5 + j0,866) \cdot 5,90 \cdot (0,407 + j0,914) + (-0,5 - j0,866) \cdot (11,70 \cdot (-0,5 + j0,866)))$$

$$\underline{U}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (12 + (-0,5 + j0,866) \cdot 2,401 + j5,393) + (-0,5 - j0,866) \cdot (-5,85 + j10,132)$$

$$\underline{U}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (12 - 1,201 - j2,697 + j2,079 - 4,670 + 2,925 - j5,066 + j5,066 + 8,774)$$

$$\underline{U}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (17,828 - j0,618)$$

$$\underline{U}_{(1)} = 5,943 - j0,206 = 5,95 \angle -1,99^\circ \text{ kV}$$

Inverzni sistem:

$$\underline{U}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_{L1} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{L2} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{L3}) =$$

$$\underline{U}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (12 \cdot (\cos 0^\circ + j \sin 0^\circ) + (-0,5 - j0,866) \cdot 5,90 \cdot (\cos 66^\circ + j \sin 66^\circ) + (-0,5 + j0,866) \cdot 11,70 \cdot (\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ))$$

$$\underline{U}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (12 \cdot (1 - j0) + (-0,5 - j0,866) \cdot 5,90 \cdot (0,407 + j0,914) + (-0,5 + j0,866) \cdot (11,70 \cdot (-0,5 + j0,866)))$$

$$\underline{U}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (12 + (-0,5 - j0,866) \cdot (2,401 + j5,393) + (-0,5 + j0,866) \cdot (-5,85 + j10,132))$$

$$\underline{U}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (12 - 1,201 - j2,697 - j2,079 + 4,670 + 2,925 - j5,066 - j5,066 - 8,774)$$

$$\underline{U}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (9,62 - j14,908)$$

$$\underline{U}_{(2)} = 3,207 - j4,969 = 5,91 \angle -57,16^\circ \text{ kV}$$

Nični sistem:

$$\underline{U}_{(0)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_{L1} + \underline{U}_{L2} + \underline{U}_{L3})$$

$$\underline{U}_{(0)} = \frac{1}{3} \cdot (12 \cdot (\cos 0^\circ + j \sin 0^\circ) + 5,90 \cdot (\cos 66^\circ + j \sin 66^\circ) + 11,70 \cdot (\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ))$$

$$\underline{U}_{(0)} = \frac{1}{3} \cdot (12 \cdot (1 - j0) + 5,90 \cdot (0,407 + j0,914) + 11,70 \cdot (-0,5 + j0,866))$$

$$\underline{U}_{(0)} = \frac{1}{3} \cdot (12 + 2,401 + j5,393 - 5,85 + j10,132)$$

$$\underline{U}_{(0)} = \frac{1}{3} \cdot (8,551 + j15,525)$$

$$\underline{U}_{(0)} = 2,850 + j5,175 = 5,91 \angle 61,15^\circ \text{ kV}$$

Premaknitev napetosti na sekundarno stran: direktni ( $-150^\circ$ ) in inverzni ( $+150^\circ$ ).

\*Komponente na sekundarni strani.

$$\underline{U}_{(1)}^* = (5,943 - j0,206) \cdot (\cos -150^\circ + j \sin -150^\circ)$$

$$\underline{U}_{(1)}^* = (5,943 - j0,206) \cdot (-0,866 - j0,5)$$

$$\underline{U}_{(1)}^* = -5,147 - j2,972 + j0,178 - 0,103$$

$$\underline{U}_{(1)}^* = -5,25 - j2,794 = 5,95 \angle -151,98^\circ \text{ kV}$$

Z upoštevanjem prestavnega razmerja  $20/0,4 = 50$  dobimo na sekundarni strani vrednosti:

$$\underline{U}_{(1)}^*_{s} = 118,94 \angle -151,98^\circ \text{ V}$$

$$\underline{U}_{(2)}^* = (3,207 - j4,969) (\cos 150^\circ + j \sin 150^\circ)$$

$$\underline{U}_{(2)}^* = (3,207 - j4,969) \cdot (-0,866 + j0,5)$$

$$\underline{U}_{(2)}^* = -2,777 + j1,604 + j4,303 + 2,485$$

$$\underline{U}_{(2)}^* = -0,292 + j5,907 = 5,91 \angle 92,83^\circ \text{ kV}$$

Z upoštevanjem prestavnega razmerja  $20/0,4 = 50$   
dobimo na sekundarni strani vrednosti:

$$\underline{U}_{(2)}^* = 118,28 \angle 92,83^\circ \text{ V}$$

Rekompozicija:

$$\underline{U}_{L1} = \underline{U}_{(1)}^* + \underline{U}_{(2)}^*$$

$$\underline{U}_{L1} = -5,25 - j2,794 - 0,292 + j5,907$$

$$\underline{U}_{L1} = -5,542 + j3,113 = 6,36 \angle 150,68^\circ \text{ kV}$$

Z upoštevanjem prestavnega razmerja  $20/0,4 = 50$   
dobimo na sekundarni strani vrednosti:

$$\underline{U}_{1s} = 127,12 \angle 150,68^\circ \text{ V}$$

$$\underline{U}_{L2} = \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{(1)}^* + \underline{a} \cdot \underline{U}_{(2)}^*$$

$$\underline{U}_{L2} = \underline{a}^2 \cdot (-5,25 - j2,794) + \underline{a} \cdot (-0,292 + j5,907)$$

$$\underline{U}_{L2} = (-0,5 - j0,866) \cdot (-5,25 - j2,794) + (-0,5 + j0,866) \cdot (-0,292 + j5,907)$$

$$\underline{U}_{L2} = 2,625 + j1,397 + j4,547 - 2,42 + 0,146 - j2,954 - j0,253 - 5,115$$

$$\underline{U}_{L2} = -4,764 + j2,737 = 5,49 \angle 150,12^\circ \text{ kV}$$

Z upoštevanjem prestavnega razmerja  $20/0,4 = 50$   
dobimo na sekundarni strani vrednosti:

$$\underline{U}_{2s} = 109,88 \angle 150,12^\circ \text{ V}$$

$$\underline{U}_{L3} = \underline{a} \cdot \underline{U}_{(1)}^* + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{(2)}^*$$

$$\underline{U}_{L3} = (-0,5 + j0,866) \cdot (-5,25 - j2,794) + (-0,5 - j0,866) \cdot (-0,292 + j5,907)$$

$$\underline{U}_{L3} = 2,625 + j1,397 - j4,547 + 2,42 + 0,146 - j2,954 + j0,253 + 5,115$$

$$\underline{U}_{L3} = 10,306 - j5,851 = 11,85 \angle -29,58^\circ \text{ kV}$$

Z upoštevanjem prestavnega razmerja  $20/0,4 = 50$   
dobimo na sekundarni strani vrednosti:

$$\underline{U}_{L3s} = 237,02 \angle -29,58^\circ \text{ V}$$

Preverjanje rezultatov meritev:

|                       |                       |          |        |
|-----------------------|-----------------------|----------|--------|
| $\underline{U}_{L1s}$ | K2: Sekundar Nap: V A | 135,19 V | 151,0° |
| $\underline{U}_{L2s}$ | K2: Sekundar Nap: V B | 116,77 V | 150,7° |
| $\underline{U}_{L3s}$ | K2: Sekundar Nap: V C | 251,63 V | -28,7° |

Tabela 7: Tabela SIGRA; napetosti, prekinitiv L2,  
(Vir: lastni)

V okviru toleranc so izračunane vrednosti skladne z izmerjenimi vrednostmi na IED-  
numerični zaščitni napravi Siemens 7SJ85.

## 8 SKLEP

V diplomskem delu obravnavamo nesimetrije tokov in napetosti na nizkonapetostni strani, ki jih povzroči izpad ene faze na primarni srednje napetostni strani transformatorja, ki smo jih obravnavali pri predmetu zaščita elektroenergetskega sistema. Nesimetrije napetosti in tokov računamo s pomočjo simetričnih komponent, kot je prikazano v diplomskem delu.

Težava zaznave izpada ene faze na primarni strani je, da na tem mestu distribucijsko omrežje nima vgrajenih merilnih naprav oziroma merilnih napetostnih in tokovnih transformatorjev na primarni strani transformatorja, ki bi nesimetrije zaznali.

Ovrednotili smo nesimetrije tokov in napetosti zaradi prekinitve vodnika na primarni strani transformatorja s pomočjo meritev na dejanskem transformatorju moči 50 kVA, 20/0,4 kV; vezave Yzn5 in jih potrdili z izračuni s simetričnimi komponentami.

Da bi teorijo simetričnih komponent podprli z delovanjem oziroma merjenjem IED-zaščitnega releja, smo vrednosti, izmerjene na primarni strani transformatorja, računali ročno s simetričnimi komponentami.

Izračunane in izmerjene vrednosti se ujemajo – z njimi smo dokazali pomen uporabe simetričnih komponent.



Ugodne razmere so nam omogočale, da smo lahko v podjetju Kolektor Etra izvedli meritve, prekinitve zunanje (L1) in notranje faze (L2) na primarni strani transformatorja.

Napetost na NN-strani je v eni fazi nazivna, v ostalih dveh pa je vrednost polovična. Enako velja za tokove. Obnašanje tokov pri polovični obremenitvi smo prikazali na simulacijskem modelu transformatorja vezave Dyn5 s PSCAD-programsko opremo.

Dejstvo je, da trifaznega sistema na NN-strani ni več, ampak so tokovi in napetosti v proti fazi za  $180^\circ$ . V diplomskem delu smo računsko dokazali, da je pojav inverzne komponente lahko relativno visok, tudi do 50 %. Howard Penrose v delu *The Impact of Voltage Unbalance on Induction Electric Motors* navaja, da je na primer pri 5-% napetostni nesimetriji tokovna nesimetrija reda od 20 do 30 %, kar povzroča toplotne izgube ter nevaren dvig temperature. Pri trifaznih uporabnikih na 0,4 kV bi bilo smiselno dograditi IED-terminal za zaščito, ki razpolaga s funkcijo ANSI 46BC – zaščita pri prekinitvi faze.

Prisotnost inverzne komponente napetosti je posebej kritična pri manjših asinhronskih motorjih, ki so standardno opremljeni le z bimetalno zaščito. Pojav inverzne komponente je možno nadzorovati z IED-tehnologijo, ki omogoča, da z relativno poceni rešitvami zaznamo nesimetrije z ustreznim algoritmom.

Dokazali smo, da lahko nesimetrije napetosti in tokov izračunamo s pomočjo simetričnih komponent ali s pomočjo inteligentnih naprav, kot je IED-zaščitni terminal.

## 9 LITERATURA

Dolenc, A. (1961). Transformatorji, Ljubljana: Univerzitetna knjižnica

Miljavec, D. in Jereb, P. (2005). Električni stroji, temeljna znanja, Ljubljana: samozaložba.

Podjetje ICES, izobraževalni center energetskega sistema. (2020). Interno gradivo: *Zaščita elektroenergetskih sistemov, Ljubljana.*

SIPROTEC 5, 7SJ82/7SJ85, Manual C53000-G5040-C017-E, Edition 04.2021, SIEMENS SIPROTEC 5, Overcurrent Protection 7SJ82/7SJ85, V8.60 and higher, Manual; pridobljeno 3. 6. 2021 z naslova [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/384/109742384/att\\_1062661/v1/SIP5\\_7SJ82-85\\_V08.60\\_Manual\\_C017-E\\_en.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/384/109742384/att_1062661/v1/SIP5_7SJ82-85_V08.60_Manual_C017-E_en.pdf)

Toroš, Z. (2013). Predstavitev distribucijskega elektroenergetskega sistema (DEES), Ljubljana: predavanje na Fakulteti za elektrotehniko.