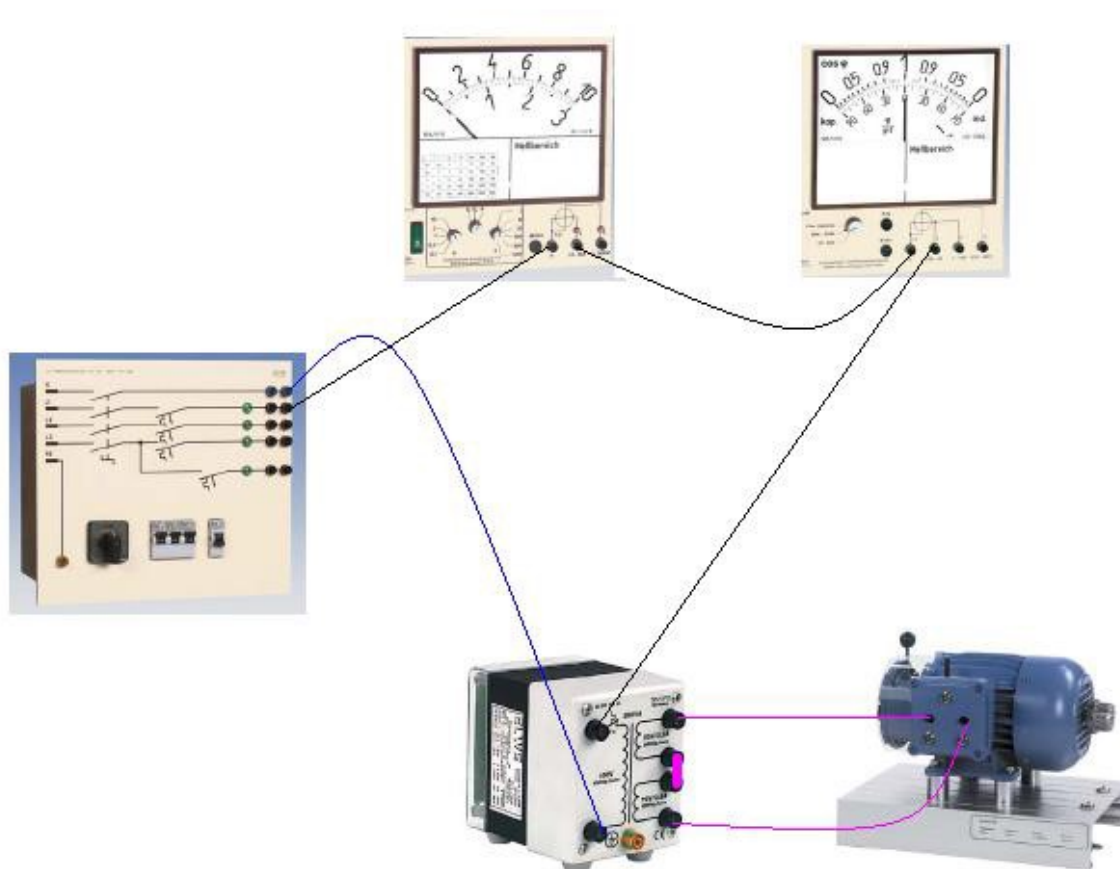


TRANSFORMATORI

TEORIJSKA RAZMATRANJA I LABORATORIJSKE VJEŽBE



NASLOV: TRANSFORMATORI

TEORIJSKA RAZMATRANJA I LABORATORIJSKE VJEŽBE

Autor: Nikola Muslim

Nakladnik: Vlastita naklada autora

Lektura i korektura: Nena Vitaljić Muslim

Recenzija: Prof.dr.sc Dragan Poljak, Prof.dr.sc. Dinko Vukadinovic

Upute za vježbe, slike i video zapisi iz laboratorija su odobreni od strane Tehničke škole Zadar i Elektrotehničke škole Split

Tiskano i digitalno izdanje se naručuje putem elektroničke pošte:

email: muslimnikola@gmail.com

Tisak na zahtjev

Ova knjiga na hrvatskom jeziku **se može** umnožavati ako se koristi u školama pa naručivanje od strane učenika nije nužno.

Za eventualne pogreške ne preuzimam odgovornost. Prilikom rukovanja s električnim strojevima i uređajima potrebno je držati se uputa i poštivati pravila sigurnosti.

Sve kritike su dobrodošle.

Proizvedeno u Republici Hrvatskoj

Godina izdanja: 2022

Mjesto izdavanja: Split

ISBN 978-953-49964-0-9 (PDF e-knjiga)

ISBN 978-953-49964-1-6 (tisak na zahtjev)

Sadržaj

TEORIJSKA RAZMATRANJA	6
Pregled osnovnih pojmova iz magnetizma.....	7
Električno i magnetsko polje.....	7
Magnetski tok Φ	8
Elektromagnet.....	8
Magnetičnost željeza, magnetsko zasićenje i petlja histereze	9
Magnetsko polje oko 2 bliska ravna vodiča kroz koje teku struje u suprotnim smjerovima..	10
Elektromagnetska indukcija	11
Samoindukcija.....	12
Međuindukcija	13
Sila na vodič u magnetskom polju	13
Izmjenične struje	14
Jednofazni sustavi.....	14
Trofazni sustavi.....	15
Elektroenergetski trofazni sustav	17
Transformatori.....	17
Općenito.....	17
Dijelovi transformatora.....	18
Nazivni podaci.....	18
Idealni transformator	19
Realni transformator	23
Korisnost transformatora	24
Trofazni transformatori	25
Označavanje stezaljki	27
Spojevi namota trofaznog transformatora	28
Specijalni transformatori.....	31
Strujni mjerni transformatori	31
Naponski mjerni transformatori	33
Regulacijski transformatori	33
Trofazni transformator u pogonu.....	34
Simetrično opterećenje trofaznog transformatora	36
Nesimetrično opterećenje trofaznog transformatora	36
Paralelni rad transformatora	38

Zagrijavanje i hlađenje transformatora.....	38
LABORATORIJSKE VJEŽBE	40
Popis vježbi	40
Potrebna oprema za izvođenje vježbi:	41
Ciljevi, zadaci i svrha izvođenja vježbi – kratki pregled.....	48
JEDNOFAZNI TRANSFORMATORI	49
VJEŽBA 1. PRAZNI HOD JEDNOFAZNOG TRANSFORMATORA	49
Transformator T1	56
Transformator T2 (toroidni transformator).....	60
Transformator T3 – Regulacijski transformator (autotransformator).....	63
Zaključak (pitanja i odgovori):	67
VJEŽBA 2. KRATKI SPOJ TRANSFORMATORA	69
Transformator T1 (jezgra kvadratnog presjeka).....	75
Transformator T2 (toroidni transformator).....	77
Zaključak (Pitanja i odgovori):	79
VJEŽBA 3. OPTEREĆENJE TRANSFORMATORA	80
Transformator za panel ploču T4.....	88
Opterećenje jednofaznog transformatora pomoću repulzijskog (jednofaznog kolektorskog) motora	90
Zaključak (Pitanja i odgovori).....	92
TROFAZNI TRANSFORMATORI	93
Vježba 4.: Spoj Yy0 i Yyn0.....	93
Prazni hod	99
Zaključak (Pitanja i odgovori):	102
Vježba 5.: Spoj Dy5 i Dyn5	104
Prazni hod	109
Jednofazno opterećenje.....	110
Dvofazno opterećenje	111
Zaključak (Pitanja i odgovori):	113
Vježba 6.: Zvijezda spoj Yd5	114
Prazni hod	118
Dvofazno opterećenje	119
Zaključak (Pitanja i odgovori):	121
Vježba 7.: Zvijezda spoj Yz5	122
Prazni hod	126
Jednofazno opterećenje.....	127

Dvofazno opterećenje	127
Zaključak (Pitanja i odgovori):	129
PRILOG	130
Liste laboratorijskih vježbi za učenike	130
LITERATURA	137

TEORIJSKA RAZMATRANJA

Prije mnogo godina ljudi su razumjeli pojam gravitacijske sile. Znali su da predmeti s određene visine padaju na zemlju i da predmeti veće mase privlače predmete manje mase.

Nakon toga otkrili su elektrostatsku silu kojom naelektrizirani jantar privlači komadiće papira ili lišća.

Budući da se lagani komadići lišća podižu suprotno gravitacijskoj privlačnoj sili zaključili su da je elektrostatska sila za takve predmete jača od gravitacijske.

Dalje su ljudi spoznali još jednu silu. To je magnetska sila koja može podići veće metalne predmete pa su zaključili da je jača od elektrostatske za određene dimenzije objekta.

Zadnja sila koju su ustanovili je nuklearna sila. To je najjača sila, koja drži na okupu protone u jezgri. Protoni su istog predznaka naboja, a privlače ih elektroni koji su suprotnog predznaka. Nije jasno kako sila drži protone na okupu niti kako sila neumorno pogoni elektrone da se gibaju oko jezgre.

Danas se u fizici elektrostatska i magnetska sila stavljaju pod jednu elektromagnetsku silu.

Kod generatora električne energije elektromagnetska indukcija nastaje tako što namoti statora ulančuju vremenski promjenjivo magnetsko polje. Promjenjivo magnetsko polje se dobiva okretanjem rotora koji na sebi ima stalne magnetske polove stvorene permanentnim magnetima ili istosmjernom strujom koja teče namotima rotora.

Transformatori su uređaji koji na principu elektromagnetske indukcije pretvaraju električnu energiju iz jednog izmjeničnog sustava u drugi iste frekvencije, ali promijenjene vrijednosti napona i struja. U pravilu se sastoje od željezne magnetske jezgre te dva (primar i sekundar) ili više namota koji su spregnuti zajedničkim vremenski promjenjivim magnetskim.

Da bi razumjeli prijenos snage magnetskim putem i elektromagnetsku indukciju prisjetit ćemo se nekih osnovnih pojmova iz elektrotehnike.

Pregled osnovnih pojmova iz magnetizma

Električno i magnetsko polje

Dvije su temeljne veličine u klasičnom elektromagnetizmu na kojima počiva elektrotehnika. To su veličine **E (električno polje)** i **B (magnetska indukcija)**. To je suštinski par u osnovama elektrotehnike i elektromagnetskoj teoriji polja.

Električno polje se manifestira djelovanjem sile na točkasti, (probni) naboj u mirovanju:

$$E = \frac{F}{q} \quad (1)$$

E – Električno polje (V/m)

F – Elektrostatska sila (N)

q – probni naboj (C)

Magnetska indukcija se manifestira djelovanjem sile na naboj u gibanju:

$$B = \frac{F}{v \cdot q} \quad (2)$$

B – magnetska indukcija (T)

F – magnetska sila (N)

q – probni naboj (C)

v – brzina gibanja naboja.

Formula (2) vrijedi za slučaj kad su brzina v , magnetska indukcija B i sila F međusobno okomiti vektori.

Ako kroz vodič prolazi struja oko njega će se zatvarati magnetske silnice.

Magnetska indukcija B nam opisuje gustoću magnetskog polja (gustoću magnetskih silnica). Jedinica za magnetsku indukciju je Tesla (T).

Koliko će biti gust raspored silnica oko vodiča ovisi o sredstvu koje se nalazi oko vodiča. To sredstvo opisujemo veličinom koja se zove magnetska permeabilnost (propustljivost), a označavamo je grčkim slovom: μ .

Magnetsku indukciju računamo iz izraza :

$$B = \mu \cdot H = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad (3)$$

B – magnetska indukcija

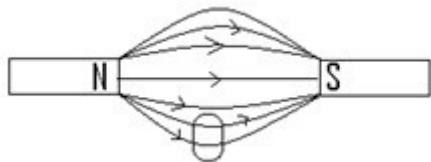
H – jakost magnetskog polja (A/m)

μ_0 – magnetska permeabilnost za vakuum i iznosi $4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am

μ_r – relativna permeabilnost

Magnetski tok Φ

Magnetski tok kroz neku površinu S je umnožak magnetske indukcije B na toj površini i površine S pod pretpostavkom da je indukcija ravnomjerno raspoređena po površini i da silnice magnetskog polja okomito ulaze na površinu. Jedinica za magnetski tok je Weber (Wb). Slika 1.4 prikazuje magnetski tok.



Slika 1.4. Magnetski tok

Magnetski tok kroz neku površinu ovisi o površini S i magnetskoj indukciji B .

$$\Phi = B \cdot S \quad (4)$$

Φ – magnetski tok (Wb)

B – magnetska indukcija (T)

S – površina (m^2)

Elektromagnet

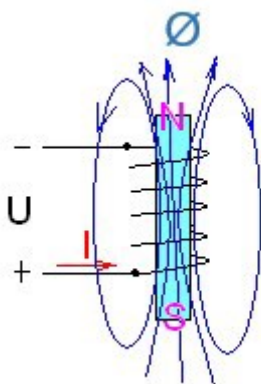
Ako zavojnicu namotamo oko željezne jezgre, njeno magnetsko polje će postati slično polju ispruženog permanentnog magneta.

Tako dobivamo elektromagnet prikazan na slici 1.5.

Magnetsko polje postoji samo dok zavojnicom teče struja. Što je veća struja veći je iznos magnetskog toka kroz zavojnicu.

Smjer magnetskog toka ovisi o smjeru namatanja zavojnice i smjeru struje kroz zavojnicu pa prema dogovoru prsti desne ruke pokazuju smjer obilaska struje po zavojnici, a palac pokazuje smjer polja.

Također se tok određuje i smjerom uvijanja desnog vijka. To znaci da magnetski tok ima smjer napredovanja struje.



Slika 1.5. Određivanje smjera magnetskog toka elektromagneta

Na mjestu izlaska toka iz jezgre pretpostavili smo N pol, a na mjestu ulaska silnica u jezgru nalazi se S pol. Krajeve magneta zovemo polovi. Istoimeni polovi se odbijaju, a raznoimeni se privlače.

Iznos inducirano napona je proporcionalan broju zavoja petlje te brzini promjene magnetskog toka.

Predznak minus označava da se inducirani napon protivi narinutom naponu. On je takvog smjera da u zavojnici stvara struju koja se svojim magnetskim tokom suprotstavlja promjeni magnetskog toka zbog kojeg je došlo do inducirano napona.

Samoindukcija

Samoindukcija je pojava da se u zavojnici koja se nalazi u **nekom dijelu strujnog kruga** inducira elektromotorna sila, zbog promjene magnetskog toka izazvane promjenom struje koja teče zavojnicom.

Smjer te elektromotorne sile je takav da nastoji spriječiti promjenu koja ju je izazvala.

Iznos elektromotorne sile ovisi o brzini promjene magnetskog toka.

Najčešće promjene nastaju pri sklapanju.

Svojstvo zavojnice da se odupire promjeni struje koja prolazi kroz nju, naziva se INDUKTIVITET. Induktivitet se ponaša kao tromost jer usporava promjenu struje.

Induktivitet je osnovna vrijednost zavojnice i on ovisi o broju zavoja zavojnice ***N***, duljini zavojnice ***l***, presjeku jezgre zavojnice ***S*** i permeabilnosti materijala od kojeg je napravljena jezgra ***μ_r***.

$$L = \frac{N^2}{l} \mu_0 \mu_r S \quad (6)$$

Jedinica za induktivitet je Henri (H).

N – broj zavoja

l - duljina zavojnice (m)

S – presjek zavojnice (m²)

μ_r – permeabilnost materijala

μ₀ - magnetska permeabilnost za vakuum i iznosi 4π 10⁻⁷ (Vs/Am)

Induciranu elektromotornu silu možemo izraziti preko induktiviteta

$$E = -L \frac{di}{dt} \quad (7)$$

E – inducirani napon (V)

L – induktivitet (H)

$\frac{di}{dt}$ - promjena struje u vremenu

Vidimo da je ovaj napon veći što je veća promjena struje. Zavojnica ima induktivitet 1H ako u njoj jednolika promjena struje od 1A u 1 sekundi inducira napon od 1V.

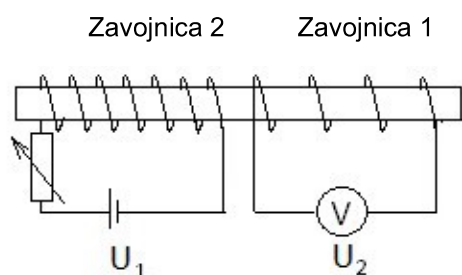
Razlika samoindukcije i elektromagnetske indukcije je u tome što se pri samoindukciji inducira elektromotorna sila u zavojnici koja je protjecana strujom (zavojnica sama sebi stvara napon koji tjera

svoju struju koja se opire struji koja ju je proizvela). Pri elektromagnetskoj indukciji zavojnica ne mora biti spojena u strujni krug, a u njoj se inducira napon ako se ona nalazi u promjenjivom polju čiji izvor može biti struja koja teče nekom drugom zavojnicom.

Međuidukcija

Međusobna indukcija je pojava induciranja napona u nekoj zavojnici uslijed promjene magnetskog toka koju izaziva neka druga zavojnica na mjestu prve zavojnice (vidi sliku 1.12.)

Pomoću promjenjivog otpornika mijenjamo iznos struje, a time i magnetski tok zavojnice 2. Na zavojnici 1. mjerimo inducirani napon pomoću voltmetra.



Slika 1.12. Međuidukcija

Ova dva svitka su međusobno magnetski spregnuta preko magnetskog polja. Ta veza dolazi do izražaja samo ako je struja promjenjiva.

Ovo uzajamno djelovanje zove se MEĐUIDUKCIJA.

Ako je izvor struje izmjeničan induciranje napona na drugom svitku će biti veće što je frekvencija izvora veća.

Sila na vodič u magnetskom polju

Ako se vodič kroz koji teče struja nalazi u magnetskom polju, djelovat će na njega sila F . Sila je proporcionalna iznosu struje kroz vodič i duljini vodiča koji se nalazi u magnetskom polju.

To se matematički opisuje na sljedeći način:

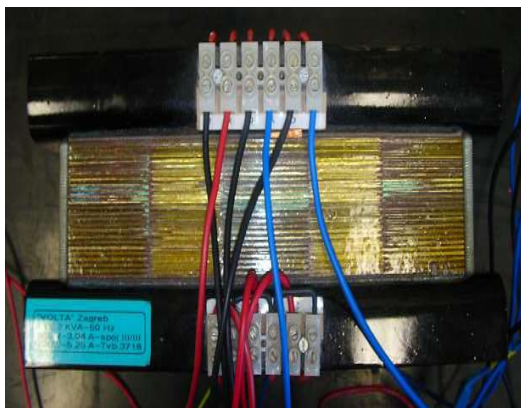
$$F = B \cdot I \cdot l \quad (8)$$

F - sila koja djeluje na vodič (N)

B - magnetska indukcija polja u kojem se nalazi vodič (T)

I - struja kroz vodič (A)

l - duljina vodiča (m)



Slika 2.5.1. Jezgra transformatora

Željezna jezgra se u pogonu zagrijava više ako dođe do povećanja gustoće magnetskog toka ili do povećanja frekvencije.

3. Gubici uslijed rasipanja magnetskog toka

Dio glavnog toka se ne zatvara samo kroz željeznu jezgru nego i kroz zrak, a taj dio označavamo kao rasipni tok. Rasipni tok je neizbježan i ima svoju ulogu u transformatoru.

Rasipanje magnetskog toka odvija se na primarnoj i sekundarnoj strani pa ih međusobno razlikujemo kao: primarni rasipni tok Φ_{s1} i sekundarni rasipni tok Φ_{s2} . Smatramo da ta dva magnetska toka ne proizvode gubitke u željeznoj jezgri, u fazi su sa strujama i induciraju napone u namotima tako da imamo :

- inducirani napon E_{s1} nastao uslijed promjene rasipnog toka na primaru
- inducirani napon E_{s2} nastao uslijed promjene rasipnog toka na sekundaru

Rasipni induktiviteti primara i sekundara zajedno s radnim otporima namota čine tzv. impedanciju kratkog spoja transformatora čija vrijednost se unaprijed određuje kod projektiranja transformatora prema parametrima mreže jer ta impedancija ograničava udarne struje kratkog spoja koje nastaju pri raznim kvarovima u mreži.

Rasipni tok se zatvara djelomično i konstrukcijskim elementima transformatora (steznici jezgre, kotao) i u njima inducira vrtložne struje te stvara dodatne gubitke energije koji mogu lokalno povišati temperaturu ulja ili namota.

Korisnost transformatora

Korisnost transformatora je omjer dobivene snage na sekundaru i uložene snage na primaru.

Snaga na primaru je jednaka snazi sekundara uvećanoj za gubitke.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_G}. \quad (17)$$

η – korisnost

P_1 – snaga na primaru (W)

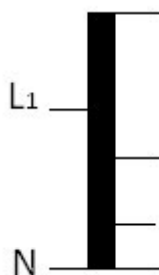


Slika 2.16. Regulacijski transformator sa klizačem

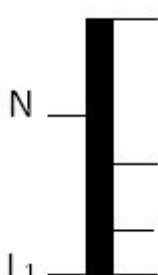
UPOZORENJE: Regulacijski transformator se ne smije uzemljiti na sekundaru jer se kod linijskog primarnog napona događa kratki spoj sa zemljom. Kod jednofaznog priključka treba paziti da se nula (nikad faza) spaja na zajednički donji vod sa sekundarom. Također treba znati da i kod malih napona sekundara, postoje puni naponi prema zemlji pa je svaki dodir s izvodom sekundara smrtonosan.

Ljudi se zavaravaju kada izmjere na sekundaru 5V, ali svaki od 2 izvoda je prema zemlji na naponu oko 230V.

Na slici 2.17 prikazan je pravilan i nepravilan način priključivanja regulacijskog transformatora.



Pravilan priključak



Nepravilan priključak

Slika 2.17. Pravilan i nepravilan priključak primara regulacijskog transformatora

Zaključak: Regulacijski transformator ima spojene primare i sekundarne namote pa se ne smije koristiti kao zaštitni izolacijski transformator

[Trofazni transformator u pogonu](#)

Trofazni transformator je u pogonu kada je na primarnoj strani priključen izvor električne energije (električna visokonaponska postrojenja ili mreže), a na sekundarnoj strani su priključena trošila ili distributivna mreža. Transformator je u pogonu i onda ako na sekundaru nema trošila, tj. kada radi u praznom hodu.

Karakter trošila može biti radni, induktivni ili kapacitivni.

U realnom transformatoru omjer napona U_1/U_2 se razlikuje od E_1/E_2 jer na otporima namota i rasipnim induktivitetima nastaje tzv. pad napona koji varira ovisno o karakteru tereta. Porastom radnog i

Potrebna oprema za izvođenje vježbi:

JEDNOFAZNI TRANSFORMATORI

Vježbe izvodimo za 4 vrste jednofaznih transformatora:



Slika 3.1. Jednofazni transformator sa jezgrom u obliku šupljeg kvadra **U-I** izvedbe; oznaka T1

primarni napon: 230V
sekundarni naponi: 2 x 115V
prividna snaga: 200VA
primarna, sekundarna struja: 0.9A
frekvencija: 50 Hz
broj zavoja primarnog namota: 479
broj zavoja sekundarnog namota: 2 x 258

masa: 3.5kg
otpor primarnog namota: 6 Ω
otpor namota na sekundaru: 2 x 4 Ω



Slika 3.2 Jednofazni toroidni transformator (jezgra u obliku šupljeg valjka); oznaka T2

primarni napon: 230V
sekundarni naponi: 2 x 115V
prividna snaga: 200VA
primarna, sekundarna struja: 0.9A
frekvencija: 50 Hz
broj zavoja primarnog namota: 814
broj zavoja sekundarnog namota: 2 x 445

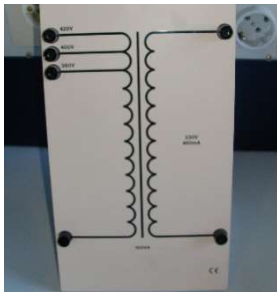
masa: 3.5kg
otpor primarnog namota: 10 Ω
otpor namota na sekundaru: 2 x 7 Ω



Slika 3.3 Autotransformator; oznaka T3

primarni napon: 230V
sekundarni naponi: 115V, 240V, 125V
prividna snaga: 200VA
primarna sekundarna struja: 0.9A
frekvencija: 50 Hz
broj zavoja primarnog namota: 646
broj zavoja sekundarnog namota: 334,705,371

masa: 3.5kg
otpor primarnog namota: 7 Ω
otpor namota na sekundaru: 6 Ω , 4 Ω , 8 Ω



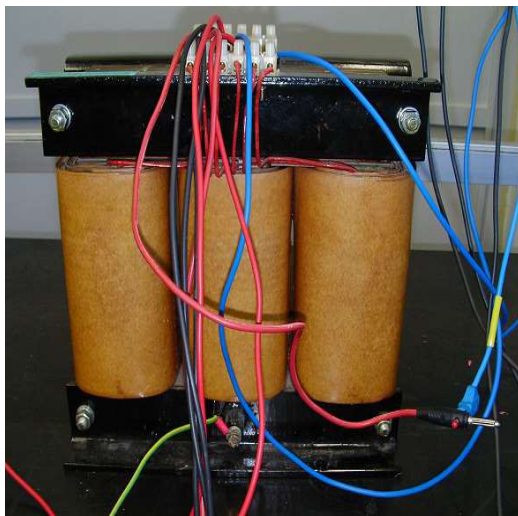
Slika 3.4. Jednofazni panel transformator T4

Višenaponska strana: 380V, 400V, 420V

Niženaponska strana: 230V

TROFAZNI TRANSFORMATORI

Vježbe izvodimo sa 2 trofazna transformatora od kojih jedan ima mogućnost spajanja namota u bilo koju grupu spoja.



Slika 3.5. Trofazni eksperimentalni europski transformator sa mogućnošću spajanja VN i NN namota u spoj zvijezda i spoj trokut



Slika 1.8. Trofazni transformator na kojem se može ostvariti bilo koja grupa spoja

Ovaj transformator je pogodan za sve spojeve:

Nazivni podaci:

Primar: 3x230/400V, 50(60) Hz

Sekundar: 3x2x115V, 0.9A

Snaga: 600VA

P_H – Gubitci uslijed histereze

P_V – Gubitci uslijed vrtložnih struja

U_{01} – primarni napon praznog hoda

I_{01} – primarna struja praznog hoda

$\cos\varphi_{01}$ – faktor snage praznog hoda

Stvarni Gubitci u željeznoj jezgri se mnogu odrediti iz izraza:

$$P_{Fe} = P_{01} - P_{Cu1} = P_{01} - I_{01}^2 \cdot R_1$$

P_{Fe} – Gubitci u željezu

P_{01} – ukupni Gubitci praznog hoda

I_{01} – primarna struja praznog hoda

P_{Cu1} – Gubitci u bakru namota primara

Gubitci u željezu su stalno prisutni dok je transformator priključen na izvor napajanja, neovisno o tome jeli transformator opterećen ili je u praznom hodu.

Toroidni transformatori gotovo da nemaju gubitke uslijed rasipanja magnetskog toka, tj. skoro sve silnice magnetskog polja prolaze željeznom jezgrom.

Zbog toga je struja praznog hoda toroidnih transformatora manja nego u ostalih transformatora.

Namoti toroidnih transformatora mogu se motati po cijelom obodu (slika 4.4.1), dok se kod kvadratnih U-I izvedbi, namoti motaju samo oko 2 stupa. Zbog toga toroidni transformatori imaju kraću jezgru, a time i manju težinu i volumen. Ipak u većim postrojenjima se manje koriste zbog složenosti izrade, cijene i većih startnih struja.



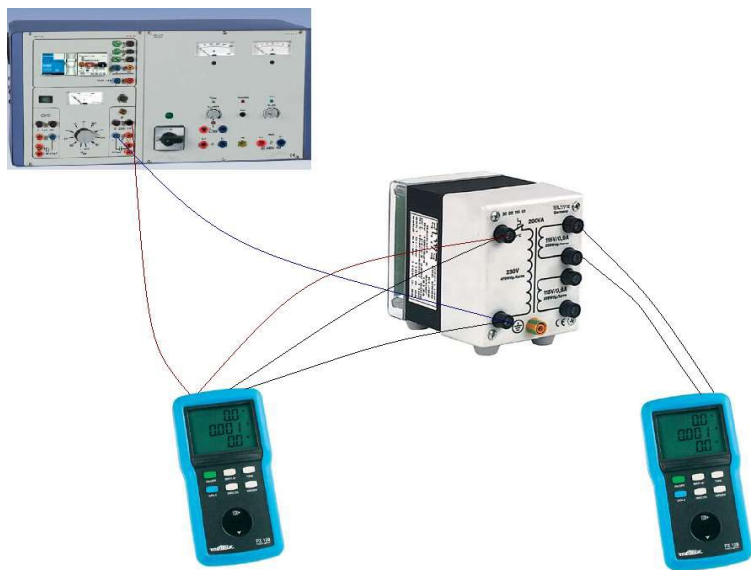
Slika 4.4.1. Oblik jezgre toroidnog transformatora (transformator T2)

Kod autotransformatora primarni i sekundarni namoti vezani su galvanskom i elektromagnetskom vezom. **Prijenosni omjer napona jednak je odgovarajućem omjeru broja namota**, ali moguće je izvršiti više podjela tako da se oni koriste za regulaciju izlaznog napona. Regulacija se vrši različitim odabirom broja namota na sekundaru.

Za snimanje karakteristike praznog hoda (slika 4.5.) potrebno je izvršiti više mjerenja

Transformator T1

1. Ostvari spoj prema shemi na slici 4.1. i montažnoj shemi na slici 4.6. (od ukupnog broja zavoja na sekundaru iskoristi samo pola):



Slika 4.6. Montažna shema jednofaznog transformatora

Nacrtaj samostalno shemu sa slike 4.1.

2. Podesi primarni napon na 230V pomoću regulacijskog transformatora. Za taj napon izmjeri primarnu struju i sekundarni napon.

$$I_{01}=0.15A$$

$$U_{01}=115V$$

3. Usporedi prijenosne omjere; omjere napona i odgovarajućih broja zavoja:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{479}{258} = 1.857$$

$$\frac{U_{01}}{U_{02}} = \frac{230}{115} = 2$$

Računamo ga iz poznate relacije:

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{U_k \cdot I_k} \quad (23)$$

U_k – napon kratkog spoja

I_k – primarna struja kratkog spoja

$\cos \varphi_k$ – faktor snage kratkog spoja

Ekvivalentnu impedanciju, reaktanciju te djelatni otpor određujemo iz nadomjesne sheme transformatora. Vrijede relacije:

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k}$$

$$X_k = Z_k \cdot \sin \varphi_k$$

$$R_k = Z_k \cdot \cos \varphi_k = \frac{P_k}{I_k^2}$$

$$Z_k = \sqrt{X_k^2 + R_k^2}$$

Z_k , ekvivalentna impedancija

X_k , ukupni induktivni otpor

R_k , ukupni radni otpor

U_{kn} , napon kratkog spoja potreban za nazivnu struju

I_k , struja kratkog spoja

P_k , gubici kratkog spoja

Iznos napona kratkog spoja ovisi o unutarnjem otporu (impedanciji) transformatora. Što je manji unutarnji otpor transformatora manji je i napon kratkog spoja. Ne utječemo bitno, na napon kratkog spoja tako da povećavamo otpor namota. Na napon kratkog spoja možemo utjecati rasipanjem toka. Kod velikih struja kratkog spoja biti će i rasipni tokovi veliki. Što je veće rasipanje magnetskog toka veći je i napon kratkog spoja.

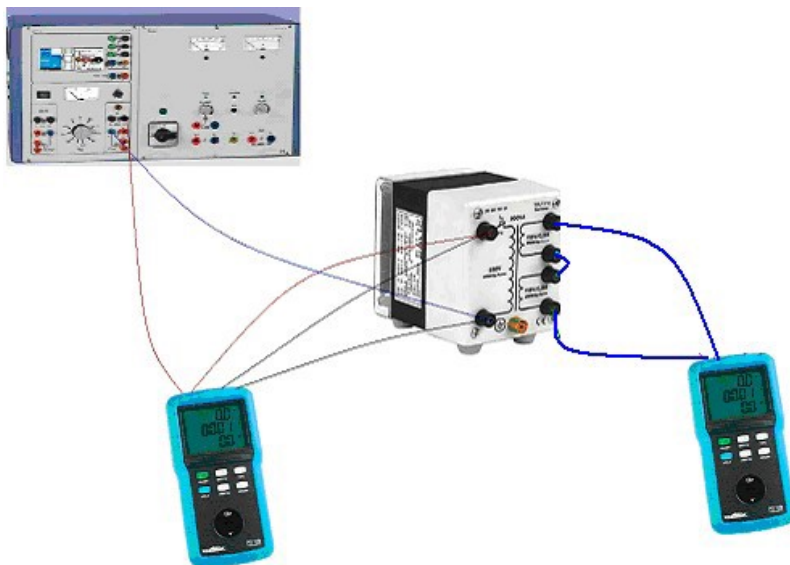
Rasipni tok Φ_{s1} je u fazi sa strujom kratkog spoja na primaru I_{k1} , a rasipni tok Φ_{s2} je u fazi sa strujom kratkog spoja na sekundaru I_{k2}

Primarni rasipni tok Φ_{s1} inducira u primarnom namotu rasipni pad napona $E_{s1} = jI_{k1} \cdot X_1$.

Sekundarni rasipni tok Φ_{s2} inducira u sekundarnom namotu rasipni pad napona $E_{s2} = jI_{k2} \cdot X_2$.

Transformator T1 (jezgra kvadratnog presjeka)

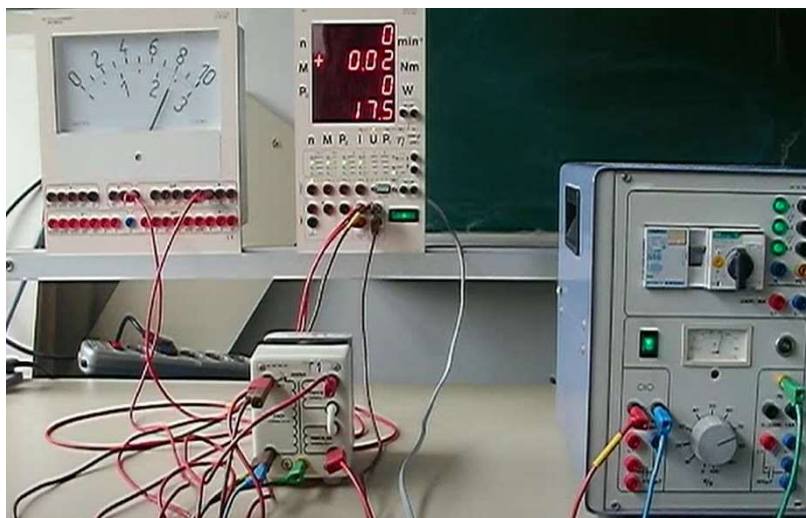
1. Ostvari spoj prema montažnoj shemi na slici 4.24 i shemi na slici 4.17:



Slika 4.24. Montažna shema spajanja transformatora T1 u kratki spoj

2. Kratko spoji sekundarni namot prema shemi i slici. Počevši od 0V, polagano podiži napon dok nazivna struja od 0.9A ne poteče primarnim namotom. Izmjeri primarni napon U_k za nazivnu struju.

$$U_k = 17.5V$$



Slika 4.25. Jedno od mjerenja: $I_{1n}=0.9A$, $U_k=17.5V$, $I_2=0.8 A$

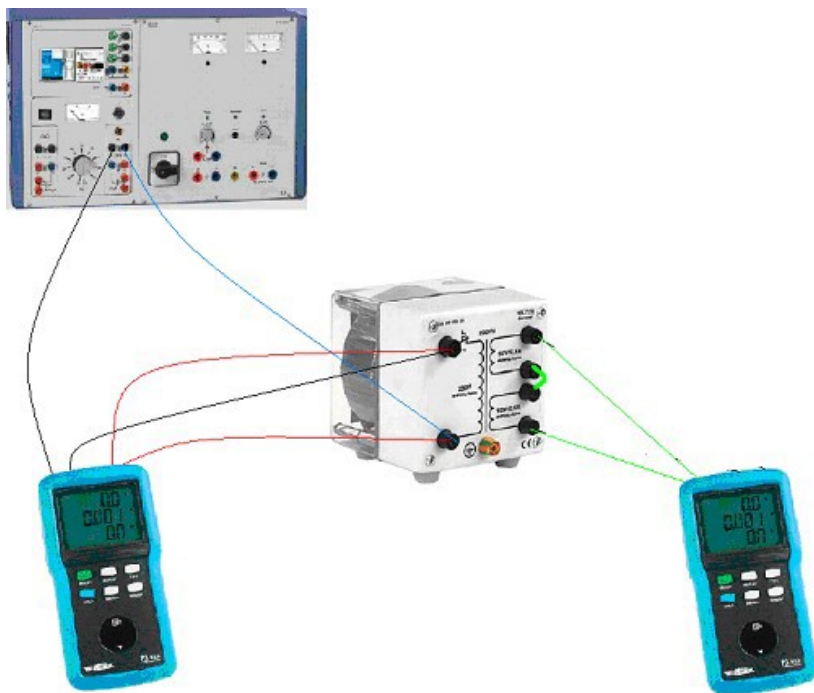
3. Izračunaj relativni napon kratkog spoja u postocima u_k :

$$u_k = \frac{U_k}{U_{1n}} \cdot 100\% = 0.076 \cdot 100\% = 7,6\%$$

4. Izračunaj ustaljenu struju kratkog spoja I_k iz nazivne struje sekundarnog namota i relativnog napona kratkog spoja:

Transformator T2 (toroidni transformator)

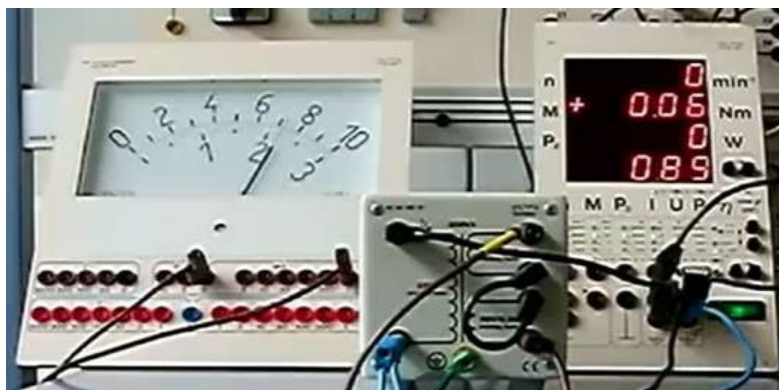
1. Ostvari spoj prema slici 4.27 i shemi 4.17:



Slika 4.27. Montažna shema kratkog spoja T2

2. Kratko spoji sekundarni namot prema shemi i slici. Počevši od 0V, polagano podiži napon dok nazivna struja od 0.9A ne poteče primarnim namotom. Izmjeri primarni namot U_k za nazivnu struju.

$$U_k = 14 \text{ V}$$

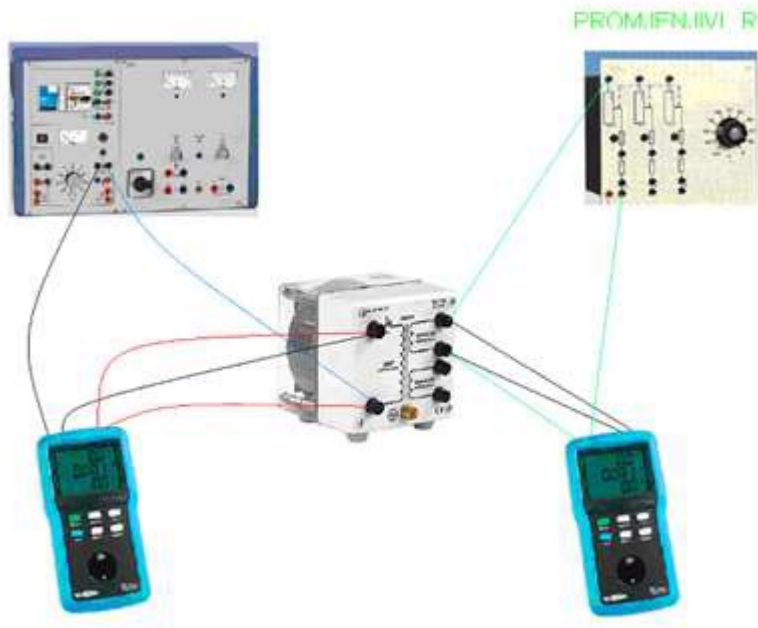


Slika 4.26. Jedno od mjerenja: $I_{1n}=0.9\text{A}$, $U_k=14\text{V}$, $I_2=0.73 \text{ A}$

3. Izračunaj relativni napon kratkog spoja u postocima u_k :

$$u_k = \frac{U_k}{U_{1n}} \cdot 100\% = 0.06 \cdot 100\% = 6\%$$

1. Ostvari spoj prema montažnoj shemi na slici 4.47 i shemi na slici 4.35.



Slika 4.47. Montažna shema opterećenog transformatora T2

2. Mijenjaj iznos otpora te izmjeri struje, napone, snage i faktore snaga na primarnoj i sekundarnoj strani transformatora. Pri 100% opterećenja radni otpor iznosi 1800 Ω.

3. Unesi izmjerene vrijednosti u tablicu 18.

R (%)	U ₁ (V)	I ₁ (A)	P ₁ (W)	cosφ ₁	S ₁ (VA)	Q ₁ (VAr)	U ₂ (V)	I ₂ (A)	P ₂ (W)	cosφ ₂	S ₂ (VA)	Q ₂ (Var)
100	235,7	0,043	10,1	0,99	10,2	0,7	130,6	0,071	9,3	1	9,3	0
80	235,6	0,058	13,6	1	13,6	0,7	130,4	0,097	12,7	1	12,7	0
60	235	0,127	30	1	30	0,6	129	0,223	28,8	1	28,8	0,5
40	235	0,303	71,1	1	71,6	0	126,1	0,543	68,5	1	68,9	1,3
20	234,3	0,633	148,2	1	148	0	120	1,138		1	137,5	2,8

Tablica 18.

4. Izvrši proračune prijenosnog omjera ,faktora snage i usporedi izračunate i izmjerene veličine.

Prijenosni omjer:

$$k = \frac{N_1}{N_2} =$$

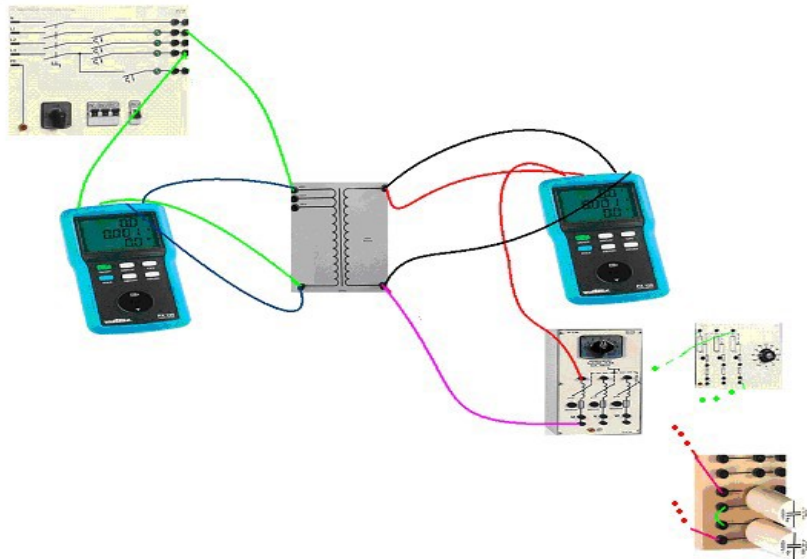
Omjer napona:

$$\frac{U_1}{U_2} =$$

Omjer struja:

Transformator za panel ploču T4

1. Ostvari spoj prema montažnoj shemi na slici 4.51 i shemi na slici 4.40.



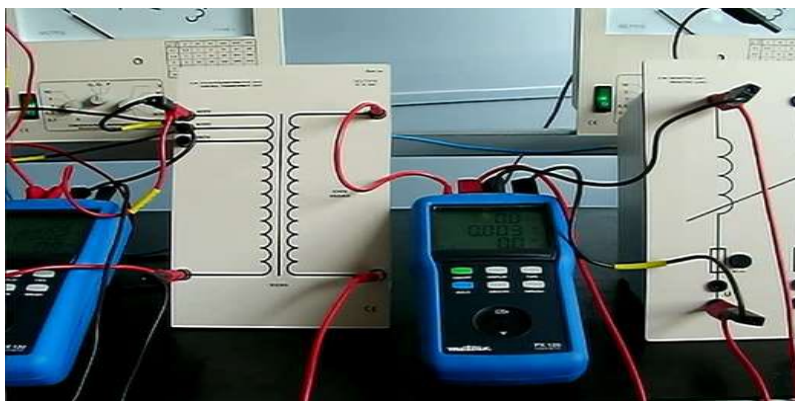
Slika 4.51. Opterećenje transformatora T4

2. Izmjeri struje, napone, snage i faktore snaga na primarnoj i sekundarnoj strani transformatora za različiti stupanj induktivnog tereta

X_L	U_1 (V)	I_1 (A)	P_1 (W)	$\cos\varphi_1$	S_1 (VA)	Q_1 (Var)	U_2 (V)	I_2 (A)	P_2 (W)	$\cos\varphi_2$	S_2 (VA)	Q_2 (Var)
1.	403	0,11	7,5	0,17	44,4	43,8	232,2	0,08	1,8	0,1	18,6	18,5
2.	403	0,158	10	0,16	63,7	62,7	229,3	0,16	3,6	0,09	37,4	37,3
3.	403	0,198	12	0,15	80	78,9	226,7	0,235	4,9	0,09	53,2	53,2
4.	403	0,246	14,6	0,15	98,9	97,8	224,5	0,316	6,3	0,09	70,9	70,7
5.	403	0,294	18	0,15	118,7	117,1	221,8	0,4	8,1	0,09	89	88,7
6.	403	0,336	21,3	0,16	135,2	133,4	219,2	0,474	10	0,09	103,9	103,3
7.	403	0,374	24,8	0,16	151	149	217,2	0,542	11,5	0,1	117,5	117
8.	403	0,417	28,9	0,17	168,4	165,7	214,5	0,616	13,5	0,1	132,7	131,5

Tablica 24. Induktivno opterećenje

Na slici 4.51 prikazan je spoj transformatora za jedno mjerenje induktivno radnog tereta.



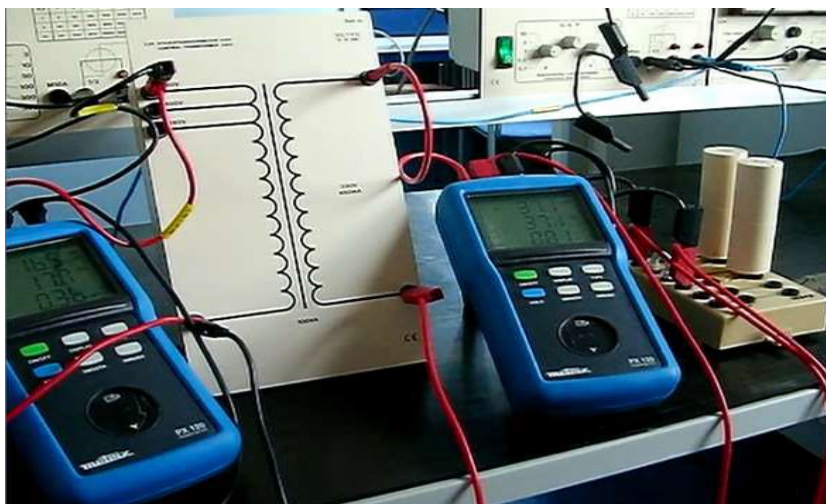
Slika 4.51. Induktivno opterećenje

Kapacitivno opterećenje

C (μF)	U ₁ (V)	I ₁ (A)	P ₁ (W)	cosφ ₁	S ₁ (VA)	Q ₁ (VAr)	U ₂ (V)	I ₂ (A)	P ₂ (W)	cosφ ₂	S ₂ (VA)	Q ₂ (Var)
0,47	404,5	0,046	5,9	0,32	18,8	17,8	236	0,037	0,4	0,05	8,8	8,8
1	404,5	0,03	6	0,49	12,1	10,6	236,5	0,075	0,4	0,02	17,8	17,8
1,5	404,5	0,027	6,1	0,56	11	9,1	238,4	0,119	0,5	0,02	28,5	28,5
2	404,5	0,041	6,5	0,36	17,7	16,4	239,7	0,156	0,4	0,01	37,1	37,1
3	404,5	0,091	7,7	0,21	37,1	36,3	242,2	0,251	0,6	0,1	60,7	60,7
4	404,5	0,148	8,7	0,14	59,7	59,4	244,8	0,34	1	0,01	84,2	84,3

Tablica 25.

Na slici 4.52 prikazano je jedno mjerenje za opterećenje sa kapacitivnim teretom.



Slika 4.52. Kapacitivno opterećenje

3. Izvrši proračune prijenosnog omjera ,faktora snage i usporedi izračunate i izmjerene veličine.

Prijenosni omjer:

$$k = \frac{N_1}{N_2} =$$

Omjer napona:

$$\frac{U_1}{U_2} =$$

Omjer struja:

$$\frac{I_2}{I_1} =$$

Faktor snage na primaru:

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 \cdot I_1}$$

Faktor snage na sekundaru:

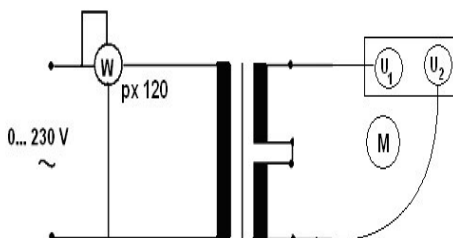
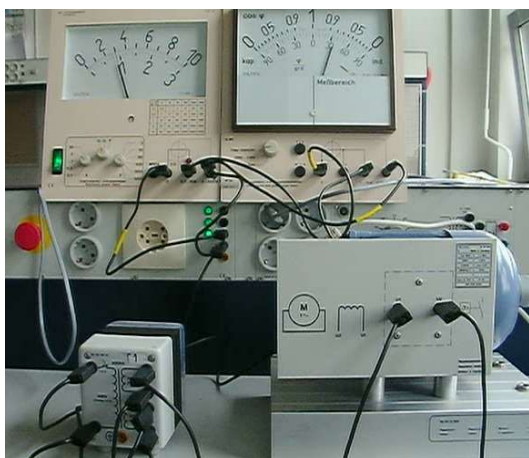
$$\cos\varphi_2 = \frac{P_2}{U_2 \cdot I_2}$$

Opterećenje jednofaznog transformatora pomoću repulzijskog (jednofaznog kolektorskog) motora

U ovoj vježbi potrebno je ispitati promjene snage i faktora snage na primaru prilikom mijenjanja položaja četkica repulzijskog motora

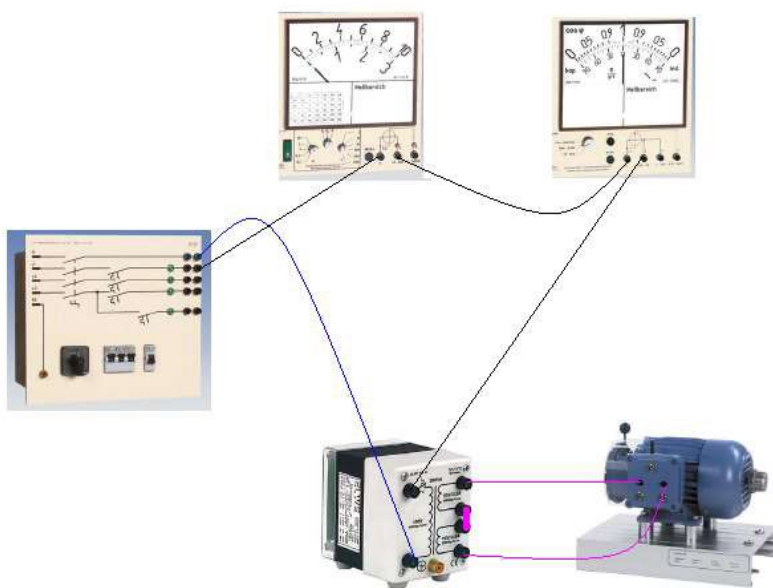
Potrebna oprema za izvođenje vježbe prikazana je na slici 4.55.

- jednofazni transformator
- repulzijski motor
- jedinica za napajanje,
- mjerač faktora snage,
- mjerač radne i jalove snage
- spojni vodovi



Slika 4.55. Oprema i shema spajanja repulzijskog motora

1.Ostvari spoj prema slici4.56.



Slika 4.56. Spajanje repulzijskog motora

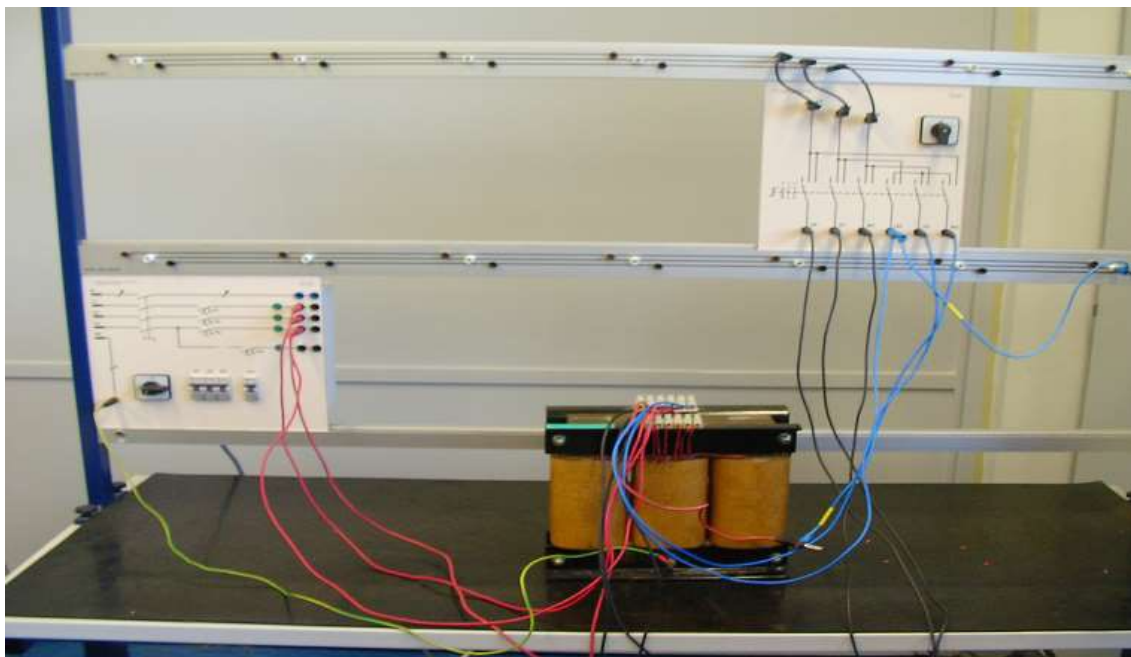
Nacrtaј fazorski dijagram napona na sekundarnoj strani za transformator grupe spoja Yy0!

primarni naponi

sekundarni naponi

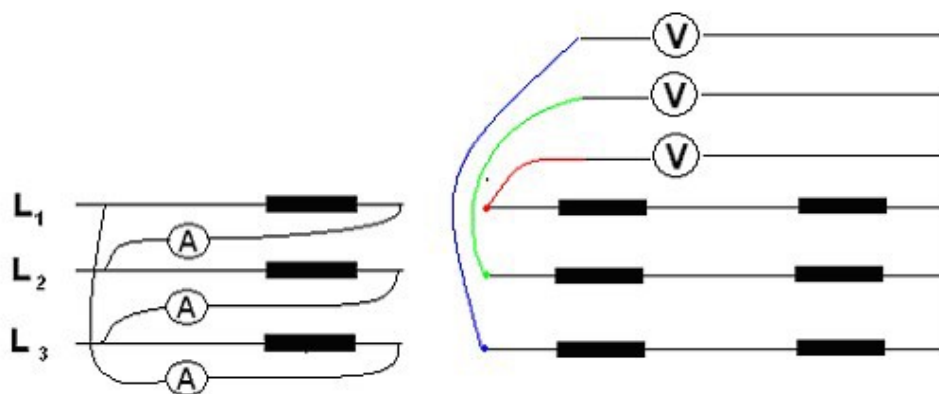
Zašto je dvofazno opterećenje dozvoljeno za trofazne transformatore vektorske grupe (grupe spoja) Yy0?

Izvrši cijelu vježbu na trofaznom transformatoru VOLTA prema slici 5.13. (sheme spajanja ostaju jednake) i usporedi rezultate!



Slika 5.13 Trofazni transformator volta

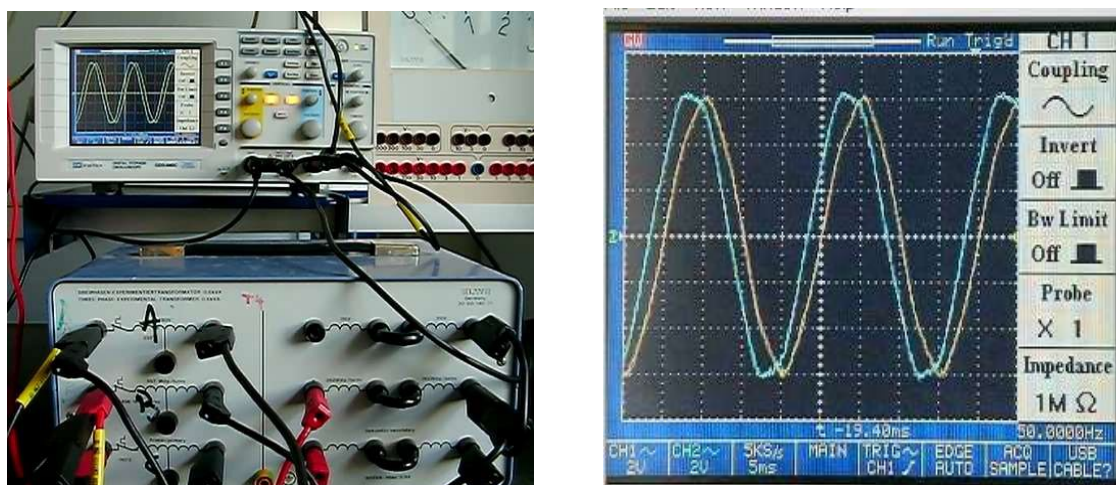
Ako na sekundaru međusobno zamijenimo početke i krajeve namota (slika 5.20) dobivamo spoj Dy11.



Slika 5.20. Shema spajanja za dobivanje grupe spoja Dy11

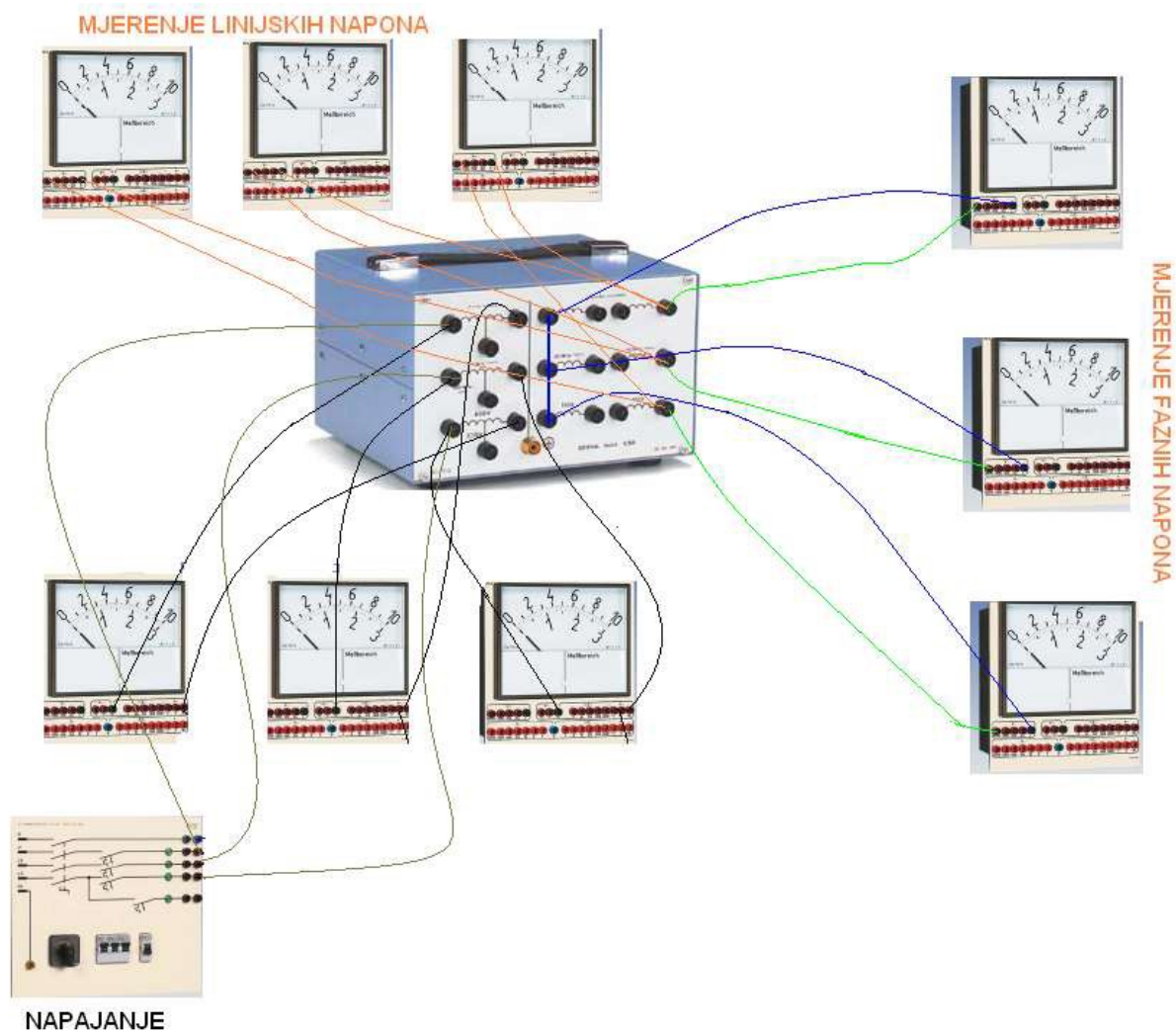
Za ovaj spoj fazni pomak istoimenih napona primara i sekundara iznosi 330° .

Grupa spoja gornje navedenog transformatora je Dy11 (slika 5.21.).



Slika 5.21. Valni oblik napona transformatora grupe spoja Dy11

1. Uspostavi spoj za mjerenje u praznom hodu prema montažnoj shemi na slici 5.22.



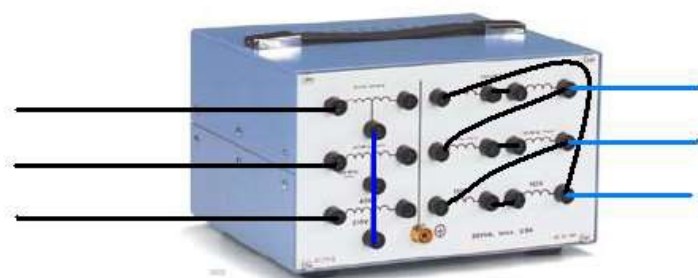
Slika 5.22 Montažna shema za Dy5

Nacrtaj shemu prema slici 5.15.

Prazni hod

1. Uspostavi spoj za mjerenje u praznom hodu prema montažnoj shemi na slici 5.32

pojednostavljena slika:



Slika 5.32. Montažna shema spoja Yd – prazni hod

Ostvari spoj za prazni hod prema shemi 5.25. Nacrtaj shemu

2. Izmjeri primarne struje i sekundarne fazne napone i struje transformatora u praznom hodu. Izmjerene vrijednosti unesi u tablicu 34:

Primar			Sekundar					
I_1	I_2	I_3	I_{a-b}	I_{b-c}	I_{c-a}	U_{a-b}	U_{b-c}	U_{c-a}
[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[V]	[V]	[V]
0.099	0.074	0.099	0.024	0.025	0.025	240	240	240

Tablica 34.

Vježba 7.: Zvijezda spoj Yz5

Cilj vježbe:

Ispitati karakteristike rada trofaznog transformatora grupe spoja Yz5 u praznom hodu i pri nesimetričnom opterećenju.

Svrha vježbe:

Učenik je osposobljen:

- uspostaviti strujni krug transformatora u spoju Yz5 prema zadanoj shemi
- izmjeriti primarne struje i sekundarne napone za simetrično i nesimetrično opterećenje transformatora
- izmjeriti fazne pomake između istoimenih napona na primarnoj i sekundarnoj strani
- odrediti fazni pomak istoimenih napona primarne i sekundarne strane pomoću indeksa (satnog broja) grupe spoja

Potrebna oprema za izvođenje vježbe:

-trofazni transformator sa mogućnošću prespajanja u bilo koju grupu spoja

-djelatno trošilo,

-jedinica za napajanje,

-ampermetar , 6 komada,

-voltmetar, 3 komada

-spojni vodovi.

Oprema se može posložiti kao na slici 5.35.



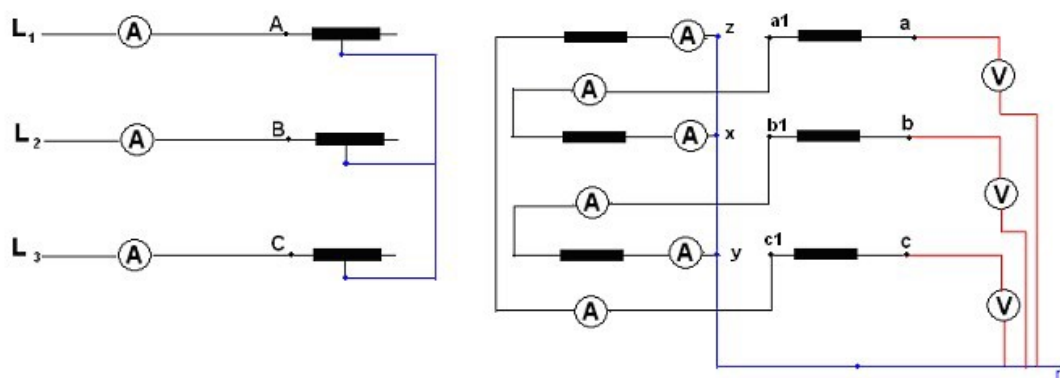
Slika 5.35. Spajanje transformatora u spoj Yz5

Objašnjenje:

Na sekundaru je napon svake faze podijeljen na dva stupa. Krajevi x,y,z su spojeni u kratko u zvjezdište i služe za izvod neutralnog voda. Između neutralnog i faznog voda priključujemo jednofazna trošila. Između dva fazna voda priključujemo dvofazna trošila. Pošto svaka faza sekundara koristi 2 stupa ovaj je spoj pogodan za nesimetrična opterećenja.

PRAZNI HOD

Trofazni transformator se u praznom hodu spaja u spoj Yz5 prema shemi na slici 5.34.



Slika 5.34. Prazni hod trofaznog transformatora grupe spoja Yz5

Istoimeni inducirani naponi na primarnoj i sekundarnoj strani transformatora grupe spoja Yz5 su

međusobno fazno pomaknuti za 150°. Valni oblici napona i spajanje grupe spoja Yz5 prikazani su na slici 5.37.

U praznom hodu sekundarne struje su nula, a sekundarni naponi su manji od faznih napona za približno 16%. To je zbog toga što serijski spojeni namoti na sekundaru nisu u fazi, tj. ne pripadaju istim stupovima željezne jezgre. **Svaki sekundarni namot je jednako podijeljen u dva dijela na dva stupa željezne jezgre.** Kad vektorski zbrojimo inducirane napone serijskog spoja 2 namota namotanih na različitim stupovima sekundarne strane dobit ćemo manji napon od faznog.

Ako želimo u Yz spoju na sekundaru ostvariti puni fazni napon trebamo na sekundaru dodati 1.16 puta više namota po jedinici duljine nego što je to slučaj za Yy spoj.

Ako npr. želimo da sekundarni fazni naponi Yz spoja iznose 230V, moramo spajati serijski 2 namota na dva različita stupa jezgre, ali na njima se mora inducirati po 132V.

Kod Yy spoja dovoljno je spojiti dva namota na istom stupu tako da svaki namot ima 115V.

SIMETRIČNO OPTEREĆENJE

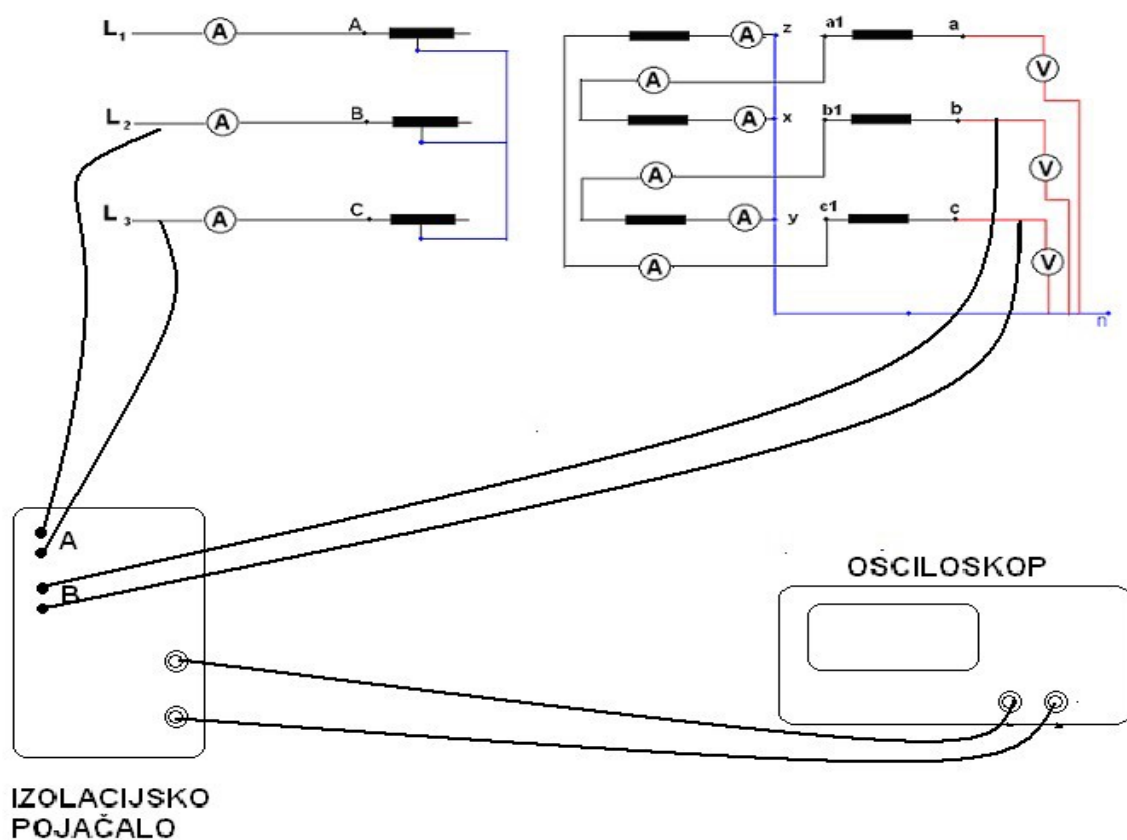
Simetrično opterećenje se ostvaruje priključkom jednakog tereta na svaku fazu.

NESIMETRIČNO OPTEREĆENJE

Za nesimetrično opterećenje uzimamo za primjer jednofazno i dvofazno opterećenje.

1. Jednofazno opterećenje

7. Izmjeni strujni krug prema sljedećoj slici 5.50 tako da se može osciloskopom snimiti fazni pomak između istoimenih napona na primarnoj i sekundarnoj strani:



Slika 5.40. Mjerenje faznog pomaka za Yz

UPOZORENJE: Osciloskop se smije spajati samo preko izolacijskog pojačala, a ne direktno na stezaljke namota.

8. Pokreni strujni krug. Snimi valne oblike istoimenih napona primarne i sekundarne strane i ustanovi njihov fazni pomak. Nacrtaj oscilogram tih dvaju napona

9. Koliko iznosi fazni pomak izmjeren između istoimenih napona na primarnoj i sekundarnoj strani transformatora vektorske grupe (grupe spoja) Yz5?