

# SPAJANJE TROFAZNOG NEUPRAVLJIVOG MOSNOG SPOJA NA POJNU MREŽU PREKO TRANSFORMATORA RAZLIČITIH GRUPA SPOJEVA

---

**Voloder, Nina**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*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:200:793246>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-31**

*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**

**SPAJANJE TROFAZNOG NEUPRAVLJIVOG MOSNOG SPOJA  
NA POJNU MREŽU PREKO TRANSFORMATORA  
RAZLIČITIH GRUPA SPOJEVA**

**Završni rad**

**Nina Voloder**

**Osijek, 2019.**

# SADRŽAJ

Stranica

1. UVOD .....	1
1.1. Zadatak završnog rada .....	1
2. TROFAZNI NEUPRAVLJIVI MOSNI SPOJ .....	2
2.1. Analiza rada induktivno opterećenog neupravljivog trofaznog mosnog spoja .....	2
3. ISPRAVLJAČKI TRANSFORMATOR.....	5
3.1. Grupa spoja transformatora .....	5
3.2. Analiza utjecaja različite grupe spojeva ispravljačkog transformatora na trofazni neupravljivi mosni spoj .....	7
3.2.1. Yy0 grupa spoja ispravljačkog transformatora .....	7
3.2.2. Yd0 grupa ispravljačkog transformatora .....	8
3.2.3. Yy0, Yy6 i Yy10 grupe spojeva ispravljačkog transformatora .....	10
4. RAD U LABORATORIJU .....	11
4.1. Mjerna oprema.....	11
4.2. Spoj trofaznog neupravljivog mosnog spoja na pojnu mrežu preko transformatora različitih vrsta spojeva .....	12
4.2.1. Yy0 grupa spoja .....	12
4.2.2. Yd0 grupa spoja .....	18
4.3. Spoj trofaznog neupravljivog mosnog spoja na pojnu mrežu preko transformatora različitih satnih brojeva.....	23
4.3.1. Yy0 grupa spoja .....	23
4.3.2. Yy6 grupa spoja .....	23
4.3.3. Yy10 grupa spoja .....	27
5. ZAKLJUČAK .....	32
SAŽETAK.....	34
ABSTRACT .....	35
LITERATURA.....	36
ŽIVOTOPIS .....	37

# 1. UVOD

Povećanjem uporabe elektroničkih uređaja, koji zahtijevaju istosmjerno napajanje, povećava se i potreba za ispravljačima jer je većina izvora električne energije koji se koriste u svakodnevnom životu izmjenična. Dakle, ispravljač je elektronički energetska pretvarač koji povezuje izmjeničnu mrežu s istosmjernim trošilom [1]. Jedna vrsta ispravljača jest neupravljivi trofazni mosni spoj koji povezuje trofazni simetrični izvor napajanja s istosmjernim trošilom. Zbog potrebe za galvanskim odvajanjem trošila od pojne mreže ili zahtijevanim naponom trošila, mosni spoj se na pojnu mrežu spaja preko ispravljačkog transformatora. Ovaj transformator je različite grupe spoja, što će biti definirano u sljedećim poglavljima rada. Cilj ovog završnog rada jeste promotriti utječu li različite grupe spoja ispravljačkog transformatora na karakteristične valne oblike struje i napona ispravljača te povratno djelovanje na izmjeničnu mrežu u smislu injektiranja viših harmonika povratne struje.

## 1.1. Zadatak završnog rada

Za kartice skalirane makete trofaznog neupravljivog ispravljača i trofaznog transformatora stupčaste izvedbe provesti ispitivanja s didaktičko-multimedijalnim sustavom Lucas-Nülle. Izraditi tehničku dokumentaciju i odabrati skupove parametara mjerenja pogodne za pravljenje predloška laboratorijske vježbe.

## 2. TROFAZNI NEUPRAVLJIVI MOSNI SPOJ

Ispravljači su električki uređaji koji povezuju izmjeničnu pojnu mrežu i istosmjerno trošilo, pri čemu se energija prenosi od izmjenične pojne mreže prema istosmjernom trošilu. Pretvaračke komponente neupravljivih ispravljača jesu diode [1]. Ovisno o broju faza pojne izmjenične mreže, neupravljivi se ispravljači dijele na jednofazne ili višefazne. Za trošila veće snage koristi se priključak na trofaznu pojnu mrežu, dok se za trošila manje snage koristi napajanje iz jednofazne pojne mreže [2].

Istosmjerna trošila dijele se na energetska i elektronička [1, 2]. Tipični primjeri energetske trošila napajanih iz neupravljivih ispravljača uzbude su istosmjernih motora, kotve magneta i akumulatorske baterije pri punjenju. Napajanja elektroničkih sklopova uređaja (osobna i procesna računala, instrumentacijska oprema, te audio i video uređaji) smatraju se elektroničkim trošilima. Elektronička trošila zahtijevaju kontinuirani napon, te se takva trošila modeliraju paralelnim spojem kapaciteta i otpora, zbog čega se smatraju kapacitivnim trošilima. Energetskim trošilima treba osigurati kontinuiranu struju, te se modeliraju serijskim spojem induktiviteta i otpora, zbog čega se smatraju induktivnim trošilima.

### 2.1. Analiza rada induktivno opterećenog neupravljivog trofaznog mosnog spoja

Pretpostavlja se da je trofazni mosni spoj priključen na simetričnu trofaznu pojnu mrežu faznih napona  $u_j = \hat{U} \sin \left[ \omega t - (j - 1) \frac{2\pi}{3} \right]$ ,  $j = 1, 2, 3$ , te da su otpori i induktiviteti pojne mreže zanemareni. Pretvaračke komponente su modelirane idealnim diodama. Komutacija između dioda je trenutna. Trošilo se smatra strujnim uvorom, glatke struje  $I_d$  (jer za induktivitet i otpor trošila vrijedi  $L_d/R_d > T/6$ ). Na nadomjesnoj shemi spoja sa slike 2.1. se uočavaju tri karakteristična čvora:

0 – nulište (neutral),

K – zajednički spoj katodne grupe ventila  $V_1, V_3, V_5$ ,

A – zajednički spoj anodne grupe ventila  $V_2, V_4, V_6$ . [3]

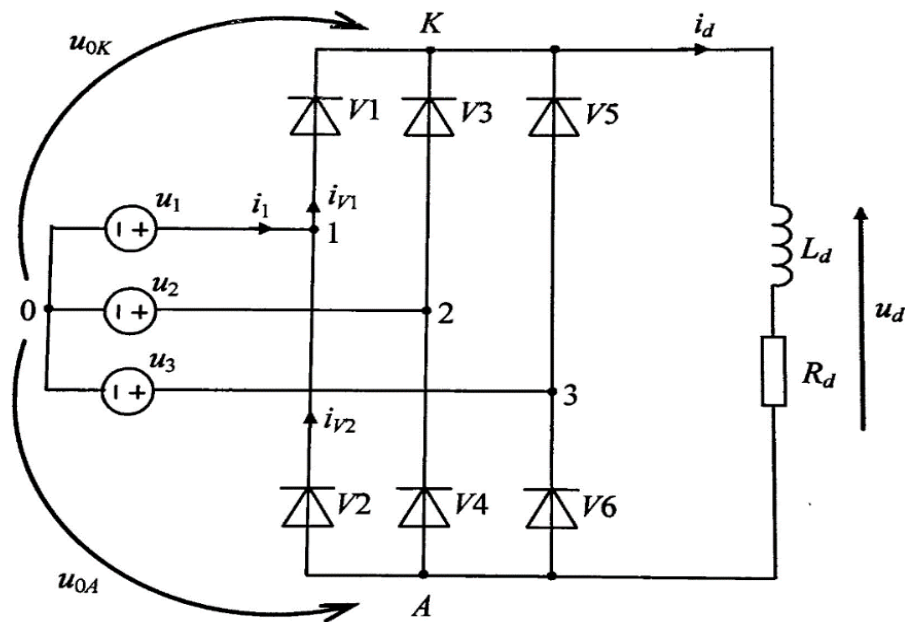
Neka su definirani naponi anodne i katodne grupe prema nulištu,  $u_{A0}$  i  $u_{K0}$ . Kada se napiše KZN za petlju koju čine naponi  $u_{A0}$  i  $u_{K0}$  i izlazni napon trošila  $u_d$  dobije se  $u_d = u_{K0} - u_{A0}$ .

Diode katodne grupe vode u vremenskom intervalu u kojemu je najpozitivniji fazni napon na kojem su priključene u odnosu na napone ostalih faza. Diode anodne grupe vode u vremenskom intervalu kada je fazni napon na kojem su priključene najnegativniji [3]. Valni oblik izlaznog napona  $u_d$  prikazan je na slici 2.2.. Komutacija dioda je trenutna, a struja je trošila glatka, iznosa:

$$I_d = U_{dio}(0)/R_d,$$

gdje je  $U_{dio}(0)$  idealni napon praznog hoda, koji se određuje prema slici iz izraza:

$$U_{dio}(0) = 6 \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/3} (u_1 - u_2) d\omega t = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \hat{U}.$$



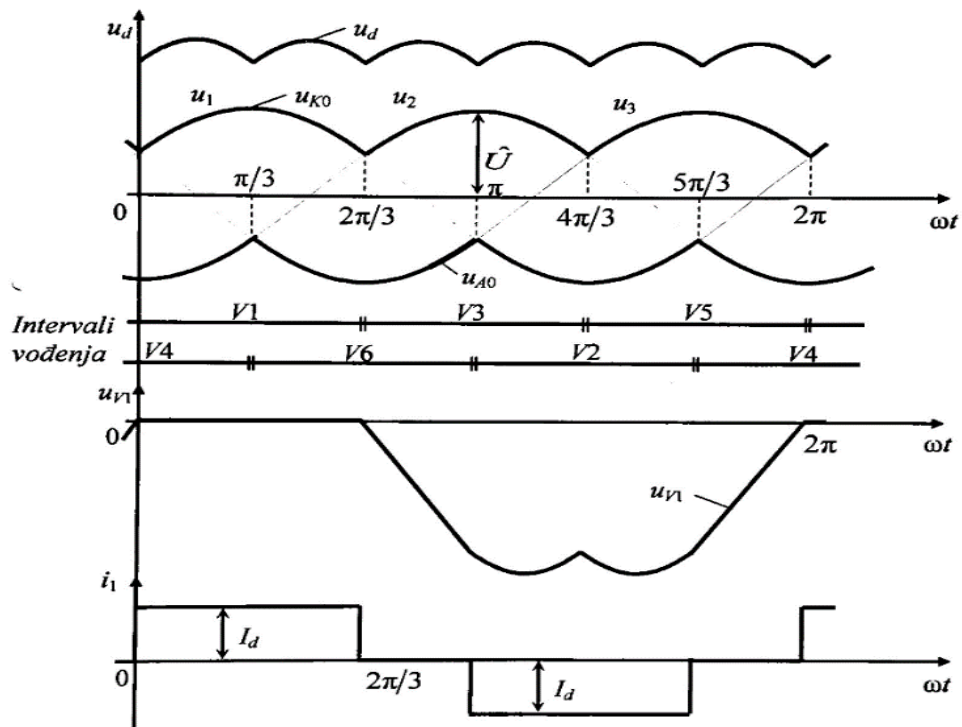
SI. 2.1. Nadomjesna shema spoja induktivno opterećenog neupravljivog trofaznog mosnog spoja

Fazne struje dobiju se pisanjem KZS-a za čvorove 1, 2, 3:

$$i_1 = i_{V1} - i_{V2},$$

$$i_2 = i_{V3} - i_{V4},$$

$$i_3 = i_{V5} - i_{V6}.$$



Sl. 2.2. Karakteristični valni oblici induktivno opterećenog neupravljivog trofaznog mosnog spoja

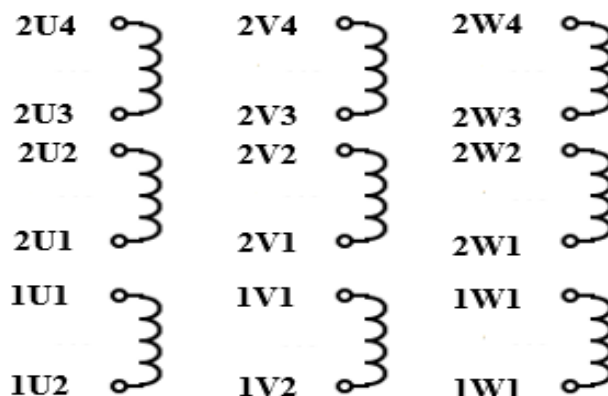
### 3. ISPRAVLJAČKI TRANSFORMATOR

Napajanje koje trofazni neupravljivi mosni spoj zahtijeva jest trofazni simetrični izvor napajanja. Postoje dva načina napajanja ovog ispravljača, a to je spajanjem direktno na pojnu mrežu ili preko posebnog transformatora, tzv. ispravljačkog transformatora. U ovom završnom radu se detaljnije promatra uloga ispravljačkog transformatora u procesu pretvorbe izmjeničnog napajanja u istosmjerno. Najprije se promatra koje karakteristike ispravljački transformator ima te teorijski razmatra njihov utjecaj na proces pretvorbe snage na frekvenciji.

#### 3.1. Grupa spoja transformatora

Ispravljački transformator ima primarne namote koji su spojeni na pojnu mrežu te se nazivaju mrežnim namotima. Sekundarni namoti ovog transformatora predstavljaju napajanje trofaznog neupravljivog mosnog spoja i oni su nazvani ventilskim namotima.

Namoti transformatora se označavaju slovima U, V i W za tri različite faze napona međusobno pomaknute za  $120^\circ$ . Ispred ovih oznaka za mrežne namote se dodaje 1, a za ventilske namote 2. Tako se naznačuje nalazi li se priključnica na primarnoj ili sekundarnoj strani transformatora. Bitno je još označiti je li određena priključnica transformatora početak ili kraj namota jedne faze. Stoga se iza oznake faze, U, V ili W, dodaje 1, za početak namota ili 2, za kraj namota. Sekundarni namoti transformatora koji će biti korišten u pokusima ovog rada su razdvojeni u dva dijela kako bi se mogao izvesti spoj cik-cak. U tom slučaju je bitno označiti svaku od priključnica na sekundarnoj strani. Tako oznake priključnica ovog transformatora izgledaju kao što je prikazano na slici 3.1.



Sl. 3.1. Oznake priključnica transformatora na eksperimentalnoj pločici



Kao i svaki trofazni sustav napajanja i namoti ispravljačkog transformatora mogu biti spojeni na različite načine, a to su spoj zvijezda, spoj trokut i spoj cik-cak, poznat i kao razlomljena zvijezda.

Spoj zvijezda predstavlja takav spoj namota da su početne ili krajnje priključnice sve tri faze međusobno spojene. Pri ovom spoju je linijski napon  $U_L \sqrt{3}$  puta veći od faznog napona  $U_F$ .

U spoju trokut je početak namota jedne faze spojen s krajem namota druge faze i tako i za preostale dvije faze. Pri ovom spoju je linijska struja  $I_L \sqrt{3}$  puta veća od fazne struje  $I_F$ .

Cik-cak spoj namota transformatora podrazumijeva da je polovica jedne faze smještena na jednom stupu transformatora i povezana je s polovicom druge faze smještene na drugom stupu. Napon pojedine faze predstavlja geometrijsku razliku dvaju napona pomaknutih za  $120^\circ$ . Ako se uspoređuje iznos napona  $U_y$  u spoju zvijezda s naponom  $U_z$  u spoju cik-cak se dolazi do zaključka da je  $U_z$  za  $\sqrt{3}/2$  manji od  $U_y$ . To bi značilo da se, ukoliko se želi postići napon koji odgovara onom u spoju zvijezda, moraju koristiti namoti s  $2/\sqrt{3}$  više navoja zbog čega je ovakav spoj skuplji. Cik-cak spoj se najčešće koristi pri nižim naponima i to tamo gdje se očekuje nesimetrično opterećenje.

Oznake za ove spojeve su Y (zvijezda), D (trokut) i Z (cik-cak) ukoliko su to primarni namoti ili y (zvijezda), d (trokut) i z (cik-cak) za sekundarne namote.

Kada su definirana ova tri različita načina spajanja namota bitno je naglasiti da primarni i sekundarni namoti ne moraju biti spojeni na isti način, nego se mogu kombinirati. Tako za ova tri spoja postoji devet različitih kombinacija spajanja primarnih i sekundarnih namota, a to su: Yy, Yd, Yz, Dy, Dd, Dz, Zy, Zd, Zz. Neke od ovih kombinacija se često koriste u praksi, a neke gotovo nikako, recimo gdje je primar transformatora u cik-cak spoju.

Da bi se transformator potpuno definirao uz vrstu spoja mora se označiti i tzv. satni broj [8]. Satni broj je cijeli broj 0 do 11 koji označava za koliko je fazor napona jedne faze sekundara fazno pomaknut u odnosu na fazor napona te iste faze primara. Satni broj dobivamo tako da se taj fazni kut podijeli s  $30^\circ$ . Tako bi satni broj za fazni kut zaostajanja od  $150^\circ$  iznosio 5.

Ako je izvedena nulta točka dopisuje se i njena oznaka. Ukoliko je ona izvedena na primarnoj strani dopisuje se N, odnosno n, ukoliko je izvedena na sekundarnoj strani.

Pretpostavlja se da je primarna strana nekog transformatora spojena u zvijezdu s izvedenom nultom točkom. Njegova sekundarna strana je u spoju trokut te fazori napona sekundara zaostaju

za  $240^\circ$  za odgovarajućim fazorima napona primara. Tada je oznaka ovog transformatora YNd8. Ova oznaka označava grupu spoja transformatora s upravo ovakvim karakteristikama.

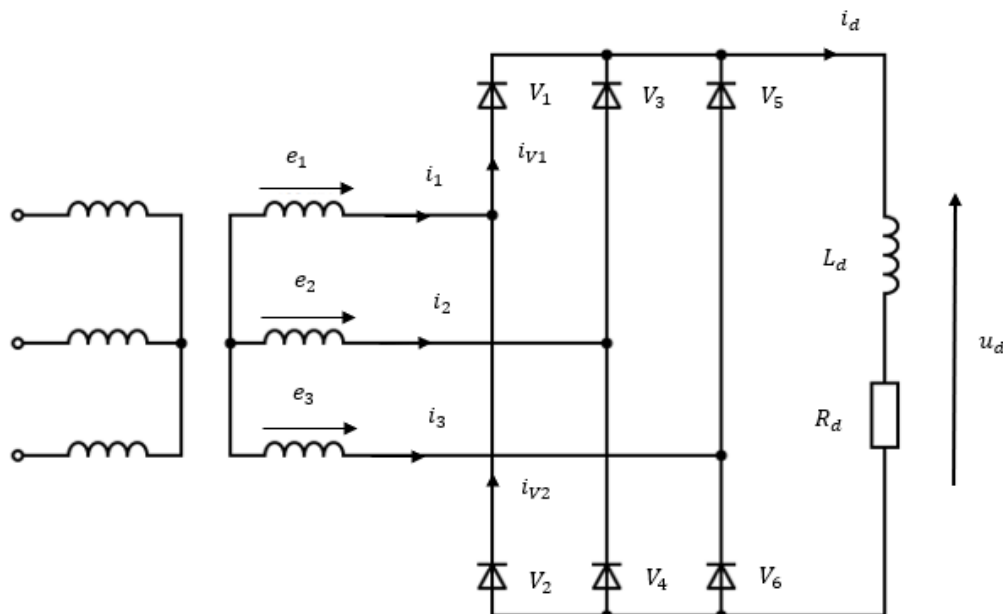
### 3.2. Analiza utjecaja različite grupe spojeva ispravljačkog transformatora na trofazni neupravljivi mosni spoj

Kako bi se najlakše shvatio utjecaj grupe spoja ispravljačkog transformatora, posebno se promatra utjecaj različite vrste spoja te utjecaj različitih satnih brojeva.

S obzirom da sekundarni, odnosno, ventilski namoti transformatora predstavljaju napajanje mosnog spoja, pri promatranju utjecaja ispravljačkog transformatora je naglasak na različitim spojevima upravo tih namota. Tako će u svim pokusima primarni, odnosno mrežni namoti biti spojeni u zvijezdu, a mijenja se konfiguraciju ventilskih namota. Pri pokusima različitih spojeva se uspoređuju valni oblici te harmonijska analiza izmjeničnih priključaka ispravljača Yy0 i Yd0 grupe spoja, a pri pokusima različitih satnih brojeva se promatraju Yy0, Yy6 te Yy10 grupe spoja.

#### 3.2.1. Yy0 grupa spoja ispravljačkog transformatora

Shema spoja prikazana je na slici 3.2..



Sl. 3.2. Shema spoja ispravljača spojenog na pojnu mrežu preko transformatora Yy0 grupe spoja

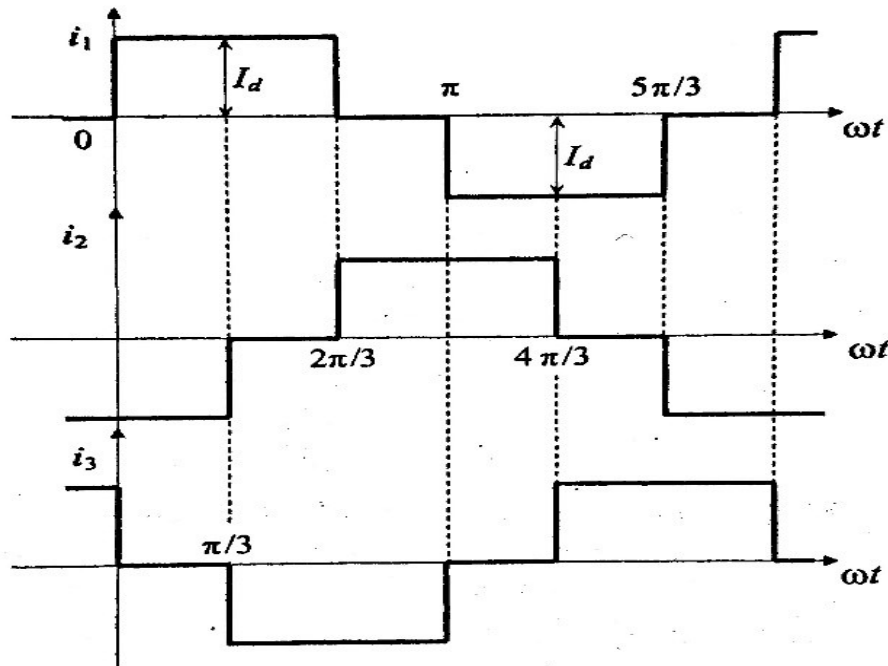
Pomoću KZS-a se dolazi do izraza:

$$i_1 = -(i_2 + i_3)$$

$$i_2 = -(i_3 + i_1)$$

$$i_3 = -(i_1 + i_2).$$

Daljom se analizom dobivaju valni oblici struja triju faza ventilskog namota prikazane na Sl. 3.3., gdje je  $I_d$  iznos glatke struje istosmjernog trošila. [1]



Sl. 3.3. Karakteristični valni oblici struja zvijezda spoja [1]

### 3.2.2. Yd0 grupa ispravljačkog transformatora

Shema spoja prikazana je na slici 3.4..

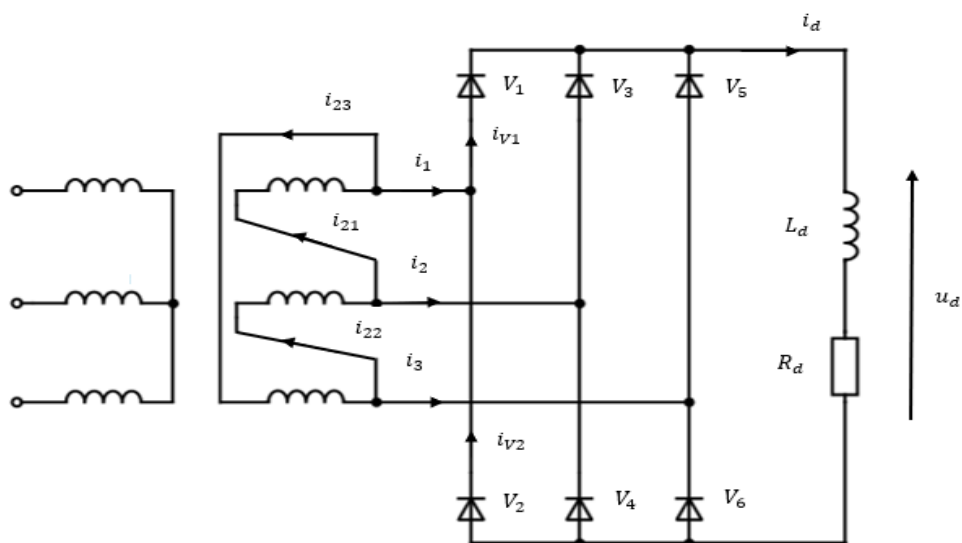
Iz KZS-a proizlaze izrazi:

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

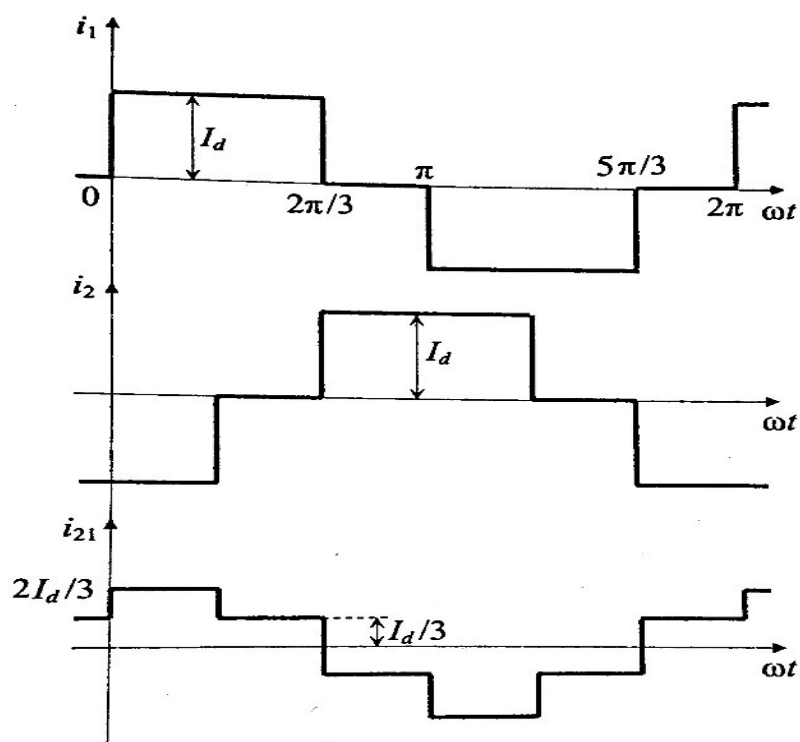
$$i_{22} = \frac{1}{3}(i_2 - i_3),$$

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

Daljom analizom dobiveni su valni oblici struja dvaju izmjeničnih dovoda mosnog spoja te valni oblik struje namota. Ovi valni oblici prikazani su na Sl. 3.5. [1]



Sl. 3.4. Shema spoja ispravljača spojenog na pojnu mrežu preko transformatora Yd0 grupe spoja



Sl. 3.5. Karakteristični valni oblici struja trokut spoja [1]

### **3.2.3. Yy0, Yy6 i Yy10 grupe spojeva ispravljačkog transformatora**

Slučaj različitih satnih brojeva je nešto jednostavniji od slučaja različitih spojeva ispravljačkog transformatora. Kao što je već navedeno, napajanje ovog ispravljača predstavljaju sekundarni, odnosno, ventilski namoti ispravljačkog transformatora. Ono što se postiže mijenjanjem satnog broja transformatora jest pomicanje fazora sekundarnih faznih napona za određeni fazni kut u odnosu na fazore odgovarajućih primarnih napona. Međutim, to ne utječe na karakteristične valne oblike ovog ispravljača jer on u svakom slučaju, za bilo koji satni broj transformatora, gledajući ovaj spoj s ventilske strane ima trofazno simetrično napajanje, odnosno napone iste vrijednosti međusobno fazno pomaknute za  $120^\circ$ . Iz toga se zaključuje da promjena satnog broja ne utječe na rad trofaznog neupravljivog mosnog spoja.

## 4. RAD U LABORATORIJU

Koristeći didaktičko multimedijalnu opremu Lucas Nülle potrebno je snimiti karakteristične valne oblike napona i struja trofaznog induktivno opterećenog neupravljivog mosnog spoja spojenog na pojnu mrežu preko trofaznog transformatora. Također, provodi se i harmonijska analiza struje izmjeničnih priključaka i kvantificiraju pokazatelji pretvorbe vezani za povratno djelovanje ispravljača i trošila na izmjeničnu pojnu mrežu. Prethodno poglavlje je bilo kratki teorijski osvrt na utjecaj različitih grupa spojeva ispravljačkog transformatora na rad trofaznog neupravljivog mosnog spoja. U ovom poglavlju se kroz pokuse ispituje ta teorijska analiza te uspoređuju dobiveni rezultati.

### 4.1. Mjerna oprema

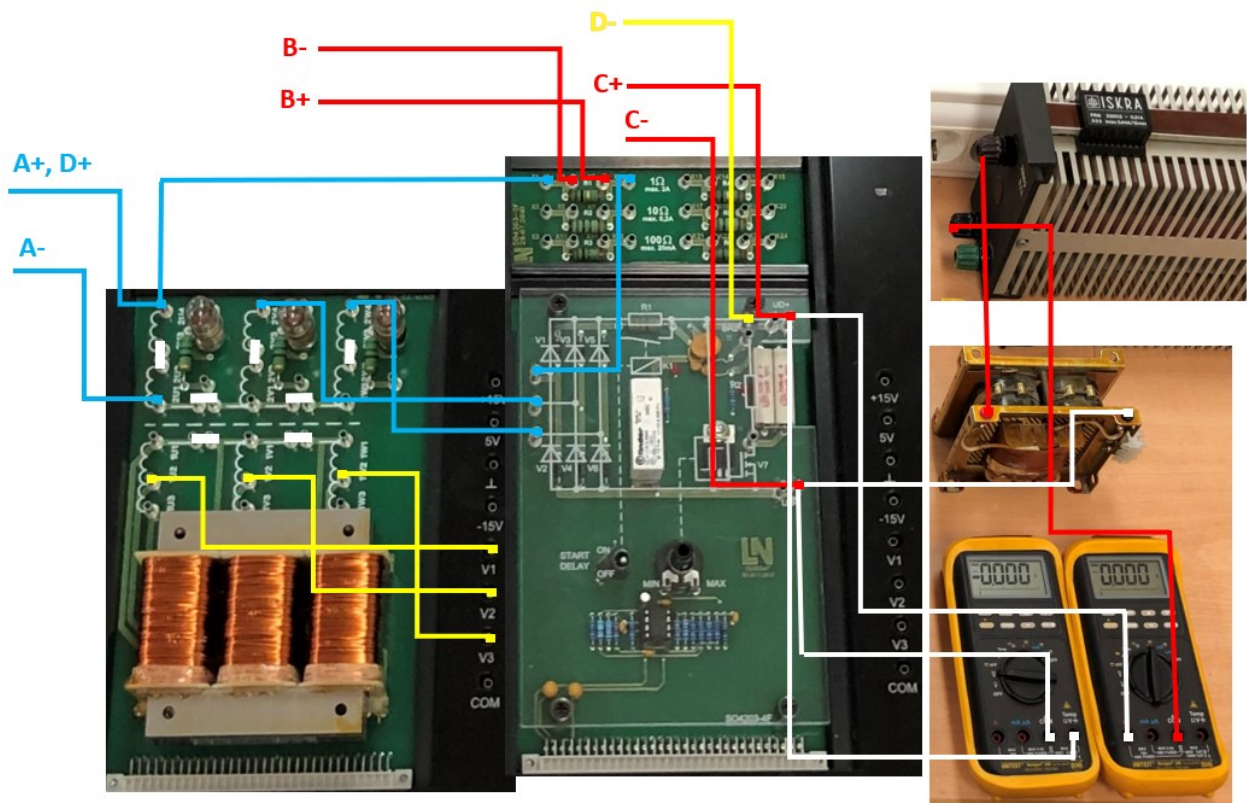
Mjerna oprema potrebna za ove pokuse [4]:

- CO4203-2A UniTrain-I sučelje s pripadajućim napajanjem,
- CO4203-2B dva eksperimentatora za povezivanje sučelja i eksperimentalne kartice,
- SO4204-7Y eksperimentalna kartica trofaznog transformatora,
- SO4203-4F eksperimentalna kartica neupravljivog ispravljača,
- prigušnica;  $L = 330mH$  ;  $R = 2\Omega$ ,
- žični otpornik, promjenjivi;  $R_{max} = 3300\Omega$  ;  $I_{max} = 0.44A$ ,
- SO4203-2F kartica sa šantovima
- dva multimetra za mjerenje napona i struje trošila,
- CO4203-2J pribor za spajanje,
- DS4203-2A računalni program Starter (LabSoft PlugIn)
- pojna izmjenična mreža 230V, 50Hz,
- računalo.

## 4.2. Spoj trofaznog neupravljivog mosnog spoja na pojnu mrežu preko transformatora različitih vrsta spojeva

### 4.2.1. Yy0 grupa spoja

Način prikaza spajanja mjernih točaka na eksperimentalnim pločicama s UniTrain-I-sučeljem kao i sa vanjskim trošilom prikazan je na 4.1. Zbog bolje preglednosti spajanje sučelja je izostavljeno sa slike, a pripadajuće oznake (oznake kanala od A do D) nalaze se na doctanim vodovima.



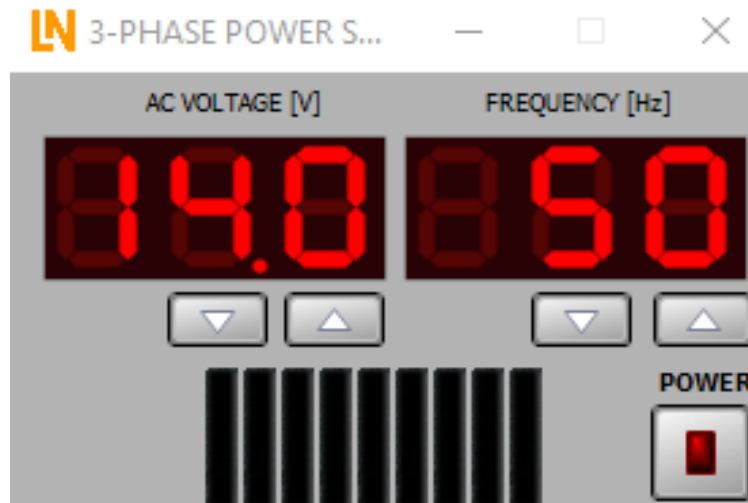
Sl. 4.1. Način spajanja trofaznog mosnog spoja na pojnu mrežu preko transformatora Yy0 grupe spoja

Snimanje valnih oblika na izmjeničnoj i istosmjernoj strani ispravljača

Redoslijed provedbe mjerenja:

1. Opremu spojiti prema slici 4.1.

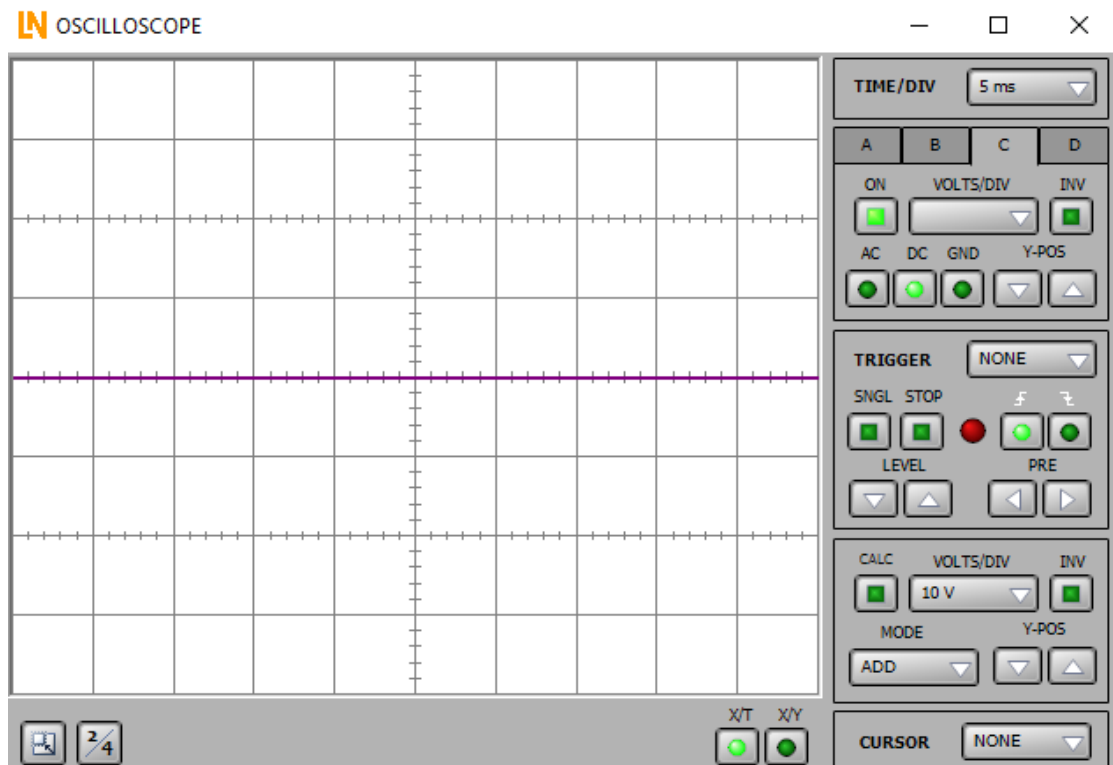
2. Na kartici ispravljača opciju *START DELAY* postaviti na *OFF*. Također, ukoliko je spojen shunt BR2 na kartici, odspojiti ga iz kruga.
3. Otvoriti programski paket *Starter (C:/ - Program Files (x86) – LN – PlugIns – Starter)*, kliknuti na ikonicu knjige te odabrati *SO4203-2A UniTrain (Basic Instruments)*.
4. Za napajanje kruga potreban je izmjenični izvor napajanja, pa u *Basic Instruments* kliknuti na *Power Supply – 3-Phase Supply*. Otvorit će se sučelje sa trofaznim izmjeničnim izvorom napajanja (sl.4.2.). Podesiti napon izvora na 14 V te frekvenciju izvora na 50 Hz.



Sl. 4.2. Prikaz sučelja virtualnog trofaznog izvora s podešenim parametrima

5. Žični otpornik (reostat) postaviti na maksimalnu vrijednost (najsigurnije izmjeriti vanjskim multimetrom/ommetrom).
6. Pokrenuti izvor napajanja klikom na *POWER*. Nakon uključanja izvora napajanja, smanjivati otpor promjenjivog otpornika do zadane radne točke – dok kroz trošilo ne poteče struja od 170 mA (kontrolirati vanjskim ampermetrom).
7. Prema shemi sa slike 4.1., na kanalu A snima se ulazni fazni napon, na kanalu B ulazna struja jedne faze, na kanalu C napon trošila i na kanalu D napon diode V1.
8. Za snimanje valnih oblika koristi se virtualni četverokanalni osciloskop (Sl.4.3). Sučelje virtualnog osciloskopa otvara se u *Basic Instruments–Measuring Devices–Oscilloscope*. Početno se otvara dvokanalni osciloskop pa je dodatna dva kanala potrebno aktivirati. Podesiti vremenski podiok (*TIME/DIV*) na 5ms. Uključiti opciju *TRIGGER* te ga podesiti na kanal A (*CHN A*).

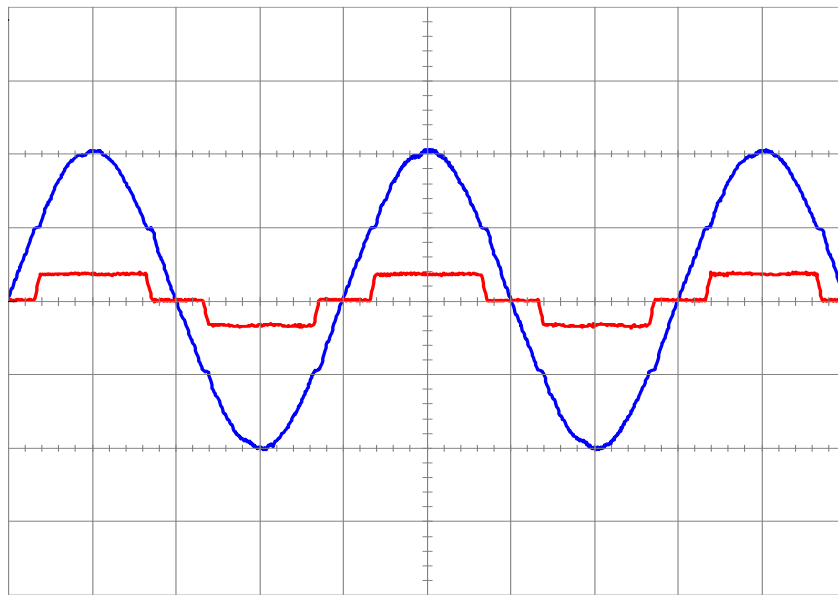




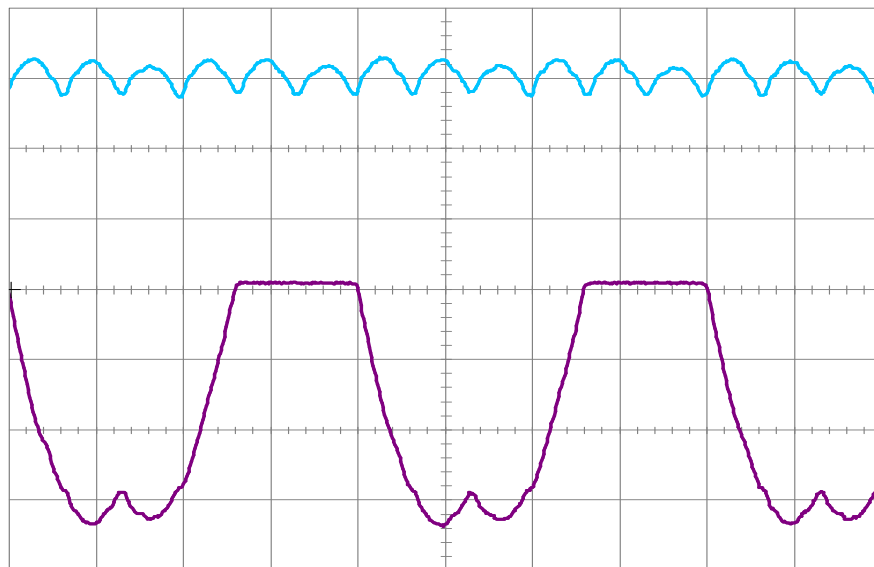
SI. 4.3. Prikaz sučelja virtualnog četverokanalnog osciloskopa

9. Aktivirati kanal A (plavi) i kanal B (crveni) za snimanje napona i struje izvora. Y-os kanala A podesiti na  $5V/DIV$  a kanala B na  $500mV/DIV$ . Uključiti izvor napajanja klikom na *POWER*. Zaustaviti snimanje osciloskopa klikom na *STOP*. Snimanje osciloskopom ponovno se pokreće deaktivacijom gumba *STOP*. Spremiti snimljeni valni oblik. Za spremanje valnog oblika kliknuti drugom tipkom miša na zaslon virtualnog osciloskopa te odabrati *copy*. Otvoriti program za uređenje teksta (Microsoft Word) te zalijepiti kopiranu sliku klikom druge tipke miša na prazan dokument i odabirom opcije *paste*.
10. Za snimanje valnih oblika napona trošila i diode V1, deaktivirati kanale A i B, te aktivirati kanale C (svjetloplavi) i D (ljubičasti) virtualnog osciloskopa. Podesiti y-os oba kanala na  $10V/DIV$  te x-os na 5ms. Obaviti snimanje i spremanje valnih oblika na prethodno opisani način (točka 9.).
11. Isključiti izvor napajanja klikom na *POWER*.

Rezultati mjerenja:



Sl. 4.4. Valni oblik napona (plavo) i struje (crveno) izmjeničnih priključnica ispravljачa

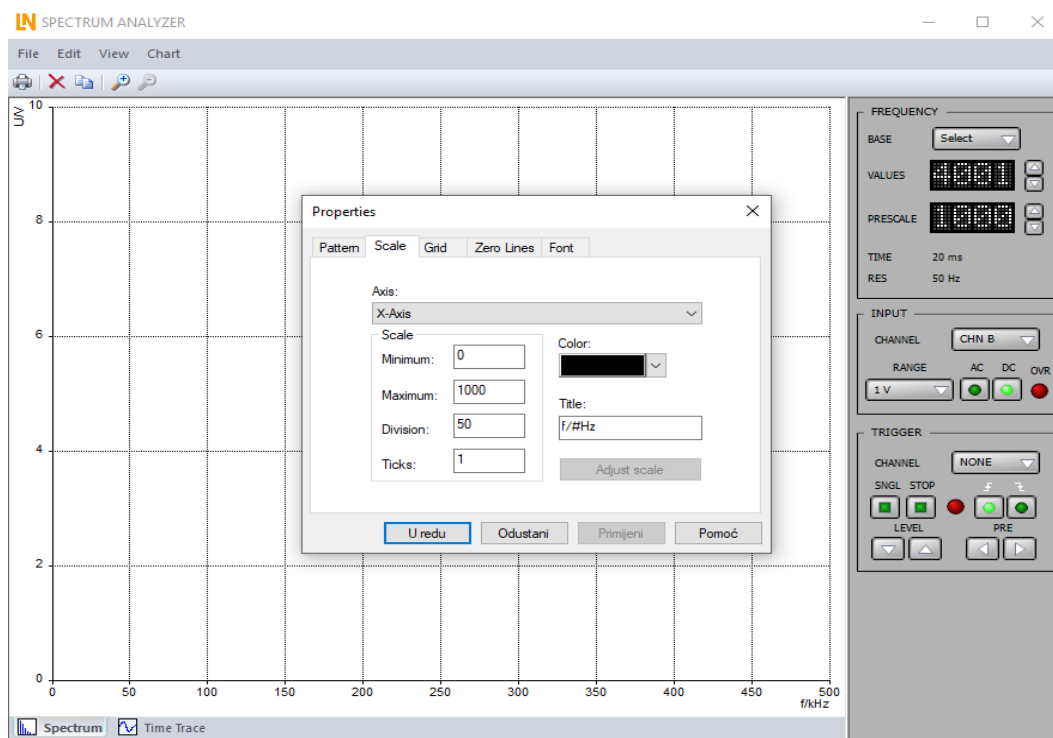


Sl. 4.5. Valni oblik napona trošila (svjetloplavo) i napona diode V1 (ljubičasto)

## Harmonijska analiza struje izmjeničnih priključaka ispravljača

Redoslijed provedbe mjerenja:

1. Opremu ostaje spojena prema slici 4.1.
2. Izvor napajanja ostaje isti kao i u prošleme pokusu snimanja valnih oblika (*Power Supply – 3-Phase Supply*), s istim podešenjima, a harmonijska analiza provodi se pomoću spektralnog analizatora koji se također nalazi u programskome paketu *Starter* (*C:/ - Program Files (x86) – LN – PlugIns – Starter*). Klikom na ikonicu knjige i odabirom *SO4203-2A UniTrain (Basic Instruments)* otvara se izbornik na kojemu je moguće odabrati spektralni analizator klikom na *Spectrum Analyzer*. Sučelje spektralnog analizatora nalazi se na slici 4.6.. Podesiti spektralni analizator prema slici 4.6.. Nadalje, dvoklikom na pozadinu spektralnog analizatora otvoriti podešenja x i y osi (*Properties – Scale*). X-os podesiti na mjerenja od 0 do 1000 Hz, s međupodjelom od 50 Hz. Y-os podesiti na mjerenje od 0 do 0,25 V s međupodjelom od 0,01 V. Kliknuti OK.

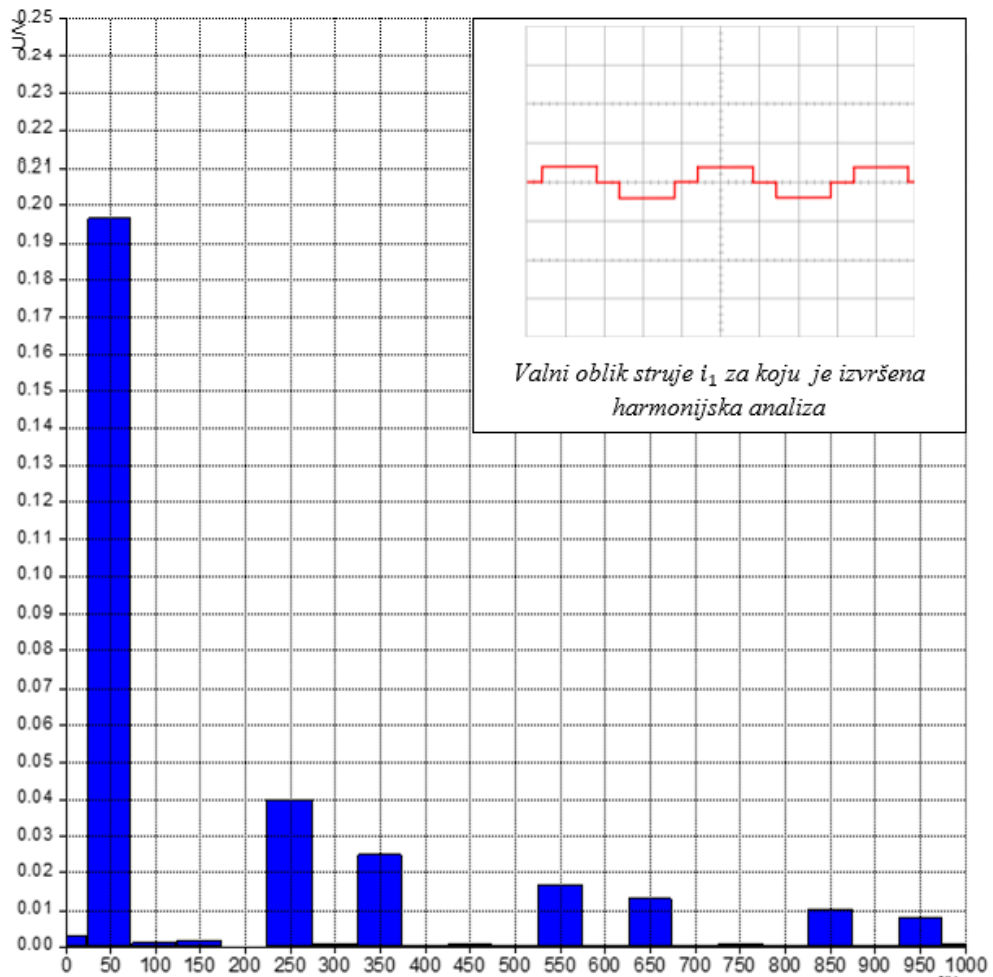


Sl. 4.6. Prikaz sučelja virtualnog harmonijskog analizatora

3. Mjerenja započeti uključivanjem izvora napajanja klikom na *POWER*. Za zaustavljanje mjerenja kliknuti ponovno na *POWER* izvora napajanja.

4. Valni analizator će napraviti harmonijsku analizu fazne struje izmjenične pojne mreže. Spremiti sliku harmonijske analize kako je opisano u točki 9. prošlog pokusa.
5. Isključiti valni analizator i izvor napajanja.

Rezultati mjerenja:



Sl. 4.7. Harmonijska analiza struje izmjeničnih priključnica ispravljača

Harmonijska analiza struje se provodi kako bi se promotrio povratni utjecaj ispravljača na pojnu mrežu, odnosno, na više harmonike mrežnih namota ispravljačkog transformatora u ovom slučaju. Karakteristična veličina koja opisuje baš to jest ukupna harmonijska distorzija struje ili THDI. Izraz za računanje THDI glasi:

$$THDI = \frac{\sqrt{\sum_{n>1}^{n=19} I(n)^2}}{I(1)}, \quad (4-1)$$

gdje je  $I(n)$  efektivna vrijednost  $n$ -tog harmonika struje, a  $I(1)$  efektivna vrijednost osnovnog harmonika struje. Ove se vrijednosti očitavaju iz harmonijske analize. Referentna vrijednost faktora THDI jednaka je nuli, što bi značilo da je struja monoharmonijska.

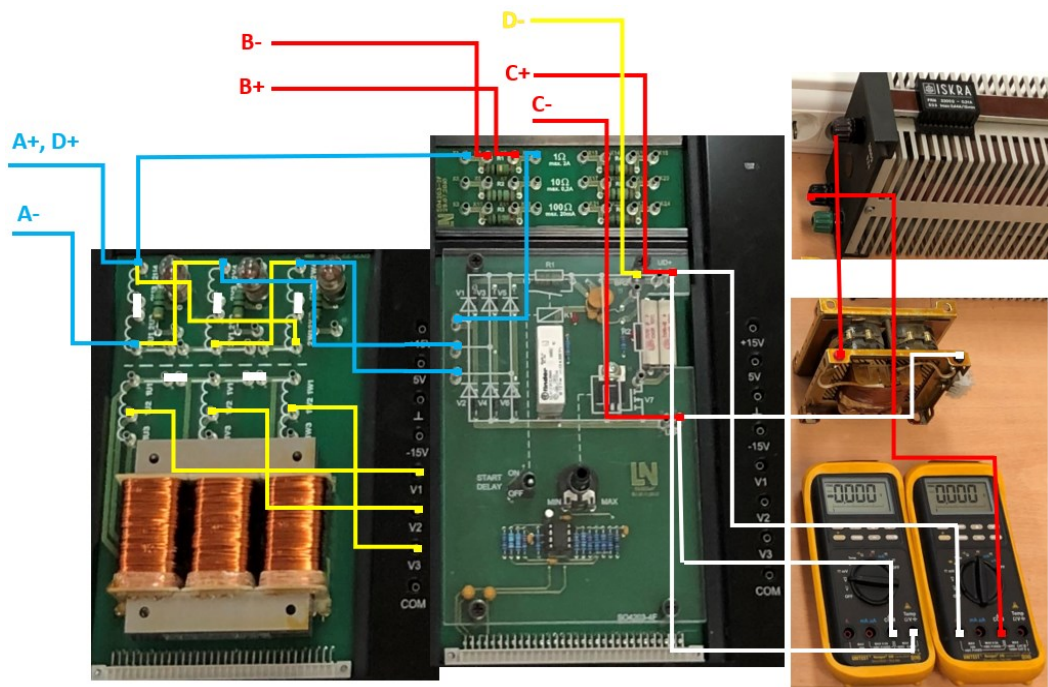
**Tab. 4.1.** Efektivne vrijednosti  $n$ -tih harmonika očitane iz harmonijskog analizatora

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$I(n)$ , [mA]	3	197	1	2	0	40	1	25	1	1	1	18	1	13

U harmonijskom rastavu povratne struje prikazanom na slici 4.7. se vidi kako su izraženi neparni harmonici struje od kojih je dominantan 5-ti harmonik koji iznosi 20,3% osnovnog harmonika. Koristeći se izrazom (4-1), izračunava se vrijednost THDI-a, te se dobije da je  $THDI = 0,524$ , ili izraženo u postocima,  $THDI = 54,2\%$ . Iz ovoga slijedi da je povratna struja višeharmonijska s značajnim utjecajem na pojnu mrežu u smislu injektiranja viših harmonika.

#### 4.2.2. Yd0 grupa spoja

Način prikaza spajanja mjernih točaka na eksperimentalnim pločicama s UniTrain-I-sučeljem kao i sa vanjskim trošilom prikazan je na slici 4.8..



**Sl. 4.8.** Način spajanja trofaznog mosnog spoja na pojnu mrežu preko transformatora Yd0 grupe spoja

## Snimanje valnih oblika na izmjeničnoj i istosmjernoj strani ispravljača

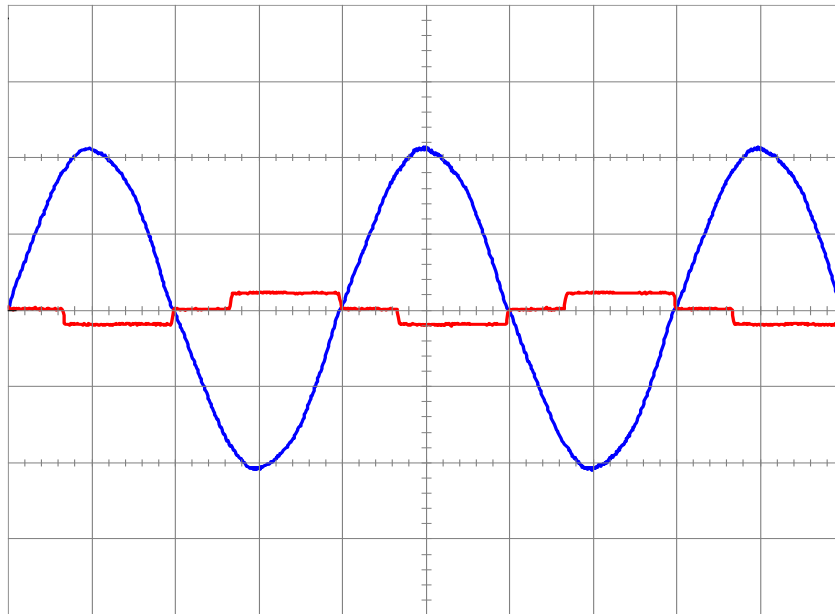
Redosljed provedbe mjerenja:

1. Opremu spojiti prema slici 4.8..
2. Na kartici ispravljača opciju *START DELAY* postaviti na *OFF*. Također, ukoliko je spojen shunt BR2 na kartici, odspojiti ga iz kruga.
3. Otvoriti programski paket *Starter (C:/ - Program Files (x86) – LN – PlugIns – Starter)*, kliknuti na ikonicu knjige te odabrati *SO4203-2A UniTrain (Basic Instruments)*.
4. Za napajanje kruga potreban je izmjenični izvor napajanja, pa u *Basic Instruments* kliknuti na *Power Supply – 3-Phase Supply*. Otvorit će se sučelje sa trofaznim izmjeničnim izvorom napajanja (Sl 4.2.). Podesiti napon izvora na 14 V te frekvenciju izvora na 50 Hz.
5. Žični otpornik (reostat) postaviti na maksimalnu vrijednost (najsigurnije izmjeriti vanjskim multimetrom/ommetrom).
6. Pokrenuti izvor napajanja klikom na *POWER*. Nakon uključenja izvora napajanja, smanjivati otpor promjenjivog otpornika do zadane radne točke – dok kroz trošilo ne poteče struja od 170mA (kontrolirati vanjskim ampermetrom).
7. Prema shemi sa slike 4.8., na kanalu A snima se ulazni fazni napon, na kanalu B ulazna struja jedne faze, na kanalu C napon trošila i na kanalu D napon diode V1.
8. Za snimanje valnih oblika koristi se virtualni četverokanalni osciloskop (Sl.4.3). Sučelje virtualnog osciloskopa otvara se u *Basic Instruments–Measuring Devices–Oscilloscope*. Početno se otvara dvokanalni osciloskop pa je dodatna dva kanala potrebno aktivirati. Podesiti vremenski podiok (*TIME/DIV*) na 5ms. Uključiti opciju *TRIGGER* te ga podesiti na kanal A (*CHN A*).
9. Aktivirati kanal A (plavi) i kanal B (crveni) za snimanje napona i struje izvora. Y-os kanala A podesiti na *5V/DIV* a kanala B na *500mV/DIV*. Uključiti izvor napajanja klikom na *POWER*. Zaustaviti snimanje osciloskopa klikom na *STOP*. Snimanje osciloskopom ponovno se pokreće deaktivacijom gumba *STOP*. Spremiti snimljeni valni oblik. Za spremanje valnog oblika kliknuti drugom tipkom miša na zaslon virtualnog osciloskopa te odabrati *copy*. Otvoriti program za uređenje teksta (Microsoft Word) te zalijepiti kopiranu sliku klikom druge tipke miša na prazan dokument i odabirom opcije *paste*. Spoj zatim konfigurirati kako bismo kanalom B mogli izmjeriti valni oblik struje druge faze izmjeničnih priključnica mosnog spoja. Na već opisani način spremiti snimljeni valni oblik.

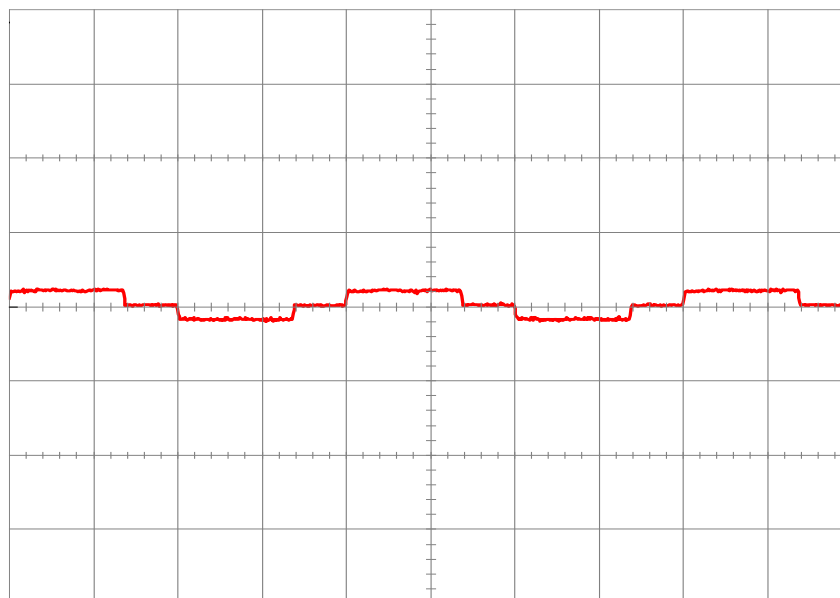
10. Za snimanje valnih oblika napona trošila i diode V1, deaktivirati kanale A i B, te aktivirati kanale C (svjetlo plavi) i D (ljubičasti) virtualnog osciloskopa. Podesiti y-os oba kanala na  $10V/DIV$  te x-os na 5ms. Obaviti snimanje i spremanje valnih oblika na prethodno opisani način (točka 9.).

11. Isključiti izvor napajanja klikom na *POWER*.

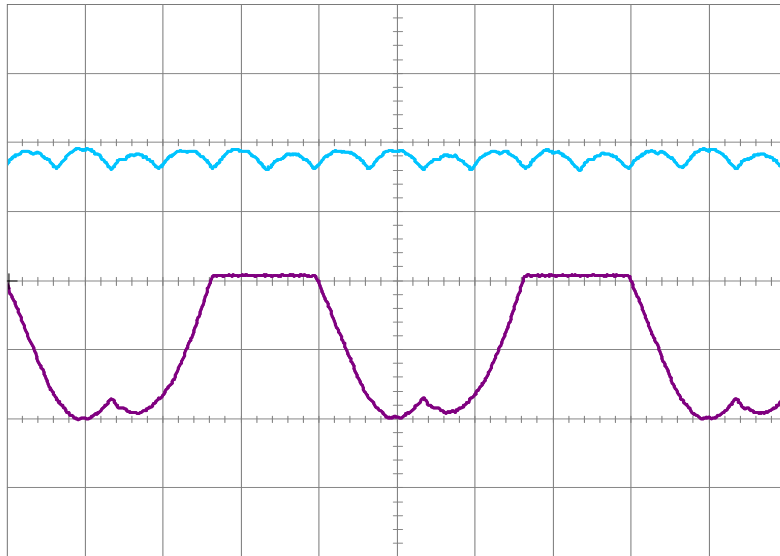
Rezultati mjerenja:



**Sl. 4.9.** Valni oblik napona (plavo) i struje (crveno) prve faze izmjeničnih priključnica ispravljača



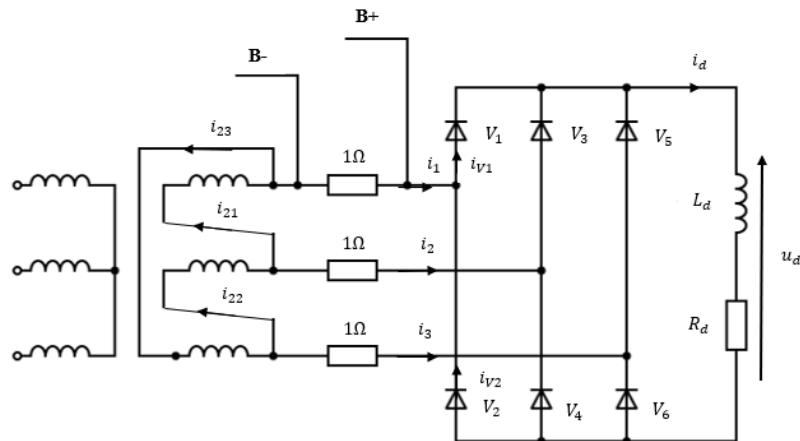
**Sl. 4.10.** Valni oblik struje druge faze izmjeničnih priključaka ispravljača



Sl. 4.11. Valni oblik napona trošila (svjetloplavo) i napona diode V1 (ljubičasto)

#### Harmonijska analiza struje izmjeničnih priključaka ispravljača

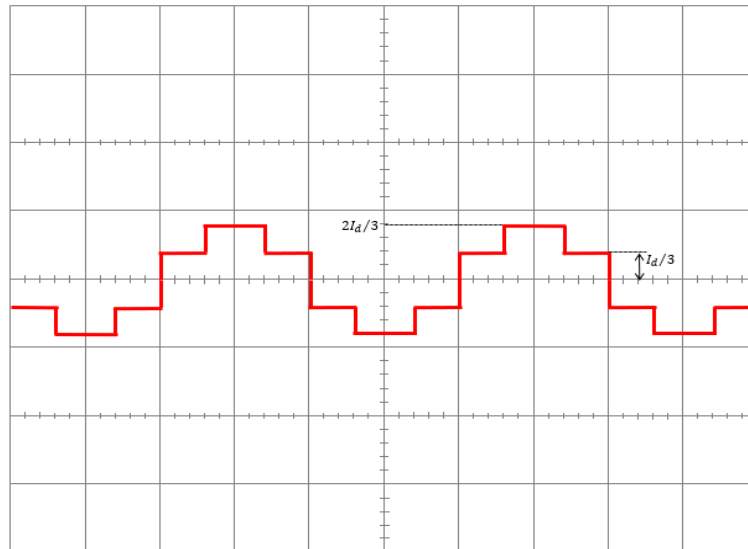
U ovom pokusu se ne koristi *Spectrum Analyzer*, s obzirom da je potrebno izvršiti harmonijsku analizu struje  $i_{21}$ , a ne postoji način da joj se fizički pristupi na eksperimentalnoj pločici trofaznog transformatora što vidimo na slici 4.12.



Sl. 4.12. Shema spoja na kojem se mjeri struja prve faze ventilskih namota (analogno za struju druge faze)

Iz tog razloga se pri pokusu snimanja karakterističnih valnih oblika snima i struja druge faze ventilskih namota, kako bi se grafo-analitičkom metodom mogla dobiti struja  $i_{21}$ . Iz izraza (3-1) se vidi da je ona jednaka jednoj trećini razlike struja  $i_1$  i  $i_2$ . Iz ovog izraza i snimljenih valnih oblika struja  $i_1$  i  $i_2$  sa slika 4.9. i 4.10. proizlazi valni oblik struje  $i_{21}$  prikazan na slici 4.13.





Sl. 4.13. Karakteristični valni oblik struje  $i_{21}$

Iz valnog oblika struje  $i_{21}$  zaključuje se da je ona višerazinska u odnosu na struju  $i_1$  grupe spoja Yy0. Iz toga slijedi pretpostavka da je THDI struje  $i_{21}$  manji od THDI-a struje  $i_1$ . U ovom pokusu se THDI računa prema izrazu (4-2) [1].

$$THDI = \sqrt{\frac{I_{21}^2}{I_{21}^2(1)} - 1}, \quad (4-2)$$

gdje je  $I_{21}$  efektivna vrijednost struje, a  $I_{21}(1)$  efektivna vrijednost osnovnog harmonika struje. Efektivna vrijednost se dobije izrazom (4-3), a efektivna vrijednost osnovnog harmonika se računa prema izrazu (4-4) [1].

$$I_{21} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_{21})^2 dt} = \frac{\sqrt{2}}{3} I_d \quad (4-3)$$

$$I_{21}(1) = \frac{I_d \sqrt{2}}{\pi} \quad (4-4)$$

Uvrštavanjem izraza (4-3) i (4-4) u izraz za THDI, dobije se sljedeće:

$$THDI = \sqrt{\frac{\left(\frac{\sqrt{2}}{3} I_d\right)^2}{\left(\frac{\sqrt{2}}{\pi} I_d\right)^2} - 1} = \sqrt{\frac{\pi^2}{9} - 1} = 0,31$$

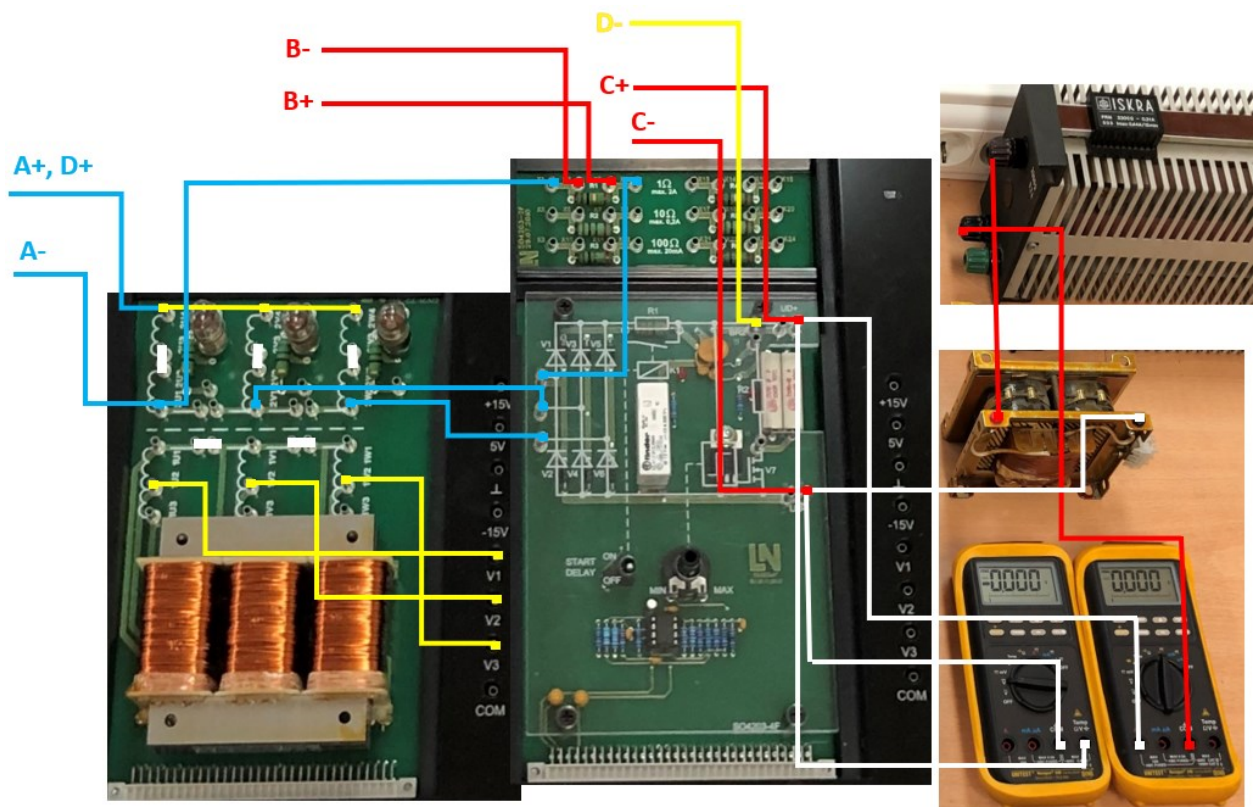
Iz iznosa THDI-a se zaključuje da je struja  $i_{21}$ , kao i struje  $i_{22}$  i  $i_{23}$  višeharmonijska. Također se potvrđuje pretpostavka kako je THDI struje  $i_{21}$  manji u odnosu na THDI struje  $i_1$  grupe spoja Yy0.

### 4.3. Spoj trofaznog neupravljivog mosnog spoja na pojnu mrežu preko transformatora različitih satnih brojeva

#### 4.3.1. Yy0 grupa spoja

Za ovu grupu spoja nije potrebno ponovno izvoditi pokuse je su svi potrebni valni oblici snimljeni u 4.2.2. odjeljku rada.

#### 4.3.2. Yy6 grupa spoja



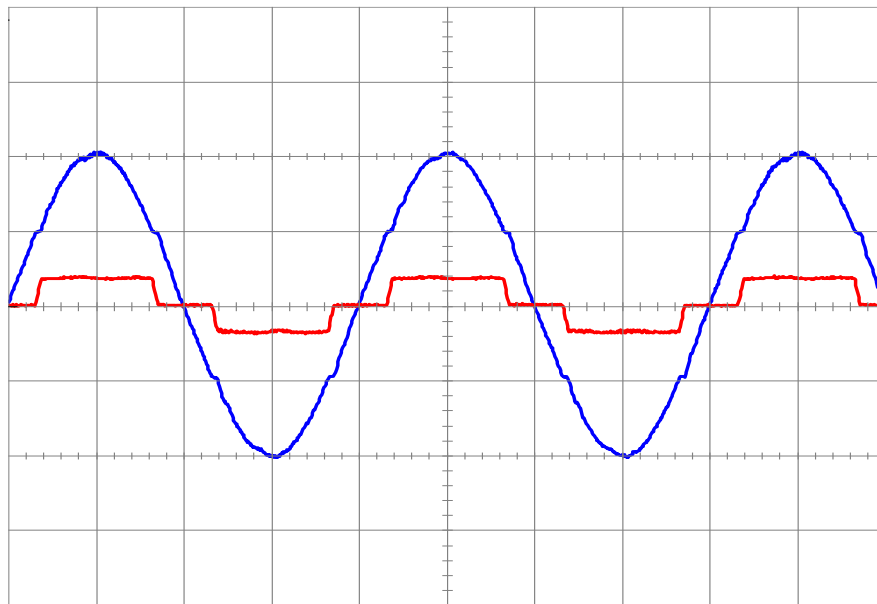
Sl. 4.14. Način spajanja trofaznog mosnog spoja na pojnu mrežu preko transformatora Yy6 grupe spoja

Redoslijed provedbe mjerenja:

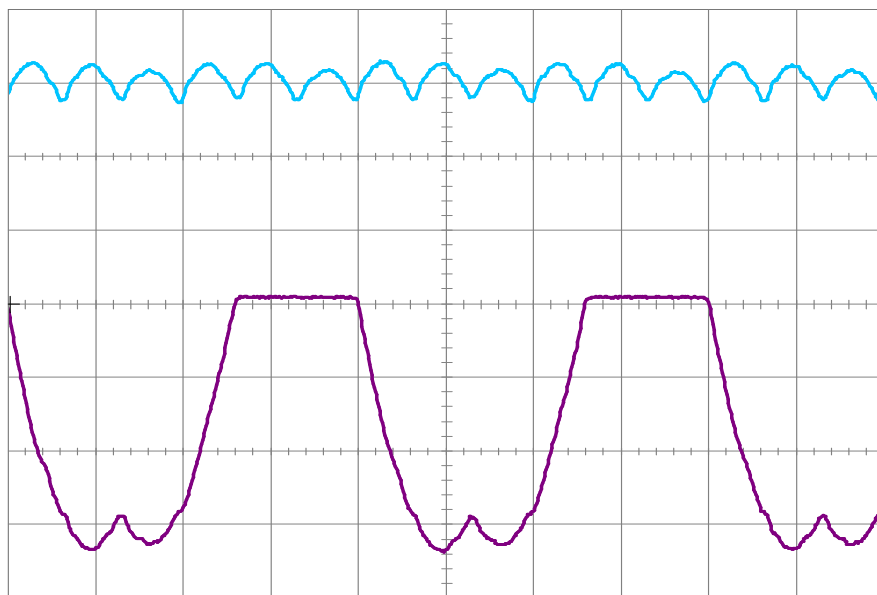
1. Opremu spojiti prema slici 4.14.
2. Na kartici ispravljača opciju *START DELAY* postaviti na *OFF*. Također, ukoliko je spojen shunt BR2 na kartici, odspojiti ga iz kruga.
3. Otvoriti programski paket *Starter (C:/ - Program Files (x86) – LN – PlugIns – Starter)*, kliknuti na ikonicu knjige te odabrati *SO4203-2A UniTrain (Basic Instruments)*.

4. Za napajanje kruga potreban je izmjenični izvor napajanja, pa u Basic Instruments kliknuti na *Power Supply – 3-Phase Supply*. Otvorit će se sučelje sa trofaznim izmjeničnim izvorom napajanja (Sl. 4.2.). Podesiti napon izvora na 14 V te frekvenciju izvora na 50 Hz.
5. Žični otpornik (reostat) postaviti na maksimalnu vrijednost (najsigurnije izmjeriti vanjskim multimetrom/ommetrom).
6. Pokrenuti izvor napajanja klikom na *POWER*. Nakon uključanja izvora napajanja, smanjivati otpor promjenjivog otpornika do zadane radne točke – dok kroz trošilo ne poteče struja od 170 mA (kontrolirati vanjskim ampermetrom).
7. Prema shemi sa 4.14., na kanalu A snima se ulazni fazni napon, na kanalu B ulazna struja jedne faze, na kanalu C napon trošila i na kanalu D napon diode V1.
8. Za snimanje valnih oblika koristi se virtualni četverokanalni osciloskop (Sl. 4.3.). Sučelje virtualnog osciloskopa otvara se u *Basic Instruments–Measuring Devices–Oscilloscope*. Početno se otvara dvokanalni osciloskop pa je dodatna dva kanala potrebno aktivirati (Sl. 4.3.). Podesiti vremenski podiok (*TIME/DIV*) na 5ms. Uključiti opciju *TRIGGER* te ga podesiti na kanal A (*CHN A*).
9. Aktivirati kanal A (plavi) i kanal B (crveni) za snimanje napona i struje izvora. Y-os kanala A podesiti na *5V/DIV* a kanala B na *500mV/DIV*. Uključiti izvor napajanja klikom na *POWER*. Zaustaviti snimanje osciloskopa klikom na *STOP*. Snimanje osciloskopom ponovno se pokreće deaktivacijom gumba *STOP*. Spremiti snimljeni valni oblik. Za spremanje valnog oblika kliknuti drugom tipkom miša na zaslon virtualnog osciloskopa te odabrati *copy*. Otvoriti program za uređenje teksta (*Microsoft Word*) te zalijepiti kopiranu sliku klikom druge tipke miša na prazan dokument i odabirom opcije *paste*.
10. Za snimanje valnih oblika napona trošila i diode V1, deaktivirati kanale A i B, te aktivirati kanale C (svjetlo plavi) i D (ljubičasti) virtualnog osciloskopa. Podesiti y-os oba kanala na *10V/DIV* te x-os na 5ms. Obaviti snimanje i spremanje valnih oblika na prethodno opisani način (točka 9.).
11. Isključiti izvor napajanja klikom na *POWER*.

Rezultati mjerenja:



**Sl. 4.15.** Napon (plavo) i struja (crveno) izmjeničnih priključnica ispravljača



**Sl. 4.16.** Napon trošila (svjetloplavo) i napon diode V1 (ljubičasto)

Harmonijska analiza struje izmjeničnih priključaka ispravljača

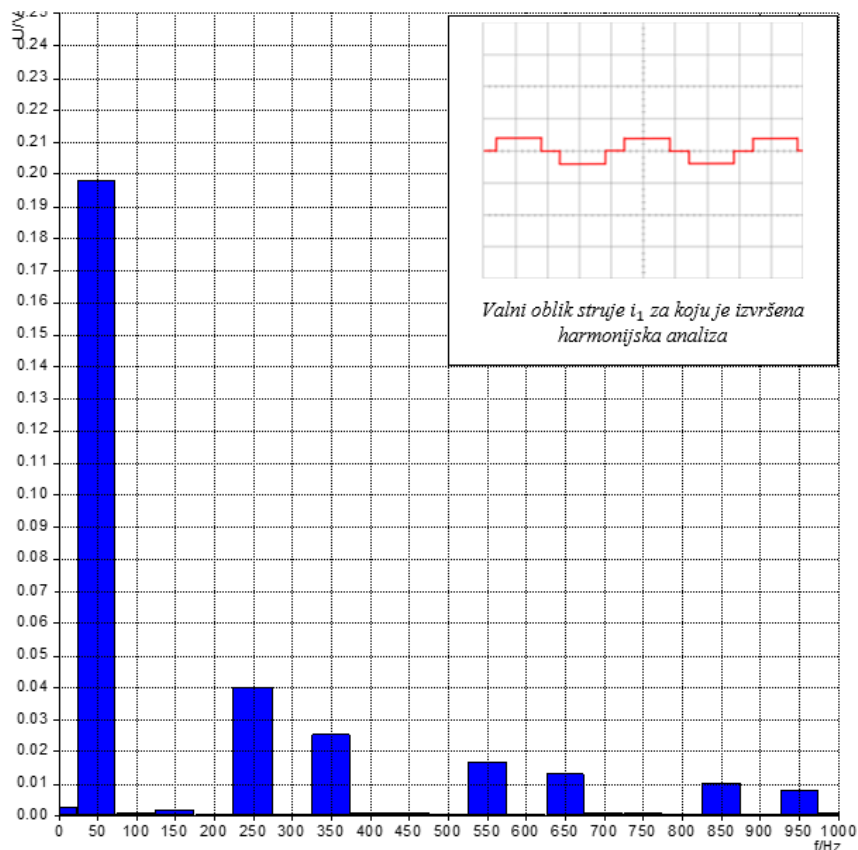
Redosljed provedbe mjerenja:

1. Opremu ostaje spojena prema slici 4.14.
2. Izvor napajanja ostaje isti kao i u prošlom pokusu snimanja valnih oblika (*Power Supply – 3-Phase Supply*), s istim podešenjima, a harmonijska analiza provodi se

pomoću spektralnog analizatora koji se također nalazi u programskome paketu *Starter* (*C:/ - Program Files (x86) – LN – PlugIns – Starter*). Klikom na ikonicu knjige i odabirom *SO4203-2A UniTrain (Basic Instruments)* otvara se izbornik na kojemu je moguće odabrati spektralni analizator klikom na *Spectrum Analyzer*. Sučelje spektralnog analizatora nalazi se na slici 4.6. Podesiti spektralni analizator prema slici 4.6. Nadalje, dvoklikom na pozadinu spektralnog analizatora otvoriti podešenja x i y osi (*Properties – Scale*). X-os podesiti na mjerenja od 0 do 1000 Hz, s međupodjelom od 50 Hz. Y-os podesiti na mjerenje od 0 do 0,25 V s međupodjelom od 0,01 V. Kliknuti OK.

3. Mjerenja započeti uključivanjem izvora napajanja klikom na *POWER*. Za zaustavljanje mjerenja kliknuti ponovno na *POWER* izvora napajanja.
4. Valni analizator će napraviti harmonijsku analizu fazne struje izmjenične pojne mreže. Spremiti sliku harmonijske analize kako je opisano u točki 9. prošlog pokusa.
5. Isključiti valni analizator i izvor napajanja.

Rezultati mjerenja:



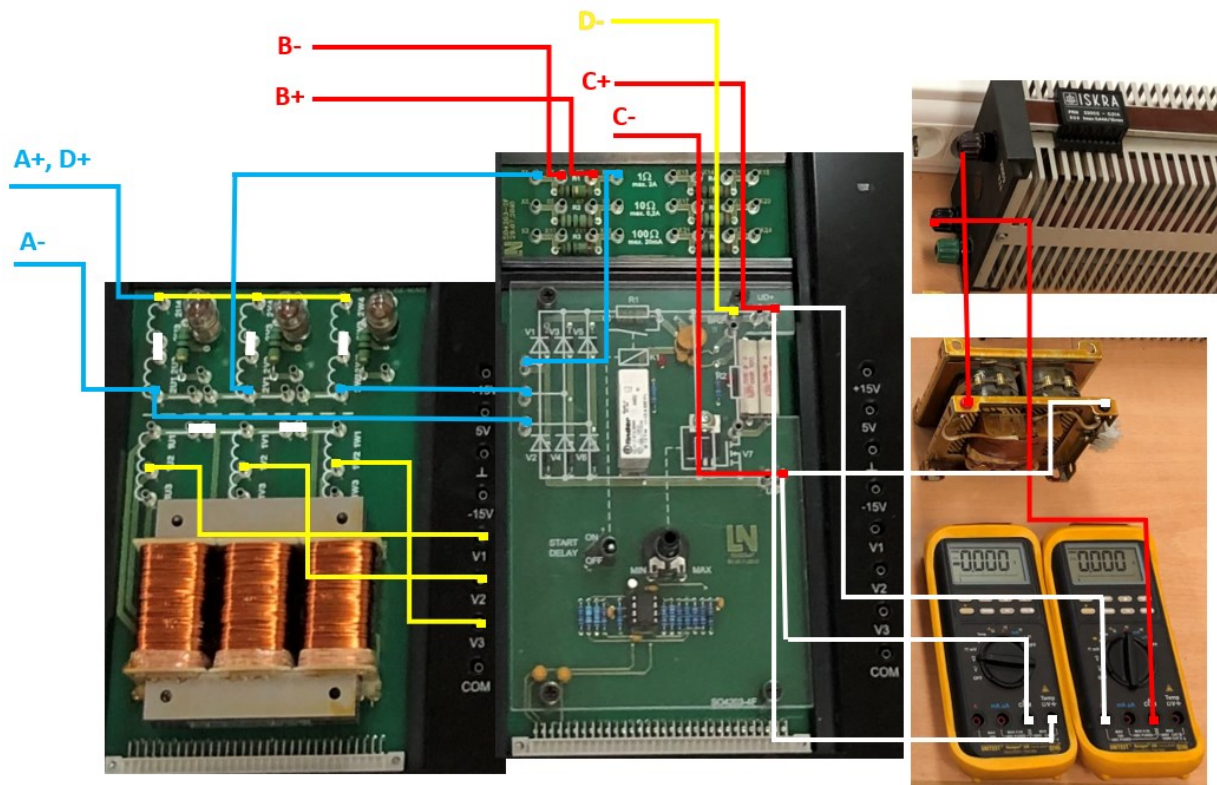
Sl. 4.17. Harmonijska analiza struje izmjeničnih priključnica ispravljača

**Tab. 4.2.** Efektivne vrijednosti  $n$ -tih harmonika očitane iz harmonijskog analizatora

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$I(n)$ , [mA]	3	198	1	2	0	40	1	25	1	1	1	18	1	13

U harmonijskom rastavu povratne struje prikazanom na slici 4.17. se vidi kako su izraženi neparni harmonici struje od kojih je dominantan 5-ti harmonik koji iznosi 20,2% osnovnog harmonika. Koristeći se izrazom (4-1), izračunava se vrijednost THDI-a, te se dobije da je  $THDI = 0,524$ , ili izraženo u postotcima,  $THDI = 54,2\%$ . Iz ovoga slijedi da je povratna struja višeharmonijska s značajnim utjecajem na pojnu mrežu u smislu injektiranja viših harmonika.

#### 4.3.3. Yy10 grupa spoja



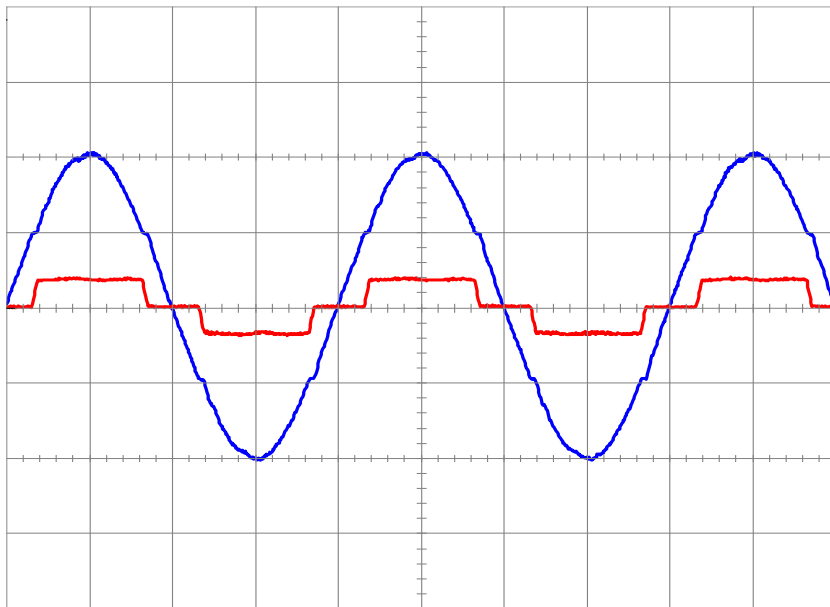
**Sl. 4.18.** Način spajanja trofaznog mosnog spoja na pojnu mrežu preko transformatora Yy10 grupe spoja

Redoslijed provedbe mjerenja:

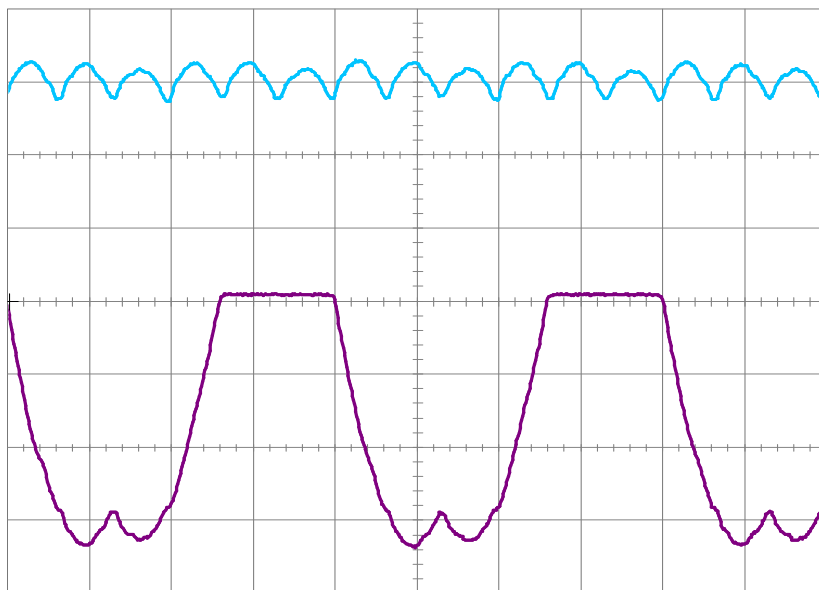
1. Opremu spojiti prema slici 4.18.

2. Na kartici ispravljača opciju *START DELAY* postaviti na *OFF*. Također, ukoliko je spojen shunt BR2 na kartici, odspojiti ga iz kruga.
3. Otvoriti programski paket *Starter (C:/ - Program Files (x86) – LN – PlugIns – Starter)*, kliknuti na ikonicu knjige te odabrati *SO4203-2A UniTrain (Basic Instruments)*.
4. Za napajanje kruga potreban je izmjenični izvor napajanja, pa u *Basic Instruments* kliknuti na *Power Supply – 3-Phase Supply*. Otvorit će se sučelje sa trofaznim izmjeničnim izvorom napajanja (Sl. 4.2.). Podesiti napon izvora na 14 V te frekvenciju izvora na 50 Hz.
5. Žični otpornik (reostat) postaviti na maksimalnu vrijednost (najsigurnije izmjeriti vanjskim multimetrom/ommetrom).
6. Pokrenuti izvor napajanja klikom na *POWER*. Nakon uključanja izvora napajanja, smanjivati otpor promjenjivog otpornika do zadane radne točke – dok kroz trošilo ne poteče struja od 170 mA (kontrolirati vanjskim ampermetrom).
7. Prema shemi sa slike 4.18., na kanalu A snima se ulazni fazni napon, na kanalu B ulazna struja jedne faze, na kanalu C napon trošila i na kanalu D napon diode V1.
8. Za snimanje valnih oblika koristi se virtualni četverokanalni osciloskop (Sl. 4.3.). Sučelje virtualnog osciloskopa otvara se u *Basic Instruments–Measuring Devices–Oscilloscope*. Početno se otvara dvokanalni osciloskop pa je dodatna dva kanala potrebno aktivirati. Podesiti vremenski podiok (*TIME/DIV*) na 5ms. Uključiti opciju *TRIGGER* te ga podesiti na kanal A (*CHN A*).
9. Aktivirati kanal A (plavi) i kanal B (crveni) za snimanje napona i struje izvora. Y-os kanala A podesiti na *5V/DIV* a kanala B na *500mV/DIV*. Uključiti izvor napajanja klikom na *POWER*. Zaustaviti snimanje osciloskopa klikom na *STOP*. Snimanje osciloskopom ponovno se pokreće deaktivacijom gumba *STOP*. Spremiti snimljeni valni oblik. Za spremanje valnog oblika kliknuti drugom tipkom miša na zaslon virtualnog osciloskopa te odabrati *copy*. Otvoriti program za uređenje teksta (*Microsoft Word*) te zalijepiti kopiranu sliku klikom druge tipke miša na prazan dokument i odabirom opcije *paste*.
10. Za snimanje valnih oblika napona trošila i diode V1, deaktivirati kanale A i B, te aktivirati kanale C (svjetlo plavi) i D (ljubičasti) virtualnog osciloskopa. Podesiti y-os oba kanala na *10V/DIV* te x-os na 5ms. Obaviti snimanje i spremanje valnih oblika na prethodno opisani način (točka 9.).
11. Isključiti izvor napajanja klikom na *POWER*.

Rezultati mjerenja:



SI. 4.19. Napon (plavo) i struja (crveno) izmjeničnih priključnica ispravljača



SI. 4.20. Napon trošila (svjetloplavo) i napon diode V1 (ljubičasto)

Harmonijska analiza struje izmjeničnih priključaka ispravljača

Redoslijed provedbe mjerenja:

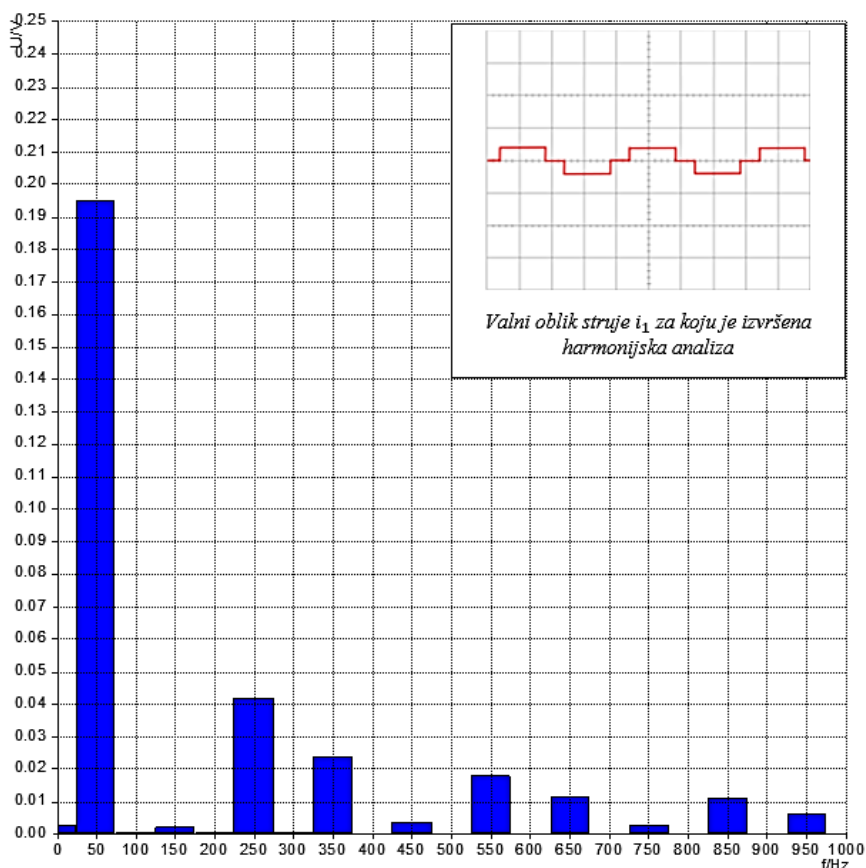
1. Opremu ostaje spojena prema slici 4.1..
2. Izvor napajanja ostaje isti kao i u prošlom pokusu snimanja valnih oblika (*Power Supply – 3-Phase Supply*), s istim podešenjima, a harmonijska analiza provodi se



pomoću spektralnog analizatora koji se također nalazi u programskome paketu *Starter* (*C:/ - Program Files (x86) – LN – PlugIns – Starter*). Klikom na ikonicu knjige i odabirom *SO4203-2A UniTrain (Basic Instruments)* otvara se izbornik na kojemu je moguće odabrati spektralni analizator klikom na *Spectrum Analyzer*. Sučelje spektralnog analizatora nalazi se na slici 4.6. Podesiti spektralni analizator prema slici 4.6. Nadalje, dvoklikom na pozadinu spektralnog analizatora otvoriti podešenja x i y osi (*Properties – Scale*). X-os podesiti na mjerenja od 0 do 1000 Hz, s međupodjelom od 50 Hz. Y-os podesiti na mjerenje od 0 do 0,25 V s međupodjelom od 0,01 V. Kliknuti OK.

3. Mjerenja započeti uključivanjem izvora napajanja klikom na *POWER*. Za zaustavljanje mjerenja kliknuti ponovno na *POWER* izvora napajanja.
4. Valni analizator će napraviti harmonijsku analizu fazne struje izmjenične pojne mreže. Spremiti sliku harmonijske analize kako je opisano u točki 9. prošlog pokusa.
5. Isključiti valni analizator i izvor napajanja.

Rezultati mjerenja:



Sl. 4.21. Harmonijska analiza struje izmjeničnih priključnica ispravljača

**Tab. 4.3.** Efektivne vrijednosti  $n$ -tih harmonika očitane iz harmonijskog analizatora

<b><math>n</math></b>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b><math>I(n)</math>, [mA]</b>	3	195	1	2	0	42	1	25	1	1	1	18	1	13

U harmonijskom rastavu povratne struje prikazanom na slici 4.21. se vidi kako su izraženi neparni harmonici struje od kojih je dominantan 5-ti harmonik koji iznosi 21,1% osnovnog harmonika. Koristeći se izrazom (4-1), izračunava se vrijednost THDI-a, te se dobije da je  $THDI = 0,524$ , ili izraženo u postocima,  $THDI = 54,2\%$ . Iz ovoga slijedi da je povratna struja višeharmonijska s značajnim utjecajem na pojnu mrežu u smislu injektiranja viših harmonika.

**Tab. 4.4.** Iznosi THDI za spojeve pri različitim grupama spojeva

	<b>Yy0</b>	<b>Yy6</b>	<b>Yy10</b>	<b>Yd0</b>
<b>THDI</b>	52,4%	52,4%	52,4%	31,1%

Iz tablice 4.4. se vidi da je povratna struja spoja trofaznog neupravljivog mosnog spoja na pojnu mrežu preko ispravljačkog transformatora višeharmonijska za sve četiri različite grupe spojeva koje su uspoređene. Također se može zaključiti kako mijenjanje satnog broja transformatora ne utječe na harmonijski sastav povratne struje trofaznog neupravljivog mosnog spoja jer za slučajeve Yy0, Yy6 te Yy10 THDI ostaje nepromijenjen i iznosi 52,4%. THDI povratne struje trofaznog mosnog spoja spojenog na pojnu mrežu preko transformatora kojemu su sekundarni namoti u trokut spoju je za oko 20% manji nego za transformator iz prethodnog slučaja. Zbog toga je izbor Yd0 grupe spoja ili neke druge grupe spoja gdje su sekundarni namoti transformatora u trokut spoju u prednosti pri izboru transformatora jer se u elektrotehnici uvijek teži smanjiti pojava i učinak viših harmonika struje.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu najprije je opisan trofazni neupravljivi mosni spoj i opisan je način rada ovog ispravljača s induktivnim trošilom. Uslijedilo je definiranje grupa spojeva trofaznog transformatora, te analiza rada ispravljača pri različitim grupama spojeva transformatora.

Nakon toga su provedeni eksperimenti kombinirajući dvije eksperimentalne kartice koje predlaže proizvođač Lucas Nülle. Korištene su eksperimentalne kartice Trofaznog transformatora i Trofaznog neupravljivog mosnog spoja. Koristeći LabSoft i UniTrain softvere i teorijsko znanje iz područja transformatora i neupravljivih ispravljača napravljena je nova vježba koja za cilj ima procjenu povratnog djelovanja trofaznog neupravljivog mosnog spoja na pojnu mrežu u smislu injektiranja viših harmonika struje. Pri analizama povratnog djelovanja mijenjana je vrsta spoja sekundara transformatora te satni broj transformatora.

Za spoj sekundara transformatora u zvijezdu je, za tri različite grupe spoja  $Yy0$ ,  $Yy6$  i  $Yy10$ , pokazano da je povratna struja višeharmonijska. U harmonijskom rastavu se ističu neparni harmonici među kojima je dominantan 5-ti harmonik i koji je u ova tri slučaja iznosio oko 20% osnovnog harmonika. Pokazano je kako pokazatelj kvalitete procesa pretvorbe vezan za harmonijski sastav povratne struje, ukupna harmonijska distorzija, THDI, iznosi oko 53%. Promatrajući valne oblike snimljene pri grupama spojeva  $Yy0$ ,  $Yy6$  i  $Yy10$ , primjećuje se kako se ne mijenjaju karakteristični valni oblici struje te da harmonijska analiza, kao i sastav i amplituda harmonika, ostaje ista. Razlog tome je, kao što je pretpostavljeno u teorijskoj analizi, činjenica da se mijenjanjem satnog broja transformatora utječe na odnos fazora primarnih i sekundarnih napona ispravljačkog transformatora. Ovo, međutim, ne predstavlja bitan parametar pri procesu pretvorbe izmjeničnog napajanja u istosmjerno, s obzirom da će sekundarni namoti transformatora predstavljati trofazno simetrično napajanje trofaznom mosnom spoju pri bilo kojem satnom broju. Iako satni broj u ovakvim primjenama ne predstavlja bitan parametar, u primjenama kao što je paralelan rad transformatora je on od ključne važnosti jer je nužno da su transformatori iste grupe spoja.

Ispitivanje načina rada provedeno je i za  $Yd0$  spoj ispravljačkog transformatora, pri čemu je rekonstruiran valni oblik povratne struje za koji je procijenjena ukupna harmonijska distorzija, te je dobiveno da THDI iznosi 31%. Time je pokazano da trofazni neupravljivi mosni spoj koji se na pojnu mrežu spaja preko transformatora čiji je sekundarni namot spojen u trokut ima bolje izmjenične karakteristike vezano za injektiranje viših harmonika struje u izmjeničnu pojnu mrežu.

Ovo predstavlja bitan faktor pri izboru transformatora s obzirom da u bilo kojem području elektrotehnike postoji težnja da se smanji povratno djelovanje na mrežu u vidu viših harmonika. Razlog tome jesu mnogi negativni učinci viših harmonika kao što je smanjeni tijek trajanja motora i nemogućnost potpunog opterećenja, povećani gubici bakra kod transformatora te povećana buka, smanjen životni vijek kondenzatora, itd.

## SAŽETAK

Napravljena je analiza rada induktivno opterećenog trofaznog neupravljivog mosnog spoja. Opisani su načini spajanja primara i sekundara ispravljačkih transformatora kao i satni broj transformatora. Teorijski je objašnjen utjecaj različitih parametara ispravljačkog transformatora na karakteristične valne oblike trofaznog neupravljivog mosnog spoja. Koristeći se didaktičko-multimedijalnom opremom Lucas Nülle se za pet različitih grupa spojeva transformatora došlo do novih shema spajanja eksperimentalnih pločica trofaznog transformatora i ispravljača. Izvršena su snimanja karakterističnih valnih oblika za ove spojeve pomoću virtualnog četverokanalnog osciloskopa. Za  $Yy0$ ,  $Yy6$  i  $Yy10$  grupe spojeva provedena je harmonijska analiza struje izmjeničnih priključaka ispravljača koristeći virtualni harmonijski analizator. Zasnivano na rezultatima mjerenja, izvršena je usporedba valnih oblika te iznosa ukupne harmonijske distorzije, THDI, za različite grupe spojeva transformatora.

Ključne riječi: trofazni transformator, grupa spoja transformatora, trofazni neupravljivi mosni spoj, harmonijska analiza, THDI.

## **ABSTRACT**

Title: Integration three phase uncontrolled bridge topology on power grid over transformer with different group connection

A theoretical analysis of an inductively loaded three-phase uncontrolled bridge rectifier is made. The ways of connecting the primary and secondary windings and the designating numeral of the rectifier transformer are described. The influence of different parameters of the rectifier transformer on the characteristic waveforms of a three-phase uncontrolled bridge rectifier is theoretically explained. Using the didactic-multimedia equipment from Lucas Nülle new circuit diagrams of the experimental three-phase transformer and rectifier circuit boards are developed for five different vector groups. The characteristic waveforms for these circuits are recorded using a virtual four-channel oscilloscope. For Yy0, Yy6 and Yy10 vector groups, a harmonic analysis of the current was performed using a virtual spectrum analyzer. Based on the measurement results, a comparison of the waveforms and the total harmonic distortion, THDI, is performed for different vector groups of the transformer.

Keywords: three-phase transformer, transformer vector groups, three-phase uncontrolled bridge rectifier, harmonic analysis, THDI.

## LITERATURA

- [1] I., Flegar, Elektronički energetska pretvarači, Kigen, Zagreb, 2010.
- [2] I., Flegar, Teorija mreža – bilješke s predavanja, Elektrotehnički fakultet, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, 2001.
- [3] D., Pelin, K., Miličević, D., Vulin, Priručnik za praktikum iz osnova energetske elektronike, Elektrotehnički fakultet, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, 2013.
- [4] D., Kezić, Energetska elektronika, murićmilorad.files.wordpress.com, 2011., dostupno na: <https://murićmilorad.files.wordpress.com/2011/11/energetska-elektronika.pdf>
- [5] I., Flegar, Sklopovi energetske elektronike – Odabrani primjeri, Graphis, Zagreb, 1996.
- [6] J.G., Kassakian, M.F., Schlecht, J.C., Verghese, Osnove energetske elektronike, I. dio, Graphis, Zagreb, 2000.
- [7] I., Marković, T., Đuran, T., Novak, Određivanje satnog broja transformatora pomoću voltmetra i fazorskog dijagrama, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Zagreb, 2018.
- [8] Z., Valter, Predavanja prof.dr.sc. Zdravka Valtera-Transformatora, loomen.carnet.hr, dostupno na: [https://loomen.carnet.hr/pluginfile.php/363923/mod\\_resource/content/2/OES%2007%202-Transformator.pdf](https://loomen.carnet.hr/pluginfile.php/363923/mod_resource/content/2/OES%2007%202-Transformator.pdf)
- [9] Lucas-Nülle; didaktička oprema za podučavanje; dostupno na: <https://www.lucas-nuelle.us/>

## **ŽIVOTOPIS**

Nina Voloder rođena je 25. veljače 1998. godine u Slavonskom Brodu. Odrasla je u Gunji gdje je pohađala OŠ „Antun i Stjepan Radić“ od 2003. do 2012. godine. 2012. upisuje se u prvi razred srednje škole „JU Gimnazija Vaso Pelagić“ u Brčkom u Bosni i Hercegovini. Srednjoškolsko obrazovanje završava 2016. godine i te iste godine upisuje se na preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku gdje je danas student treće godine istog studija.