

# Utjecaj grupe spoja mrežnog transformatora na izmjenične karakteristike odabrane topologije ispravljača

---

Mišković, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2021

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:932976>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-02**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij Elektrotehnike**

**UTJECAJ GRUPE SPOJA MREŽNOG  
TRANSFORMATORA NA IZMJENIČNE  
KARAKTERISTIKE ODABRANE TOPOLOGIJE  
ISPRAVLJAČA**

**Diplomski rad**

**Josip Mišković**

**Osijek, 2021.**

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

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Osijek, 21.09.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Josip Mišković
<b>Studij, smjer:</b>	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	D-1250, 06.10.2019.
<b>OIB studenta:</b>	17899710450
<b>Mentor:</b>	Prof. dr. sc. Denis Pelin
<b>Sumentor:</b>	Andrej Brandis
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	Izv. prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	Prof. dr. sc. Denis Pelin
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	Josip Bilandžić
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Utjecaj grupe spoja mrežnog transformatora na izmjenične karakteristike odabrane topologije ispravljača
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	Postojeće eksperimentalne kartice pretvarača i transformatora opreme Lucas-Nulle koristiti za osmišljavanje laboratorijske vježbe iz Elektromagnetske kompatibilnosti. Napraviti mjerenja kojima se identificiraju pokazatelji izmjeničnih karakteristika ispravljača. Usporediti mjerenjem dobivene pokazatelje s analitičkim proračunom za odabranu topologiju ispravljača. Napraviti predložak za laboratorijsku vježbu!
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	21.09.2021.

Potpis mentora za predaju konačne verzije rada  
u Studentsku službu pri završetku studija:

Potpis:

Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 21.09.2021.

**Ime i prezime studenta:**

Josip Mišković

**Studij:**

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

D-1250, 06.10.2019.

**Turnitin podudaranje [%]:**

19

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Utjecaj grupe spoja mrežnog transformatora na izmjenične karakteristike odabrane topologije ispravljača**

izrađen pod vodstvom mentora Prof. dr. sc. Denis Pelin

i sumentora Andrej Brandis

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

Potpis studenta:

**IZJAVA**

**o odobrenju za pohranu i objavu ocjenskog rada**

kojom ja Josip Mišković, OIB: 17899710450, student/ica Fakulteta elektrotehnike,

računarstva i informacijskih tehnologija Osijek na studiju Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, kao autor/ica ocjenskog rada pod naslovom: Utjecaj grupe spoja mrežnog transformatora na izmjenične karakteristike odabrane topologije ispravljača,

dajem odobrenje da se, bez naknade, trajno pohrani moj ocjenski rad u javno dostupnom digitalnom repozitoriju ustanove Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek i Sveučilišta te u javnoj internetskoj bazi radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu, sukladno obvezi iz odredbe članka 83. stavka 11. *Zakona o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju* (NN 123/03, 198/03, 105/04, 174/04, 02/07, 46/07, 45/09, 63/11, 94/13, 139/13, 101/14, 60/15).

Potvrđujem da je za pohranu dostavljena završna verzija obranjenog i dovršenog ocjenskog rada. Ovom izjavom, kao autor/ica ocjenskog rada dajem odobrenje i da se moj ocjenski rad, bez naknade, trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim:

- a) široj javnosti
- b) studentima/icama i djelatnicima/ama ustanove
- c) široj javnosti, ali nakon proteka 6 / 12 / 24 mjeseci (zaokružite odgovarajući broj mjeseci).

*\*U slučaju potrebe dodatnog ograničavanja pristupa Vašem ocjenskom radu, podnosi se obrazloženi zahtjev nadležnom tijelu Ustanove.*

Osijek, 21.09.2021.

(mjesto i datum)

\_\_\_\_\_  
(vlastoručni potpis studenta/ice)

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. PREGLED TEME DIPLOMSKOG RADA</b> .....	<b>2</b>
<b>3. ISPRAVLJAČ</b> .....	<b>3</b>
<b>3.1. Trofazni neupravljivi mosni spoj</b> .....	<b>3</b>
<b>4. TRANSFORMATOR</b> .....	<b>6</b>
<b>4.1. Spojevi namota transformatora</b> .....	<b>6</b>
4.1.1. Zvijezda spoj .....	7
4.1.2. Trokut spoj .....	7
4.1.3. Cik-cak spoj.....	8
<b>4.2. Satni broj transformatora</b> .....	<b>8</b>
<b>5. ANALIZA UTJECAJA RAZLIČITE GRUPE SPOJA MREŽNOG TRANSFORMATORA NA TROFAZNI NEUPRAVLJIVI MOSNI SPOJ</b> .....	<b>9</b>
<b>5.1. Yy0 grupa spoja</b> .....	<b>9</b>
<b>5.2. Yd0 grupa spoja</b> .....	<b>12</b>
<b>5.3. Yy6 i Yy10 grupa spoja</b> .....	<b>15</b>
<b>6. MJERENJE U LABORATORIJU</b> .....	<b>16</b>
<b>6.1. Mjerna oprema</b> .....	<b>16</b>
<b>6.2. Yy0 grupa spoja</b> .....	<b>18</b>
<b>6.3. Yd0 grupa spoja</b> .....	<b>22</b>
<b>6.4. Yy6 grupa spoja</b> .....	<b>26</b>
<b>6.5. Yy10 grupa spoja</b> .....	<b>29</b>
<b>7. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>32</b>
<b>SAŽETAK</b> .....	<b>33</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>34</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>35</b>
<b>ŽIVOTOPIS</b> .....	<b>36</b>

<b>Prilog 1: Laboratorijska vježba .....</b>	<b>37</b>
<b>Prilog 2: Izveštaj laboratorijske vježbe .....</b>	<b>47</b>

## 1. UVOD

U ovom diplomskom radu promatrat će se utjecaji ispravljača na izmjeničnu pojnu mrežu u smislu injektirana u mrežu viših harmonijskih članova struje, budući su pretvaračke komponente nelinearne i na monoharmonijski poticaj generiraju višeharmonijsku struju. Mjerenja će se vršiti na sekundarnoj strani transformatora, kako bi se mogao istražiti utjecaj ispravljača bez utjecaja ostalih uređaja ili trošila na zajedničko mjesto priključenja na izmjeničnoj strani.

Uz pomoć Lucas-Nulle didaktičko-multimedijalne opreme ispitivat će se različite grupe spoja transformatora preko kojeg je ispravljač priključen na izmjeničnu pojnu mrežu. Prikazat će se harmonijska distorzija struje i izračunati *THDI* uz pomoć virtualnog spektralnog analizatora. Uspoređivat će se dobivene vrijednosti s teorijskim. Cilj ovog diplomskog rada je proučiti utjecaje različitih grupa spoja transformatora na karakteristike valnih oblika struje sekundarnog namota transformatora i izraditi predložak laboratorijske vježbe za buduće generacije na kolegiju Elektromagnetska kompatibilnost.

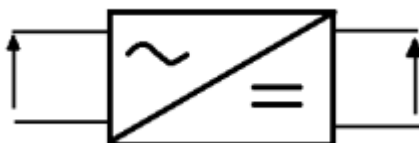


## 2. PREGLED TEME DIPLOMSKOG RADA

Ispravljač je spojen na trofazni transformator kojemu se namoti primara i sekundara mogu spojiti u trokut ili zvijezda spoj. Napon svake od faza je sinusoidalna i pomaknut 120 stupnjeva. Struja kroz diodu prolazi isključivo iz smjera anode prema katodi. Kada je dioda propusno polarizirana (na anodi je + potencijal, a na katodi – potencijal) [1]. Kod neupravljivog mosnog spoja ne postoje parni harmonici. Također se vidi da su peti i sedmi harmonik dominantni harmonici [2]. M. Umihanić u stručnom radu [3] analizira uzroke i posljedice nastajanja viših harmonika te načine kako da se otklone, simulaciju izvodi uz pomoć MatLab-a. D. Pelin u priručniku za praktikum [4] analitički i eksperimentalno prikazuje ispravljače. Ispravljači su električni uređaji koji povezuju izmjeničnu pojnu mrežu i istosmjerno trošilo, pri čemu je smjer energije od izmjenične mreže prema istosmjernom trošilu. A. Tomasović opisuje u radu [5] da je u današnje vrijeme sve veća potreba za energetske učinkovitošću što znači da skoro sva današnja trošila imaju sklopove energetske elektronike. Takvi sklopovi unose harmonike u mrežu i stvaraju padove napona. Na internet stranici elektrosklop [6] opisuju se razni postupci spajanja namota transformatora i način označavanja istih. Na stranici Lucas-Nuelle [7] se nalaze sve potrebne stvari za upoznavanje s didaktičko-multimedijalnom opremom. I. Flegar u knjizi [9] daje analizu rada ispravljača, izvodi razne relacije koje pomažu pri analiziranju i rješavanju zadataka

### 3. ISPRAVLJAČ

Ispravljač je električni uređaj koji povezuje izmjeničnu mrežu s istosmjernim trošilom, pri čemu je smjer energije od izmjenične mreže prema istosmjernom trošilu[4]. Na slici 3.1 se vidi jednofazni ispravljač. Ispravljači u ovisnosti o broju faza dijele se na jednofazne ili višefazne. Kada se koristi trošilo viših snaga koristi se trofazni priključak a za trošila manjih snaga jednofazni priključak. Ispravljači se mogu podijeliti i po vrsti ventila gdje postoje 3 mogućnosti a to su punoupravljivi, poluupravljivi i neupravljivi.



*Slika 3.1. Simbol jednofaznog ispravljača*

Punoupravljiv ispravljač koristi upravljive ventile a to su GTO i IGBT, pri čemu se napon regulira na upravljačkoj priključnici. Poluupravljiv ispravljač koristi isti broj dioda i tiristora koji se reguliraju naponom. Neupravljiv ispravljač koristi energetske diode, a izlazni napon nije moguće regulirati te je uvjetovan ulaznim naponom mreže ili naponom transformatora.

#### 3.1. Trofazni neupravljivi mosni spoj

Trofazni mosni spoj je spojen na simetričnu trofaznu mrežu faznih napona.

$$u_j = \hat{U} \sin \left[ \omega t - (j - 1) \frac{2\pi}{3} \right], j = 1, 2, 3, \text{ otpor i induktivitet su zanemareni.}$$

Pretpostavke analize su sljedeće:

- Komutacija između dioda je trenutna,
- Pretvaračke komponente modelirane idealnim diodama,
- Trošilo je strujni uvor glatke struje  $I_d$  ( $L_d/R_d > T/6$ ).

Sa slike 3.2. uočavaju se tri karakteristična čvora:

0- nulište,

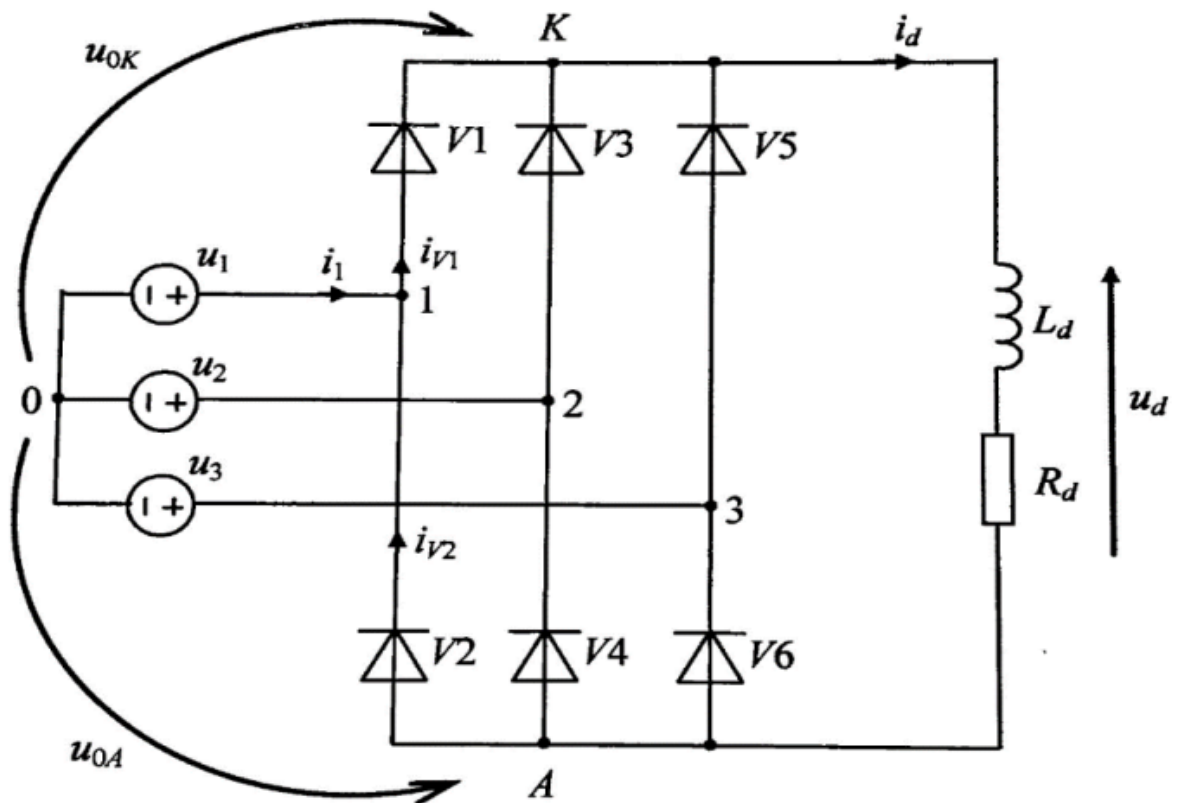
K - zajednički spoj katodne grupe ventila  $V_1, V_3$  i  $V_5$ ,

A - zajednički spoj anodne grupe ventila  $V_2, V_4$  i  $V_6$ .

Naponi anode i katode su definirani prema nulištu  $u_{A0}$ ,  $u_{K0}$ . Kad se raspiše Kirchhoffov zakon za napon na izlazu trošila dobiva se:

$$u_{d0} = u_{K0} - u_{A0} \quad (3-1)$$

Katodna grupa dioda vodi u vremenskom intervalu kada je najpozitivniji fazni napon na koji su priključeni s obzirom na napon ostali faza. Anodna grupa dioda vodi u vremenskom intervalu kada je fazni napon koji je priključen na njih najnegativniji. Valni oblik  $u_d$  prikazan je na slici 3.3.



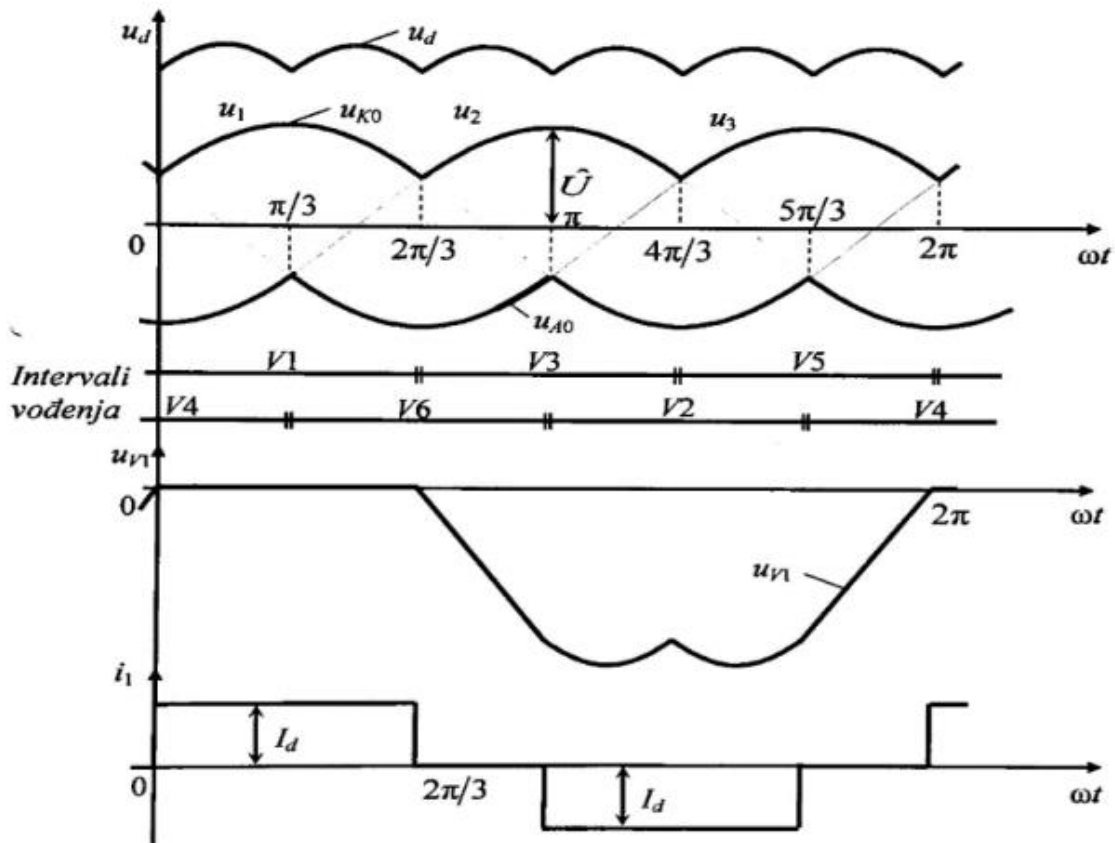
Slika 3.2. Nadomjesna shema induktivno opterećenog neupravljivog trofaznog mosnog spoja

Fazne struje se dobiju pisanjem KZS-a:

$$i_1 = i_{v1} - i_{v2} \quad (3-2)$$

$$i_2 = i_{v3} - i_{v4}$$

$$i_3 = i_{v5} - i_{v6}$$

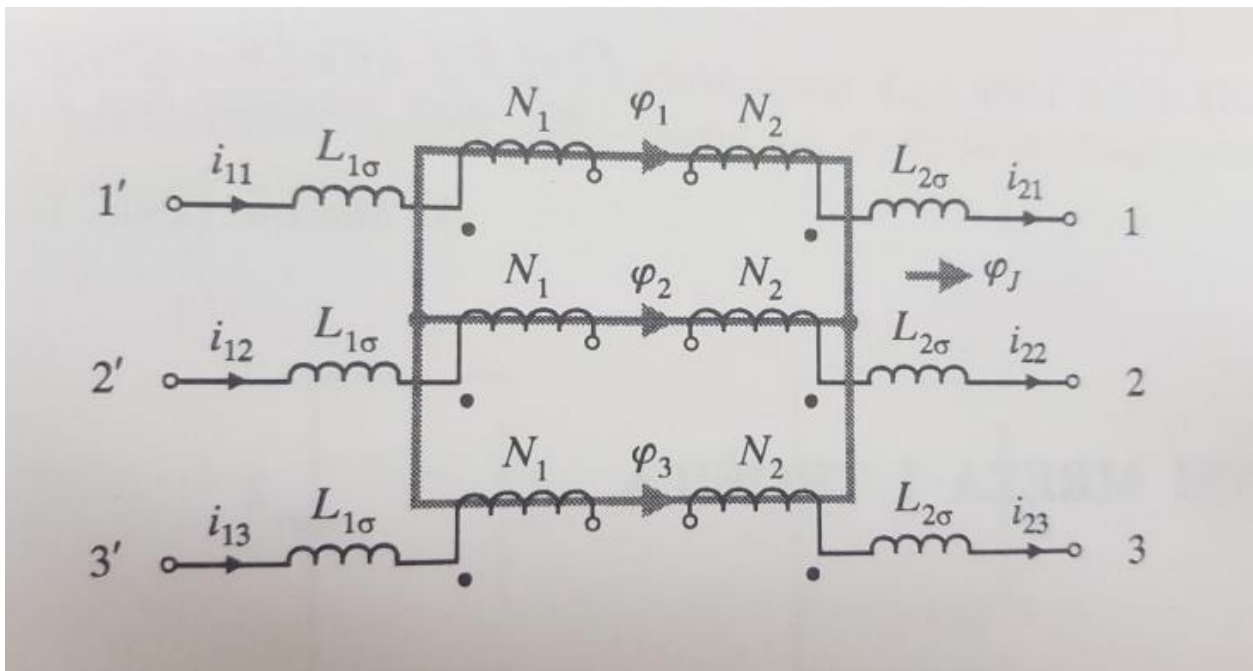


Slika 3.3. Karakteristični valni oblici napona i struja dobiveni analizom

Valni oblik izlaznog napona  $u_d$  je pulsni, primjeti se 6 pulseva u jednom periodu. Valni oblik struje  $i_1$  je višeharmonijski.

## 4. TRANSFORMATOR

U diplomskom radu ispravljački transformator se nalazi na eksperimentalnoj kartici Lucas-Nulle opreme koju je potrebno spojiti na trofazni simetrični izvor napajanja. Uz pomoć trofaznog neupravljivog mosnog spoja i ispravljačkog transformatora moguće je dobiti valne oblike za različite grupe spoja. Ispravljački transformator ima primarne i sekundarne namote. Primar namota je spojen na pojnu mrežu i naziva se mrežni namot dok je sekundar spojen na neupravljivi mosni spoj i naziva se ventilski namot. Slova  $U$ ,  $V$  i  $W$  su oznake za namote, međusobni pomak faza iznosi 120 stupnjeva. Prije oznake može biti i broj 1 ili 2 koji označavaju mrežni ili ventilski namot. Model trofaznog transformatora vidi se na slici 4.1.



Slika 4.1. Model trofaznog transformatora[4]

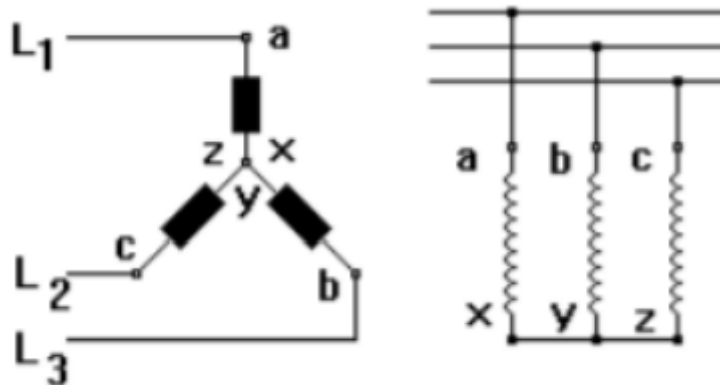
### 4.1. Spojevi namota transformatora

Namoti trofaznog ispravljačkog transformatora mogu biti spojeni na više načina. U ovom diplomskom radu namoti primara bit će uvijek spojeni u zvijezdu dok će se sekundar mijenjati. Postoje 3 vrste spoja [6]:

- spoj zvijezda,
- spoj trokut,
- spoj cik-cak.

#### 4.1.1. Zvijezda spoj

Zvijezda spoj se postiže tako da se krajevi svih namota spoje u jednu točku slika 4.2.

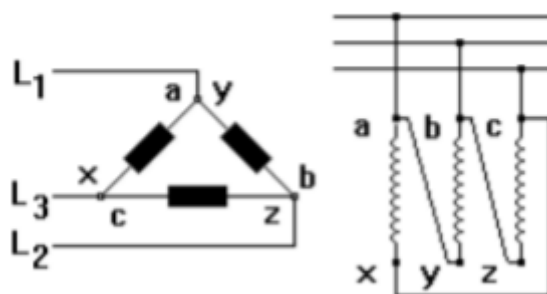


*Slika 4.2. Spoj namota u zvijezdu*

Linijski napon  $U_L$  je  $\sqrt{3}$  puta veći od faznog napona  $U_F$ , fazna i linijska struja su jednake.

#### 4.1.2. Trokut spoj

Trokut spoj se postiže tako da se početak namota jedne faze spoji s krajem namota druge faze slika 4.3.

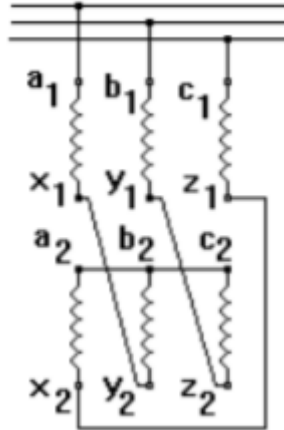


*Slika 4.3. Spoj namota u trokut*

Linijska struja  $I_L$  je za  $\sqrt{3}$  puta veći od fazne struje  $I_F$ , naponi su jednaki.

### 4.1.3. Cik-cak spoj

Cik-cak spoj se postiže povezivanjem polovice prve faze smještene na prvom stupu transformatora s polovicom druge faze koja je smještena na drugom stupu slika 4.4.



*Slika 4.4. Spoj namota u cik-cak*

Naponi pojedinih faza predstavljaju geometrijske razlike dva napona međusobno pomaknuti za 120 stupnjeva. Uspoređivanjem napona  $U_y$  (zvijezda spoj) s  $U_z$  (cik-cak spoj) vidi se da je  $U_y$  veći za  $\frac{\sqrt{3}}{2}$  od  $U_z$ .

Uz pomoć velikih štampanih slova imamo različitu oznaku za svaki spoj tako je  $Z$  (cik-cak),  $D$  (trokut) i  $Y$  (zvijezda) za primarne namote te  $z$ ,  $d$ , i  $y$  za sekundarne namote. Ako postoji i nultočka dopiše se oznaka  $N$  za primar i  $n$  za sekundar. Npr.  $YNd$  označava primar spojen u zvijezdu s izvedenom nultočkom i sekundar spojen u trokut.

## 4.2. Satni broj transformatora

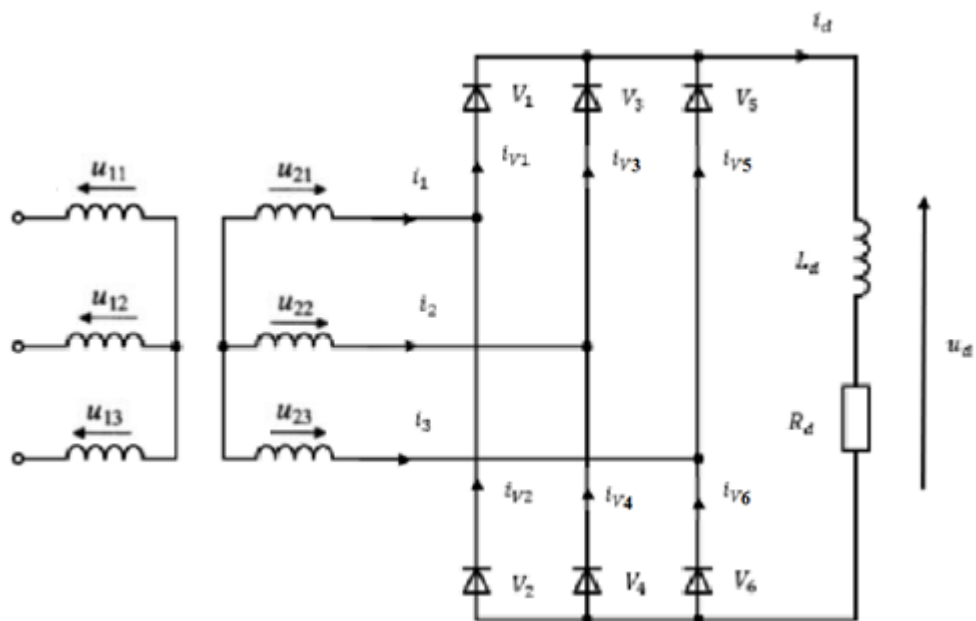
Da spoj transformatora bude posve definiran mora se označiti i satni broj pored grupe spoja npr.  $Yy0$ . Satni broj može biti cijeli broj od 0 do 11. Satni broj pokazuje koliko je transformator na sekundaru zakrenuo fazu s obzirom na primar. Računski se prikazuje na način da se fazni kut podjeli s 30 stupnjeva. Na primjer ako je fazni kut zaostajanja  $120^\circ$  to znači da je satni broj 4.

## 5. ANALIZA UTJECAJA RAZLIČITE GRUPE SPOJA MREŽNOG TRANSFORMATORA NA TROFAZNI NEUPRAVLJIVI MOSNI SPOJ

Različite grupe spoja mrežnog transformatora odnosno različiti satni broj utjecat će na valne oblike struje i napona. U ovom diplomskom radu namot primara će uvijek biti spojen u zvijezda spoj dok će se namoti na sekundaru mijenjati. Cilj je odrediti što se događa s valnim oblicima struje i napona kada se mijenja satni broj a što kada se mijenja grupa spoja, isto tako će se promatrati harmonijska analiza struje sekundara transformatora (*THDI*) za sve 4 vrste spoja a to su sljedeći spojevi  $Yy0$ ,  $Yd0$ ,  $Yy6$  i  $Yy10$ .

### 5.1. $Yy0$ grupa spoja

Shema spoja nalazi se na slici 5.1.



*Slika 5.1. Shema ispravljača spojenog na mrežu preko  $Yy0$  grupe spoja transformatora*

Uz pomoć KZS-a dolazi se do izraza:

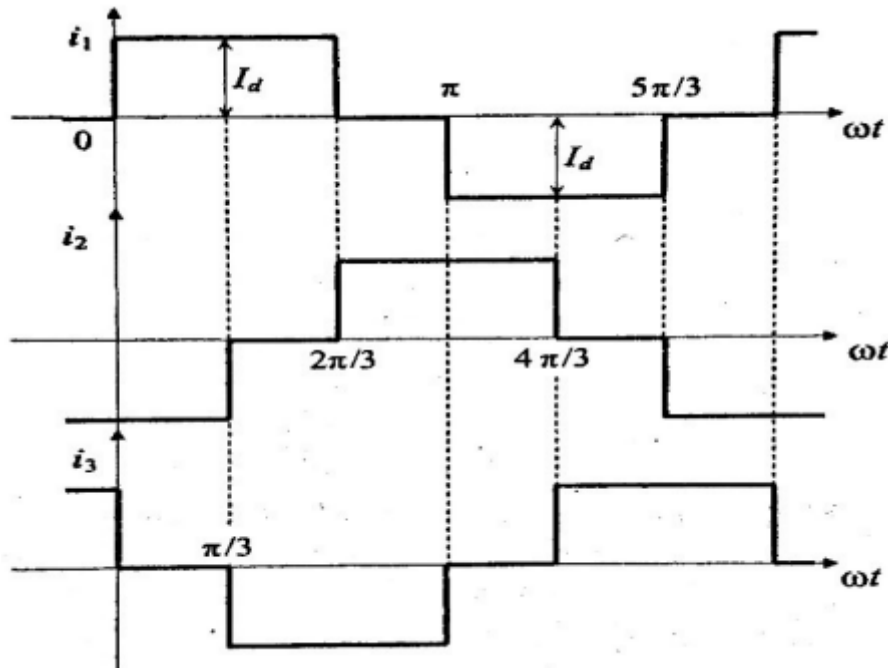
$$i_1 = i_{v1} - i_{v2} \quad (5-1)$$

$$i_2 = i_{v3} - i_{v4}$$

$$i_3 = i_{v5} - i_{v6}$$



Daljim se analiziranjem dobiva valni oblik struje za svaku fazu sekundarnog namota prikazanih na slici 5.2., gdje  $I_d$  označava glatku struju istosmjernoga trošila[9].



Slika 5.2. Karakteristični valni oblici struja za zvijezda spoj

Postavljanjem jednakosti  $i_1 = I_d$  za  $t_0 = 0, t_2 = \frac{\omega t}{3}$ .

Vrijeme  $t_1 = \frac{\omega t}{6}$  se nalazi u intervalu od 0 do  $\frac{\omega t}{3}$ .

Postavljanjem jednakosti  $i_1 = 0$  za  $t_2 = \frac{\omega t}{3}, t_3 = \frac{\omega t}{2}$ .

Postavljanjem jednakosti  $i_1 = -I_d$  za  $t_3 = \frac{\omega t}{2}, t_5 = \frac{5\omega t}{6}$ .

Vrijeme  $t_4 = \frac{2\omega t}{3}$  se nalazi u intervalu od  $\frac{\omega t}{2}$  do  $\frac{5\omega t}{6}$ .

Postavljanjem jednakosti  $i_1 = 0$  za  $t_5 = \frac{5\omega t}{6}, t_6 = \omega t$

Izraz za efektivnu vrijednost fazne struje sekundarnog namota transformatora u spoju zvijezda glasi:

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_1)^2 dt}$$

$$\begin{aligned}
& \sqrt{\frac{1}{T} \left( \int_0^{T/3} I_d^2 dt + 0 + \int_{T/2}^{5T/6} (-I_d)^2 dt + 0 \right)} = \\
& \sqrt{\frac{1}{T} \left( I_d^2 \cdot \left( \frac{T}{3} - 0 \right) + I_d^2 \cdot \left( \frac{5T}{6} - \frac{T}{2} \right) \right)} \\
& = \sqrt{\frac{1}{T} \left( I_d^2 \cdot \frac{T}{3} + I_d^2 \cdot \frac{T}{3} \right)} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \frac{T}{3} (I_d^2 + I_d^2)} \\
& = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot 2I_d^2} = \sqrt{\frac{2}{3} I_d^2}
\end{aligned}$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d \quad (5-2)$$

Izraz za efektivnu vrijednost osnovnog harmonika struje dobije se prema[3]:

$$I(1) = \frac{\sqrt{6} \cdot I_d}{\pi} \quad (5-3)$$

Faktor distorzije struje:

$$v_i = \frac{I(1)}{I} = \frac{\frac{\sqrt{6}I_d}{\pi}}{\sqrt{\frac{2}{3}}I_d} = \frac{3}{\pi} = 0,955 \quad (5-4)$$

Ukupni THDI za zvijezda spoj:

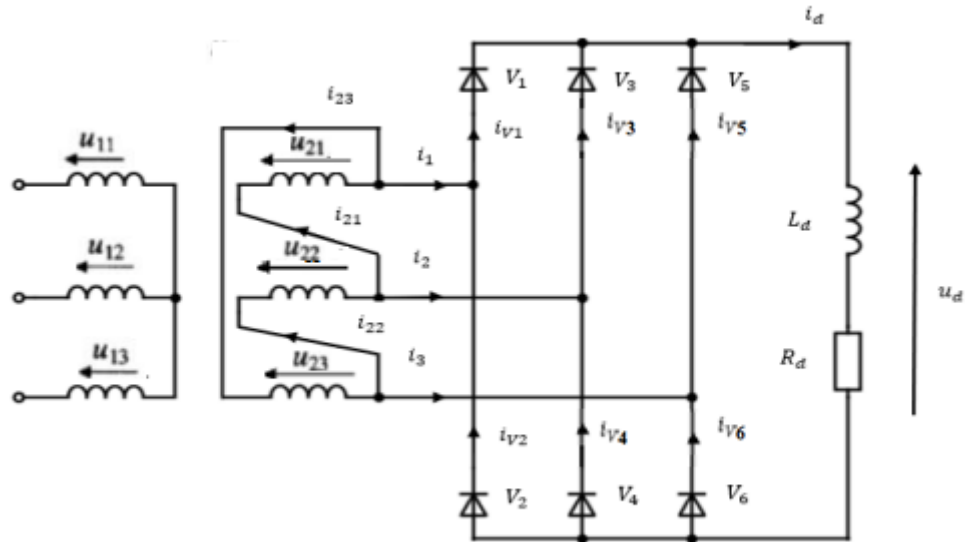
$$THDI = \sqrt{\left(\frac{1}{v_i}\right)^2 - 1} = \sqrt{\frac{\pi^2}{9} - 1} = 0,31 \cdot 100\% = 31\% \quad (5-5)$$

Ukupni THDI za zvijezda spoj:

$$\begin{aligned}
THDI &= \sqrt{\frac{I_1^2}{I_1^2(1)} - 1} = \sqrt{\frac{\left(\sqrt{\frac{2}{3}}I_d\right)^2}{\left(\frac{\sqrt{6}}{\pi}I_d\right)^2} - 1} = \sqrt{\frac{\frac{2}{3}I_d^2}{\frac{6}{\pi^2}I_d^2} - 1} \\
&= 0,31 \cdot 100\% = 31\%
\end{aligned} \quad (5-6)$$

## 5.2. Yd0 grupa spoja

Shema spoja nalazi se na slici 5.3.



Slika 5.3. Shema ispravljača spojenog na mrežu preko Yd0 grupe spoja transformatora

Iz KZS-a proizlaze izrazi:

	$i_{21} + i_{22} + i_{23} = 0$	
$i_1 = i_{21} - i_{23}$	$i_{21} + i_{22} = -i_{23}$	$i_1 = i_{21} + i_{21} + i_{22} = 2i_{21} + i_{22}$
$i_2 = i_{22} - i_{21}$	$i_{22} + i_{23} = -i_{21}$	$i_2 = i_{21} + i_{22} + i_{23} = 2i_{22} + i_{23}$
$i_3 = i_{23} - i_{22}$	$i_{21} + i_{23} = -i_{22}$	$i_3 = i_{23} + i_{21} + i_{23} = 2i_{23} + i_{21}$

$$i_1 - i_2 = 2i_{21} + i_{22} - 2i_{22} - i_{23} = 2i_{21} - i_{22} - i_{23}$$

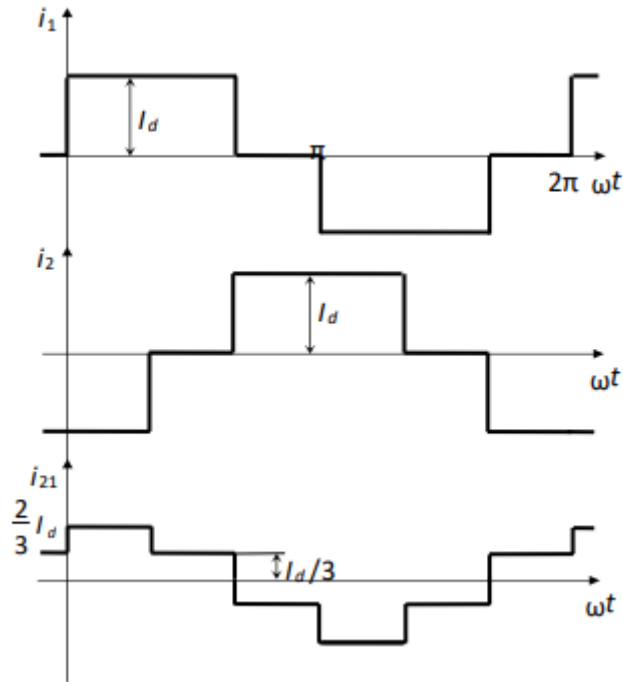
$$i_1 - i_2 = 3i_{21} - (i_{21} + i_{22} + i_{23})$$

$$i_1 - i_2 = 3i_{21}$$

$$i_{21} = \frac{1}{3}(i_1 - i_2) \quad (5-7)$$

$$i_{22} = \frac{1}{3}(i_2 - i_3)$$

$$i_{23} = \frac{1}{3}(i_3 - i_1)$$



*Slika 5.4. Karakteristični valni oblici struje za trokut spoj*

Postavljanjem jednakosti  $i_1 = I_d$  i  $i_2 = -I_d$  za  $t_0 = 0, t_1 = \frac{\omega t}{6}$

$$i_{21}(t_0 = 0, t_1 = \frac{\omega t}{6}) = \frac{1}{3}(i_1 - i_2) = \frac{1}{3}(I_d - (-I_d)) = \frac{2}{3}I_d$$

Postavljanjem jednakosti  $i_1 = I_d$  i  $i_2 = 0$  za  $t_1 = \frac{\omega t}{6}, t_2 = \frac{\omega t}{3}$

$$i_{21}(t_1 = \frac{\omega t}{6}, t_2 = \frac{\omega t}{3}) = \frac{1}{3}(i_1 - i_2) = \frac{1}{3}(I_d - 0) = \frac{1}{3}I_d$$

Postavljanjem jednakosti  $i_1 = 0$  i  $i_2 = I_d$  za  $t_2 = \frac{\omega t}{3}, t_3 = \frac{\omega t}{2}$

$$i_{21}(t_2 = \frac{\omega t}{3}, t_3 = \frac{\omega t}{2}) = \frac{1}{3}(i_1 - i_2) = \frac{1}{3}(0 - I_d) = -\frac{1}{3}I_d$$

Postavljanjem jednakosti  $i_1 = -I_d$  i  $i_2 = I_d$  za  $t_3 = \frac{\omega t}{2}, t_4 = \frac{2\omega t}{3}$

$$i_{21}(t_3 = \frac{\omega t}{2}, t_4 = \frac{2\omega t}{3}) = \frac{1}{3}(i_1 - i_2) = \frac{1}{3}(-I_d - I_d) = -\frac{2}{3}I_d$$

Postavljanjem jednakosti  $i_1 = -I_d$  i  $i_2 = 0$  za  $t_4 = \frac{2\omega t}{3}, t_5 = \frac{5\omega t}{6}$

$$i_{21} \left( t_4 = \frac{2\omega t}{3}, t_5 = \frac{5\omega t}{6} \right) = \frac{1}{3}(i_1 - i_2) = \frac{1}{3}(-I_d - 0) = -\frac{1}{3}I_d$$

Postavljanjem jednakosti  $i_1 = 0$  i  $i_2 = -I_d$  za  $t_5 = \frac{5\omega t}{6}$ ,  $t_6 = \omega t$

$$i_{21} \left( t_5 = \frac{5\omega t}{6}, t_6 = \omega t \right) = \frac{1}{3}(i_1 - i_2) = \frac{1}{3}(0 - (-I_d)) = \frac{1}{3}I_d$$

Izraz za efektivnu vrijednost fazne struje sekundarnog namota transformatora u trokut spoju glasi:

$$I_{21} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_{21})^2 dt}$$

$$\sqrt{\frac{1}{T} \left( \int_0^{T/6} \left(\frac{2}{3}I_d\right)^2 dt + \int_{T/6}^{T/3} \left(\frac{1}{3}I_d\right)^2 dt + \int_{T/3}^{T/2} \left(-\frac{1}{3}I_d\right)^2 dt + \int_{T/2}^{2T/3} \left(-\frac{2}{3}I_d\right)^2 dt + \int_{2T/3}^{5T/6} \left(-\frac{1}{3}I_d\right)^2 dt + \int_{5T/6}^T \left(\frac{1}{3}I_d\right)^2 dt \right)}$$

$$\sqrt{\frac{1}{T} \left( \frac{4}{9} \cdot I_d^2 \cdot \left(\frac{T}{6} - 0\right) + \frac{1}{9} \cdot I_d^2 \cdot \left(\frac{T}{3} - \frac{T}{6}\right) + \frac{1}{9} \cdot I_d^2 \cdot \left(\frac{T}{2} - \frac{T}{3}\right) + \frac{4}{9} \cdot I_d^2 \cdot \left(\frac{2T}{3} - \frac{T}{2}\right) + \frac{1}{9} \cdot I_d^2 \cdot \left(\frac{5T}{6} - \frac{2T}{3}\right) + \frac{1}{9} \cdot I_d^2 \cdot \left(T - \frac{5T}{6}\right) \right)}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \frac{T}{6} \left( \frac{4}{9}I_d^2 + \frac{1}{9}I_d^2 + \frac{1}{9}I_d^2 + \frac{4}{9}I_d^2 + \frac{1}{9}I_d^2 + \frac{1}{9}I_d^2 \right)}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{6} \cdot \frac{12}{9}I_d^2} = \sqrt{\frac{2}{9}I_d^2}$$

$$I_{21} = \frac{\sqrt{2}}{3}I_d \tag{5-8}$$

Izraz za efektivnu vrijednost osnovnog harmonika struje dobije se prema[3]:

$$U(1) = \frac{V(1)}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2} \cdot E}{\pi}$$

$$I(1) = \frac{\sqrt{2} \cdot I_d}{\pi} \tag{5-9}$$

Faktor distorzije struje:

$$v_i = \frac{I(1)}{I} = \frac{\frac{\sqrt{2}}{\pi} I_d}{\frac{\sqrt{2}}{3} I_d} = \frac{3}{\pi} = 0,955$$

Ukupni THDI za trokut spoj:

$$THDI = \sqrt{\left(\frac{1}{v_i}\right)^2 - 1} = \sqrt{\frac{\pi^2}{9} - 1} = 0,31 \cdot 100\% = 31\%$$

Ukupni THDI za trokut spoj:

$$THDI = \sqrt{\frac{I_{21}^2}{I_{21}^2(1)} - 1} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\sqrt{2}}{3} I_d\right)^2}{\left(\frac{\sqrt{2}}{\pi} I_d\right)^2} - 1} = \sqrt{\frac{\frac{2}{3^2} I_d^2}{\frac{2}{\pi^2} I_d^2} - 1} = 0,31 \cdot 100\% = 31\%$$

### 5.3. Yy6 i Yy10 grupa spoja

Kao što se može vidjeti ove 2 grupe spoja su dosta slične Yy0 spoju, razlika je u tome što imaju druge satne brojeve. Satni broj neće značajno utjecati na izgled valnih oblika napona i struje. Razlika između ova 3 spoja je jedino fazni pomak između napona i osnovnog harmonika struje koji će ovisiti o satnom broju. Za Yy6 spoj osnovni harmonik struje biti će pomaknut za 180° u odnosu na valni oblik napona, isto tako za spoj Yy10 osnovni harmonik struje biti će pomaknut za 300° u odnosu na valni oblik napona, treba naglasiti da je valni oblik napona isti za sva 3 spoja. Iz ovoga se zaključuje da satni broj ne utječe na povratno djelovanje trofaznog neupravljivog mosnog spoja na pojnu mrežu nego samo mijenja fazni pomak između napona i osnovnog harmonika struje.

## 6. MJERENJE U LABORATORIJU

Korištenjem didaktičko multimedijalne opreme Lucas-Nulle snimit će se različiti valni oblici napona i struje za različite grupe spojeva transformatora. Odradit će se harmonijska analiza i prikazati rezultati mjerenja u odnosu na rezultate analize. Lucas-Nulle oprema se sastoji od programskog paketa Labsoft, upravljačke ploče UniTrain i eksperimentalnih pločica. Računalo se spoji preko USB priključka s upravljačkom pločom kako bi dobilo informacije koje se događaju unutar mjerne opreme te ih projicira na zaslону.

### 6.1. Mjerna oprema

Mjerna oprema koja se koristi[7]:

- računalo,
- računalni program Starter ,
- CO4203-2A UniTrain - sučelje i njegovo pripadajuće napajanje,
- SO4204-7Y eksperimentalna kartica trofaznog transformatora,
- CO4203-2B dva eksperimentatora za povezivanje eksperimentalne kartice i sučelja,
- SO4203-4F eksperimentalna kartica neupravljivog ispravljača,
- CO4203-2J pribor za spajanje,
- SO4203-2F kartica sa šantovima ,
- multimetri,
- izmjenična mreža 230V, 50Hz,
- strujna kliješta,
- promjenjivi otpornik;  $R_{max} = 3300\Omega$  ;  $I_{max} = 0.44A$ ,
- prigušnica;  $L = 330mH$  ;  $R = 2\Omega$ .



*Slika 6.1. Lucas Nulle eksperimentalne kartice i upravljačka ploča*



*Slika 6.2. Promjenjivi otpornik*



*Slika 6.3. Prigušnica*





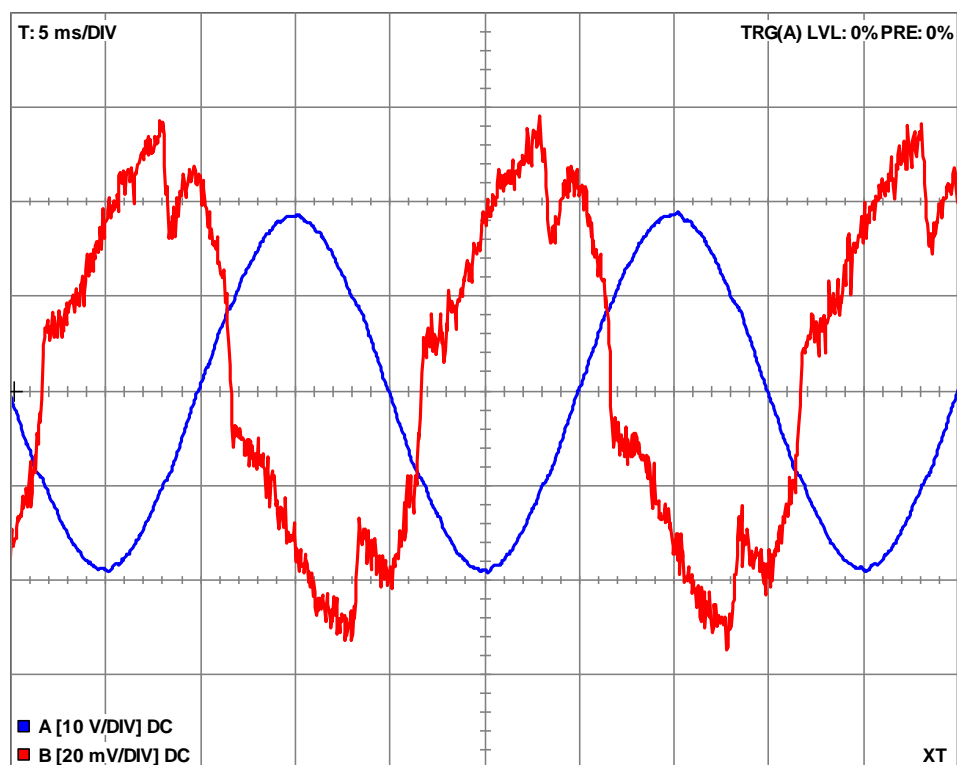
*Slika 6.4. Multimetri*



*Slika 6.5. Strujna kliješta*

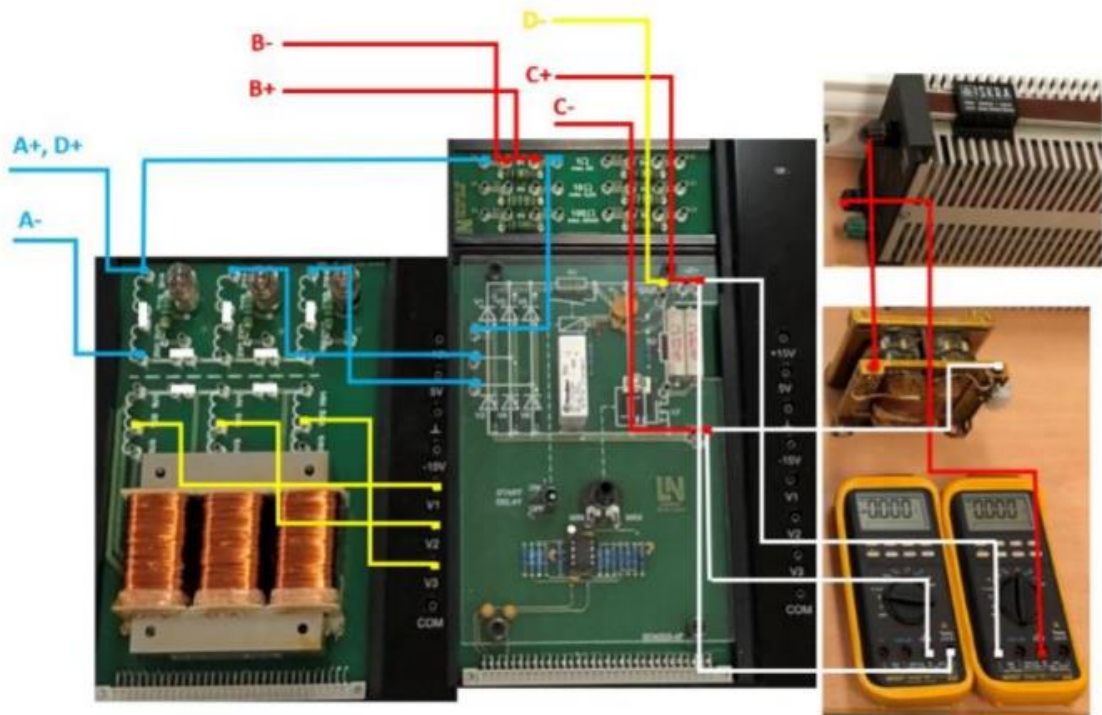
## 6.2. Yy0 grupa spoja

Mjerenja će se vršiti na sekundarnoj strani transformatora zbog toga što se mjerenjem struje na primarnoj strani dobije struja svih uređaja spojenih na toj fazi. Takva faza struje je izobličena, slika 6.6., te harmonijskom analizom se ne bi mogao dobiti uvid u povratni utjecaj ispravljača na pojnu mrežu.



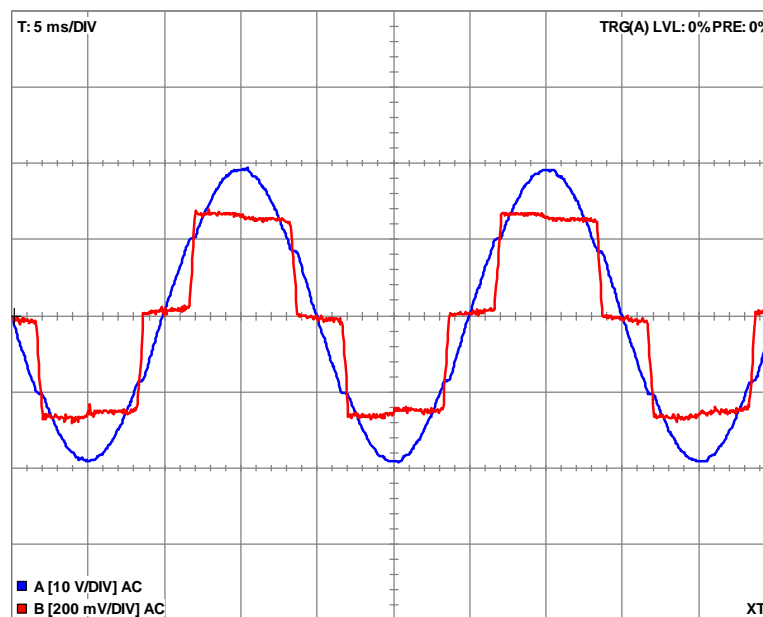
*Slika 6.6. Valni oblik struje primara transformatora*

Na slici 6.7. se vidi način spajanja Lucas-Nulle opreme s eksperimentalnim pločicama na kojima se vrše mjerenja.

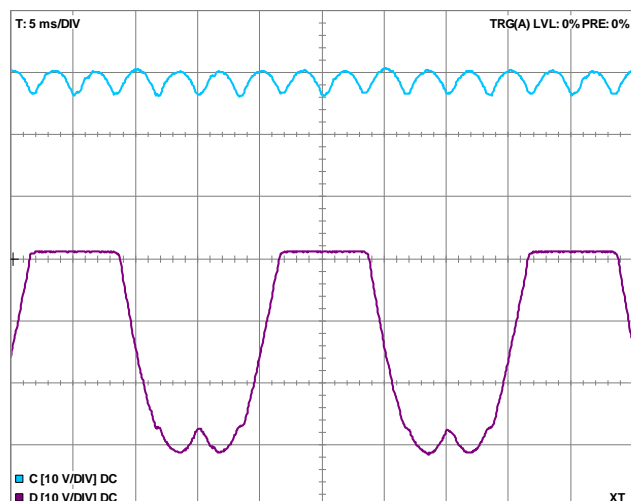


*Slika 6.7. Shematski prikaz spajanja Yy0 grupe spoja*

Valni oblici su snimljeni uz pomoć osciloskopa koji se nalazi unutar programskog paketa Labsoft.



*Slika 6.8. Valni oblici faznog napona (plavo) i linijske struje (crveno) (14V i 50Hz)*

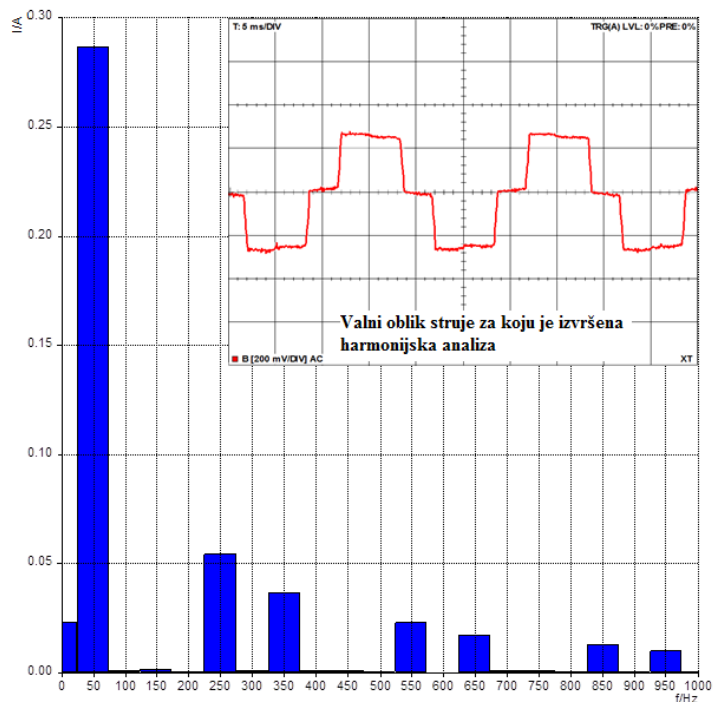


**Slika 6.9.** Valni oblici izlaznog napona ispravljača (plavo) i napon na diodi (ljubičasto)

Sa slike 6.8. može se vidjeti da ne postoji fazni pomak između valnih oblika napona i osnovnog harmonika struje što znači da je oznaka satnog broja ispravna.

Slika 3.3. prikazuje očekivane valne oblike izlaznog napona ispravljača i napona na diodi što se potvrdilo i mjerenjem slika 6.9.

Harmonijska analiza se provodi uz pomoć virtualnog spektralnog analizatora koji se nalazi unutar programskog paketa Labsoft.



**Slika 6.10.** Harmonijska analiza fazne struje  $i_1$  sekundara transformatora u  $Yy0$  spoju

Provođenjem harmonijske analize promatra se povratni utjecaj ispravljača na mrežu odnosno na više harmonike struje primarnog namota transformatora. Karakteristični pokazatelj uz pomoć kojeg se opisuje je harmonijska distorzija struje ili *THDI*, a računa se kao:

$$THDI = \frac{\sqrt{\sum_{n>1}^{n=19} I(n)^2}}{I(1)} \quad (6-1)$$

gdje je:

- $I(n)$  – efektivna vrijednost  $n$ -tog harmonika struje
- $I(1)$  – efektivna vrijednost osnovnog harmonika struje

Kako bi se izračunao *THDI* potrebno je očitati vrijednosti sa slike 6.10. te ih unijeti u tablicu 6.1.

**Tablica 6.1.** Očitane vrijednosti harmonijske analize

$n$	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
$\hat{I}(n)$ [mA]	286,90	2,59	54,23	30,67	0,82	23,08	17,93	0,00	16,23	15,42
$I(n)$ [mA]	202,90	1,83	38,35	21,69	0,58	16,32	12,68	0,00	11,48	10,91
Postotna vrijednost[%]	100,00	0,90	18,90	10,69	0,29	8,04	6,25	0,00	5,66	5,37
<i>THDI</i> [%]	25,24									

Izraženi su neparni harmonici od kojih je dominantan peti harmonik i iznosi 38,35 mA odnosno 18,9% osnovnog harmonika struje sekundara transformatora. Očitane vrijednosti su ustvari vršne te se koristi izraz 6-2 kako bi se dobile efektivne vrijednosti

$$I(n) = \frac{\hat{I}(n)}{\sqrt{2}} \quad (6-2)$$

Postotna vrijednost se računa izrazom 6-3:

$$\text{postotna vrijednost} = \frac{\text{vrijednost } n - \text{tog harmonika}}{\text{vrijednost osnovnog harmonika}} \cdot 100\% \quad (6-3)$$

Primjeri računskog dijela:

$$I(1) = \frac{\hat{I}(1)}{\sqrt{2}} = \frac{286,9}{\sqrt{2}} = 202,90 \text{ mA}$$

$$THDI = \frac{\sqrt{\sum_{n>1}^{n=19} I(n)^2}}{I(1)}$$

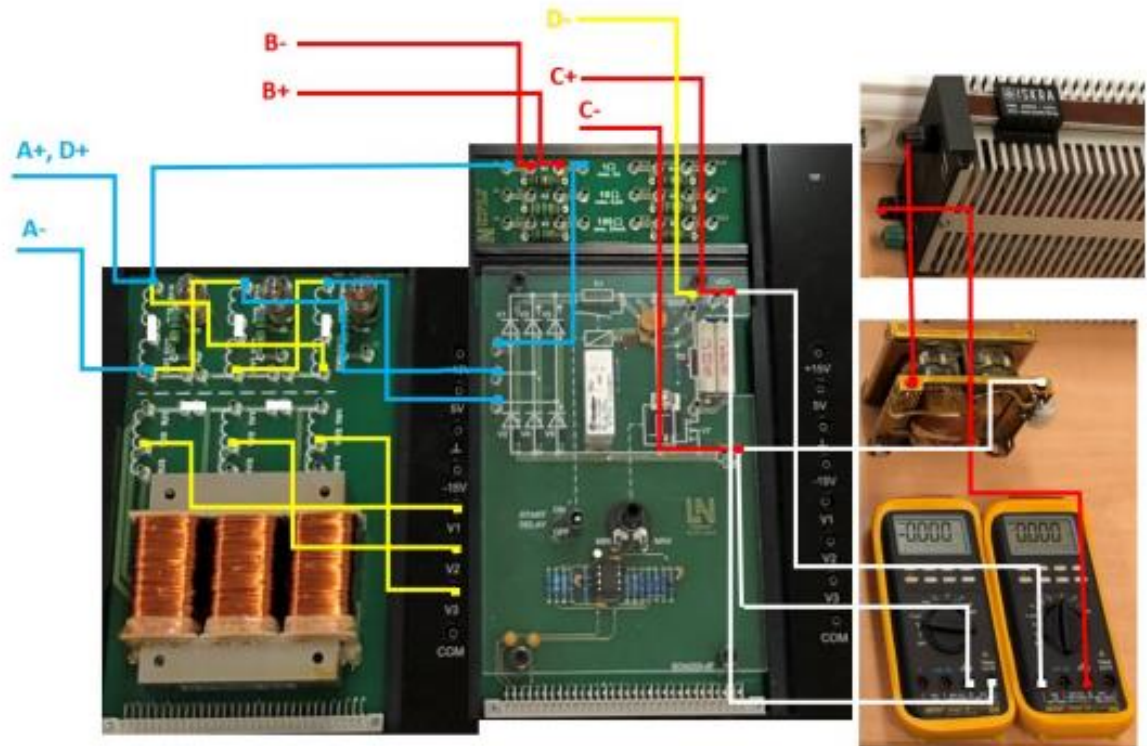
$$= \frac{\sqrt{1,83^2 + 38,35 + 21,69^2 + 0,58^2 + 16,32^2 + 12,68^2 + 11,48^2 + 10,91^2}}{202,90} * 100\% \\ = 25,24\%$$

$$\text{postotna vrijednost} = \frac{\text{vrijednost } 5 - \text{tog harmonika}}{\text{vrijednost osnovnog harmonika}} \cdot 100\% = \frac{38,35}{202,90} \cdot 100\% \\ = 18,90 \%$$

Vidi se odstupanje *THDI*-a koji iznosi 25,24% u odnosu na referentni kojemu je iznos 31%. Odstupanje dolazi jer ne uzimamo u obzir sve harmonike nego samo najdominantnijih devet.

### 6.3. Yd0 grupa spoja

Kao i za *Yy0* spoj mjerenja će se vršiti na sekundarnoj strani transformatora zbog toga što je na primaru struja izobličena.



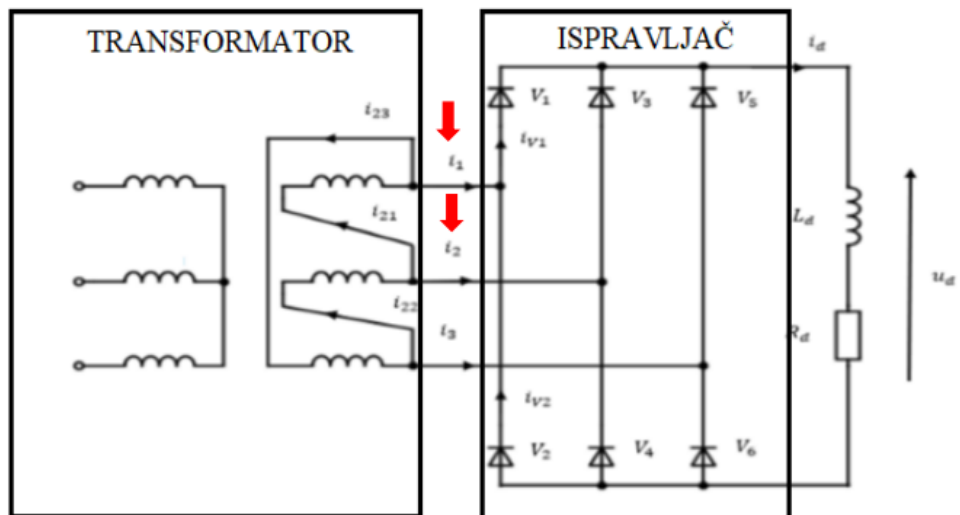
*Slika 6.11. Shematski prikaz spajanja Yd0 grupe spoja*

Na slici 6.11. se vidi način spajanja Lucas-Nulle opreme s eksperimentalnim pločicama na kojima se vrše mjerenja. Primjećuje se da postoji samo nekoliko promjena u odnosu na Yy0 spoj. U Yd0 spoju koristiti će se strujna klijesta kako bi izmjerili vrijednosti linijskih struja nakon čega se koristi izraz 5-2

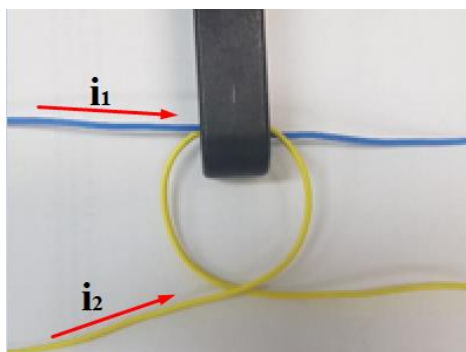
$$i_{21} = \frac{1}{3}(i_1 - i_2)$$

da se izračuna fazna struja. Strujna klijesta je potrebno spojiti na B INPUT a vodiče koji su spojeni na B+ i B- je potrebno odvojiti.

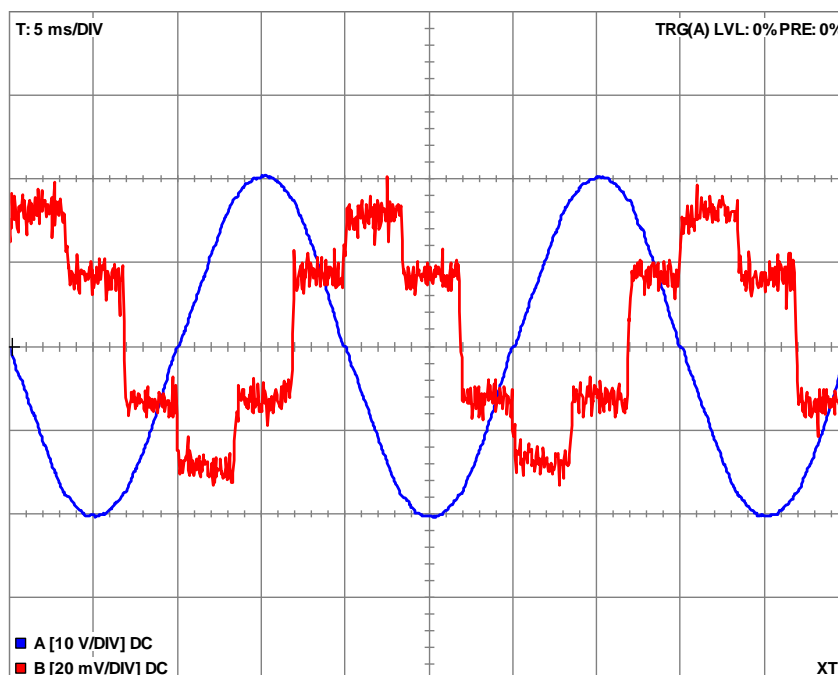
Strujnim klijestima je potrebno obuhvatiti 2 vodiča kojim teku linijske struje slika 6.12., od jednog vodiča treba napraviti petlju slika 6.13. čime se postiže protjecanje struje ali suprotnog smjera, orijentacija linijskih struja je bitna.



Slika 6.12. Shematski prikaz spoja ispravljača i transformatora u Yd0 spoju



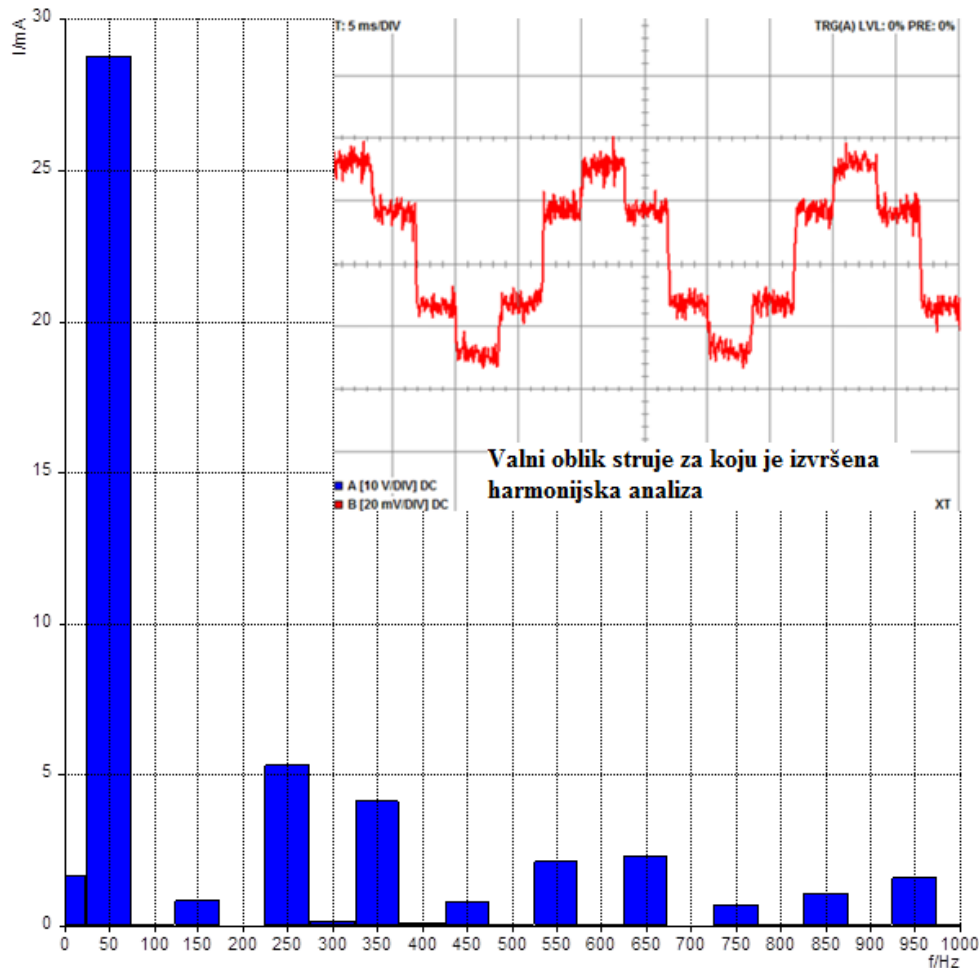
Slika 6.13. Invertiranje jedne linijske struje



Slika 6.14. Valni oblici faznog napona (plavo) i faze struje (crveno) (14V i 50Hz)

Može se primjetiti da fazna struja ima šest razina u odnosu na  $Yy0$  spoj gdje ima tri razine.

Harmonijska analiza se provodi kao i za  $Yy0$  spoj uz pomoć spektralnog analizatora koji se nalazi unutar programskog paketa.



**Slika 6.15.** Harmonijska analiza fazne struje  $i_{21}$  sekundara transformatora u  $Yd0$  spoju

**Tablica 6.2.** Očitane vrijednosti harmonijske analize

$n$	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
$\hat{I}(n)$ [mA]	287,74	8,89	53,41	41,74	8,21	21,82	23,20	7,50	11,12	16,14
$I(n)$ [mA]	203,50	6,29	37,77	29,52	5,80	15,43	16,41	5,30	7,87	11,41
Postotna vrijednost[%]	100,00	3,09	18,56	14,51	2,85	7,58	8,06	2,60	3,87	5,61
THDI[%]	27,36									

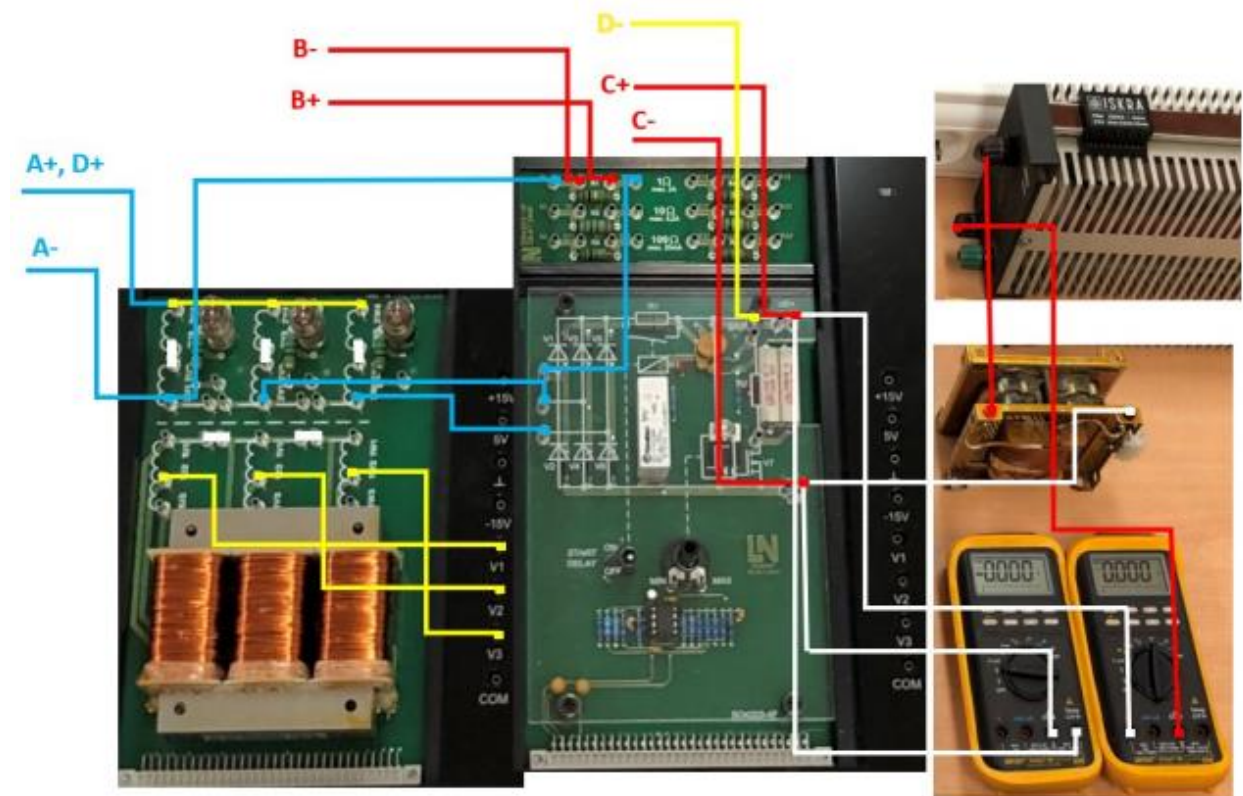


Izraženi su neparni harmonici kao i za grupu spoja  $Yy0$ , ističe se peti harmonik koji ima vrijednost 37,77 mA i 18,56 % osnovnog harmonika struje sekundara transformatora, još se primjećuje utjecajniiji 3. harmonik nego kod ostalih spojeva. Svi podaci u tablici se računaju prema izrazima 6-1, 6-2 i 6-3.

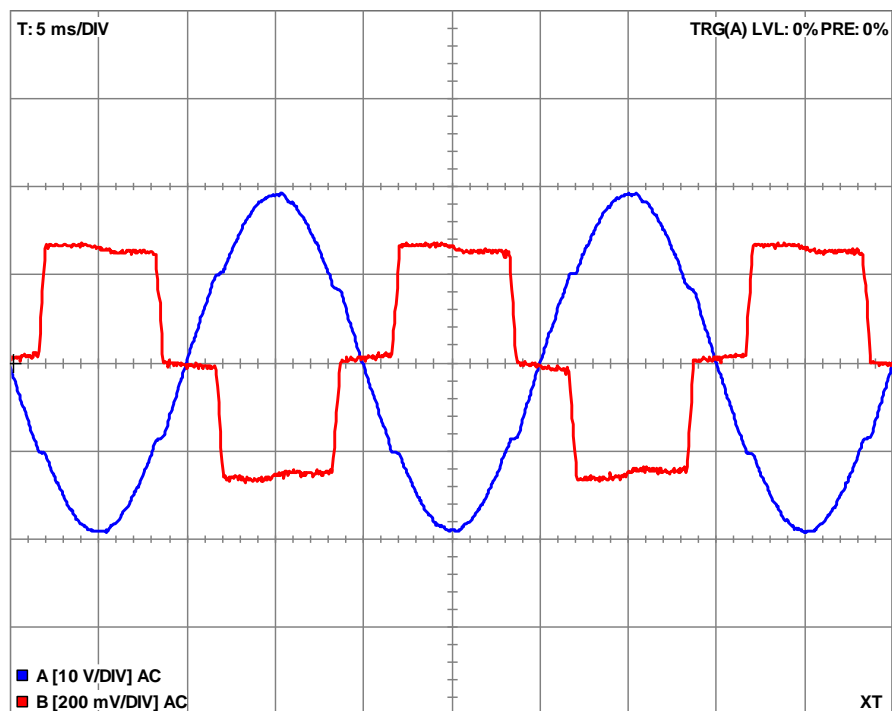
Za  $THDI$  valnog oblika prema slici 6.15 očekivani iznos je 0,31 odnosno 31% prema knjizi prof. Flegara odnosno relaciji 5-6.

#### 6.4. $Yy6$ grupa spoja

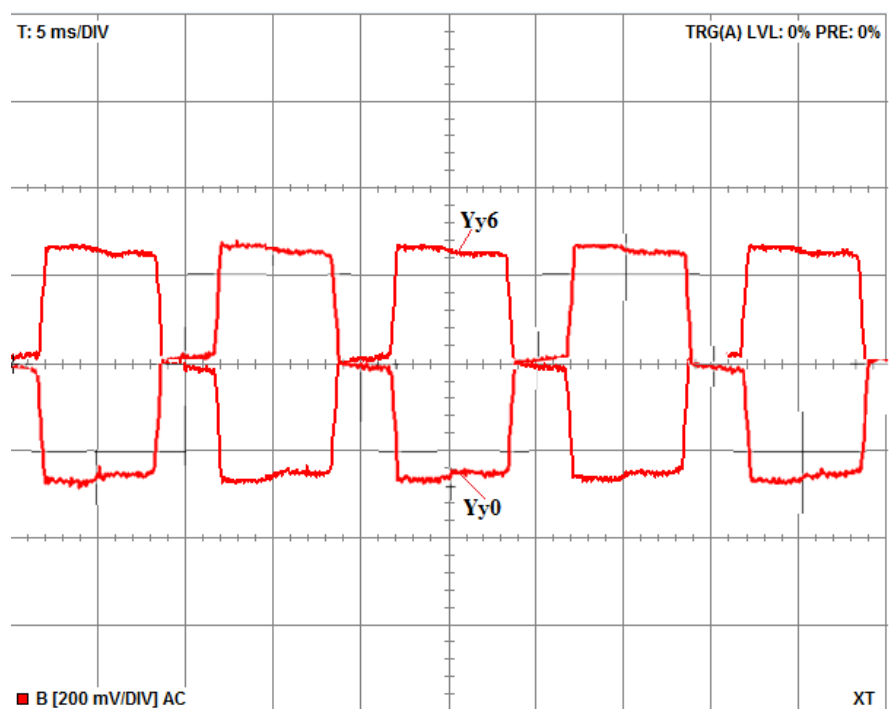
Na slici 6.16. je prikazan shematski spoj  $Yy6$  grupe spoja.



*Slika 6.16. Shematski prikaz spajanja  $Yy6$  grupe spoja*

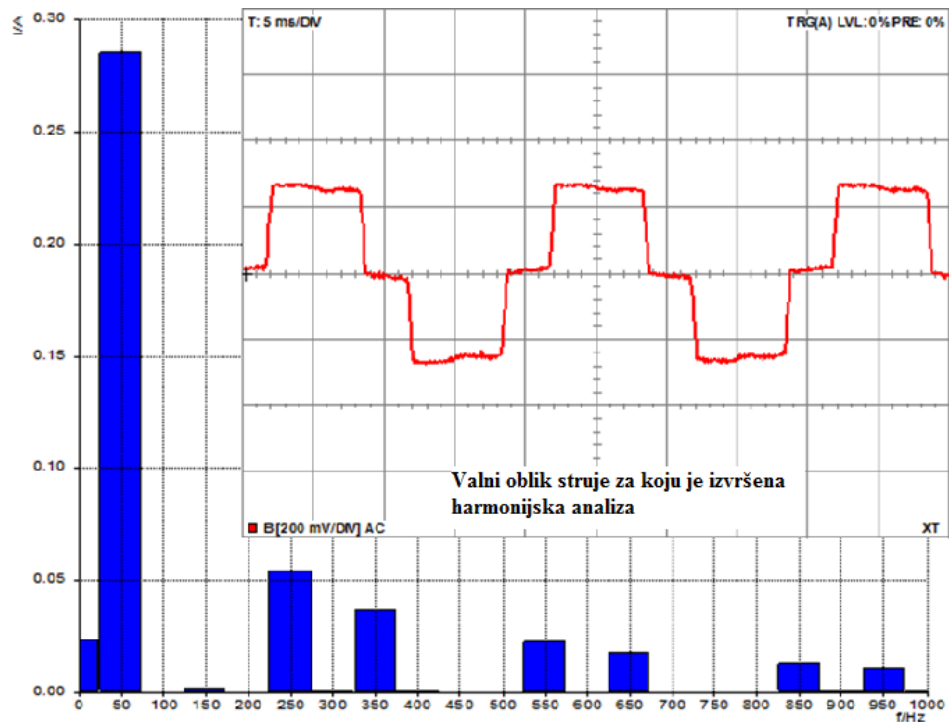


*Slika 6.17. Valni oblici faznog napona (plavo) i linijske struje (crveno) (14V i 50Hz)*



*Slika 6.18. Usporedba linijske struje Yy0 i Yy6 grupe spoja*

Iz slike 6.17. se vidi da je fazni pomak točno  $180^\circ$  što odgovara satnom broju, slika 6.18. dokazuje da su amplitude linijskih struja iste kao i period. Zaključuje se da satni broj utječe samo na pomak valnog oblika ne i na njegovu efektivnu vrijednost što bi značilo da ukupna harmonijska distorzija struje treba biti jednaka u oba slučaja.



Slika 6.19. Harmonijska analiza fazne struje  $i_1$  sekundara transformatora u Yy6 spoju

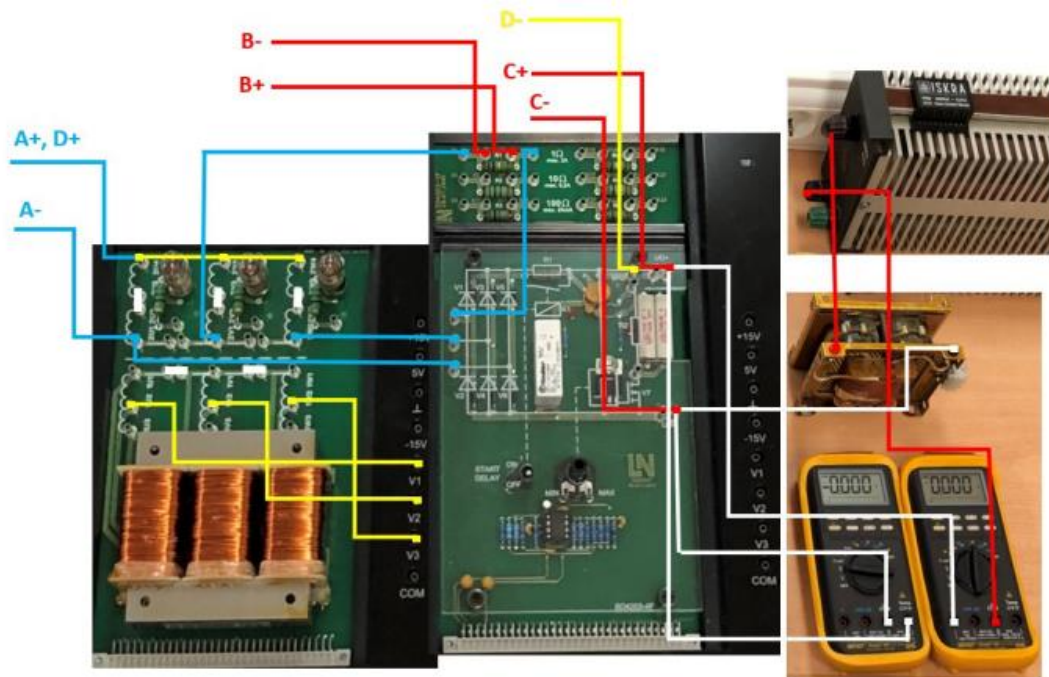
Tablica 6.3. Očitane vrijednosti harmonijske analize

$n$	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
$\hat{I}(n)$ [mA]	285,17	2,56	54,40	36,82	0,00	22,73	18,60	0,00	14,29	12,55
$I(n)$ [mA]	201,68	1,81	38,48	26,04	0,00	16,07	13,16	0,00	10,10	8,87
Postotna vrijednost[%]	100,00	0,90	19,08	12,91	0,00	7,97	6,52	0,00	5,01	4,40
THDI[%]	26,12									

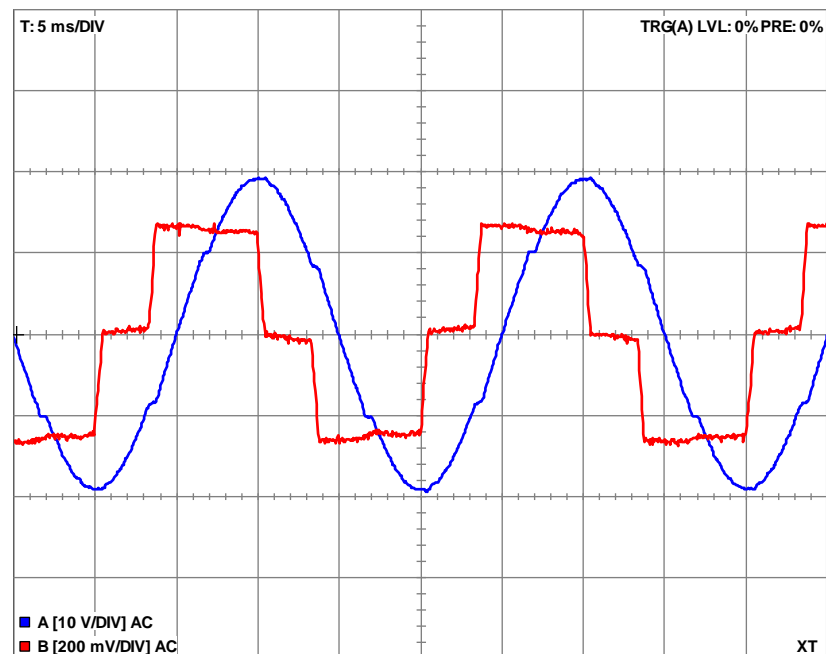
Izraženi su neparni harmonici kao i za sve grupe spoja, ističe se peti harmonik koji ima vrijednost 38,48 mA i 19,08 % osnovnog harmonika struje sekundara transformatora, svi podaci u tablici se računaju prema izrazima 6-1, 6-2 i 6-3.

## 6.5. Yy10 grupa spoja

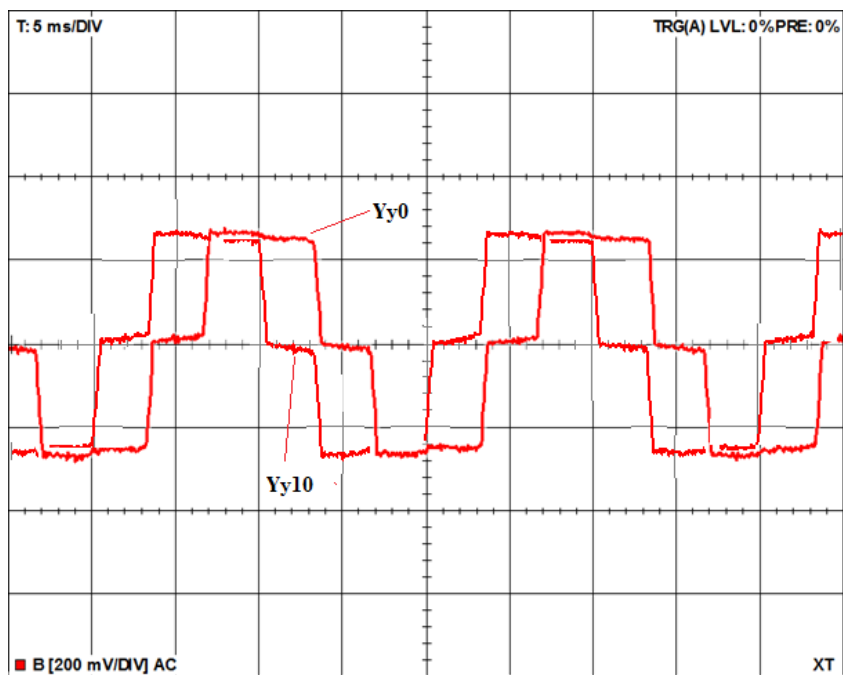
Na slici 6.20. je prikazan shematski spoj Yy10 grupe spoja.



Slika 6.20. Shematski prikaz spajanja Yy10 grupe spoja

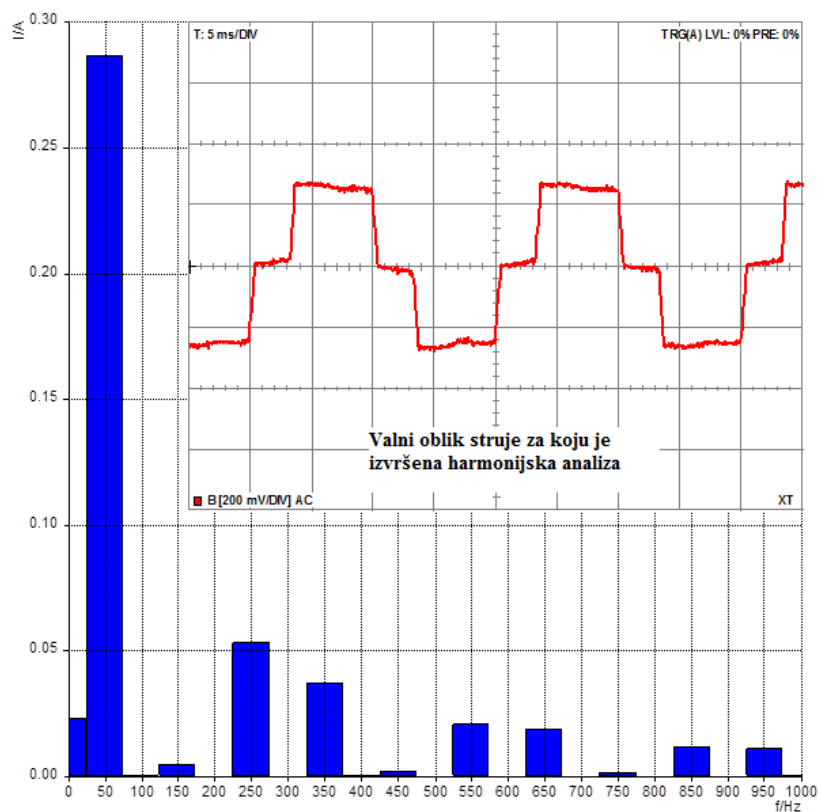


Slika 6.21. Valni oblici faznog napona(plavo) i linijske struje(crveno) (14V i 50Hz)



*Slika 6.22. Usporedba linijske struje Yy0 i Yy10 grupe spoja*

Iz slike 6.22. se zaključuje da su amplituda i period istih vrijednosti za obje grupe spoja s amo je fazni pomak različit i iznosi 0 stupnjeva za Yy0 grupu spoja i 300° za Yy10 grupu spoja .



*Slika 6.23. Harmonijska analiza fazne struje  $i_1$  sekundara transformatora u Yy10 spoju*

**Tablica 6.4.** Očitane vrijednosti harmonijske analize

$n$	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
$\hat{I}(n)$ [mA]	286,74	5,21	53,26	37,56	2,28	21,26	18,84	0,81	13,78	13,12
$I(n)$ [mA]	202,79	3,69	37,67	26,56	1,61	15,04	13,32	0,57	9,75	9,28
Postotna vrijednost[%]	100,00	1,82	18,57	13,10	0,79	7,42	6,57	0,28	4,81	4,58
THDI[%]	25,74									

Izraženi su neparni harmonici kao i za sve grupe spoja, ističe se peti harmonik koji ima vrijednost 37,67 mA i 18,57 % osnovnog harmonika struje sekundara transformatora, svi podaci u tablici se računaju prema izrazima 6-1, 6-2 i 6-3.

**Tablica 6.5.** Dobivene vrijednosti THDI-a iz spektralne analize

Grupa spoja	$Yy0$	$Yd0$	$Yy6$	$Yy10$
THDI[%]	25,24	27,36	26,12	25,74
THDI[%]teorijski	31			

U tablici 6.5. vide se vrijednosti THDI-a za različitu grupu spoja odnosno za različiti sati broj, za sve četiri različite grupe spoja povratna struja trofaznog neupravljivog mosnog spoja na mrežu preko transformatora je višeharmonijska. Satni broj ne utječe značajno na THDI vidi se da za slučajeve  $Yy0$ ,  $Yy6$  i  $Yy10$  THDI skoro pa se nemijenja, iznosi oko 26 %. Spoj  $Yd0$  ima malo bolji THDI 27,36 % a bolji je zato što se teži teorijskoj vrijednosti koja iznosi 31%. Ako se uzme u obzir više harmonika a ne samo par najizraženijih odstupanja će biti manja. Isto tako odstupanja nastaju jer struja nije glatka nego određene valovitosti.

## 7. ZAKLJUČAK

Korištenjem Lucas-Nulle didaktičko-multimedijalne opreme promatran je utjecaj ispravljача na izmjeničnu pojnu mrežu te mogućnosti spajanja primarnih i sekundarnih namota transformatora. Definirane su četiri grupe spoja transformatora. Primarna strana transformatora je stalno spojena u zvijezdu. Mjenjanjem spoja namota sekundara vidno se mijenjaju valni oblici struje sekundara transformatora. Spajanjem grupe spoja  $Yy0$ ,  $Yy6$  i  $Yy10$  značajnu ulogu ima satni broj transformatora. Satni broj ne utječe na izgled valnog oblika niti na njegov iznos već samo na fazni kut između primara i sekundara transformatora. Prilikom provođenja harmonijske analize fazne struje sekundara transformatora uz pomoć virtualnog spektralnog analizatora koji se nalazi unutar programskog paketa Labsoft primjećuju se neparni harmonici, među kojima je dominantan peti. *THDI* za  $Yy0$ ,  $Yy6$  i  $Yy10$  grupu spoja transformatora je gotovo identičan i iznosi oko 26%. Valni oblik grupe spoja  $Yy0$  se izgledom značajno razlikuje od  $Yd0$  grupe spoja transformatora. Valni oblik fazne struje sekundara transformatora grupe spoja  $Yy0$  ima tri razine dok valni oblik fazne struje  $Yd0$  grupe spoja transformatora ima šest razina. *THDI* im je sličan a iznosi 27,36% za  $Yd0$  grupu spoja transformatora. Teorijska vrijednost fazne struje sekundara transformatora za gupe spoja  $Yd0$  i  $Yy0$  je jednaka i iznosi 31%. Mjerenjima se dobije nešto ispod toga. Razlozi odstupanja mjerenih od teorijski dobivenih iznosa su uzimanje ograničenog broja harmonika (prvih 9 dominantnih), te kvalitativno odstupanje snimljenih valnih oblika od valnih oblika dobivenih matematičkim modelom u analizi rada. Prilikom snimanja fazne struje na primaru transformatora valni oblik je izobličen, razlog tomu je što su ostali uređaji i trošila spojeni na mjesto priključka na izmjeničnoj strani.

## SAŽETAK

U ovom diplomskom radu opisan je ispravljač i kakve utjecaje ima na izmjeničnu pojnu mrežu zbog nelinearnosti komponenata. Opisuje se način rada transformatora te mogućnosti spajanja primarnog i sekundarnog namota. Uz pomoć različitih spojeva primara i sekundara definiraju se 4 grupe spoja za koje će se napraviti analiza rada. Korištenjem Lucas-Nulle didaktičko-multimedijalne opreme, njegovih eksperimentalnih kartica i programskog paketa Labsoft vrše se mjerenja za  $Yy0$ ,  $Yd0$ ,  $Yy6$  i  $Yy10$  grupu spoja transformatora. Uz pomoć virtualnog spektralnog analizatora koji je dio programskog paketa Labsoft-a mjeri se harmonijski sadržaj fazne struje sekundara transformatora. Dan je postupak izračuna  $THD$  fazne struje sekundara transformatora za zvijezda i trokut spoj. Napravljena je detaljna analiza utjecaja grupe spoja i satnog broja na  $THD$  fazne struje sekundara transformatora.

Ključne riječi: ispravljač, transformator, grupe spoja transformatora,  $THDI$ , didaktičko-multimedijalna oprema Lucas-Nulle



## ABSTRACT

This thesis describes the rectifier and what effects it has on the alternating supply network due to the nonlinearity of the components. The mode of operation of the transformer and the possibility of connecting the primary and secondary windings are described. With the help of different primary and secondary compounds, 4 groups of compounds are defined for which a work analysis will be performed. Using Lucas-Nulle didactic-multimedia equipment, its experimental cards and the Labsoft software package, measurements are performed for the  $Yy0$ ,  $Yd0$ ,  $Yy6$  and  $Yy10$  group of the transformer connection. With the help of a virtual spectrum analyzer that is part of the Labsoft software package, measurements of the harmonic content of the phase current of the transformer secondary were performed. The procedure for calculating the  $THD$  phase current of a secondary transformer for a star and triangle junction is given. A detailed analysis of the influence of the connection group and the hour number on the  $THD$  phase currents of the transformer secondary was made.

Keywords: rectifier, transformer, transformer connection groups,  $THDI$ , didactic-multimedia equipment Lucas-Nulle

## LITERATURA

- [1] D. Kezić, Energetska elektronika, 2011., dostupno na: <https://muricmilorad.files.wordpress.com/2011/11/energetska-elektronika.pdf>
- [2] N. Noković, Povratni utjecaj induktivno opterećenog poluupravljivog trofaznog mosnog spoja na distribucijsku mrežu, 2017., dostupno na: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/etfos%3A1481/datastream/PDF/view>
- [3] M. Umihanić, Analiza viših harmonika šestopulsnog ispravljača sprega transformatora YgY, hrčak, Tehnički glasnik, 2015., dostupno na: [https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id\\_clanak\\_jezik=203361](https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=203361)
- [4] D. Pelin, K. Miličević, D. Vulin, Priručnik za praktikum iz osnova energetske elektronike, Elektrotehnički fakultet, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, 2013.
- [5] A. Tomasović, S. Nekić, J. Šimić, M. Lasić, M. Veža, Negativno povratno djelovanje nelinearnih trošila na kvalitetu napona, 2008., dostupno na: <http://www.ho-cired.hr/referati/SO2-03.pdf>
- [6] Elektroskop, Označavanje stezaljki i spojevi transformatora, dostupno na: <http://www.elektrosklop.hr/tehnicki-podaci/oznacavanje-i-spojevi/>
- [7] Lucas-Nuelle, didaktičko multimedijalna oprema, dostupno na: <https://www.lucas-nuelle.us/>
- [8] N. Voloder, Spajanje trofaznog neupravljivog mosnog spoja na pojnu mrežu preko transformatora različitih grupa spojeva, 2019.
- [9] I. Flegar, Elektronički energetske pretvarači, Kigen, Zagreb, 2010.
- [10] I. Balenović, Izmjenične karakteristike trofaznog ispravljača u neupravljivom mosnom spoju u ovisnosti o grupi spoja mrežnog transformatora, 2020.

## **ŽIVOTOPIS**

Josip Mišković rođen je 26. Veljače 1996. godine u Slavonskom Brodu. Odrastao je u Babinoj Gredi gdje je pohađao OŠ „Mijat Stojanović“ od 2002. do 2010. godine. 2010. upisuje se u prvi razred srednje tehničke škole u Županji smjer elektrotehničar. Srednjoškolsko obrazovanje završava 2014. godine i te iste godine upisuje se na stručni studij elektroenergetike na Elektotehničkom fakultetu Osijek koji kasnije mijenja naziv u Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku gdje je danas student druge godine diplomskog studija.

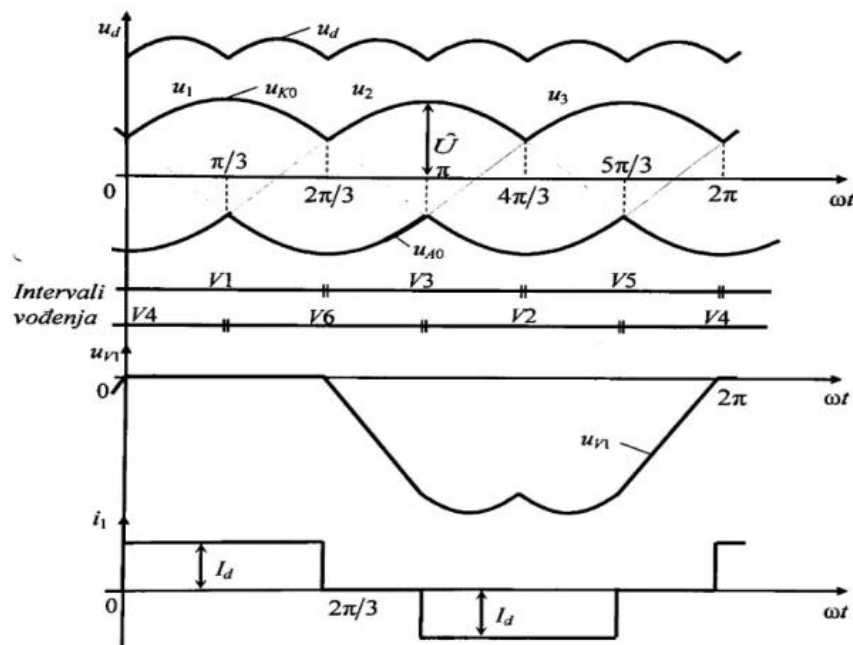
## Prilog 1: Laboratorijska vježba

# UTJECAJ GRUPE SPOJA MREŽNOG TRANSFORMATORA NA IZMJENIČNE KARAKTERISTIKE ODABRANE TOPOLOGIJE ISPRAVLJAČA

## 1. UVOD

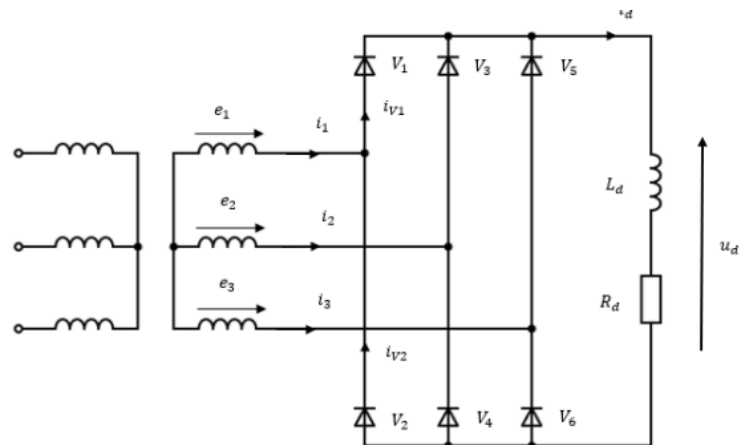
Mjenjanjem grupe spoja mrežnog transformatora uz pomoć ispravljača moguće je odrediti različite valne oblike napona i struje u softverskom paketu Lucas-Nulle. Ispravljač omogućuje spjanje pojne mreže s istosmjernim trošilom. Postoje dvije izvedbe neupravljivih ispravljača a to su jednofazni i višefazni.

Neupravljivi ispravljači koriste diode kojima je izlazni napon uvjetovan ulaznim naponom mreže ili s transformatorom prije samoga ispravljača.



*Slika 1.1. Karakteristični valni oblici induktivno opterećenog neupravljivog trofaznog mosnog spoja*

## 1.1 Analiza rada



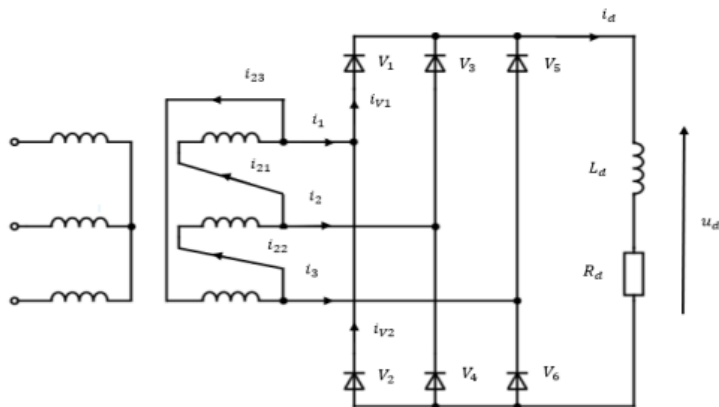
*Slika 1.2. Shema ispravljača spojenog na mrežu preko Yy0 grupe spoja transformatora*

Pomoću KZS-a se dolazi do izraza:

$$i_1 = i_{v1} - i_{v2} \quad (1-1)$$

$$i_2 = i_{v3} - i_{v4}$$

$$i_3 = i_{v5} - i_{v6}$$



*Slika 1.3. Shema ispravljača spojenog na mrežu preko Yd0 grupe spoja transformatora*

Iz KZS-a proizlaze izrazi:

$$i_{21} = \frac{1}{3}(i_1 - i_2) \quad (1-2)$$

$$i_{22} = \frac{1}{3}(i_2 - i_3)$$

$$i_{23} = \frac{1}{3}(i_3 - i_1)$$

## 2. RAD U LABORATORIJU

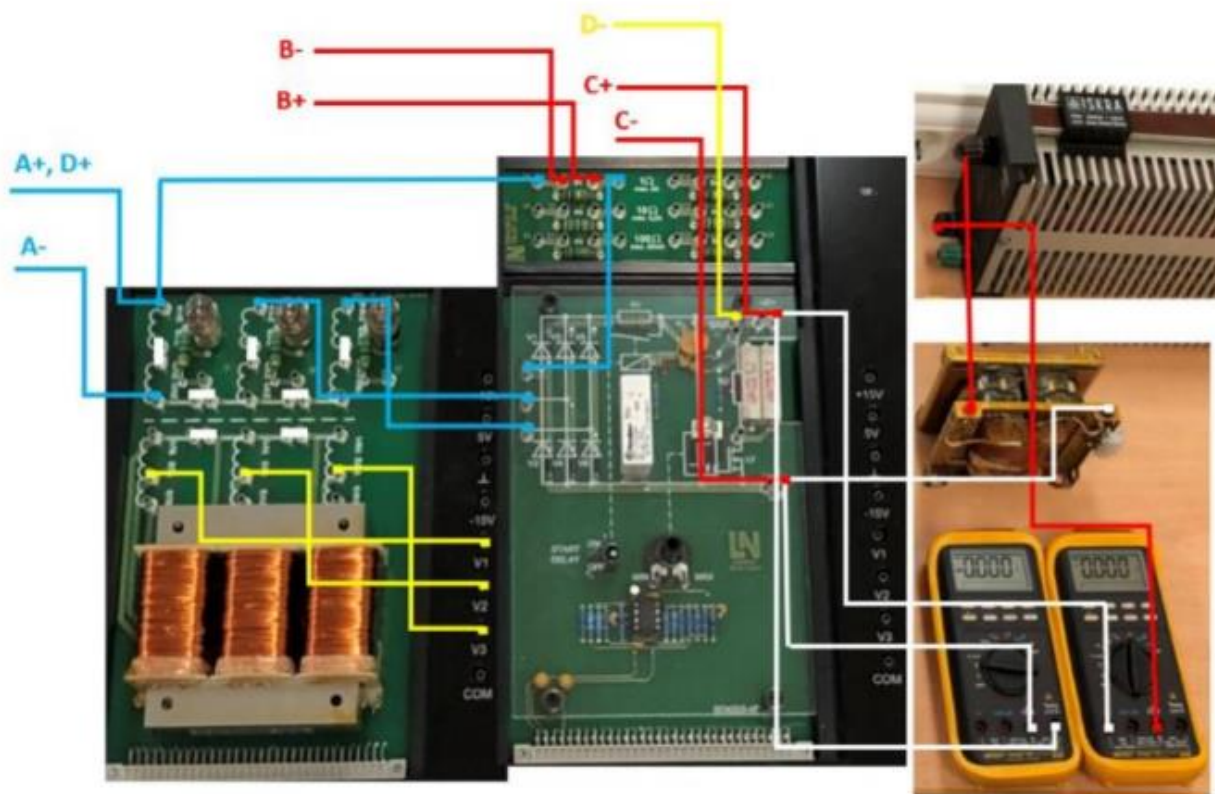
Korištenjem didaktičko multimedijalne opreme Lucas Nulle snimamo valne oblike napona i struje te provodimo harmonijsku analizu.

Mjerna oprema koju koristimo:

- računalo,
- računalni program Starter
- CO4203-2A UniTrain - sučelje i njegovo pripadajuće napajanje,
- SO4204-7Y eksperimentalna kartica trofaznog transformatora,
- CO4203-2B dva eksperimentatora za povezivanje eksperimentalne kartice i sučelja,
- SO4203-4F eksperimentalna kartica neupravljivog ispravljača,
- CO4203-2J pribor za spajanje,
- SO4203-2F kartica sa šantovima
- dva multimetra,
- izmjenična mreža 230V, 50Hz,
- strujna kliješta,
- promjenjivi otpornik;  $R_{max} = 3300\Omega$  ;  $I_{max} = 0.44A$ ,
- prigušnica;  $L = 330mH$  ;  $R = 2\Omega$ .

### 2.1 Yyo grupa spoja

Na slici 2.1. vidimo način spajanja Lucas-Nulle opreme s eksperimentalnim pločicama na kojima se vrše mjerenja.

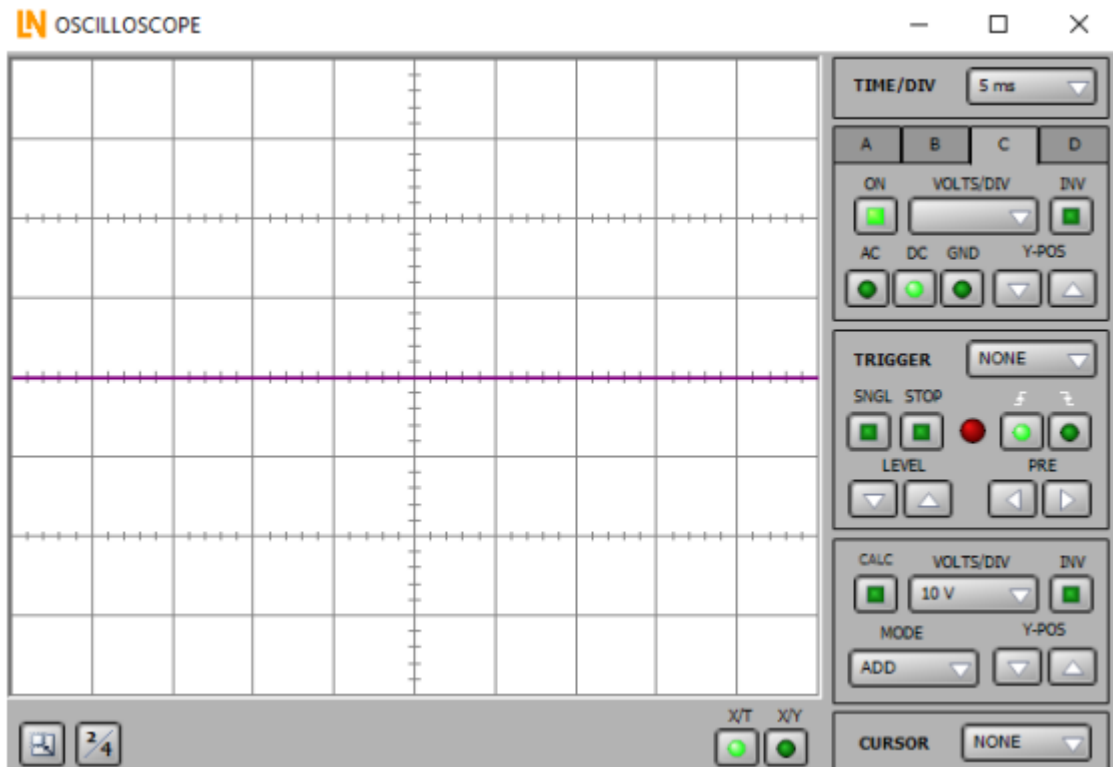


*Slika 2.1. Shematski prikaz spajanja Yy0 grupe spoja*

#### **Redosljed provedbe mjerenja:**

1. **Uključiti računalo** (dok spajate opremu da ne morate čekati njegovo pokretanje)
2. Opremu spojiti prema **slici 2.1.**, prije nego što **otpornik** spojite podesite ga na maksimalnu vrijednost (koristiti multimetar)
3. Otvariti programski paket Starter (**C:/ Program Files (x86) / LN / PlugIns / Starter**), kliknut na ikonicu knjige, odabrati **SO4203-2A UniTrain (Basic Instruments)**.
4. Potrebno je izmjenični izvor napajanja, u **Basic Instruments** odabrati **Power Supply – 3 Phase Supply**, napon postaviti na **14 V** a frekvenciju na **50 Hz**
5. Ako je sve spojeno uključite napajanje klikom na tipku **POWER**
6. Potrebno je smanjivati vrijednost otpora dok napon ne postane **stabilan** a struja da ima maksimalnu vrijednost (npr. napon je 29 V a struja 0,25 A), **kontrolirati** vanjskim ampermetrom i voltmetrom
7. Snimat ćemo sljedeće vrijednosti, kanal **A** – fazni napon, kanal **B** - fazna struja, kanal **C** – izlazni napon ispravljača, kanal **D** – napon na diodi D1

8. Otvorite **Oscilloscope** (Basic Instruments / Measuring Devices / Oscilloscope), potrebno je dvokanal prebaciti na četverokanal (**tipka 2/4** u donjem lijevom kutu Slika 2.2.)



*Slika 2.2. Prikaz osciloskopa*

9. Podesite sljedeće parametre (na tipku **ON** palite i gasite određeni kanal)

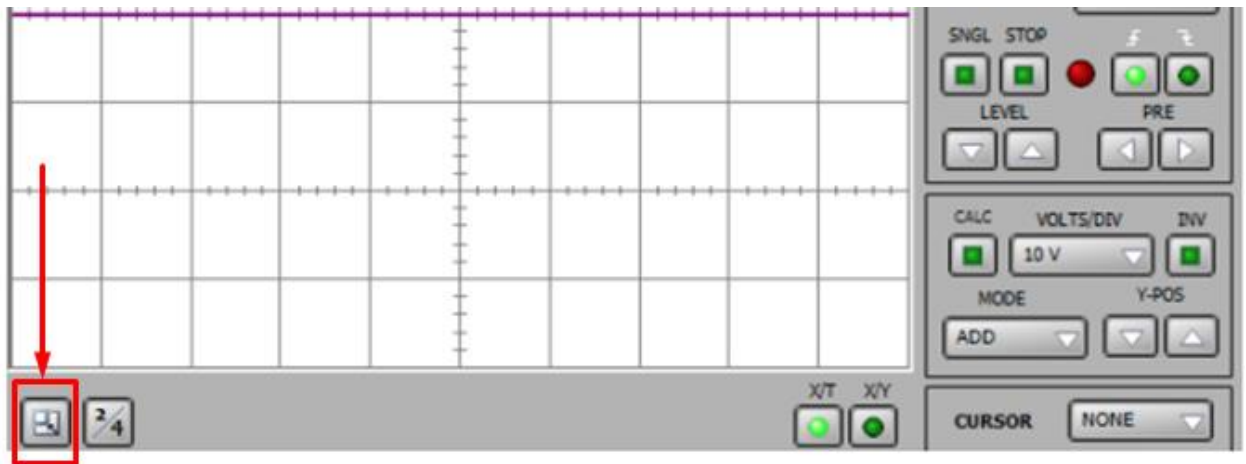
*Tablica 2.1. Parametri za podešavanje osciloskopa*

Valni oblik	Kanal na osciloskopu	VOLTS/DIV	AC/DC	TIME/DIV
Fazni napon	A	10V	AC	5ms
Fazna struja	B	50mV ( <b>povećati ili smanjiti</b> ako je potrebno)	AC	5ms
Izlazni napon ispravljача	C	10V	DC	5ms
Napon na diodi D1	D	10V	DC	5ms

10. Snimiti kanale A i B zajedno te C i D zajedno, koristiti opciju **TRIGGER** (odabrati CHN A za sve kanale) pritisnuti **STOP** (kada budete mijenjali vrijednosti potrebno je ukloniti TRIGGER i ugasiti opciju STOP kako bi vam se pojavile druge vrijednosti valnih oblika), **PRIPAZITI** jel potrebno neki kanal **INVERTIRATI**, provjeriti kakve valne oblike trebate dobiti



11. Valne oblike snimate u **Word dokument** koristite desni klik na pozadinu (na kojoj se nalaze valni oblici) i opciju **COPY**, potrebno je uključiti ikonicu sa slike 2.3. radi boljeg očitavanja vrijednosti

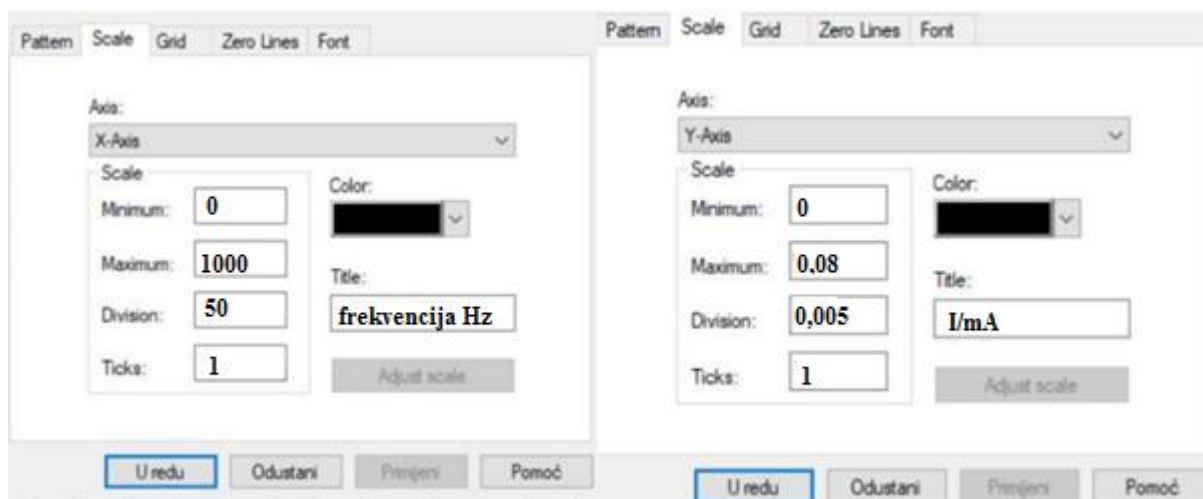


*Slika 2.3. Dodavanje „Legende“*

12. Napravite mjerenja za 3 različite vrijednosti napona **14V, 12V i 8V**, frekvencija je stalno ista **50Hz**
13. Kada napravite sva mjerenja ugasi **samo Osciloskop** sve ostalo nam treba za daljnja mjerenja

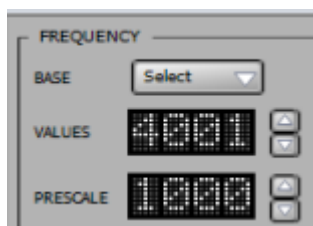
### **Harmonijska analiza**

1. Oprema ostaje spojena kao na slici 2.1.
2. Izvor napajanja vratiti na **14 V i 50 Hz**
3. Otvoriti **Spectrum Analyzer**
4. Desni klik na pozadinu spectralnog analizatora otvorit prozor **PROPERTIES**, zatim odabrati **SCALE** podesite X - Axis i Y- Axis po slici 2.4. (ako je struja velika ili mala potrebno je povećati vrijednost odnosno smaniti vrijednost Y-Axis )



*Slika 2.4. Vrijednosti X i Y osi*

5. Kliknuti **Uredi**
6. Podesiti **BASE** na 50 Hz slika 2.5.



*Slika 2.5. Podešavanje bazne frekvencije*

7. Započeti mjerenje klikom na tipku **POWER**
8. Mjerenje zaustaviti na tipku **STOP**
9. Snimiti harmonijsku analizu (graf) u Word dokument
10. Očitati vrijednosti harmonika i zapisati u tablicu 2.2. (pokazivačem ili kursorom prijeđite preko harmonika automatski će se pokazati njihova vrijednost)
11. THDI izračunati iz izraza (2-1)

*Tablica 2.2. Vrijednosti harmonika očitanih iz spektralne analize*

$n$	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
$\hat{I}(n)$ [mA]	286,90	2,59	54,23	30,67	0,82	23,08	17,93	0,00	16,23	15,42
$I(n)$ [mA]	202,90	1,83	38,35	21,69	0,58	16,32	12,68	0,00	11,48	10,91
Postotna vrijednost[%]	100,00	0,90	18,90	10,69	0,29	8,04	6,25	0,00	5,66	5,37
THDI[%]	25,24									

$\hat{I}(n)$  – vršna vrijednost n-tog harmonika

$I(n)$  – efektivna vrijednost n-tog harmonika

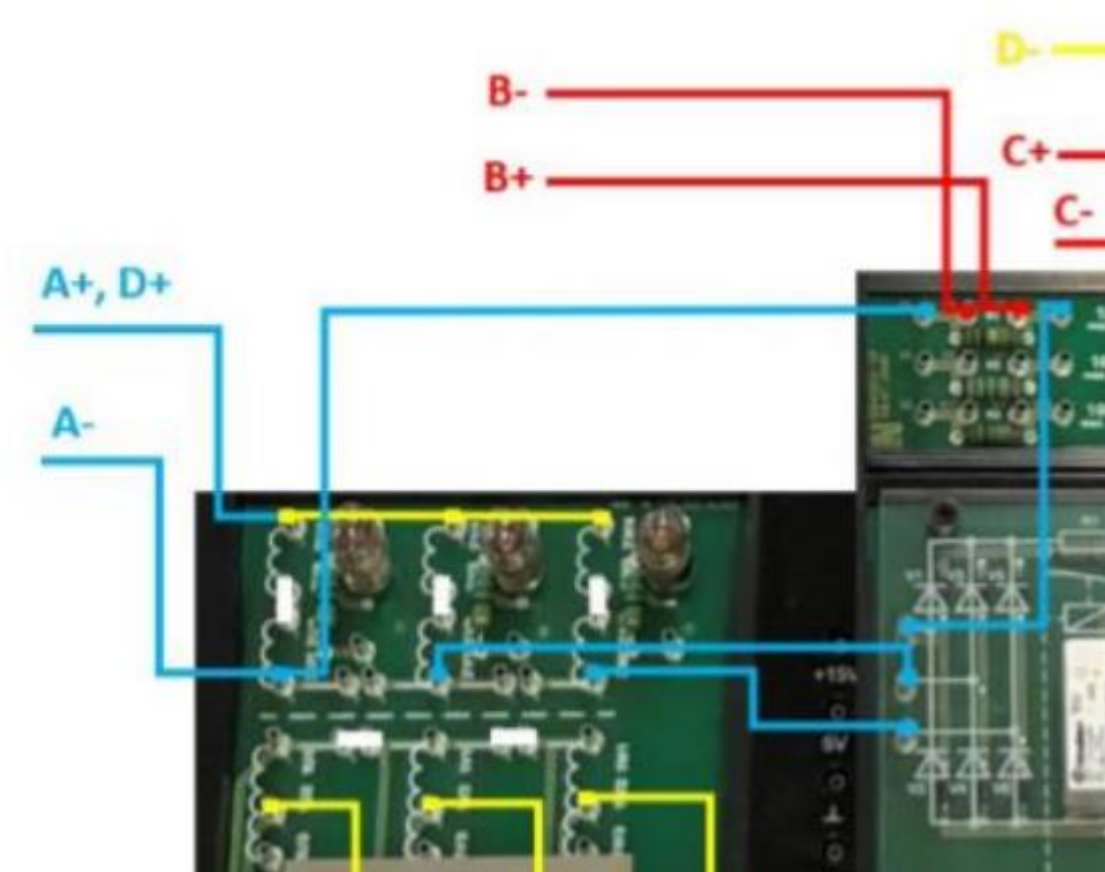
$I(1)$  – efektivna vrijednost prvog harmonika

$$THDI = \frac{\sqrt{\sum_{n>1}^{n=19} I(n)^2}}{I(1)} \quad (2-1)$$

$$I(n) = \frac{\hat{I}(n)}{\sqrt{2}} \quad (2-2)$$

## 2.2 Yy6 grupa spoja

1. Opremu spojiti prema slici 2.6., (Napomena: potrebno je prilagoditi **vidljive** vodiče sa slike, ostalo se ne mijenja)

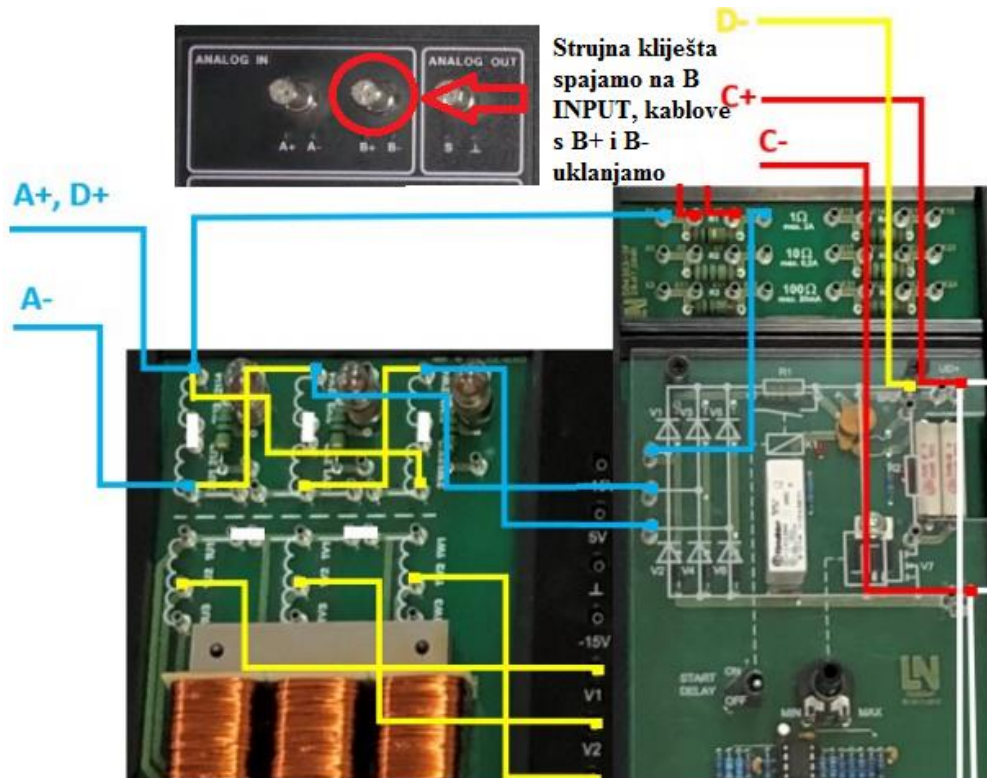


*Slika 2.6. Shematski prikaz spajanja grupe spoja Yy6*

2. Snimiti valne oblike istim postupkom kao i za Yy0 spoj i spremiti u Word dokument (samo 14V i 50Hz). Pripaziti je li potrebno **INVERTIRATI** neki signal.

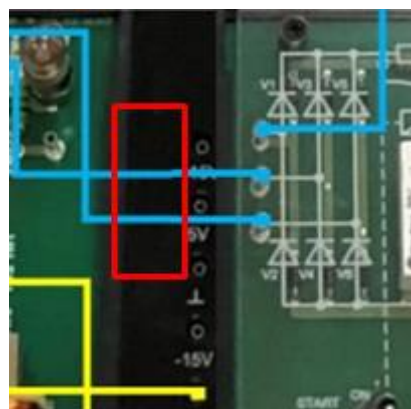
### 2.3. Yd0 grupa spoja

1. Spojite opremu prema slici 2.7. (Napomena: potrebno je prilagoditi **vidljive** vodiče sa slike, ostalo se ne mijenja)



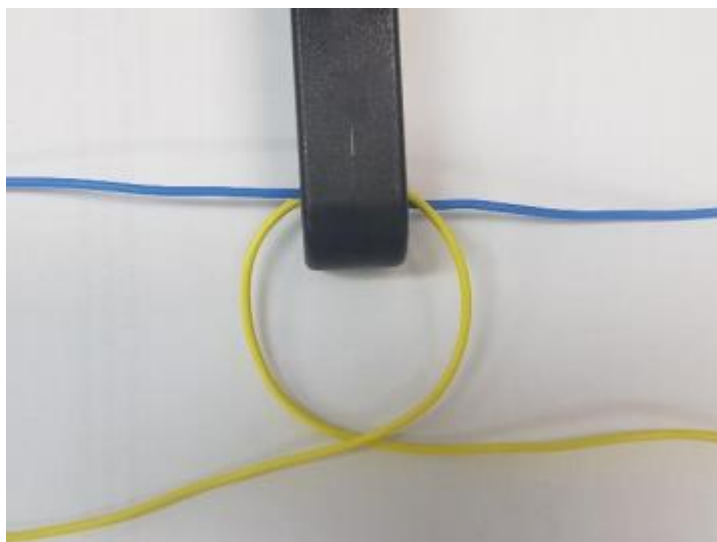
*Slika 2.7. Shematski prikaz Yd0 grupe spoja*

2. Strujna kliješta postavite na opseg 100 mV/A
3. Strujnim kliještima je potrebno obuhvatiti 2 vodiča slika 2.8.



*Slika 2.8. Linijske struje*

4. Prilikom obuhvaćanja vodiča potrebno je jedan vodič invertirati slika 2.9.



*Slika 2.9. Invertiranje jedne linijske struje*

5. Pritisnuti **POWER** te snimiti valne oblike za 14V i 50Hz
6. Valne oblike spremiti u Word dokument
7. Snimiti valni oblik B kanala posebno, potrebno za spektralnu analizu
8. Napraviti **SPEKTRALNU ANALIZU** istim postupkom kao i za  $Yy0$  spoj
9. Popuniti tablicu 2.3. koristiti isti izraz (2-1) za  $THDI$  kao i za  $Yy0$  spoj

*Tablica 2.3. Vrijednosti harmonika očitanih iz spektralne analize*

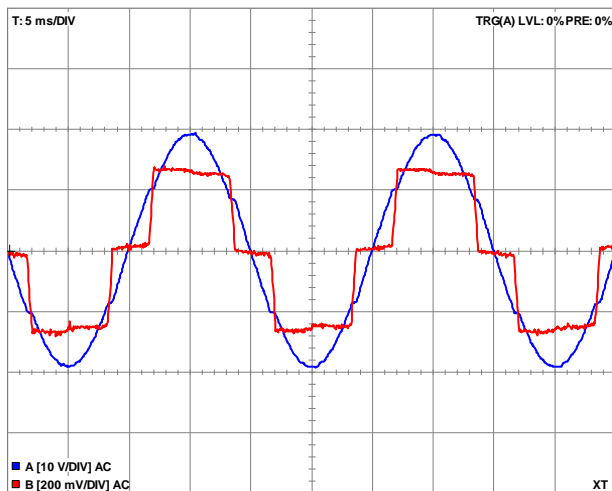
$n$	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
$\hat{I}(n) [mA]$	287,74	8,89	53,41	41,74	8,21	21,82	23,20	7,50	11,12	16,14
$I(n) [mA]$	203,50	6,29	37,77	29,52	5,80	15,43	16,41	5,30	7,87	11,41
Postotna vrijednost[%]	100,00	3,09	18,56	14,51	2,85	7,58	8,06	2,60	3,87	5,61
$THDI$ [%]	27,36									

## Prilog 2: Izvještaj laboratorijske vježbe

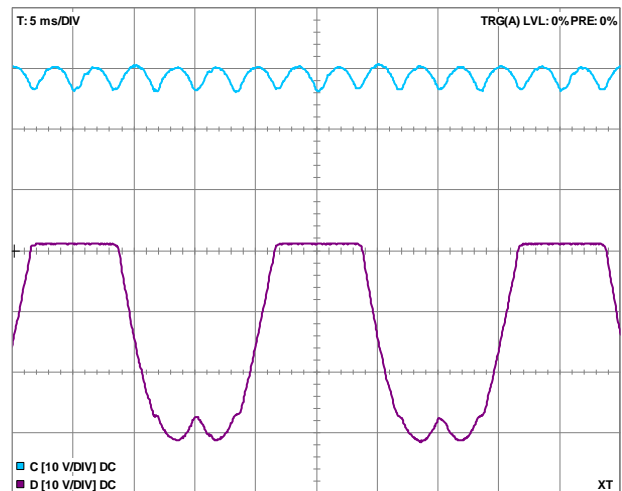
# UTJECAJ GRUPE SPOJA MREŽNOG TRANSFORMATORA NA IZMJENIČNE KARAKTERISTIKE ODABRANE TOPOLOGIJE ISPRAVLJAČA

Rezultati mjerenja

a)  $Yy0$  grupa spoja

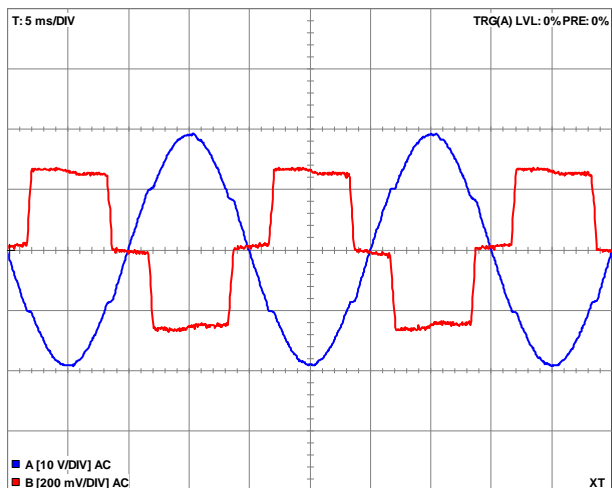


Fazni napona i linijska struja

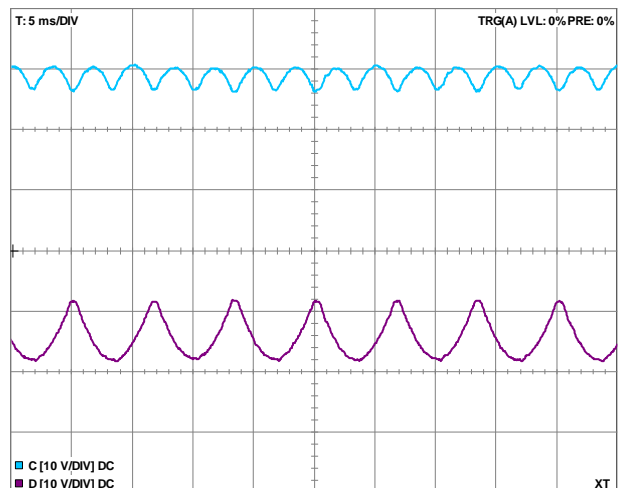


Izlazni napon ispravljača i napon na diodi

b)  $Yy6$  grupa spoja

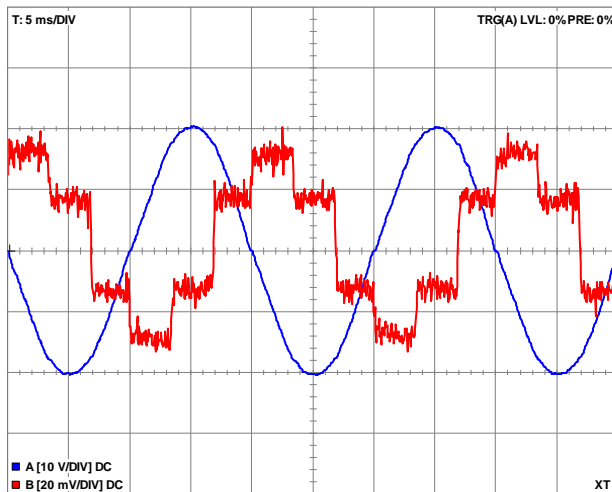


Fazni napona i linijska struja

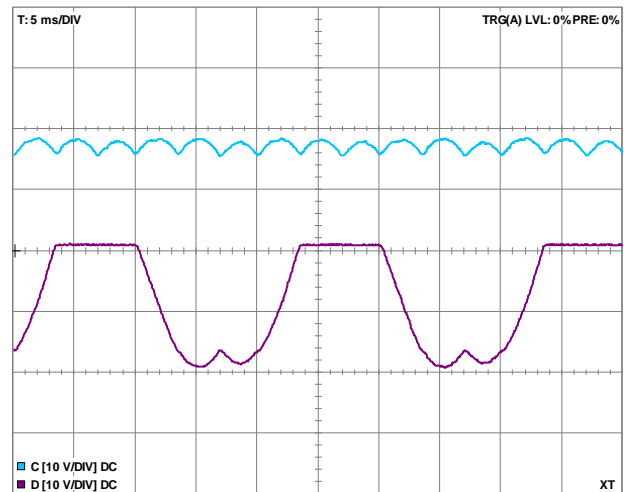


Izlazni napon ispravljača i napon na diodi

c)  $Yd0$  grupa spoja



Fazni napona i linijska struja



Izlazni napon ispravljača i napon na diodi

d) Harmonijska analiza

Grupa spoja transformatora	Iznos osnovnog harmonika [mA]	Postotna vrijednost petog harmonika [%]	Iznos THDI-a [%]
$Yy0$	202,90	18,90	25,24
$Yd0$	203,50	18,56	27,36

Zašto nismo radili harmonijsku analizu za  $Yy6$  grupu spoja? Komentirati najpoželjniju grupu spoja transformatora.

Pilikom snimanja valnog oblika fazne struje sekundara transformatora za grupe spoja  $Yy0$  i  $Yy6$  vidi se da je jedina razlika što je valni oblik struje sekundara transformatora grupe spoja  $Yy6$  fazno pomaknut za  $180^\circ$  što odgovara satnom broju. Prema tome snimanje valnog oblika fazne struje sekundara transformatora za spoj  $Yy10$  bi samo pomaknuo fazni kut na  $300^\circ$  a nebi mjenjao iznos ni oblik.

Jako su male razlike u izračunu THDI-a između  $Yy0$  i  $Yd0$  grupe spoja transformatora.  $Yd0$  grupa spoja ima 27.36% iznos THDI-a što je malo bolje od  $Yy0$  i  $Yy6$  grupa spoja transformatora, jer je njezina vrijednost bliža očekivanoj koja iznosi 31%.

Zaključiti šta radi satni broj s faznom strujom. Što će se desiti s valnim oblikom i pomakom fazne struje ako je u pitanju  $Yy10$  grupa spoja.

Satni broj pokazuje koliko je transformator na sekundaru zakrenuo fazu s obzirom na primar.

Satni broj će zakrenuti fazu na sekundaru transformatora za  $300^\circ$ , valni oblik struje na sekundaru transformatora će se samo fazno pomaknuti ali neće mijenjati iznos ni izgled.

Odredite teorijski THDI i usporediti ga s računskim.

$v_i = \frac{I(1)}{I} = \frac{\frac{\sqrt{6}I_d}{\pi}}{\sqrt{\frac{2}{3}}I_d}$ $= \frac{3}{\pi} = 0,955$	$v_i = \frac{I(1)}{I} = \frac{\frac{\sqrt{2}}{\pi}I_d}{\frac{\sqrt{2}}{3}I_d}$ $= \frac{3}{\pi} = 0,955$
--	--

Teorijski *THDI*

$$THDI = \sqrt{\left(\frac{1}{v_i}\right)^2 - 1} = \sqrt{\frac{\pi^2}{9} - 1} = 0,31 \cdot 100\% = 31\%$$

Mjereni *THDI*

$Yy0$	$Yd0$
25,24	27,36

Odstupanja iznose za  $Yy0$  grupu spoja  $\left(1 - \frac{25,24}{31}\right) \cdot 100 = 18,58\%$  i za  $Yd0$  grupu spoja  $\left(1 - \frac{27,36}{31}\right) \cdot 100 = 11,74\%$