Paralelni rad transformatora

Jurić, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:318233

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

University North Digital Repository

Sveučilište Sjever

Završni rad br. 423/EL/2018

Paralelni rad transformatora

Filip Jurić, 4098/601

Varaždin, svibanj 2018. godine

Sveučilište
Sjever

Elektrotehnika

Završni rad br. 423/EL/2018

Paralelni rad transformatora

Filip Jurić, 4098/601

acer, matični broj

Mentor

Branko Tomičić, dr.sc.

Varaždin, svibanj 2018. godine

Predgovor

Zahvaljujem se mentoru, profesoru Branku Tomičiću, na nesebičnoj pomoći oko završnog rada, koji je sa svojim stručnim i kompetentnim znanjem, pripomogao da rad bude što bolji. Te me sa svojim entuzijazmom, usmjeravao na prevladavanje problema koji bi mogli nastati prilikom izrade završnog rada.

Te se zahvaljujem i profesoru Stanku Vinceku. Koji mi je omogućio korištenje laboratorijske opreme, bez koje ne bi bilo moguće realizirati završni rad. Te što je nadzirao sva mjerenja i osigurao siguran način rada.

Sažetak

U završnom radu detaljno se opisuje što je transformator, te fizikalne pojave koje se javljaju tokom njegovom rada. Korišteni su vektorski prikazi izmjeničnih električnih veličina. Za rad su korištene odgovarajuće formule i sheme kako bi lakše bilo shvatiti stvari vezane uz samu pojavu i rad transformatora. U radu su navedeni glavni konstrukciji dijelovi transformatora.

U glavnom dijelu završnog rada govori se o uvjetima koji nužno moraju biti zadovoljeni,kako bi transformatori u paralelnom radu ispravno radili, te u kojim uvjetima se ne smiju transformatori nalaziti kada se zahtjeva njihov paralelni rad.

U laboratoriji su napravljena mjerenja, te je opisan postupak njihove provedbe. Nakon svakog mjerenja dobiveni su rezultati koji su se koristili za daljnju računsku analizu.

KLJUČNE RIJEČI: transformator, struja, napon, snaga, električna energija, paralelni rad transformator

Abstract

In the final work, it is described in detail what is the transformer, and the physical appearance that occur during his work. Vector illustrations of alternating electrical quantities were used. Appropriate formulas and schemes were used for the work to make it easier to understand things related to the appearance and operation of the transformer. The main structure of this work are the parts of the transformer.

The main part of the final work discusses the conditions that must necessarily be met, so that the transformers work in the parallel operation properly and under which conditions the transformers may not be located when their parallel operation is needed

Measurements have been made in the laboratory and the procedure for their implementation is described. After each measurement, the results obtained were used for further computational analysis.

KEYWORDS: transformer, current, voltage, power, electrical energy, parallel transformer operation

Popis korištenih kratica

VN	Visokonaponska strana
NN	Niskonaponska strana

Sadržaj

1. Uvod 6

1.1. Osnove pretvorbe mehaničke i električne energije 6

2. Transformatori 9

2.1. Općenito o transformatorima 9
2.2. Faradayev zakon indukcije 10
2.3. Idealni transformator 11
2.4. Realni transformator 15
2.5. Struja magnetiziranja i gubici 15
2.6. Nadomjesna shema transformatora 18
2.7. Pokus praznog hoda i kratkog spoja 19
2.8. Dijelovi transformatora 22
2.8.1. Kotao 22
2.8.2. Namoti 23
2.8.3. Magnetska jezgra 23
2.8.4. Konzervator 24
2.9. Paralelni rad transformatora 24
2.9.1. Paralelni rad transformatora pri nejednakim omjerima transformacije 27
2.9.2. Paralelni rad transformatora pri nejednakim naponima kratkog spoja 29
2.9.3. Uvjeti pripadnosti transformatora istoj grupi 32

3. Izračun i mjerenje struje izjednačenja kod krivih spojeva paralelnog rada transformatora 33

3.1. Mjerenje i izračun napona kratkog spoja 33
3.2. Izračun struje izjednačenja 37
3.3. Mjerenje struje izjednačenja kod krivih spojeva 38

4. Zaključak 42
5. Literatura 43
6. Popis slika 44

1. Uvod

Potražnja za električnom energijom sve više raste, kao i potrošnja same te energije radi mnogobrojnih prednosti koje nam nudi. Također električna energija je sve više zastupljenija u mnogim područjima rada i djelatnostima.

Postoje mnoge mogućnosti iz kojih se dobiva električna energija,kao što su:

- mehanička energija,
- toplinska energija,
- nuklearna energija,
- energija vodotoka.

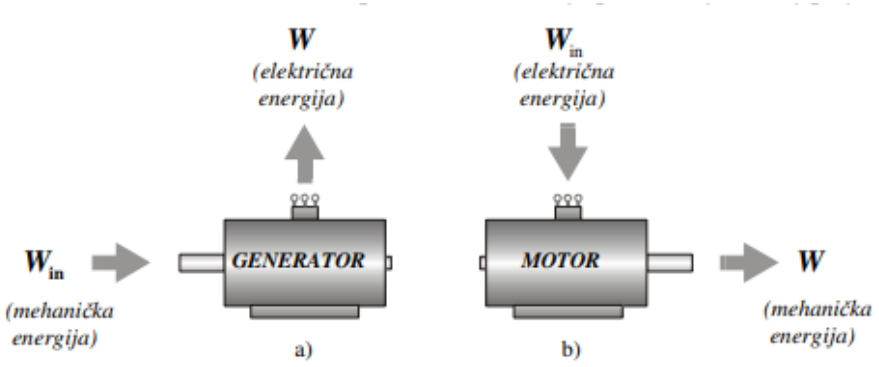
Kako znanost napreduje tako napreduje i elektrotehnika. Počinju se istraživati bolja alternativna rješenja za dobivanje električne energije, kao što su izvor sunca, vjetra, termalna energija i dr. [5]

1.1. Osnove pretvorbe mehaničke i električne energije

Pretvorba energije može biti proces koji je povratan ili nepovratan. Kod nepovratnog procesa,jedan dio energije se pretvara u oblik koji više nije moguće iskoristiti za bilo koju daljnju uporabu.

Primjer takvog nepovratnog procesa je proces u kojem dio energije pretvara u toplinu koja odlazi u okolinu.

Električni strojevi pretvaraju mehaničku u električnu energiju - generatori ili električnu u mehaničku energiju- elektromotori,slika 1.1.1, te električnu u električnu energiju, što radi transformator. [1]



Slika 1.1. Pretvorba energije u električnom stroju
a) generator,
b) motor.

Slika 1.1.1. Pretvorba energije [1]

Između električnih motora i generatora nema nikakve posebne fizikalne razlike. I jedni i drugi mogu pretvarati energiju u oba smjera.

Generatori mogu pretvarati električnu energiju u mehaničku,

kao motori. Jednako tako i motori mogu pretvarati mehaničku energiju u električnu, kao generatori.

Pri pretvorbi energije je važan odnos dovedene i predane energije. Predana energija je uvijek manja od primljene zbog gubitka koji nastaju pri pretvorbi. [1]:

2. Transformatori

2.1. Općenito o transformatorima

Gradnja transformatora i električnih strojeva temelji se na dvjema vrstama fizikalnih pojava, na električkim i magnetskim pojavama, koje usko povezuju zakon protjecanja i zakon elektromagnetske indukcije.

Nema električkih pojava bez magnetskih , a niti obrnuto.

Iz osnova elektrotehnike poznato je da se oko svakog vodiča kojim teče električna struja stvara magnetsko polje,slika 2.1.1. Jakost magnetskog polja i struja koja teče kroz taj vodič su proporcionalne. Ako kroz više paralelnih vodiča teče struja u istom smjeru tada je magnetsko polje, koje se stvori oko njih, proporcionalno sumi svih tih struja. Napravi li se s jednim vodičem svitak od više zavoja i kroz njega pusti struja, dobit će se magnetsko polje čija je jakost proporcionalna umnošku struje i broja zavoja. Ovdje se dolazi do zakona protjecanja koji govori: „linijski integral jakosti magnetskog polja po zatvorenoj konturi jednak je ukupnoj struji što prolazi kroz površinu koju ta kontura zatvara“. [1]

Taj zakon prikazan je sljedećom formulom :

$$\oint_{l_{Fe}} \vec{H}\, d\vec{l} = \sum I = \theta\,, \qquad (1)$$

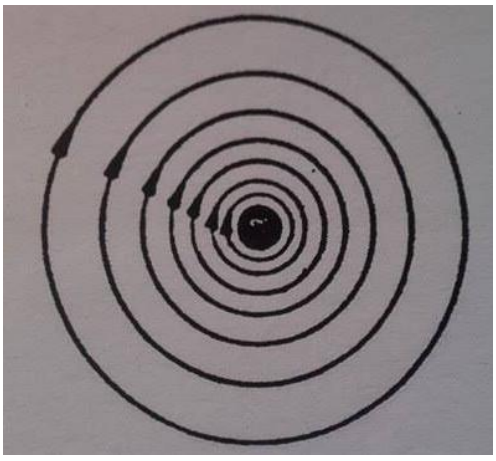
gdje su:

H - jakost magnetskog polja,

I - struja,

l_{Fe} - duljina silnica ,

θ - ukupno protjecanje ili uzbuda



Slika 2.1.1. Magnetsko polje oko vodiča [1]

Polje magnetske indukcije prikazuje se u obliku silnica, a ukupni broj tih silnica u nekom presjeku naziva se magnetskim tokom. Magnetska indukcija proporcionalna je s jakosti magnetskog polja i ovisna je o materijalu tj. njegovoj permeabilnosti.

$$B = \mu \cdot H, \tag{2}$$

gdje je μ permeabilnost materijala.

2.2. Faradayev zakon indukcije

Faradayev zakon ili zakon elektromagnetske indukcije je najvažniji zakon na kojem se zasniva rad transformatora. On glasi: „Promjenjivi magnetski tok, u svakom zavoju unutar sebe, inducira električki napon“. Taj napon je proporcionalan brzini promjene toka pa jednadžba za inducirani napon glasi (za slijedeće izvode formula korištena je literatura [1]): -:

$$e_z(t) = -\frac{d\emptyset(t)}{dt}, \tag{3}$$

gdje je:

Φ - magnetski tok,

e_z- inducirani napon zavoja.

Ako se uzme u obzir broj zavoja dobit će se :

$$e(t) = -N\frac{d\emptyset(t)}{dt}. \tag{4}$$

Umnoškom vrijednosti toka i broja zavoja dobiven je pojam ulančanog magnetskog toka i tada jednadžba glasi:

$$e(t) = -\frac{d\Psi(t)}{dt}. \tag{5}$$

Gdje je Ψ ulančani magnetski tok.

Prema zakonu protjecanja, uzbuđuje se magnetski tok, koji je proporcionalan struji. Zbog toga je i ulančani tok proporcionalan struji, a to je izraženo prema sljedećoj jednadžbi:

$$\Psi(t) = L \cdot i \tag{6}$$

gdje je „L“ koeficijent samoindukcije ili induktivitet.

Samoinduktivitet je veličina koja prikazuje vrijednost uzbuđenog ulančanog toka pri struji od 1A.

Tako proizlazi glavna formula 2.2.1:

$$\varepsilon_{ind} = -N \cdot \frac{d\emptyset}{dt} \qquad (7)$$

Gdje je:

N- broj zavoja petlje

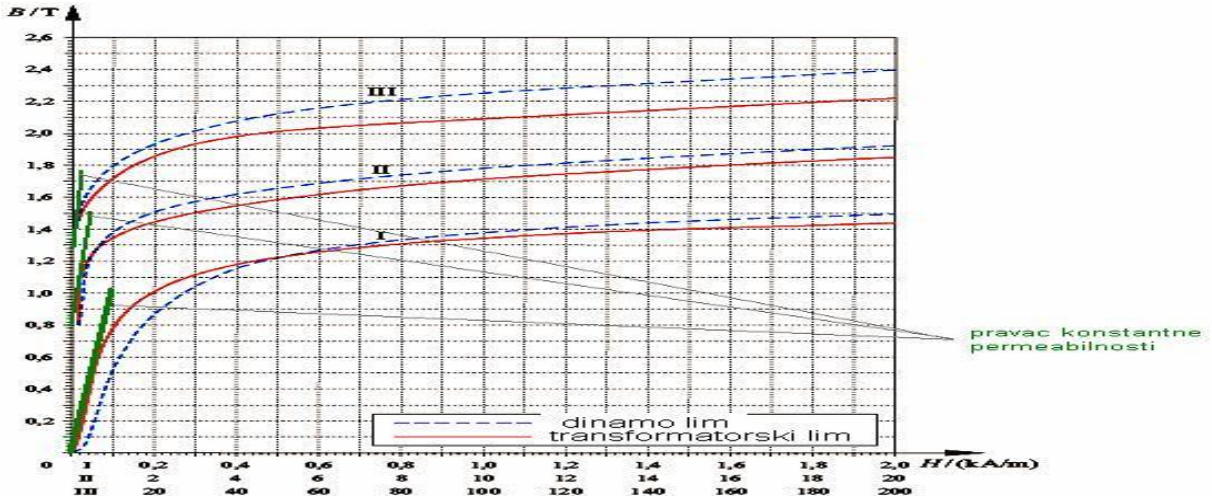
$\frac{d\emptyset}{dt}$ – brzina promjene magnetskog toka

ε_{ind}-inducirani napon

Predznak minus u gore navedenoj formuli ima veze sa Lentzovim zakonom. Govori da inducirani napon ima suprotan smjer djelovanja od uzroka što ga je stvorio. Inducirana elektromotorna sila pokušava proizvesti struju takvog smjera koja se svojim učinkom protivi promjeni magnetskog toka. [1]

2.3. Idealni transformator

Najprije je potrebno razmotriti rad idealnog transformatora kod kojeg se zanemaruju gubici i padovi napona. To je moguće pod pretpostavkom da se kod takvog transformatora svaka silnica zatvara kroz jezgru pa prolazi kroz oba namota, da su gubici u bakru i željezu zanemarivi i da neće doći do zasićenja željeza tj. da će biti konstantna magnetska permeabilnost, kao na slici 2.3.1.



Slika 2.3.1 Krivulja magnetiziranja željeza [2]

Buduća razmatranja kod magnetiziranja jezgre idealnog transformatora pretpostavljena su prema slici 2.3.2. odnosno praktički radit će se na pravcu koji je na slici 2.3.1 ucrtan isprekidanom linijom i predstavlja konstantnu permeabilnost.

Slika 2.3.2. Skica jednofaznog transformatora [3]

Način rada transformatora prikazuje se i objašnjava prema slici 2.3.2. na primjeru jednofaznog dvonamotnog transformatora jer se i za višefazne transformatore spojne sheme i vektorski dijagrami prikazuju jednofazno.

Priključi li se namot na izvor izmjeničnog sinusnog napona konstantne efektivne vrijednosti , s konstantnom frekvencijom on postaje primarni namot.

Priključeni izmjenični napon, uz otvorenu sklopku na sekundaru S, potjerat će kroz taj namot izmjeničnu struju – struju magnetiziranja ili uzbude. Po zakonu protjecanja ona s primarnim namotajem stvori protjecanje koje uzbudi izmjenični magnetski tok u cijelosti zatvoren kroz željeznu jezgru. Prema zakonu elektromagnetske indukcije, opisano u prethodnom poglavlju, taj tok će u primarnom namotaju inducirati protunapon opisan jednadžbom 2.3.1. (za slijedeće izvode formula korištena je literatura [3]):

Jednadžba 2.3.1, se može prikazati preko ove formule 2.3.2:

$$E_1 \cdot \sqrt{2} = N_1 \cdot \emptyset_m \cdot e^{j\omega t} \cdot \mathrm{j}\omega \tag{8}$$

Uvrštavanjem jednadžbi dobiva se izraz 2.3.3 :

$$E_1 \cdot \sqrt{2} = -N_1 \cdot \frac{U_1 \cdot \sqrt{2}}{\omega \cdot N_1} \cdot (-j) \cdot e^{j\omega t} \cdot j\omega. \tag{9}$$

Prilikom raspisivanja izraza dobiva se vektorski i analitički izraz. Iz čega se dobiva izraz 2.3.4.

$$\overrightarrow{E_1} = -\overrightarrow{U_1} \tag{10}$$

Isti magnetski tok, koji je prema zakonu elektromagnetske indukcije inducirao napon u

primarnom namotu , inducirat će prema istom zakonu i u sekundarnom namotu, napon koji se zove još i napon međuindukcije za slijedeće izvode formula korištena je literatura [1]):

$$e_{2=-}N_2 \frac{d\emptyset(t)}{dt}. \quad (11)$$

Napon prethodne jednadžbe aktivni je napon koji će potjerati struju kroz trošilo ako se prema slici 2.3.2 sklopkom zatvori strujni sekundarni krug.

Kao što se u primaru inducira napon koji drži ravnotežu priključenom naponu, tako se u sekundaru inducira napon koji je jednak naponu otvorenih stezaljki:

$$\overrightarrow{E_2} = \overrightarrow{U_2}. \quad (12)$$

Iz jednadžbi je vidljivo da se u primarnom i sekundarnom namotu inducirani naponi odnose kao omjer zavoja pa slijedi:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (13)$$

Jednadžba predstavlja osnovnu jednadžbu transformatora. Prikazuje mogućnost da se električna energija s jednog naponskog nivoa transformira u drugi.

Ako se sklopkom prema slici 2.3.2 zatvori strujni krug u sekundaru i time priključi potrošač odgovarajuće impedancije, pod djelovanjem napona kroz taj krug će poteći struja opterećenja koja je određena jednadžbom:

$$I_2 = \frac{U_z}{U_T} = \frac{E_2}{\sqrt{R_T^2 + X_T^2}}. \quad (14)$$

Gdje je :

R_t –radna komponenta impedancije

X_t –reaktivna komponenta impedancije.

Ova struja će za napona biti pomaknuta za kut koji je određen sljedećom jednadžbom:

$$\emptyset_2 = arctg \frac{X_T}{R_T}. \quad (15)$$

Struja opterećenja, prema zakonu protjecanja , u sekundarnim zavojima stvara protjecanje. U prethodnim razmatranjima ustanovljeno je da primarna struja magnetiziranja sa primarnim zavojima stvara protjecanje koje je potrebno da se uzbudi tok potreban za induciranje protunapona koji drži ravnotežu sa priključenim naponom. Ova ravnoteža bi sa sekundarnim protjecanjem bila narušena jer to protjecanje uzbuđuje novi magnetski tok koji nastoji promijeniti tok stvoren protjecanjem praznog hoda. Kako bi se ravnoteža u stacionarnom stanju održala, priključeni primarni napon će automatski potjerati dodatnu struju koja će poništiti djelovanje sekundarne struje odnosno sekundarno protjecanje. Iz toga proizlazi uvjet koji mora biti ispunjen, a prikazan je sljedećom jednadžbom:

$$\overrightarrow{I_p} \cdot N_1 = \overrightarrow{-I_2} \cdot N_2. \quad (16)$$

Ako se uzme da je struja praznog hoda jednaka nuli, vrijedi sljedeća jednadžba:

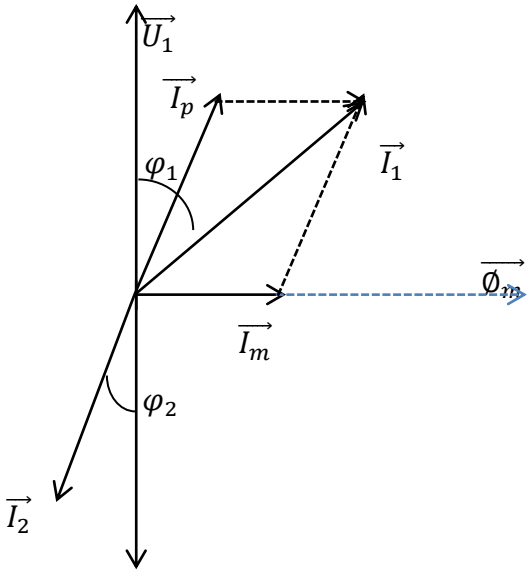
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}. \quad (18)$$

Osnovna veličina transformatora je omjer induciranih napona koja se naziva prijenosni omjer:

$$K_{12} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (19)$$

Kod crtanja vektorskih dijagrama uzima se da je prijenosni omjer k_{12}=1 zbog pojednostavljenog i lakšeg pregleda, odnosno reduciraju se sekundarne veličine na primarne. [5]

Iz prethodnih uvjeta slijedi vektorski dijagram idealnog transformatora prikazan na slici 2.4.



Slika 2.3.3. Vektorski dijagram opterećenja idealnog transformatora [2]

Primarno iz mreže idealni transformator uzima jalovu snagu koja mu je potrebna za magnetiziranje željeza i prividnu snagu koju sekundarno predaje trošilu.

2.4. Realni transformator

Uvođenjem veličina koje su zanemarene kod idealnog transformatora, dolazi se do realnog transformatora.

U realnom transformatoru uzimaju se stvarna svojstva stroja koja su navedena u 4 kratka opisa:
1) Primarni i sekundarni namoti imaju omski otpor. Zbog tih otpora kod prolaska struje nastaju padovi napona. Pad napona u primarnom namotu proporcionalan je sa primarnom strujom. Pad napona u sekundaru (ili reducirana veličina na primar) proporcionalan je sa sekundarnom strujom. Zbog protjecanja struje na ohmskim otporima nastaju gubici, Koji se računaju prema sljedećoj jednadžbi :

$$P_{cu} = P_{cu1} + P_{cu2} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2. \qquad (20)$$

2) Kod idealnog transformatora pretpostavljeno je da se magnetske silnice zatvaraju u potpunosti kroz željeznu jezgru. No, kod realnog transformatora se one zatvaraju i kroz zrak jer permeabilnost željezne jezgre nije beskonačno velika. Silnice koje se zatvaraju samo oko zavoja primarnog i sekundarnog namota čine rasipni tok. Primarni rasipni tok i sekundarni rasipni tok u fazi su sa pripadajućim strujama i u odgovarajućim namotima induciraju protunapone koji su jednaki umnošku struje i rasipnog induktivnog otpora. Ovi padovi napona uzrokovani su rasipnim induktivitetom i prethode za kut od 90° za magnetskim tokovima koji su ih inducirali.
3) Kod izmjeničnog magnetiziranja željezne jezgre transformatora javljaju se gubici u željezu koji su posljedica djelovanja vrtložnih struja i magnetiziranja po petlji histereze.
4) Ovisnost magnetske indukcije o jakosti magnetskog polja, nije linearna, već je opisana petljom histereze. To je razlog da uz sinusno priključeni napon i uz sinusni uzbuđeni magnetski tok, struja magnetiziranja nije sinusna. Pomoću Fourierove analize ovakva struja se može rastaviti na harmoničke članove. [1]

2.5. Struja magnetiziranja i gubici

Za uzbuđivanje magnetskog polja u jezgri transformatora potrebni su prema zakonu protjecanja uzbudni amperzavoji, koji će ovisiti o potrebnoj veličini magnetskog toka u jezgri,

geometrijskim dimenzijama jezgre, te o magnetskim karakteristikama limova, iz kojih je jezgra načinjena.

Ako transformator priključimo primarno na mrežu, čiji je napon sinusan, mora se u jezgri uzbuditi sinusni magnetski tok,čija je tjemena vrijednost prema jednadžbi (za slijedeće izvode formula korištena je literatura [1]) -:-

$$\emptyset_m = \frac{U_1}{4{,}44 * f * N}. \tag{21}$$

Prilikom proračuna struje magnetiziranja pretpostavit će se da nema rasipnog toka, tj. da magnetski tok u svim presjecima jezgre ima istu momentalnu vrijednost. Na taj način za razna mjesta magnetskog kruga dobijemo, uz pretpostavku jednolike raspodjele toka po presjeku, indukciju prema jednadžbi-:-

$$B_x = \frac{\emptyset_t}{S_x}, \tag{22}$$

gdje je S_x presjek na tom mjestu jezgre.

Uz sinusan tok biti će i promjena indukcije također sinusna. U zračnim rasporima magnetskog kruga iznosit će jakost magnetskog polja-:-

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_o}. \tag{23}$$

Ako se uzbuda željezne jezgre periodički mijenja, magnetiziranje jezgre odvija se po tzv. petlji histreze. Za svaku momentalnu vrijednost jakosti magnetskog polja, dobije se iz petlje histereze pripadna magnetska indukcija. Kada se zna jakost magnetskog polja na svim mjestima u jezgri, može se iz zakona protjecanja izračunati u tom trenutku potrebne amper zavoje struje magnetiziranja po izrazu-:-

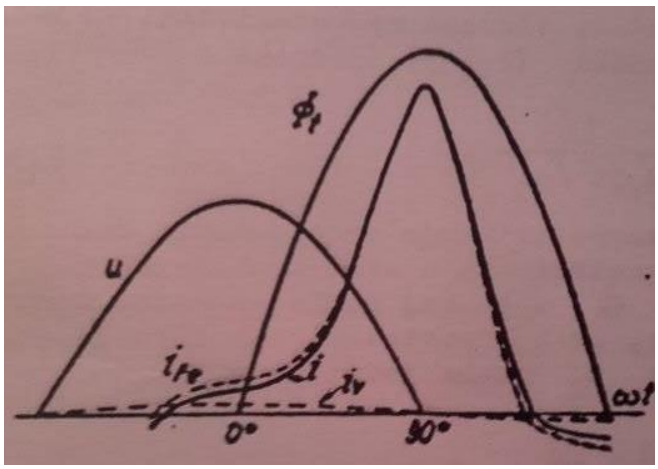
$$\oint_{l_{Fe}} \vec{H}\, d\vec{l} = \sum i, \tag{24}$$

Integracija se može provesti odvojeno za dio puta kroz željezo i dio puta kroz zrak:

$$\frac{1}{W}\left(\oint H_{Fe} dl + \int H_\sigma dl\right) = i_\mu = i_{Fe} + i_\sigma \tag{25}$$

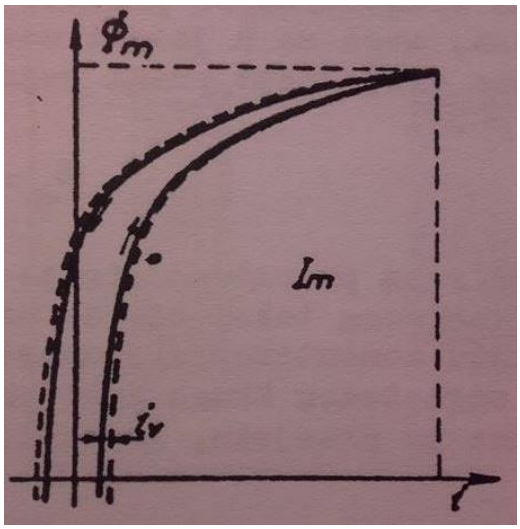
Potrebna uzbudna struja se može rastaviti na struju za uzbude željeza i struju za uzbuđivanje zračnog raspora.

Na slici 2.5.1.je provedena analiza struje magnetiziranja željeza za jednu polu periodu. Da bi se inducirao protunapon narinutom naponu javlja se u jezgri sinusni tok, koji zaostaje za narinutim naponom za 90°. [1]



Slika 2.5.1. Prikaz magnetiziranja željeza za jednu polu periodu [1]

Iz statičke petlje histereze može se za razne vrijednosti toga toka izračunati potrebna uzbudna struju. Tako se dobije statička magnetska karakteristika kruga tj. petlja tok-struja prikazana punom linijom na slici 2.5.2.



Slika 2.5.2. Prikaz statičke magnetske karakteristike [1]

Iz te petlje može se, poznavajući vremensku promjenu toka, dobiti odgovarajuću vremensku promjenu struje magnetiziranja .Ta struja nije sinusna. Kako je polu perioda simetrična, tada ona sadrži neparne sinusne i kosinusne članove viših harmonika.

2.6. Nadomjesna shema transformatora

Jednadžbe transformatora koje su pisane običajnim načinom, dovode do nepoželjnog oblika vektorskog dijagrama, gdje se navodi na pomisao pogrešnog polariteta sekundarnog napona. Kod nadomjesne sheme važno je preračunati sekundarne vrijednosti na primarne odnosno sekundarne vrijednosti reducirati na primarnu stranu transformatora tako da svi prethodno uzeti gubici ostanu nepromijenjeni. Kod reduciranja sekundarnih vrijednosti magnetske prilike u transformatoru moraju ostati nepromijenjene.

Magnetski tok oko svitka zatvarat će se kroz jezgru tako da obuhvati primar i sekundar te dio samo oko sebe. Oni magnetski tokovi koji obuhvaćaju samo jedan namot ne sudjeluju u procesu transformacije pa se oni zato zovu rasipni magnetski tokovi .Oni budu u fazi sa vektorima svojih struja(za slijedeće izvode formula korištena je literatura [2]): :

$$U_{\sigma 1} = I_1 X_{\sigma 1} \tag{26}$$
$$U_{\sigma 2} = I_2 X_{\sigma 2} \, .$$

Naponske jednadžbe za primarni i sekundarni krug jednake su :

$$U_1 = U_{M1} + U_{R1} + U_{\sigma 1} \tag{27}$$
$$U_2 = U_{M2} - U_{R2} - U_{\sigma 2} \, .$$

Izvor u realnom transformatoru sa željeznom jezgrom sa sobom nosi struju magnetiziranja te struju opterećenja. Prema tome, strujna jednadžba glasi:

$$I_1 = I_0 + I_p \, . \tag{28}$$

Gdje je :

I_p- struja opterećenja,

I_0- struja praznog hoda

Prilikom reduciranja sekundarnih veličina na primar, naponska jednadžba za sekundar glasi:

$$U_2 = U_M - \dot{U}_{\sigma 2} - \dot{U}_{R2}, \tag{30}$$

a za struju vrijedi:

$$I_1 = I_0 + \dot{I}_2, \tag{31}$$

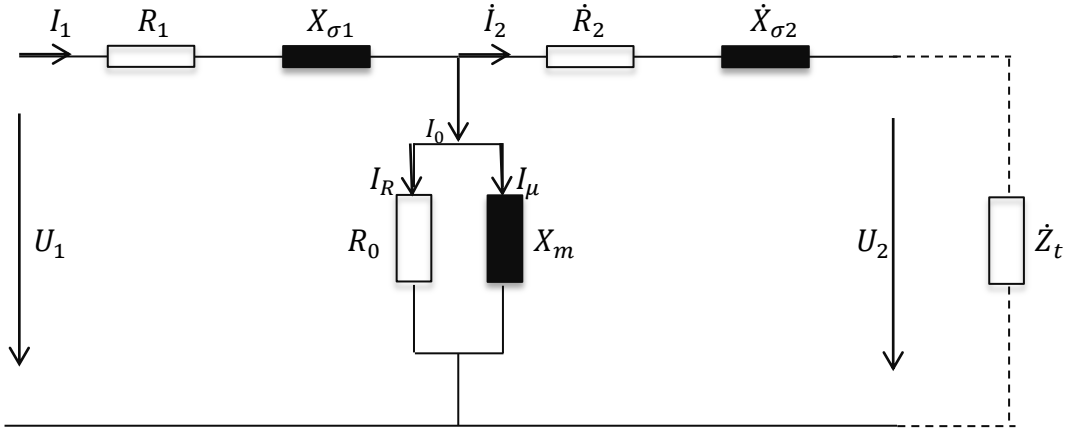
gdje je :

$$\dot{U}_2 = U_2 \frac{N_1}{N_2}, \tag{32}$$
$$\dot{U}_{\sigma 2} = U_{\sigma 2} \frac{N_1}{N_2} \, ,$$

$$\dot{U}_{R2} = U_{R2}\frac{N_1}{N_2},$$

$$\dot{I}_2 = I_p\frac{N_1}{N_2}.$$

Sada se može transformator prikazati pomoću nadomjesne sheme 2.6.1.



Slika 2.6.1 Nadomjesna shema transformatora [4]

Gdje su :

R_1 - radni otpor

$\dot{R}_2$ – radni otpor

R_0 - otpor koji predstavlja gubitke u željezu,

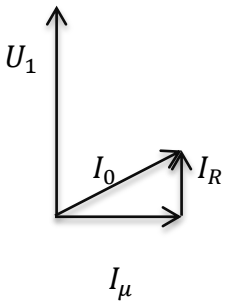
X_m- reaktancija kojoj dodjeljujemo glavni magnetski tok $\emptyset_{gl}$,

$X_{\sigma 1}$- reaktancija rasipnog toka na primaru,

$X_{\sigma 2}$- reaktancija rasipnog toka na sekundaru.

2.7. Pokus praznog hoda i kratkog spoja

Pomoću pokusa praznog hoda i kratkog spoja dobivaju se svi glavni podaci o nekom transformatoru. Pri praznom hodu struje praznog hoda su relativno male, te se tako može zanemariti padove napona na radnom otporu i rasipnoj reaktanciji i gubitke u bakru. Iz toga slijedi vektorski dijagram 2.7.1.



Slika 2.7.1.Vektorski dijagram [3]

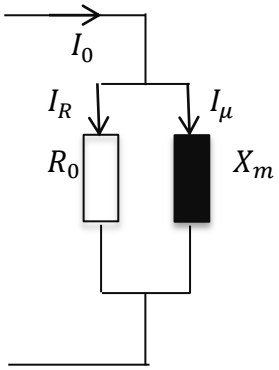
Pri mjerenju primarnog i sekundarnog napona dobiva se :

$$\frac{U_1}{U_2} \cong \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\,; \qquad (33)$$

$$P_0 \cong P_{Fe}.$$

Kod mjerenja snage, koju uzima transformator u praznom hodu kod nominalnog napona iz mreže, dobivaju se nominalni gubici u željezu, zbog toga što se gubitke u bakru tada može zanemariti zbog male struje koju u toj radnoj točki transformator uzima iz mreže.

U nadomjesnoj shemi na slici 2.7.2. su zanemareni radni otpori i rasipni tokovi. [3]



Slika 2.7.2. Nadomjesna shema za prazni hod [3]

Pomoću vektorskog dijagrama 2.7.1. dolazimo do sljedećih formula-:

$$P_0 = \frac{U_1^2}{R_0}\,, \qquad (34)$$

$$R_0 = \frac{U_1^2}{P_0}\,, \qquad (35)$$

$$I_R = \frac{U_1}{R_0}\,, \qquad (36)$$

$$I_\mu = \sqrt{I_0^2 - I_R^2}\,, \qquad (37)$$

$$X_m = \frac{U_1}{I_\mu}\quad . \qquad (38)$$

Gdje je:

P_0- snaga transformatora u praznom hodu koju uzima iz mreže

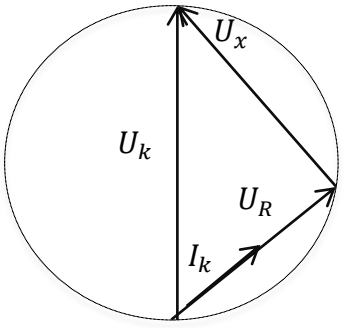
I_R- komponenta struje praznog hoda

I_μ- struja magnetiziranja

X_m- reaktancija glavnog magnetskog toka

Kada se koristi pokus kratkog spoja, tada se sekundarne stezaljke transformatora kratko spoje i narine se na primar onaj napon koji protjera kroz namote transformatora nominalnu struju. Taj napon naziva se napon kratkog spoja . Radi malog napona se može zanemariti struja magnetiziranja. Napon na sekundarnim stezaljkama je jednak nuli.

Pokus kratkog spoja se odnosi na nominalne struje. Pogonsko stanje kratkog spoja vrlo je nepovoljno, jer struja kratkog spoja znatno povećava gubitke u namotima koji rastu s kvadratom vrijednosti struje. Posljedice mogu biti pogubne na transformator, ako u kratkom vremenu ne dođe do prekida ovakvog pogonskog stanja. U transformatoru se razvija velika količina topline i stvaraju se velika mehanička naprezanja. Trokut u slici 2.7.3. predstavlja nominalne vektore pada napona na radnim otporima i napone na rasipnim reaktancijama. (za slijedeće izvode formula korištena je literatura [3]):



Slika 2.7.3. Kappov trokut [2]

Iz čega slijedi da je :

$$U_R = I_k\,(R_1 + \dot{R}_2), \tag{39}$$

$$U_x = I_k\,(X_{\sigma 1} + \dot{X}_{\sigma 2}), \tag{40}$$

$$P_k = I_k^2\,(R_1 + \dot{R}_2)\,. \tag{41}$$

Gdje je:

U_R -padovi napona na radnim otporima

U_x –padovi napona na induktivnom otporu primara i sekundara

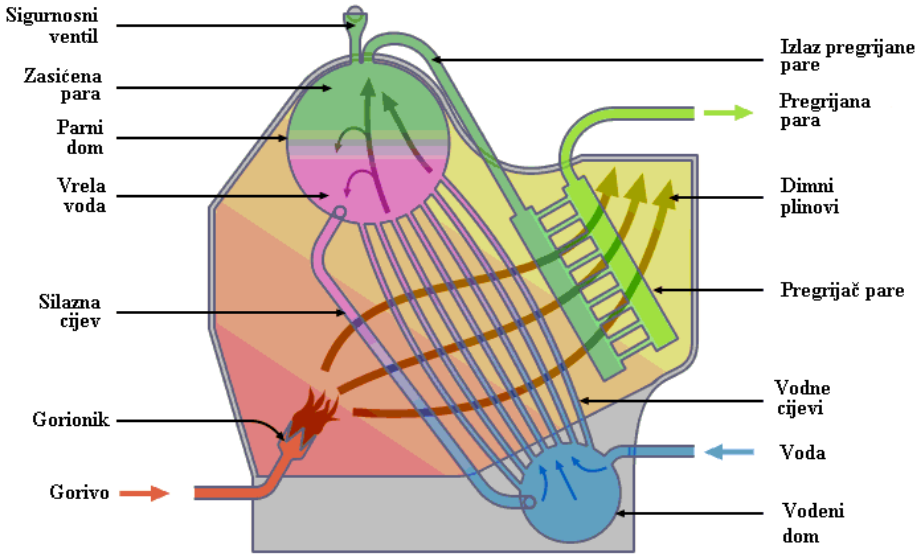
P_k- snaga kratkog spoja

2.8. Dijelovi transformatora

Transformator se sastoji od glavnih i pomoćnih konstrukcijskih dijelova.
Glavni konstrukcijski dijelovi transformatora su magnetska jezgra, namoti i sustav izolacije.
U pomoćne konstrukcijske dijelove spada kotao, konzervator, ulje i Bucholov relej. [2]

2.8.1. Kotao

Glavna uloga kotla je ta da nosi ulje i provodi toplinu iz transformatora u okolni zrak. Povećanjem snage i dimenzija transformatora, rastu i gubici. Tako se mora rashladna površina kotla relativno povećati, bilo izvedbom s rebrastim limom s cijevima ili nadogradnjom rashladnih tijela. Transformatori većih dimenzija se pretežito nastoje smjestiti u otvorenim prostorima radi opasnosti od požara a i radi smanjenja građevinskih radova. [2]
Slika 2.8.1.1. prikazuje kotao transformatora.



Slika 2.8.1.1. Detaljni prikaz kotla transformatora [6]

2.8.2. Namoti

Namoti se pretežito sastoje od manjeg ili većeg broja svitaka. Kada imamo manji presjek tada se obično rade polusvici a kada je riječ o većim presjecima tada u pravilu polusvitak ima samo jedan zavoj u svakom polju. Svici ne smiju imati prevelike dimenzije zbog hlađenja, radi toga što toplina mora s padom temperature izaći iz unutrašnjosti u okolinu.

U transformatorima se pretežito koristi čisti elektrolitski bakar, do promjera oko 3 mm a preko toga se koristi pravokutni profil. Ovisno o klasama izolacije se vodiči sukladno izoliraju. [2]

2.8.3. Magnetska jezgra

Jezgra transformatora sačinjena je od transformatorskih limova koji obavezno moraju biti međusobno izolirani. U gotovo svim slučajevima se koristi visokolegirani lim debljine 0,35 mm. Pri mehaničkoj obradi limova pojavljuju se mehanička naprezanja koja znatno povećavaju specifične gubitke. Ako se prilikom stavljanja izolacije na limove pojave nejednolike debljine lima i hrapavost površine, može se prouzročiti smanjenje aktivnog presjeka jezgre tj. faktor punjenja paketa. Pretežito taj faktor iznosi od 0,85 do 0,96.

Efektivna vrijednost jakosti magnetskog polja za željezne jezgre pri indukciji od 1 T iznosi otprilike $H_{Fe} = 85\ A/m$.

A za zrak

$$H_{zr} = \frac{B}{4\pi\sqrt{2}*10^{-7}} \approx 56 * 10^4\ A/m\ . \qquad (45)$$

Iz toga se vidi da se pri gradnji transformatorske jezgre mora pokušati smanjiti zračni raspor što bolje.

Nakon izgradnje i stezanja, jezgra mora biti potpuno kruto tijelo. [2]

2.8.4. Konzervator

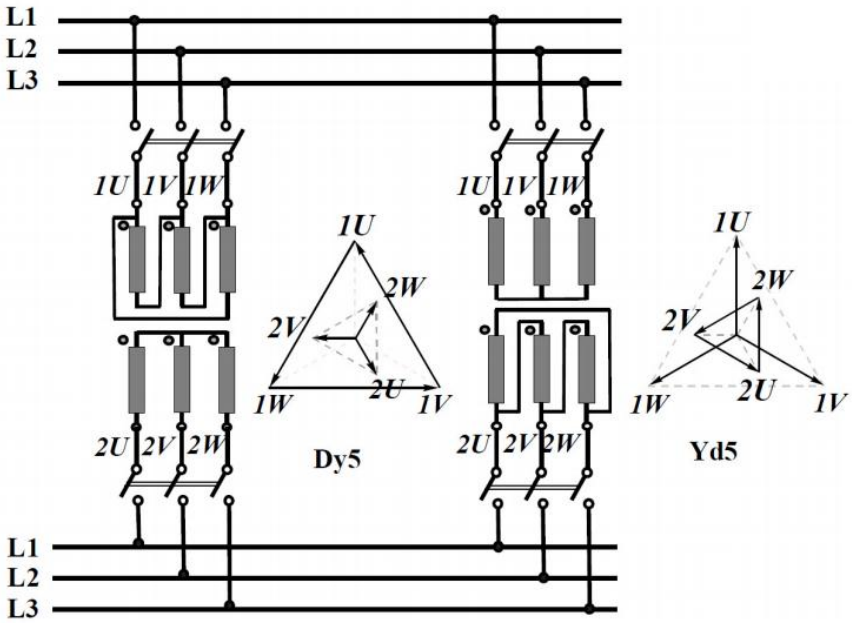
Uloga konzervatora je da vlaga ne dolazi u ulje jer već 0,01% vlage u ulju smanjuje probojnu čvrstoću od 130 kV/cm na 50 kV/cm.
Konzervator se nalazi na poklopcu kotla, ima oblik valjkaste posude koja je s kotlom vezana pomoću čeličnih cijevi.
Probojna čvrstoća u ulju najviše ovisi o postotku vlage u ulju. Već pri relativno malim postocima smanjuje se probojna čvrstoća. Konzervator se pretežito tankom cijevi veže za kotao kako ne bi došlo do cirkulacije ulja između kotla i konzervatora. Ulje ima takvo svojstvo da se pri zagrijavanju rasteže za 0,8% svog volumena za svaki 1℃.Temperatura ulja u prosjeku iznosi 100℃, pa volumen konzervatora mora iznositi najmanje 10% od ukupnog volumena ulja.
Kod većih transformatora se u dovodnu cijev postavlja dehidrator, koji ima ulogu da spriječi ulazak vlage kroz konzervator. Na slici 2.5.4.1 je prikazana izrada konzervatora u tvornici Končar. [2]



Slika 2.8.4.1 Prikaz izrade konzervatora u tvornici Končar [6]

2.9. Paralelni rad transformatora

Paralelni spoj dvaju ili više transformatora se ostvaruje spajanjem istoimenih stezaljki visokonaponske strane svih transformatora na odgovarajuće faze visokonaponske mreže i spajanjem istoimenih stezaljki niskonaponske strane svih transformatora na odgovarajuće faze niskonaponske mreže. [5]
U slučaju kako je prikazano na slici 2.9.1,paralelni rad se može vršiti preko sabirnica ili preko mreže.



Slika 2.9.1 Paralelni rad transformatora Dy5 i Yd5 [5]

Da bi transformatori mogli raditi paralelno,moraju biti zadovoljeni ovi uvjeti:

A) Prijenosni omjer,tj. omjer broja zavoja, moraju biti jednaki

$$\frac{N_1}{N_2}=\frac{N_1^{"}}{N_2^{"}}\,, \tag{46}$$

a transformatori moraju biti građeni za iste nominalne napone. Kod ovog uvjeta je važno da između prijenosnih omjera broja zavoja ne postoji razlika, dok u veličini nominalnog napona smije doći do neznatnog odstupanja. Tako se na primjer mogu spojiti paralelno dva transformatora, koja su građena za 10 kV/380V i za 10,5kV/400V ali pod uvjetom da su im prijenosni omjeri broja zavoja isti. Kada nema isti broj prijenosnih omjera dolazi do struje izjednačenja , dok je kod nejednakih napona jedan od transformatora samo naponski više odnosno manje napregnut od drugog.

Struja izjednačenja kod nejednakih prijenosnih omjera paralelno spojenih transformatora može uz minimalne razlike u omjeru broja zavoja poprimiti vrlo neugodne iznose. Kada napon kratkog spoja dvaju transformatora iznosi 5%. Tada je svakom transformatoru potrebno 5% nominalnog napona da bi potekla nominalna struja kroz transformator u kratkom spoju. U slučaju paralelnog spoja će bilo koja razlika napona potjerati u krugu paralelno spojeni transformatora struju izjednačenja, zapravo struju kratkog spoja. Tako će na primjer razlika napona od 2 puta 5% ,tj. 10% nominalnog napona, potjerati kroz oba transformatora nominalnu struju. Ako razlika napona iznosi samo 1%, bit će i struja izjednačenja proporcionalno manja,tj. iznosit će 10% nominalne struje. [1]

B) Potreban fazni pomak istoimenih sekundarnih faza prema istoimenim primarnim fazama. Tako transformator grupe spoja Dy5 može raditi u paralelnom radu sa transformatorom grupe spoja Yd5. [1]

C) Naponi kratkog spoja moraju biti jednaki, odnosno ne smije među njima biti veća razlika od $\pm$10%. Ukoliko je razlika nešto veća, transformator manje snage mora imati veći napon kratkog spoja. Kod većih odstupanja je potrebno transformatoru s manjim naponom kratko spoja dodati prigušni svitak.
Kod transformatora, koji imaju jednake napone kratkog spoja, razdijelit će se i pogonske struje u omjeru njihovih nominalnih snaga odnosno nominalnih struja. Do takve razdiobe dolazi radi nužnosti jednakih padova napona na svim transformatorima, pa se pri tome moraju struje na pojedine transformatore podijeliti u obrnutom omjeru njihovih impedancija, koje u slučaju jednakih napona kratkog spoja imaju omjere obrnuto proporcionalne omjerima nominalnih struja odnosno nominalnih snaga.
Ako naponi kratkog spoja nisu međusobno jednaki, doći će do neravnomjerne raspodjele tereta u pogonu. [1]

D) Nominalne snage transformatora moraju biti približno jednaki. Prema ICE preporukama nije dozvoljeno povezivanje transformatora u paralelni rad koji imaju omjere snaga veće od 3:1.
U slučaju da manji transformator ima manji napon kratkog spoja, doći će do pogonskog stanja u kojem će manji transformator biti preopterećen a da veći ne može prenositi punu nazivnu snagu. [1]

2.9.1. Paralelni rad transformatora pri nejednakim omjerima transformacije

Ako dva transformatora,približno jednakih snaga rade u praznom hodu. A primarni namotaji oba transformatora priključeni na zajedničke sabirnice (za slijedeće izvode formula korištena je literatura [1]):

$$U_{1A}=U_{1B}. \tag{47}$$

Prema tome slijedi da je-:-

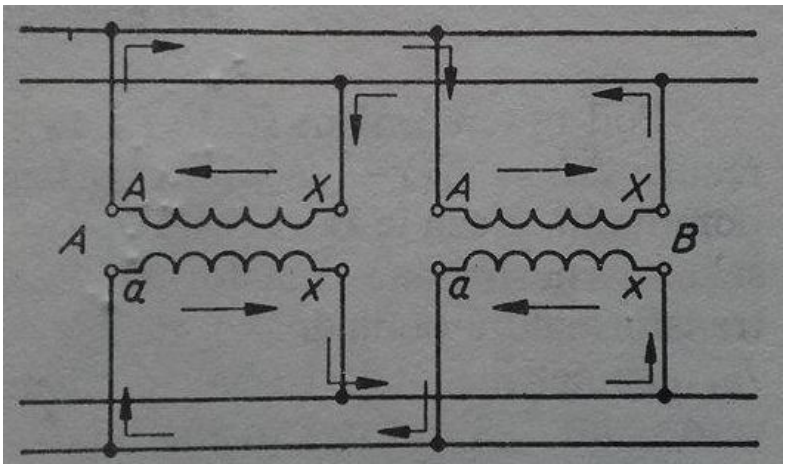
$$E_{2A}>E_{2B}. \tag{48}$$

Ako su sekundarni naponi spojeni na zajedničke sabirnice, tada se u krugu ovih dvaju namota pojavljuje razlika napona-:-

$$\Delta E = E_{2A} - E_{2B}. \tag{49}$$

Pod čiji će djelovanjem poteći struja izjednačenja.

Budući da su primarni i sekundarni namotaji transformatora elektromagnetski vezani, pojave struje izjednačenja u strujnom krugu sastavljenom od sekundarnih namota transformatora uzrokuje pojavu odgovarajuće struje izjednačenja kruga sastavljenom od primarnih namota transformator, što pokazuje slika 2.9.1.1. Gdje je A prvi transformator a B drugi. [1]



Slika 2.9.1.1 Struje izjednačenja u transformatorima [1]

No struja izjednačenja teče serijskim krugom koji se sastoji samo od namota oba transformatora. Prema tome sve se odvija onako kao da se oba transformatora u pogledu napona nalaze u kratkom spoju. Zanemarujući djelatne otpore kratkog spoja,dobije se (za slijedeće izvode formula korištena je literatura [1]):

$$I_i = \frac{\Delta E}{X_{kA}+X_{kB}}\ , \tag{50}$$

gdje su X_{kA} i X_{kB} induktivni otpori kratkog spoja.

Naponi tada imaju vrijednost -:-

$$E_{2A}= 0\text{A}, \tag{51}$$

$$E_{2B}= 0\text{B}.$$

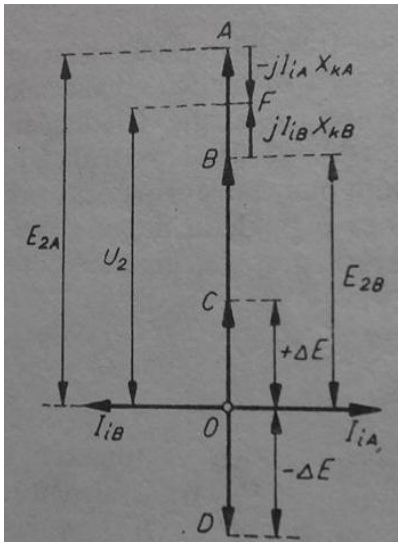
Napon prvog transformatora može biti veći od napona drugog transformatora za veličinu-:-

$$+\Delta E=0\text{C}. \tag{52}$$

Ili obrnuto-:-

$$-\Delta E=0\text{D}$$

Struja izjednačenja, koja teče prvim transformatorom , zaostaje za 90° iza napona. To ne znači da postoje dvije različite struje izjednačenja, već da jedna te ista struja izjednačenja igra različitu ulogu u odnosu na prvi i drugi transformator . U prvom transformatoru s većim naponom struja izjednačenja zaostaje iza napona za 90° pa je, u odnosu na transformator prvi induktivna, a struja prethodi naponu za 90° pa je u odnosu na transformator drugi kapacitivan. [1]



Slika 2.9.1.2 Paralelni rad transformatora
pri $k_A \neq k_B$, u praznom hodu [1]

Budući da su snage i naponi kratkog spoja obaju transformatora uvjetno jednaki,točka F dijeli odsječak AB napola, slika 2.9.1.2 Napon na sekundarnim sabirnicama jest

$$U_2=0\text{F} \tag{53}$$

Pod opterećenjem se oba napona mijenjaju praktički podjednako. Prema tome vrijedi-:-

$$\Delta E=E_{2A}- E_{2B}, \tag{54}$$

i struja izjednačenja ostaje gotovo ista kao i u praznom hodu.

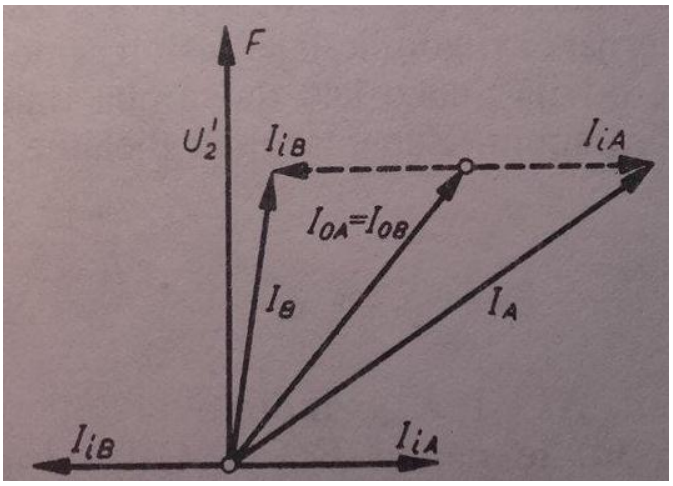
Neka je kao i prije-:-

$$P_{nA} = P_{nB}. \tag{55}$$

Budući da je struja izjednačenja izravnala sekundarne napone transformatora, struja opterećenja raspodjeljuje se između oba transformatora podjednako.

$$I_{0A}=I_{0B} \quad (56)$$

Ako se zbroje te struje geometrijski dobivamo rezultirajuće struje, slika 2.9.1.3. Prema tome, ako je transformator A potpuno opterećen, transformator B bit će nedovoljno opterećen. Obrnuto, pri punom opterećenju drugog transformatora prvi je neopterećen. Normalnim se smatra prvi slučaj, jer je preopterećenje u pravilu nedopušteno. Na taj način pri nejednakosti omjera transformacije struja izjednačenja ne dopušta da se potpuno opterete svi paralelno spojeni transformatori.



Slika 2.9.1.3 paralelni rad transformatora
pri $k_A \neq k_B$, kod opterećenja [1]

Pri znatnoj razlici u omjerima transformacije struja, postoji mogućnost da normalan rad transformatora nije moguć. Stoga je po propisu strogo definirano da razlika u omjerima ne prelazi 0,5%.

Kod nejednakosti omjera transformacije,potrebno je omogućiti da transformator manje snage ima veći omjer transformacije, jer su pri induktivnom opterećenju uvjeti rada transformatora povoljniji. [1]

2.9.2. Paralelni rad transformatora pri nejednakim naponima kratkog spoja

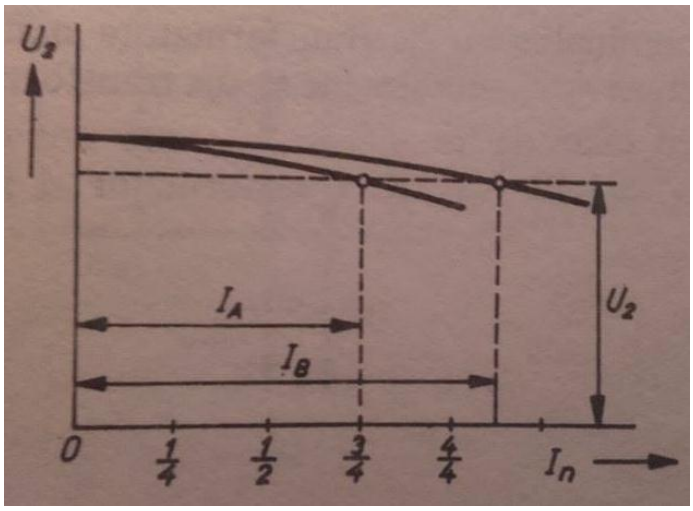
Ako je $U_{kA} > U_{kB}$. U takvom slučaju pri opterećenju svakog transformatora nominalnom strujom nezavisno jedna od drugoga, u transformatoru A nastati će veći pad napona koji iznosi-:-

$$U_k = \frac{I_n Z_k}{U_n}, \tag{57}$$

a u transformatoru B manji. Ovisnost sekundarnog napona o sekundarnoj struji-:-

$$U_2 = f(I_2), \tag{58}$$

Naziva se vanjska karakteristika.



Slika 2.9.2.1 Raspodjela opterećenja pri $U_{kA} \neq U_{kB}$ [1]

Prema tome vrijedi da vanjska karakteristika transformatora A prolazi od vanjske karakteristike transformatora B, slika 2.9.2.1.

U paralelnom spoju dvaju transformatora sekundarnim sabirnicama djeluje jedan te isti napon U_2, ali pri tome se transformatori opterećuju različito, A je nedovoljno opterećen, a B je preopterećen. [1]

Kako bi se dalo odrediti vrijednost struja u transformatorima A i B, mora se pripaziti na to da su, otpori tih transformatora i padovi napona pri paralelnom spoju na zajedničke sabirnice uvijek jednaki. To se može ovako zapisati (za slijedeće izvode formula korištena je literatura [1])-:-

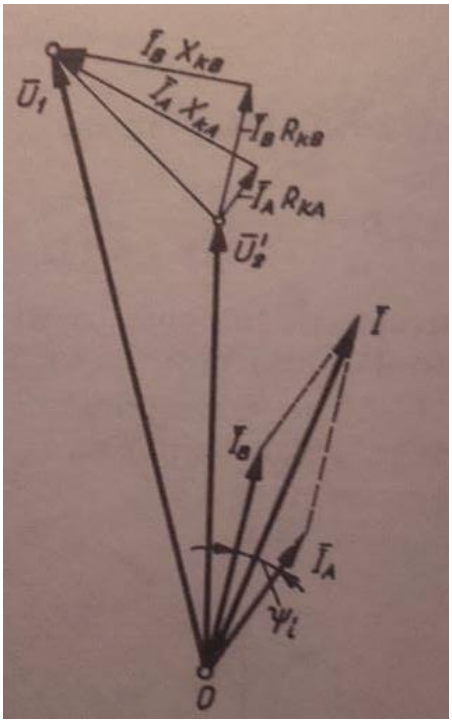
$$I_A Z_{kA} = I_B Z_{kB}, \tag{59}$$

odakle je:

$$I_A : I_B = Z_{kB} : Z_{kA}. \tag{60}$$

Struje opterećenja paralelno spojenih transformatora obrnuto su proporcionalne impedancijama kratkog spoja. Osim toga i komponente kratkog spoj nisu jednake .

Pri konstrukciji trokuta kratkog spoja na pojednostavljenom vektorskom dijagramu, slika 2.9.2.2.



Slika 2.9.2.2. Dijagram struja $U_{kA} \neq U_{kB}$ [1]

Vidimo da su djelatni padovi napona ovih trokuta i njima paralelni vektori struja međusobno pomaknuti u fazi. Struja , koja odlazi u sekundarnu mrežu od oba transformatora, geometrijski je zbroj slika 2.6.2.2. Uostalom,pomak u fazi obično je malen, i time je moguće zamijeniti geometrijski zbroj s algebarskim,tj. da je -:-

$$I=I_A+I_B \tag{61}$$

U ovom slučaju raspodjela opterećenja između dva transformatora u paralelnom radu lako se određuje. Budući da su naponi na stezaljkama transformatora u paralelnom radu jednaki, struje su proporcionalne sa snagama. Tada vrijedi da je -:-

$$\frac{I_A}{I_B}=\frac{P_A}{P_B}=\frac{Z_{kB}}{Z_{kA}}=\frac{In_B Z_{kB}/U_n}{I_{nA}Z_{kA}/U_n}\ \frac{I_{nA}}{I_B}, \tag{62}$$

$$\frac{P_A}{P_B}=\frac{U_{kB}}{U_{kA}}\ \frac{P_{nA}}{P_{nB}}.$$

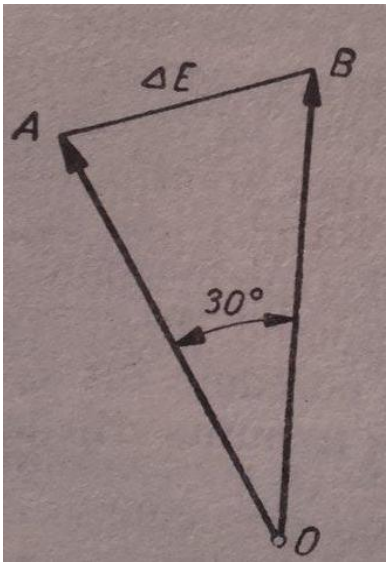
Takvi uvjeti paralelnog rada transformatora nisu pogodni. Stoga pravila zahtijevaju da naponi kratkog spoj transformatora, koji su predviđeni za paralelan rad, ne odstupaju od artimetičke srednje vrijednosti više od $\pm 10\%$. [1]

2.9.3. Uvjeti pripadnosti transformatora istoj grupi

U slučaju da su svi uvjeti zadovoljeni, ali da trofazni transformatori pripadaju različitim grupama. Kao na primjer Yy12 i Yd11. U tom slučaju, kako slijedi iz vektorskih dijagrama, sekundarni linijski napon obaju transformatora međusobno pomaknuti za 30°. Stoga se u krugu transformatora pojavljuje znatan napon -:-

$$\Delta E = AB \tag{63}$$

reda veličine faznih napona namota,slika2.9.3.1. Pod djelovanjem toga napona, nominalna struja, biti će u krugu struje izjednačenja malena. Prema tome, spajanje u paralelni rad transformatora koji pripadaju različitim grupama nije dopušten. [1]



Slika 2.9.3.1. Dijagram napona transformatora koji pripadaju različitim grupama [1]

3. Izračun i mjerenje struje izjednačenja kod krivih spojeva paralelnog rada transformatora

U ovom poglavlju bit će detaljno opisano i analizirano,što je struja izjednačenja kod krivih spojeva paralelnog rada transformatora. Transformator na kojim će se vršiti mjerenja ima nazivne podatke:

P = 0,5 kVA,

U = 380 V,

f = 50 Hz,

In = 0,76 A,

spoj : Δ/Δ

Biti će i navedeni svi ostali parametri i izračuni koji su potrebni kako bi rezultat mjerenja i izračuna bio ispravan.

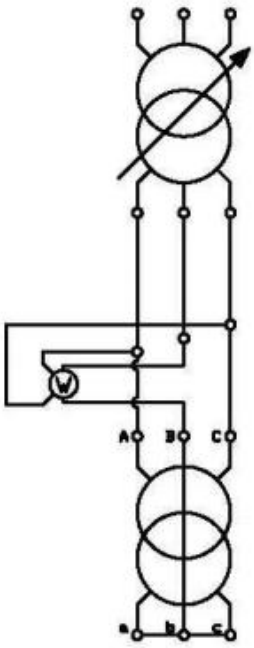
3.1. Mjerenje i izračun napona kratkog spoja

Prilikom postavljanja više transformatora u paralelni rad potrebno je znati koji su naponi kratkih spojeva tih transformatora.

Ukoliko naponi kratkih spojeva nisu međusobno jednaki,tada neće odgovarati zbroju njihovih nazivnih snaga za maksimalno dozvoljeno opterećenje grupa paralelno spojenih transformatora.

Pri tome će transformator sa najmanjim naponom kratkog spoja biti najviše opterećen.

Kod ovog mjerenja transformatora u kratkom spoju, sekundar se kratko spoji a na primar postavimo sniženi napon koji će uzrokovati da kroz namotaj protjera nazivnu struju.
Mjerenje će se odvijati prema shemi 3.1.1.



Slika 3.1.1. Shema kratko spojenog transformatora

Nakon spajanja, napon se oprezno podiže do struje koja otprilike iznosi 1,2 In

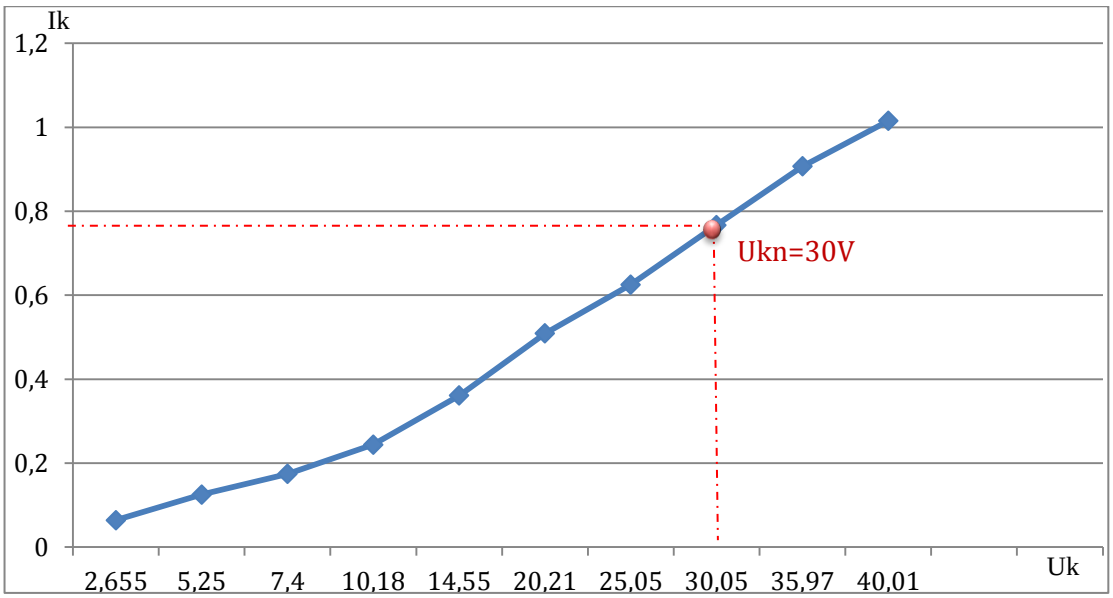
. Kada je dosegnuta maksimalno određena vrijednost polako smanjujemo napon, te snimimo 10 mjernih rezultata.

Mjerenjem su dobiveni sljedeći rezultati:

Uk (V)	40,1	35,97	30,50	25,05	20,21	14,55	10,18	7,4	5,25	2,65
Ik (A)	1,015	0,907	0,767	0,625	0,509	0,361	0,244	0,174	0,125	0,064
Pk (W)	21,8	17,6	12,6	8,4	5,6	2,8	1,3	0,7	0,3	0,1

Tablica 3.1.2 10 mjernih točaka

Kada su zabilježeni mjerni rezultati potrebno je odrediti napon kratkog spoja. Za to je potrebno napraviti krivulju ovisnosti struje kratkog spoja o naponu kratkog spoja,krivulja 3.1.2.

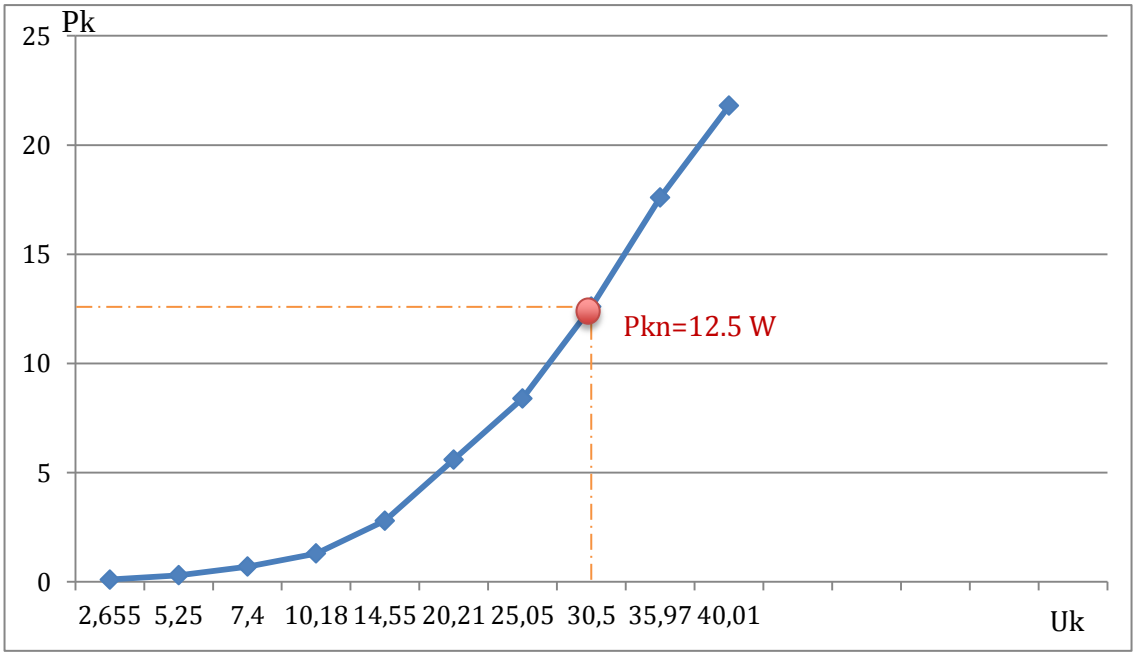


Slika 3.1.2. Krivulja ovisnosti struje kratkog spoja o naponu kratkog spoja

Iz krivulje 3.1.2 moguće je odrediti nazivni napon kratkog spoja. Ako se na y-osi odredi vrijednost 0,76 i vertikalno od te vrijednosti prema krivulji povuče imaginarna crta, dobije se nazivni napon kratkog spoja, koji se odredi na x-osi, te odgovara iznosu od 30 volti.

Kako bi se mogao konačni rezultata napona kratkog spoja odrediti potrebo je odrediti još nazivnu snagu transformatora.

Nazivna snaga će se odrediti pomoću krivulje ovisnosti snage o naponu kratkog spoja,krivulja 3.1.3.



Slika 3.1.3. Krivulja ovisnosti snage o naponu kratkog spoja

Određivanje nazivne snage se određuje sličnim postupkom kao i kod nazivnog napona kratkog spoja, samo što u ovom slučaju se kreće od x-osi pa se prema tome određuje nazivna snaga,koja odgovara vrijednosti od 12,5 vati.

Kako su dobiveni sada svi podaci ,može se preko odgovarajućih formula izračunati napon kratkog spoja koji će dalje služiti za izračun struje izjednačenja. (za slijedeće izvode formula korištena je literatura [3]):

Za trofazni transformator vrijedi:

$$cos\varphi_{kn}=\frac{P_{kn}}{\sqrt{3}\cdot U_k\cdot I_k}=\frac{12,5}{\sqrt{3}*30*0,76}=0,316\ , \tag{65}$$

$$U_{rn}=U_{kn}*cos\varphi_{kn}=30*0,316=9,48\ \text{V}\ , \tag{66}$$

$$\sin\varphi=\sqrt{1-cos\varphi^2}=\sqrt{1-0,316^2}=0,948\ , \tag{67}$$

$$U_{xn}=U_{kn}*sin\varphi_{kn}=30*0,948=28,44\ \text{V}\ , \tag{68}$$

$$U_{x\%}=\frac{U_{xn}}{U_1}*100=\frac{28,44}{380}=7,48\%\ , \tag{69}$$

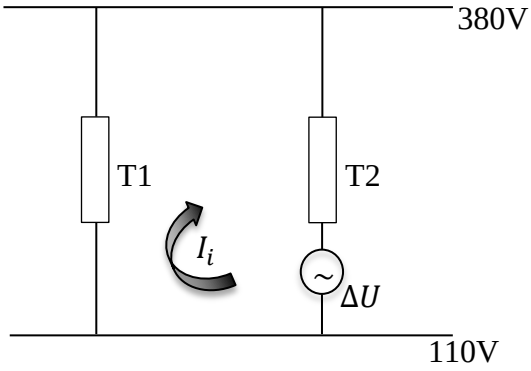
$$U_{k\%}=\frac{U_{kn}}{U_1}*100=\frac{30}{380}*100=7,89\% \tag{70}$$

Nakon dobivenog napona kratkog spoja koji iznosi 7,89 %,moguće je daljnje rješavanje problema oko izračuna struje izjednačenja kod paralelnog rada transformatora sa krivim spojevima.

3.2. Izračun struje izjednačenja

U ovom poglavlju se prikazuje kako računski odrediti struju izjednačenja kod prijašnjeg transformatora na kojem je određen napon kratkog spoja.

Za pomoć će poslužiti shema 3.2.1:



Slika 3.2.1 Dva transformatora spojena u paralelu [5]

Na početku poglavlja 3 određeni su nazivni podaci transformatora, a za ovaj primjer uzeta su dva jednaka transformatora (za slijedeće izvode formula korištena je literatura [2

]):

Najprije se izračunava impedancija na sekundarnoj strani transformatora:

$$X_1 = \frac{U_{k1\%}}{100} * \frac{U_{n2}^2}{S_{n1}} = \frac{7{,}89}{100} * \frac{110^2}{0{,}5*10^3} = j1{,}90938\Omega. \quad (71)$$

Pošto je drugi transformator jednak kao i prvi može pretpostaviti da je impedancija:

$$X_1 = X_2 = j1{,}90938\Omega. \quad (72)$$

Oba transformatora imaju spoj trokut što znači da fazni i linijski napon iznosi:

$$U_f = U_l = 380\ V. \quad (73)$$

Sada je moguće odrediti struju izjednačenja za ta dva transformatora,po formuli:

$$I_i = \frac{U}{X_1+X_2} = \frac{380}{1{,}90938+1{,}90938} = 99{,}50A. \quad (74)$$

Time je računski određena konačna struja izjednačenja koja se javlja na sekundarnoj strani transformatora.

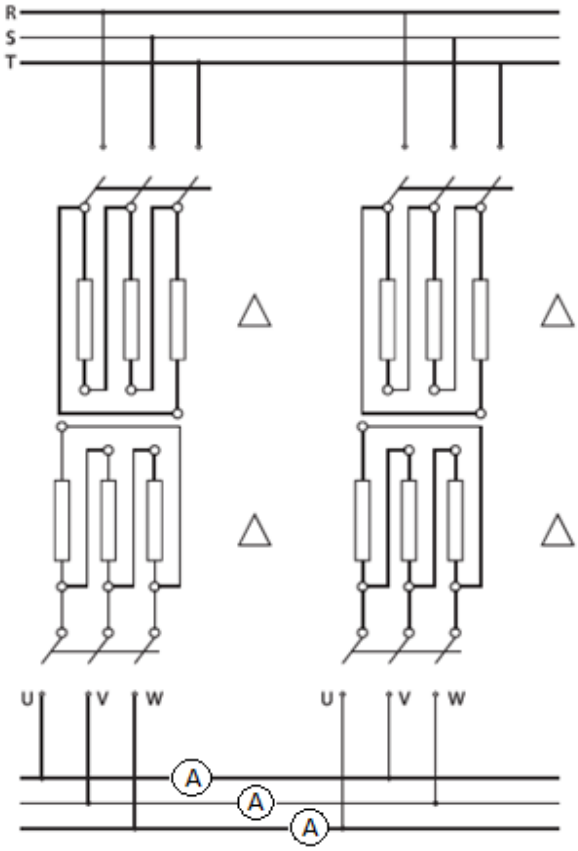
3.3. Mjerenje struje izjednačenja kod krivih spojeva

Mjerenja struje izjednačenja kod krivih spojeva u paralelnom radu nije moguće odraditi pri punom nazivnom naponu na primarnoj strani transformatora radi eventualnih neželjenih posljedica, kao što su samouništenje primarnih i sekundarnih namotaja ili oštećivanje mjernih instrumenata. Zato se mjerenje izvodi pri sniženom naponu.

U raznim literaturama se sekundari transformatora pretežito označavaju sa U ,V i W. Pa je tako prije samog početka mjerenja potrebno sekundare transformatora krivo spojiti, kako bi se dobile struje izjednačenja već pri malim nazivnim naponima.

To znači da će se sekundar od prvog transformatora,na stezaljci U spojiti na sekundar drugog transformatora na stezaljku V ili , bolje rečeno, prvi namotaj prvog transformatora biti će spojen na drugi namotaj drugog transformatora. Pa tako redom, V stezaljka od prvog transformatora na W stezaljku drugog transformatora, te W stezaljka prvog transformatora na stezaljku U drugog transformatora. Prilikom spajanja sekundara u krive spojeve potrebno je između svake stezaljke postaviti jedan amper metar, na kojima će biti prikazane struje izjednačenja.

Kako bi se moglo izvršiti mjerenje potrebna je shema sa tim krivim spojevima,koja je prikazana u nastavku,slika 3.3.1.



Slika 3.3.1 Paralelni transformatori sa krivim spojem

Kako bi bilo moguće realizirati taj spoj sa promjenjivim naponom primara,koristio se još jedna transformator. Sekundar toga transformatora isključivo je služio za dobivanje smanjene vrijednosti napona koji je će kasnije napajati primare transformatora spojene u paralelu. Vrijednost smanjenog napona iznosila je 5,2 volti.

Nakon spajanja prema shemi 3.3.1 polako dižemo napon te istodobno nadziremo amper metre, kakao ne bismo prešli maksimalnu dozvoljenu vrijednost instrumenata i samih transformatora.



Slika 3.3.2 Vrijednosti struja kod krivih spojeva U,V i W

U naponskom stanju na instrumentima su dobiveni sljedeći rezultat,što prikazuje slika:

između točke U i V,dobivena struja 5,941 A,

između točke V i W,dobivena struja 6,055 A,

između točke W i U,dobivena struja 6,131 A

Pomoću kriv spojeva određenu su struje izjednačenja koje se javljaju prilikom na sekundarnoj strani transformatora u paralelnom radu.

Mjerenjem je također prikazano kako sve tri struje previše ne odstupaju. Kada ne bi imali jednake prijenosne omjere,transformator s većim sekundarnim naponom, protjerao bi struju izjednačenja već prije samog priključenja nekog opterećenja na sekundar.

Prilikom mjerenja, prof. Stanko Vincek je nadgledao postupak samog spajanja i mjerenja, radi same zaštite studenta i opreme koja se nalazi u laboratoriju.

4. Zaključak

Svrha izrade ovoga završnog rada je ukazati na sve uvjete koji su potrebni za paralelni rad transformatora te analiza oko struje izjednačenja na sekundarnoj strani transformatora.

Kada transformatori ne bi imali jednake prijenosne omjere, tada bi transformator sa većim sekundarnim naponom, protjerao struju izjednačenja kroz oba transformatora već prije samog opterećenja sekundarne strane.

Mjerenjem i računskom analizom dokazano je, da prilikom jednakih prijenosnih omjera,struje izjednačenja na sekundarnoj strani, imaju približno jednake vrijednosti. Čime je jedan uvjet zadovoljen za paralelno povezivanje transformatora.

5. Literatura

[1]. A.Dolenc: Transformatori 1. i 2.dio, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1991.

[2]. B. Tomičić : Električni strojevi, Visoka elektrotehnička škola ,Varaždin.

[3]. J.Huđek i L.Havaš: Osnove elektrotehnike, Varaždin, 2007.

[4]. R. Wolf: Osnove električnih strojeva,četvrto izdanje, Zagreb, 1995.

[5]. I. Mandić, V. Tomljenović, M. Pužar, Sinkroni i asinkroni strojevi,Zagreb,2012

[6] http://www.koncar.hr/

6. Popis slika

Slika 1.1.1. Pretvorba energije

IZVOR: Sinkroni i asinkroni strojevi, Veleučilište u Zagrebu,Zagreb 2012 ……5

Slika 2.1.1. Magnetsko polje oko vodiča

IZVOR: Transformatori 1. i 2.dio, Sveučilište u Zagrebu, izdanje 1991……...6

Slika 2.3.1. Krivulja magnetiziranja željeza

IZVOR: Sinkroni i asinkroni strojevi, Veleučilište u Zagrebu, Zagreb 2012…….8

Slika 2.3.2. Skica jednofaznog transformatora

IZVOR: https://element.hr/artikli/file/2457 ….....9

Slika 2.3.3. Vektorski dijagram opterećenja idealnog transformatora

IZVOR: Bilježnica iz kolegija električni strojevi…….11

Slika 2.5.1. Prikaz magnetiziranja željeza za jednu polu periodu

IZVOR: Transformatori 1. i 2.dio, Sveučilište u Zagrebu, izdanje 1991……..14

Slika 2.5.2. Prikaz statičke magnetske karakteristike

IZVOR: Transformatori 1. i 2.dio, Sveučilište u Zagrebu, izdanje 1991…….....14

Slika 2.6.1 Nadomjesna shema transformatora

IZVOR: Bilježnica iz kolegija električni strojevi…….....16

Slika 2.7.1.Vektorski dijagram

IZVOR: Bilježnica iz kolegija električni strojevi…….……16

Slika 2.7.2. Nadomjesna shema za prazni hod

IZVOR: Osnove elektrotehnike, Veleučilište u Varaždin, izdanje 2007…….17

Slika 2.7.3. Kappov trokut

IZVOR: Bilježnica iz kolegija električni strojevi…….....…….....18

Slika 2.8.1.1. Detaljni prikaz kotla transformatora

IZVOR: https://sh.wikipedia.org/wiki/Vodocijevni_kotao#/media/File:Wt_boiler.gif ..19

Slika 2.8.4.1 Prikaz izrade konzervatora u tvornici Končar

IZVOR: http://www.koncar.hr/ 21

Slika 2.9.1 Paralelni rad transformatora Dy5 i Yd5

IZVOR: Osnove elektrotehnike, Veleučilište u Varaždin, izdanje 2007…….....21

Slika 2.9.1.1 Struje izjednačenja u transformatorima

IZVOR: Transformatori 1. i 2.dio, Sveučilište u Zagrebu, izdanje 1991……...…24

Slika 2.9.1.2 Paralelni rad transformatora

IZVOR: Transformatori 1. i 2.dio, Sveučilište u Zagrebu, izdanje 1991……...…25

Slika 2.9.1.3 paralelni rad transformatora
IZVOR: Transformatori 1. i 2.dio, Sveučilište u Zagrebu, izdanje 1991…….….26

Slika 2.9.2.1 Raspodjela opterećenja pri $U_{kA} \neq U_{kB}$
IZVOR: Transformatori 1. i 2.dio, Sveučilište u Zagrebu, izdanje 1991…….……27
Slika 2.9.2.2. Dijagram struja $U_{kA} \neq U_{kB}$
IZVOR: Transformatori 1. i 2.dio, Sveučilište u Zagrebu, izdanje 1991…….……28
Slika 2.9.3.1. Dijagram napona transformatora koji pripadaju različitim grupama
IZVOR: Transformatori 1. i 2.dio, Sveučilište u Zagrebu, izdanje 1991……....……29
Slika 3.1.1. Shema kratko spojenog transformatora
IZVOR: Priprema za laboratorijske vježbe iz kolegija električni strojevi……..……..31
Slika 3.1.2. Krivulja ovisnosti struje kratkog spoja o naponu kratkog spoja
IZVOR: Samostalno napravljena od dobivenih rezultata……..……32
Slika 3.1.3. Krivulja ovisnosti snage o naponu kratkog spoja
IZVOR: Samostalno napravljena od dobivenih rezultata…….…….……32
Slika 3.2.1 Dva transformatora spojena u paralelu
IZVOR: Samostalno napravljena……..…….....34
Slika 3.3.1 Paralelni transformatori sa krivim spojem
IZVOR: Transformatori 1. i 2.dio, Sveučilište u Zagrebu, izdanje 1991……..……35
Slika 3.3.2 Vrijednosti struja kod krivih spojeva U,V i W
IZVOR: Poslikani rezultati sa mjerenja…….……..….36

Sveučilište Sjever
Sveučilišni centar Varaždin
104. brigade 3, HR–42000 Varaždin

UNIVERSITY NORTH

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL: Odjel za elektrotehniku

PRISTUPNIK: Filip Jurić | MATIČNI BROJ: 4098/601

DATUM: | KOLEGIJ: Električni strojevi

NASLOV RADA: Paralelni rad transformatora

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU: Transformers in parallel operation

MENTOR: Dr. sc. Branko Tomičić | ZVANJE: viši predavač

ČLANOVI POVJERENSTVA:
1. Dunja Srpak
2. Dr. Sc. Ladislav Havaš
3. Dr. Sc. Branko Tomičić - mentor
4. Mr. Sc. Ivan Šumiga - zamjenik člana
5.

Zadatak završnog rada

BROJ: 423/EL/2018

OPIS:

U radu je potrebno:

- Objasniti strukturu nadomjesne sheme transformatora,

Objasnite princip rada transformatora i na toj osnovi izvedite nadomjesnu shemu.

- Opisati značenje svakoga pojedinoga parametra,

Objasnite vezu između ulančenih magnetskih tokova i reaktancija. Navedite vrste magnetskih tokova u transformatoru i puteve kojima se zatvaraju. Navedite sve namote u stroju i povežite ih s odgovarajućim radnim otporom. Koji parametar nadomjesne sheme predstavlja gubitke u jezgri.

- Navesti uvjete za paralelni rad transformatora,

Navedite i detaljno objasnite uvjete za uključivanje u paralelni rad transformatora. Koje su posljedice ako ti uvjeti nisu ispunjeni.

- Provesti ispitivanja u laboratoriju na odgovarajućim transformatorima,

Proučite natpisne pločice transformatora koji se nalaze u laboratoriju, te raspoloživu opremu za mjerenje. Provedite odgovarajuća mjerenja radi utvrđivanja parametara nadomjesne sheme. Izvedite odgovarajuće zaključke o mogućnosti paralelnog spajanja odabranih transformatora. Nacrtajte odgovarajuće sheme i navedite potrebnu opremu za mjerenje.

- Napraviti proračun struje izjednačenja u slučaju spajanja istih transformatora s različitim faznim pomakom,

Na osnovi dobivenih parametara nadomjesne sheme načinite proračun struje izjednačenja.

- Provesti opterećenja u laboratoriju u paralelnom radu,

Načinite pokus praznoga hoda u paralelnom radu i izmjerite sve parametre. Usporedite dobivene rezultate s onima dobivenim proračunom.

- Izvesti odgovarajuće zaključke,

Usporedite rezultate proračuna i mjerenja, te izvedite odgovarajuće zaključke.

ZADATAK URUČEN: 10.04.2018 | POTPIS MENTORA:

REPUBLIKA HRVATSKA SVEUČILIŠTE SJEVER

Sveučilište
Sjever

SVEUČILIŠTE
SJEVER

IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, FILIP JURIĆ *(ime i prezime)* pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog *(obrisati nepotrebno)* rada pod naslovom PARALELNI SAD TRANSFORMATORA *(upisati naslov)* te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)
Filip Jurić
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnost i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, FILIP JURIĆ *(ime i prezime)* neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog *(obrisati nepotrebno)* rada pod naslovom PARALELNI SAD TRANSFORMATORA *(upisati naslov)* čiji sam autor/ica.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)
Filip Jurić
(vlastoručni potpis)