

Energetski transformatori

Grbavec, Hrvoje

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:170396>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-25**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

ENERGETSKI TRANSFORMATORI

Rijeka, srpanj 2023.

Hrvoje Grbavec

0069090225

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

ENERGETSKI TRANSFORMATORI

Mentor: Prof. dr. sc. Dubravko Franković

Rijeka, srpanj 2023.

Hrvoje Grbavec

0069090225

Rijeka, 13. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**
Predmet: **Električna postrojenja**
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Hrvoje Grbavec (0069090225)**
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij elektrotehnike

Zadatak: **Energetski transformatori / Power transformers**

Opis zadatka:

Energetski transformatori predstavljaju jednu od najvažnijih komponenti elektroenergetskog sustava, a služe za povezivanje mreža (podsustava) različitih naponskih razina. Razlikujemo više vrsta energetskih transformatora ovisno o njihovoj funkciji i karakteristikama. U radu je potrebno prikazati fizikalno načelo rada transformatora, vektorski dijagram te nadomjesnu shemu transformatora. Opisati osnovne dijelove energetskih transformatora te uobičajene izvedbe mrežnih i distribucijskih transformatora.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.



Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:

Prof. dr. sc. Dubravko Franković

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

Prof. dr. sc. Dubravko Franković

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj završni rad izradio samostalno, koristeći se navedenom literaturom te znanjem stečenim na prijediplomskom studiju elektrotehnike Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci.



Rijeka, srpanj 2023.

Hrvoje Grbavec

ZAHVALA

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Dubravku Frankoviću na vremenu koje je posvetio i savjetima koje mi je prenio prilikom izrade ovog završnog rada.

Hvala svim profesorima i asistentima na znanju koje su mi prenijeli tijekom prijediplomskog studija.

Najveća hvala na podršci i razumijevanju mojoj obitelji koja je sve ovo vrijeme bila uz mene.

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. FIZIKALNI ZAKONI PRIMIJENJENI U RADU TRANSFORMATORA..... | 3 |
| 2.1. Ampereov kružni zakon ili zakon protjecanja..... | 3 |
| 2.2. Faraday – Lenzov zakon ili zakon elektromagnetske indukcije..... | 4 |
| 3. FIZIKALNA NAČELA RADA TRANSFORMATORA | 5 |
| 3.1. Idealni transformator | 6 |
| 3.2. Realni transformator | 9 |
| 3.2.1. Struja magnetiziranja..... | 9 |
| 3.2.2. Struja primara | 10 |
| 3.2.3. Gubici u namotima | 10 |
| 3.2.4. Gubici u željezu..... | 11 |
| 3.2.5. Rasipni magnetski tok..... | 13 |
| 3.2.6. Pojava viših harmonika struje magnetiziranja | 14 |
| 3.3. Osnovna pogonska stanja | 14 |
| 3.3.1. Transformator opterećen impedancijom Z | 15 |
| 3.3.2. Prazni hod transformatora | 17 |
| 3.3.3. Kratki spoj transformatora | 19 |
| 3.4. Reduciranje transformatorskih veličina..... | 21 |
| 3.5. Pokus praznog hoda i kratkog spoja..... | 23 |
| 3.5.1. Pokus praznog hoda | 24 |
| 3.5.2. Pokus kratkog spoja | 25 |
| 3.6. Nadomjesna shema transformatora | 27 |
| 4. ENERGETSKI TRANSFORMATORI..... | 30 |
| 4.1. Jezgra transformatora | 31 |
| 4.2. Namoti transformatora..... | 33 |

| | | |
|--------|--|----|
| 4.2.1. | Namoti prema tijeku energije | 33 |
| 4.2.2. | Namoti prema visini napona | 33 |
| 4.2.3. | Namoti prema funkciji | 34 |
| 4.2.4. | Namoti prema načinu namatanja..... | 34 |
| 4.2.5. | Vodiči za namote energetskih transformatora..... | 35 |
| 4.2.6. | Spojevi namota..... | 36 |
| 4.3. | Regulacijska sklopka | 38 |
| 4.4. | Kotao | 38 |
| 4.5. | Hladnjaci..... | 39 |
| 4.6. | Provodnici..... | 39 |
| 4.7. | Konzervator | 40 |
| 4.8. | Ventilatori..... | 40 |
| 5. | IZVEDBA TRANSFORMATORA..... | 42 |
| 5.1. | Suhi transformatori..... | 42 |
| 5.2. | Uljni transformatori | 42 |
| 5.3. | Autotransformatori | 43 |
| 5.4. | Transformatori s odvojenim namotima | 45 |
| 6. | ZAKLJUČAK..... | 47 |
| | LITERATURA..... | 49 |
| | POPIS OZNAKA I KRATICA | 50 |
| | SAŽETAK..... | 54 |
| | ABSTRACT | 55 |
| | POPIS SLIKA | 56 |

1. UVOD

Energija je važna za ekonomski rast i razvoj te osiguranje njezinoga kontinuiteta. Bez električne energije proizvodnja uopće ne bi bila moguća. Proizvodnja električne energije je zbog svoje važnosti stavljena u istu skupinu sa proizvodnjom hrane, sirovina i dostupnosti pitke vode. Potražnja za energijom kao i njezina potrošnja sve više raste [1].

Uvođenjem i liberalizacijom tržišta električne energije, na način da se razdvoje proizvodnja, prijenos i distribucija električne energije, transformatori kao uređaji zauzeli su važno mjesto.

Transformatori su statički električni uređaji koji pretvaraju izmjenični napon jedne amplitude na drugu posredstvom magnetskog toka uz zadržavanje jednake frekvencije i snage, ali promijenjene vrijednosti napona i struja. Neizostavni su dio elektroenergetskog sustava i nužni za prijenos i distribuciju energije na veće razdaljine [2].

Razvoj transformatora tekao je postepeno. Michael Faraday je još 1831. godine otkrio princip elektromagnetske indukcije. Prvim komercijalno upotrebljivim transformatorom smatra se sustav serijski povezanih zavojnica sa štapnom željeznom jezgrom kojeg je izgradio ruski inženjer Pavel Jobločkov 1877. godine. Ruski inženjer Mihail Osipović Dolivo-Dobrovoljski 1891. godine izumio je suhi trofazni transformator s trostupnom jezgrom. Na međunarodnoj izložbi 1891. godine u Frankfurtu, demonstrirana je prva primjena transformatora u prijenosu energije dalekovodom. Proizvodnja transformatora u Hrvatskoj započela je 1946. godine u zagrebačkom poduzeću „Rade Končar“ [3].

U razvoju transformatora potrebno je spomenuti i Nikolu Teslu, genija moderne elektrotehnike i fizike. Tesli se priznaje važnost u istraživanjima električnih i magnetskih pojava, a napose u prijenosu energije. Teslin višefazni sustav izmjeničnih struja njegov je najvažniji izum. [4].

Fizikalni principi na kojima se temelji rad transformatora ostali su nepromijenjeni i njihova konstrukcija također se nije značajno mijenjala u proteklih sto godina. Napredak je ostvaren u magnetskim i izolacijskim materijalima te primjenom računala za matematičko modeliranje [3].

Taj napredak prati i Grupa Končar koja se sve više okreće korištenju biorazgradivih tekućina koje ne zagađuju okoliš [5].

Cilj ovog završnog rada je prikazati fizikalno načelo rada transformatora, vektorski dijagram te nadomjesnu shemu transformatora. Opisati osnovne dijelove energetskih transformatora te uobičajene izvedbe mrežnih i distribucijskih transformatora i naglasiti važnost transformatora u elektroenergetskom sustavu.

U uvodu završnoga rada se definiraju predmet i cilj rada. U drugom poglavlju opisani su Ampereov i Faradayev zakon. U trećem je prikazano fizikalno načelo rada transformatora s vektorskim dijagramom te nadomjesnom shemom transformatora. U četvrtom poglavlju opisani su osnovni dijelovi energetskih transformatora. U petom poglavlju opisane su uobičajene izvedbe mrežnih i distribucijskih transformatora. Slijede zaključak, literatura, popis oznaka i kratica, sažetak i ključne riječi na hrvatskom i engleskom jeziku te popis slika.

2. FIZIKALNI ZAKONI PRIMIJENJENI U RADU TRANSFORMATORA

Princip rada transformatora objašnjava se pomoću dva temeljna fizikalna zakona, Ampereovog kružnog zakona i Faradayevog zakona elektromagnetske indukcije [3].

2.1. Ampereov kružni zakon ili zakon protjecanja

Pomoću Ampereovog kružnog zakona dokazuje se da električni naboj koji se giba izaziva magnetsko polje, odnosno dobivamo vezu između električne i magnetske fizikalne veličine. Ampereov kružni zakon dan je jednadžbom (2.1):

$$\oint_{C_S} H \cdot dl = \int_S J \cdot ndS = \Theta, \quad (2.1)$$

gdje je:

H jakost magnetskog polja, A/m

dl infinitezimalni dio zatvorene krivulje, m

J gustoća provodnih struja u vodičima, A/m²

ndS jedinični vektor okomit na infinitezimalni dio površine, m²

Θ strujno protjecanje, A.

Ampereov kružni zakon govori da je krivuljni integral vektora jakosti magnetskog polja H po zatvorenoj krivulji l jednak algebarskom zbroju n struja koje obuhvaća zatvorena krivulja l . Drugim riječima, krivuljni integral vektora jakosti magnetskog polja H duž zatvorene krivulje l jednak je strujnom protjecanju Θ [7].

2.2. Faraday – Lenzov zakon ili zakon elektromagnetske indukcije

Faraday je primijetio da će promjena magnetskog toka u zatvorenoj krivulji inducirati elektromotornu silu unutar te krivulje. Induciranje promjenjivog magnetskog toka može se ostvariti na nekoliko načina, vremenskom promjenom magnetske indukcije B ili promjenom površine S kroz koju magnetski tok prolazi. Ovisno o načinu na koji se ostvari promjenjivi magnetski tok, postoje dvije različite elektromotorne sile: elektromotorna sila gibanja i elektromotorna sila transformacije. Poznavajući Faradayev zakon Lenz je definirao smjer induciranog napona i smjer inducirane struje u zatvorenoj krivulji, pa je zakon poprimio ime Faraday – Lenzov zakon. Matematički zapis Faraday–Lenzovog zakona glasi (2.2) [7]:

$$e(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt}, \quad (2.2)$$

gdje je:

e inducirana elektromotorna sila, V

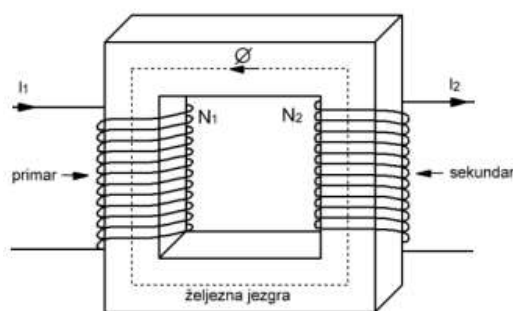
$d\Phi(t)$ derivacija magnetskog toka po vremenu, Wb/s.

3. FIZIKALNA NAČELA RADA TRANSFORMATORA

Transformatori, koji potječu od latinske riječi *transformatio* što znači mijenjanje oblika, su uređaji koji prenose električnu energiju između dvije zavojnice kroz koje prolazi isti magnetski tok. Prijenos energije između zavojnica temelji se na Faradayevom zakonu elektromagnetske indukcije. Transformatori rade samo na izmjeničnom naponu, jer je promjenjivi magnetski tok ključni uvjet za elektromagnetsku indukciju. U praksi se transformatori upotrebljavaju kad, pri konstantnoj frekvenciji, izmjenični napon jedne amplitude želimo promijeniti u izmjenični napon druge amplitude [6].

Fizikalno načelo rada transformatora prikazat će se na idealnom transformatoru sa jezgrom od feromagnetskog materijala, također ćemo zanemariti gubitke prijenosa energije među namotima transformatora.

Osnovni dijelovi transformatora su jezgra od feromagnetskog materijala te primarni i sekundarni namot, koji se također nazivaju primar i sekundar, prikazano na slici 3.1. Namoti transformatora konstruirani su na način da postoji dobra izolacija između namota i feromagnetske jezgre, između namota primara i sekundara te između zavoja unutar namota [6].



Slika 3.1. Osnovni dijelovi transformatora [6]

3.1. Idealni transformator

Na primarni namot priključuje se izvor izmjeničnog sinusoidalnog napona efektivne vrijednosti U_1 koji kroz namot tjera izmjeničnu sinusoidalnu struju I_1 koja stvara promjenjivi magnetski tok Φ sinusoidalnog oblika.

Primar i sekundar su na istoj feromagnetskoj jezgri pa isti promjenjivi magnetski tok Φ u namotu primara inducira napon samoindukcije e_{1S} efektivne vrijednosti E_1 , a u sekundaru napon međuindukcije e_{2M} efektivne vrijednosti E_2 . Napon samoindukcije e_{1S} i napon međuindukcije e_{2M} dani su jednadžbama (3.1) i (3.2) [6]:

$$e_{1S} = -N_1 \frac{d\Phi(t)}{dt}, \quad (3.1)$$

$$e_{2M} = -N_2 \frac{d\Phi(t)}{dt}, \quad (3.2)$$

gdje su:

N_1 brojevi zavoja na primaru,

N_2 brojevi zavoja na sekundaru.

Efektivna vrijednost napona na primarnom namotu U_1 odgovara naponu samoindukcije e_{1S} , dok efektivna vrijednost napona na sekundarnom namotu U_2 odgovara naponu međuindukcije e_{2M} (3.3) i (3.4):

$$U_1 = E_1 \quad (3.3)$$

$$U_2 = E_2 \quad (3.4)$$

gdje je:

U_1 efektivna vrijednost napona na primaru, V

U_2 efektivna vrijednost napona na sekundaru, V

E_1 efektivna vrijednost induciranog napona na primaru, V

E_2 efektivna vrijednost induciranog napona na sekundaru, V

Inducirani naponi također su sinusoidalnog oblika. Efektivne vrijednosti tih napona su (3.5) i (3.6):

$$E_1 = 4,44N_1f\Phi_m, \quad (3.5)$$

$$E_2 = 4,44N_2f\Phi_m, \quad (3.6)$$

gdje je:

f frekvencija, Hz

Φ_m magnetski tok, Wb.

Stavljanjem ta dva napona u međusobni omjer, dobivamo prvu glavnu jednadžbu transformatora (3.7) i (3.8) [8]:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}, \quad (3.7)$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (3.8)$$

Omjer efektivne vrijednosti napona na primarnom namotu U_1 i sekundarnom namotu U_2 transformatora jednak je omjeru broja zavoja primarnog i sekundarnog namota N_1 i N_2 . Omjer broja zavoja primarnog i sekundarnog namota N_1 i N_2 nazivamo prijenosni omjer transformatora.

Kada na sekundar transformatora spojimo trošilo snaga s primara prenosi se na trošilo na sekundaru.

Za idealni transformator koji nema gubitke vrijedi jednakost snage na primarnom i sekundarnom namotu, jer se sveukupna energija s primara magnetskim putem prenosi na sekundar (3.9) i (3.10):

$$P_1 = P_2, \quad (3.9)$$

$$U_1I_1 = U_2I_2, \quad (3.10)$$

gdje je:

P_1 snaga na primaru, W

P_2 snaga na sekundaru, W

I_1 efektivna vrijednost struje na primaru, A

I_2 efektivna vrijednost struje na sekundaru, A.

Iz toga proizlazi druga glavna jednadžba transformatora (3.11) [8]:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}, \quad (3.11)$$

Efektivne vrijednosti struja primara I_1 i sekundara I_2 su obrnuto proporcionalne broju zavoja na primarnom i sekundarnom namotu N_1 i N_2 .

Na temelju toga možemo zaključiti da pomoću transformatora možemo mijenjati vrijednosti napona i struje ovisno o omjeru zavoja na primarnom i sekundarnom namotu N_1 i N_2 .

Priključenjem trošila impedancije Z , Ω na sekundar transformatora (3.12):

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (3.12)$$

gdje je:

R realni dio impedancije, Ω

X imaginarni dio impedancije, Ω

efektivna vrijednost struje na sekundaru I_2 može se izračunati koristeći izraz (3.13):

$$I_2 = \frac{U_2}{Z}, \quad (3.13)$$

Fazni pomak φ_2 između napona U_2 i struje I_2 na sekundarnom namotu ovisi o omjeru imaginarne X i realne R komponente impedancije Z priključenog trošila (3.14) [6]:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{X}{R}, \quad (3.14)$$

Efektivnu vrijednost struje primara I_1 dobijemo iz druge glavne jednadžbe transformatora (3.15):

$$I_1 = I_2 \frac{N_2}{N_1}, \quad (3.15)$$

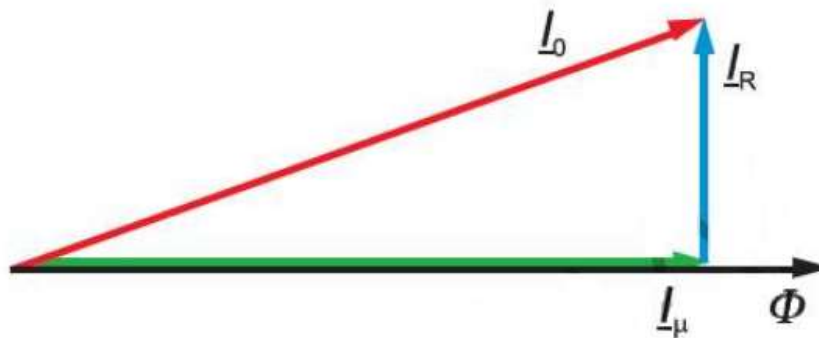
3.2. Realni transformator

Prilikom dosadašnjih analiza zanemarili smo nekoliko faktora.

Kako bismo dobili realniju sliku stanja transformatora u obzir moramo uzeti sljedeće činjenice:

3.2.1. Struja magnetiziranja

Kada je transformator neopterećen njegovim primarnim namotom teče struja praznog hoda I_0 . Ta struja se može razdvojiti na dvije komponente: struju magnetiziranja I_μ koja stvara magnetski tok Φ i struju I_R koja pokriva gubitke u feromagnetskoj jezgri i primarnom namotu kako je prikazano na slici 3.2. Komponenta struje praznog hoda I_R je puno manja od struje praznog hoda I_0 pa ju možemo zanemariti. U tom slučaju možemo pretpostaviti da je struja magnetiziranja I_μ jednaka struji praznog hoda I_0 [6].

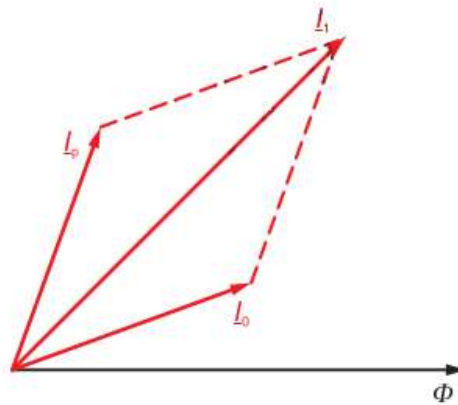


Slika 3.2. Struja magnetiziranja [6]

Također je važno reći da struja magnetiziranja nije sinusoidalna zbog promjenjive magnetske permeabilnosti željezne jezgre, koja proizlazi iz nelinearnog odnosa između jakosti struje magnetiziranja i magnetske indukcije.

3.2.2. Struja primara

Struju primara I_1 također možemo podijeliti na dvije komponente: struju praznog hoda I_0 i struju opterećenja I_p , kao na slici 3.3. Kada je transformator opterećen, struja opterećenja I_p je puno veća od struje praznog hoda I_0 stoga možemo pretpostaviti da je primarna struja I_1 jednaka struji opterećenja I_p [6].



Slika 3.3. Struja primara [6]

3.2.3. Gubici u namotima

Namoti transformatora, uobičajeno izrađeni od bakra, imaju određeni djelatni otpor na kojem se javljaju gubici snage u obliku topline, ta toplina predstavlja Jouleovu toplinu. Ti gubici nazivaju se gubici u bakru (3.16) i (3.17) [6, 8]:

$$P_{Cu1} = I_1^2 R_1, \quad (3.16)$$

$$P_{Cu2} = I_2^2 R_2, \quad (3.17)$$

gdje su:

P_{Cu1} gubici u bakru na primaru, W

P_{Cu2} gubici u bakru na sekundaru, W

R_1 djelatni otpor primara, Ω

R_2 djelatni otpor sekundara, Ω

3.2.4. Gubici u željezu

Prisutnost izmjeničnog magnetskog toka u feromagnetskoj jezgri uzrokuje gubitke zbog histereze i vrtložnih struja. Ovi gubici određuju se prema izrazima (3.18) i (3.19) [8, 9]:

$$P_h = h \cdot f \cdot B_m^2 \cdot m, \quad (3.18)$$

$$P_v = v \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot m, \quad (3.19)$$

gdje su:

P_h gubici histereze, W

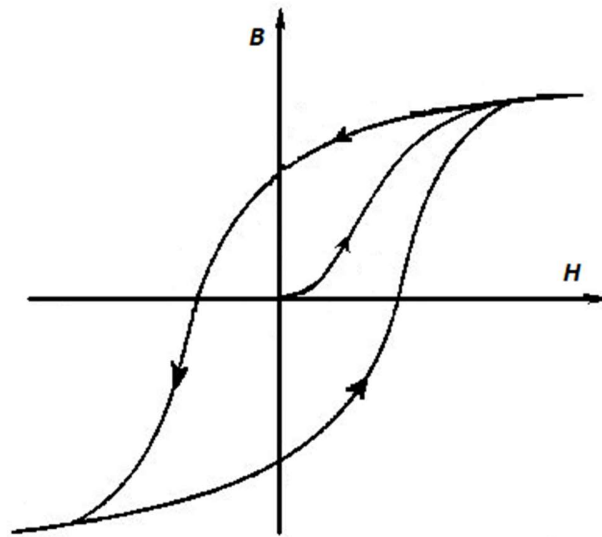
P_v gubici vrtložnih struja, W

h, v jedinični gubici, W/kg

B_m magnetska indukcija, T

m masa jezgre, kg.

Krivulja histereze u B - H koordinatnom sustavu predstavlja površinu koja je definirana kao umnožak magnetske indukcije B i jakosti magnetskog polja H slika 3.4.



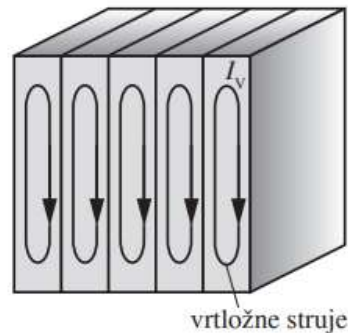
Slika 3.4. Krivulja histereze [9]

Pri periodičnom procesu magnetiziranja i razmagnetiziranja, koji se javlja pri protoku izmjenične struje, svaki se put mora dodatnom koercitivnom silom savladavati remanentni magnetizam u jezgri, što rezultira trošenjem energije odnosno zagrijavanjem jezgre.

Površina petlje histereze proporcionalna je energiji koja se utroši tijekom jednog ciklusa magnetiziranja. Gubici nastali tim procesom nazivaju se gubicima zbog histereze.

Gubici zbog histereze povećavaju se s porastom frekvencije, magnetske indukcije i napona napajanja.

Vrtložne struje u feromagnetnim materijalima stvaraju određenu količinu topline ovisno o električnom otporu. Energija koja se troši u ovom slučaju beskorisna je i smatra se gubicima, a ti gubici nazivaju se gubicima zbog vrtložnih struja slika 3.5. [8].



Slika 3.5. Vrtložne struje [9]

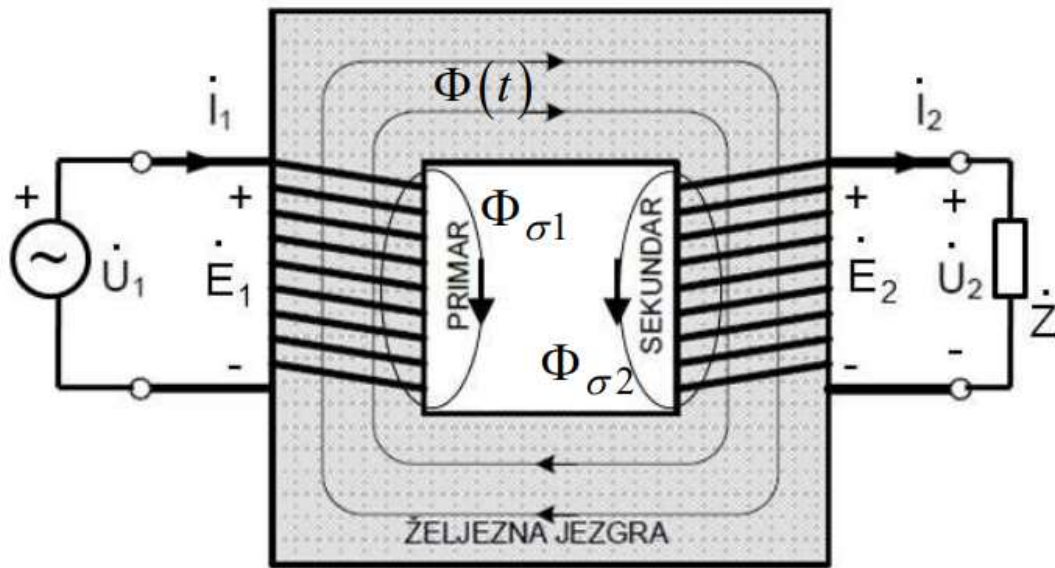
Jezgra se može zamisliti kao beskonačan broj kratko spojenih vodljivih petlji koje obuhvaćaju magnetski tok. Taj magnetski tok inducira napon u petljama. Pošto su te petlje zatvorene nastaju vrtložne struje koje prolaze kroz jezgru, zagrijavaju ju i stvaraju gubitke.

Gubici zbog vrtložnih struja smanjuju se tako da se jezgra radi od dinamo-limova koji su međusobno električki izolirani pa sprječavaju nastajanje petlji koje obuhvaćaju velike površine.

Gubici vrtložnih struja ovise o magnetskoj indukciji odnosno naponu i frekvenciji, dok ne ovise o struji, odnosno opterećenju transformatora [8].

3.2.5. Rasipni magnetski tok

U feromagnetskoj jezgri transformatora, ne prolazi sav magnetski tok kroz sve zavoje primara i sekundara. Dio magnetskog toka koji prolazi samo zavojima primarnog ili sekundarnog namota naziva se rasipni magnetski tok. Rasipni magnetski tok primara $\Phi_{\sigma 1}$ inducira protunapon na primaru koji se promatra kao induktivni pad napona na primaru. Isto tako rasipni magnetski tok $\Phi_{\sigma 2}$ inducira protunapon na sekundaru koji se promatra kao induktivni pad napona na sekundaru, što je vidljivo iz slike 3.6. [8].



Slika 3.6. Glavni i rasipni magnetski tok [8]

3.2.6. Pojava viših harmonika struje magnetiziranja

Struja magnetiziranja u transformatoru nije sinusoidalna zbog promjenjive magnetske permeabilnosti željeza, što donekle mijenja fizikalnu sliku rada transformatora. Kako bismo bolje razumjeli ta ponašanja, analizirat ćemo osnovna pogonska stanja rada realnog transformatora [6].

3.3. Osnovna pogonska stanja

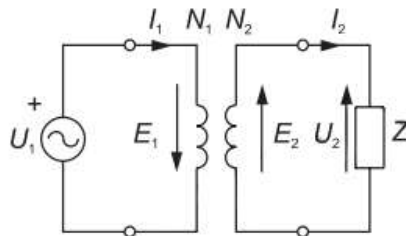
Rad transformatora analizira se u tri osnovna pogonska stanja, a to su:

- opterećenje – na sekundar je priključeno trošilo,
- prazni hod – stezaljke sekundara su otvorene i
- kratki spoj – stezaljke sekundara su kratko spojene [8].

3.3.1. Transformator opterećen impedancijom Z

Svaki je transformator konstruiran za određenu prividnu snagu. Tu snagu nazivamo nazivnom snagom transformatora S_N . Kada su na primaru i sekundaru naponi U_{N1} i U_{N2} na nazivnoj razini, transformator radi na nazivnoj snazi, pri čemu kroz namote teku nazivne struje I_{N1} i I_{N2} . Ove vrijednosti uvijek su naznačene na natpisnoj pločici transformatora.

Transformator opterećen impedancijom Z vidljiv je na shemi sa slike 3.7.



Slika 3.7. Shema transformatora opterećenim impedancijom Z [6]

Djelatni otpori namota primara i sekundara stvaraju padove napona na tim namotima U_{R1} i U_{R2} prema izrazima (3.20) i (3.21):

$$U_{R1} = I_1 R_1, \quad (3.20)$$

$$U_{R2} = I_2 R_2. \quad (3.21)$$

Zbog rasipnih tokova $\Phi_{\sigma 1}$ i $\Phi_{\sigma 2}$ u primarnom i sekundarnom namotu javljaju se inducirani naponi koji se prikazuju kao padovi napona U_{X1} i U_{X2} na induktivnom otporu primarnog namota X_1 i na induktivnom otporu sekundarnog namota X_2 (3.22) i (3.23):

$$U_{X1} = jI_1 X_1, \quad (3.22)$$

$$U_{X2} = jI_2 X_2. \quad (3.23)$$

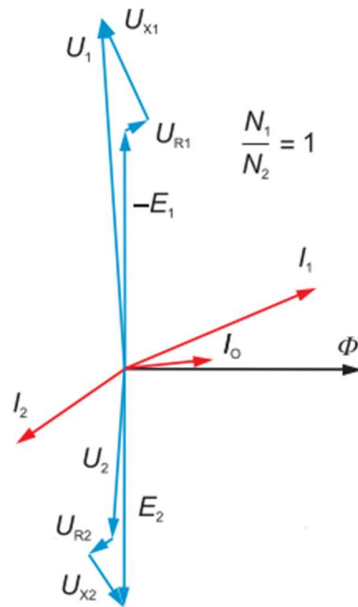
Za primar i sekundar transformatora možemo napisati jednadžbe II. Kirchhoffovog zakona (3.24) i (3.25):

$$U_1 + E_1 - U_{R1} - U_{X1} = 0, \quad (3.24)$$

$$U_2 - E_2 + U_{R2} + U_{X2} = 0. \quad (3.25)$$

Na temelju II. Kirchhoffovog zakona možemo nacrtati vektorski dijagram realnog transformatora opterećenog impedancijom Z . Pretpostavit ćemo da je prijenosni omjer transformatora $\frac{N_1}{N_2} = 1$ te da je transformator opterećen induktivnom impedancijom Z . Vektorski dijagram za realni transformator opterećen impedancijom Z vidljiv je na slici 3.8.

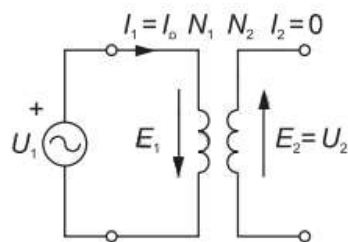
Kod crtanja vektorskog dijagrama prvo magnetski tok Φ postavimo na realnu os i struju magnetiziranja I_μ stavimo s njim u fazu. Inducirani naponi na primarnom i sekundarnom namotu zaostaju za magnetskim tokom za 90° . Djelatni pad napona na primarnoj strani U_{R1} i na sekundarnoj strani U_{R2} su u fazi s primarnom i sekundarnom strujom, a induktivni pad napona na primaru U_{X1} i na sekundaru U_{X2} okomiti su na smjer struja [6].



Slika 3.8. Vektorski dijagram za realni transformator opterećen impedancijom Z [6]

3.3.2. Prazni hod transformatora

Prazni hod transformatora je osnovno pogonsko stanje rada transformatora u kojem je na primarni namot priključen napon, a stezaljke sekundarnog namota su otvorene. Napon na sekundarnom namotu jednak je induciranom naponu E_2 , dok je struja I_2 jednaka nuli, slika 3.9.



Slika 3.9. Shema transformatora u praznom hodu [6]

Kroz primarni namot prolazi struja praznog hoda I_0 . Glavni magnetski tok Φ u feromagnetskoj jezgri uzrokuje gubitke zbog histereze i vrtložnih struja. Struja praznog hoda I_0 sastoji se od dvije komponente: induktivne I_μ i djelatne I_R , što je prikazano na slici 3.2.

Induktivna komponenta struje praznog hoda I_0 generira glavni magnetski tok Φ , dok djelatna komponenta prikazuje gubitke zbog histereze i vrtložnih struja nastalih u feromagnetskoj jezgri.

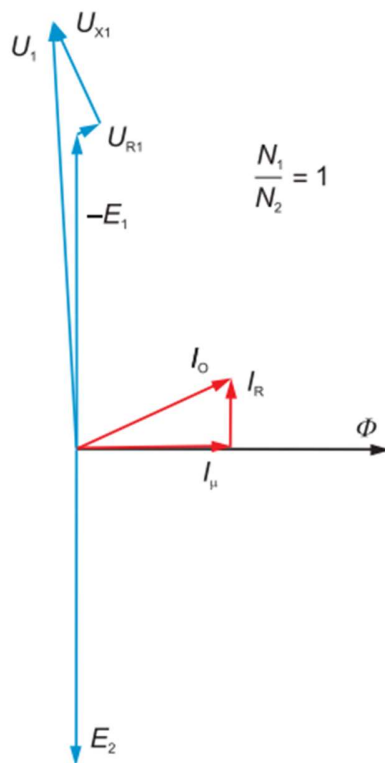
Sada, primjenom II. Kirchhoffovog zakona, možemo zapisati sljedeće jednadžbe za primar i sekundar (3.26) i (3.27):

$$U_1 + E_1 - U_{R1} - U_{X1} = 0, \quad (3.26)$$

$$U_2 = E_2. \quad (3.27)$$

Pomoću jednadžbi II. Kirchhoffovog zakona možemo nacrtati vektorski dijagram realnog transformatora u praznom hodu. Prijenosni omjer opet ćemo uzeti da iznosi 1 slika 3.10.

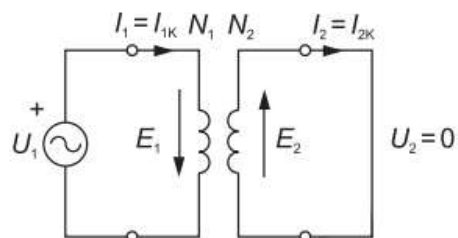
Kod crtanja dijagrama ponovo ćemo početi tako da magnetski tok Φ postavimo na realnu os i struju magnetiziranja I_μ stavimo s njim u fazu. Inducirani naponi na primaru i sekundaru zaostaju za magnetskim tokom za 90° . Djelatni pad napona na primarnoj strani U_{R1} je u fazi s primarnom strujom, a induktivni pad napona na primaru U_{X1} okomiti je na smjer struje.



Slika 3.10. Vektorski dijagram za realni transformator u praznom hodu [6]

3.3.3. Kratki spoj transformatora

Za vrijeme kratkog spoja na primarnu stranu transformatora priključen je napon U_1 , a stezaljke sekundarnog namota transformatora kratko su spojene, što znači da je sekundarni napon $U_2 = 0$ V slika 3.11.



Slika 3.11. Shema transformatora za vrijeme kratkog spoja [6]

Namotima transformatora teku struje kratkog spoja koje su znatno veće od nazivnih struja primara i sekundara.

Jednadžbe II. Kirchhoffovog zakona za vrijeme kratkog spoja glase (3.28) i (3.29):

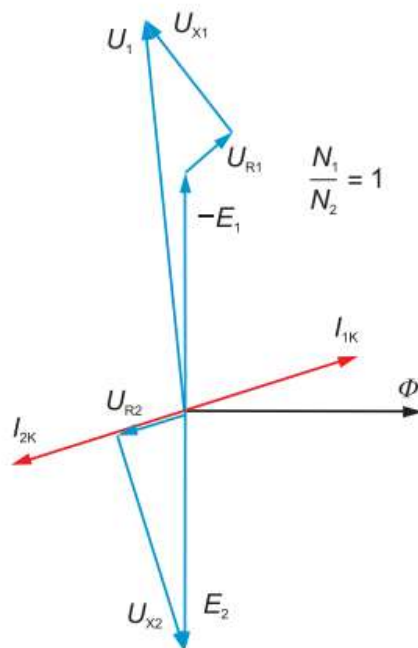
$$U_1 + E_1 - U_{R1} - U_{X1} = 0, \quad (3.28)$$

$$E_2 - U_{R2} - U_{X2} = 0. \quad (3.29)$$

Pogonsko stanje kratkog spoja je stanje kvara koje je vrlo nepovoljno, jer struja kratkog spoja izaziva značajan porast gubitaka u namotima, a ti gubici rastu kvadratno s povećanjem struje. Takva zagrijavanja mogu imati ozbiljne posljedice koje mogu biti i pogubne za transformator, ako zaštita brzo ne odreagira. U transformatoru se generira velika količina topline, što dovodi do velikih mehaničkih naprezanja, koja ne samo da mogu u potpunosti uništiti transformator već mogu oštetiti okolne dijelove postrojenja.

Vektorski dijagram realnog transformatora za vrijeme kratkog spoja crtamo pomoću jednadžbi II. Kirchhoffovog zakona. Prijenosni omjer opet će iznositi 1 slika 3.12.

Kod crtanja vektorskog dijagrama još jednom prvo magnetski tok Φ postavimo na realnu os. Inducirani naponi na primaru i sekundaru zaostaju za magnetskim tokom za 90° . Djelatni pad napona na primarnoj strani U_{R1} i na sekundarnoj strani U_{R2} su u fazi sa strujama kratkog spoja primara i sekundara, a induktivni pad napona na primarnoj strani U_{X1} i na sekundarnoj strani U_{X2} okomiti na smjer struja kratkog spoja.



Slika 3.12. Vektorski dijagram za realni transformator za vrijeme kratkog spoja [6]

3.4. Reduciranje transformatorskih veličina

Crtajući vektorske dijagrame za različita pogonska stanja realnog transformatora prijenosni omjer 1:1 se koristi s ciljem da se sve karakteristične veličine jasno prikažu i da se uoče njihovi međusobni odnosi.

Kod velikih prijenosnih omjera, vektorski dijagrami mogu predstavljati izazov, pa se provodi postupak reduciranja sekundarnih veličina na primar. Ako označimo sekundarni napon pri broju zavoja sekundarnog namota N_2 s U_2 , a reducirani sekundarni napon U_2' pri broju zavoja primarnog namota N_1 , vrijedi sljedeće (3.30) i (3.31):

$$U_2' = U_2 \frac{N_1}{N_2}, \quad (3.30)$$

$$E_2' = E_2 \frac{N_1}{N_2}. \quad (3.31)$$

Istim postupkom dobivamo izraz za preračunavanje struje (3.32):

$$I_2' = I_2 \frac{N_2}{N_1}. \quad (3.32)$$

Kako je otpor definiran kao omjer napona i struje, možemo dobiti izraze za reduciranje djelatnog otpora R_2 sa sekundara na primar (3.33) i (3.34):

$$R_2' = \frac{U_{R2}'}{I_2'} = \frac{U_{R2} \frac{N_1}{N_2}}{I_2 \frac{N_2}{N_1}}, \quad (3.33)$$

$$R_2' = R_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2, \quad (3.34)$$

i induktivnog otpora X_2 (3.35) i (3.36):

$$X_2' = \frac{U_{X2}'}{I_2'} = \frac{U_{X2} \frac{N_1}{N_2}}{I_2 \frac{N_2}{N_1}}, \quad (3.35)$$

$$X_2' = X_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2. \quad (3.36)$$

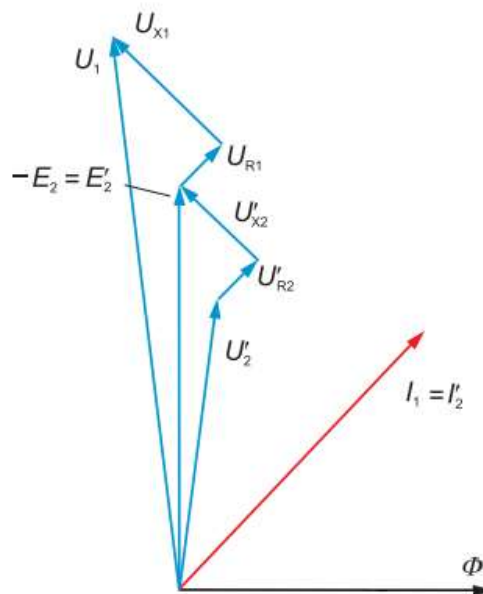
Jednadžbe II. Kirchhoffovog zakona za realni transformator opterećen impedancijom Z , s sekundarnim veličinama reduciranim na primarnu stranu, sada su (3.37) i (3.38):

$$U_1 + E_1 - U_{R1} - U_{X1} = 0, \quad (3.37)$$

$$U_2' - E_2' + U_{R2}' + U_{X2}' = 0. \quad (3.38)$$

Uz redukciju sekundarnih veličina na primar, pri crtanju vektorskog dijagrama, iz praktičnih se razloga sekundarne veličine zarotiraju za 180° . Tako se omogućuje bolje uočavanje međusobnih odnosa između veličina [6].

Vektorski dijagram realnog transformatora opterećenog induktivnom impedancijom Z slika 3.13.



Slika 3.13. Vektorski dijagram transformatora opterećenog s impedancijom Z s reduciranim veličinama na primar

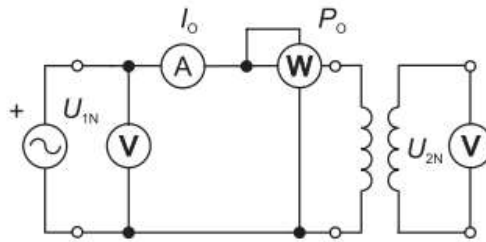
Moguće je i primarne veličine na isti način reducirati na sekundar i dobije se isti rezultat.

3.5. Pokus praznog hoda i kratkog spoja

Glavne karakteristike transformatora mogu se odrediti eksperimentalnim putem, mjerenjem napona, struja i snaga u praznom hodu i kratkom spoju. Ovim mjernim postupcima, koje uobičajeno nazivamo pokus praznog hoda i pokus kratkog spoja, dobivamo podatke potrebne za definiranje glavnih karakteristika promatranog transformatora [6].

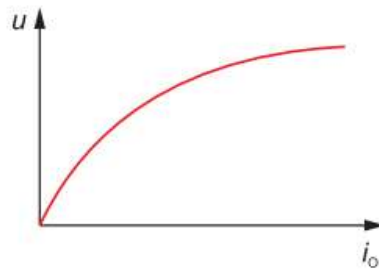
3.5.1. Pokus praznog hoda

Pokus praznog hoda transformatora izvodi se tako da na primarnu stranu transformatora priključimo nazivni napon efektivne vrijednosti U_{N1} zajedno s voltmetrom, ampermetrom i vatmetrom, a na sekundar spojimo samo voltmetar velikog unutarnjeg otpora kao na slici 3.14.



Slika 3.14. Shema pokusa praznog hoda [6]

Karakteristika pokusa praznog hoda vidi se na slici 3.15.



Slika 3.15. Karakteristika pokusa praznog hoda [6]

Voltmetri postavljeni na primarnoj i sekundarnoj strani mjerit će nazivne napone primara U_{N1} i sekundara U_{N2} . Pomoću njih možemo izračunati prijenosni omjer transformatora (3.39):

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{N1}}{U_{N2}}. \quad (3.39)$$

Ampermetar mjeri struju praznog hoda I_0 , a vatmetar mjeri snagu koju transformator u praznom hodu uzima iz mreže P_0 .

U praznom hodu transformatora, struja koja teče primarom znatno je manja od nazivne struje, obično oko 1% kod većih trofaznih transformatora. Tako mala struja uzrokuje zanemarive gubitke u namotima transformatora. Možemo zaključiti da snaga koju mjeri vatmetar predstavlja gubitke u željezu transformatora (3.40):

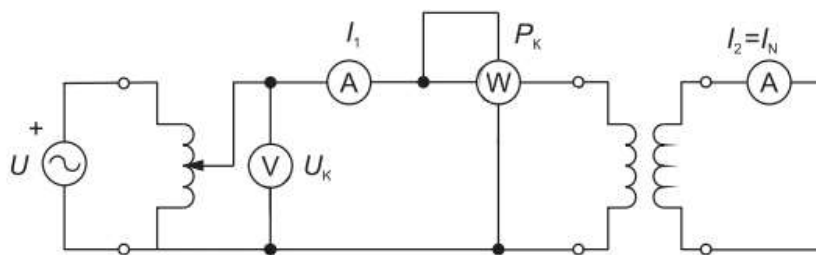
$$P_{Fe} \approx P_0. \quad (3.40)$$

Na temelju izmjerenih veličina može se izračunati fazni pomak između napona i struje primara, računajući $\cos\varphi_0$ (3.41):

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_{Fe}}{U_{N1}I_0}. \quad (3.41)$$

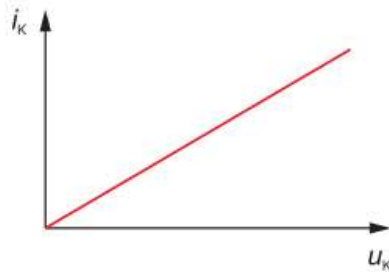
3.5.2. Pokus kratkog spoja

Tijekom pokusa kratkog spoja na primaru mjere se napon, struja i snaga na primaru. Na sekundaru, koji je kratko spojen, mjeri se struja kratkog spoja slika 3.16.



Slika 3.16. Shema pokusa kratkog spoja [6]

Karakteristika pokusa kratkog spoja vidi se na slici 3.17.



Slika 3.17. Karakteristika pokusa kratkog spoja [6]

Pokus kratkog spoja provodi se tako da se pomoću regulacijskog transformatora napon primara U_1 postepeno povećava, od vrijednosti 0 V do vrijednosti U_K , za koju na sekundaru poteče nazivna struja I_{N2} . Istovremeno na primarnom namotu teče nazivna struja I_{N1} . Snaga koju mjeri vatmetar na primaru označava se s P_K .

Pri naponu U_K , koji je mnogo manji od nazivnog napona primara U_{N1} , gubici u željezu transformatora mogu se zanemariti jer su struja magnetiziranja I_μ i magnetska indukcija Φ vrlo male. Zaključujemo da izmjerena snaga P_K predstavlja gubitke koji se javljaju u bakru namota transformatora (3.42):

$$P_{Cu} \approx P_K. \quad (3.42)$$

Na temelju vrijednosti izmjerenih tijekom pokusa kratkog spoja možemo izračunati i faktor faznog pomaka $\cos\varphi_K$ (3.43):

$$\cos\varphi_K = \frac{P_{Cu}}{U_K I_{N1}}. \quad (3.43)$$

Napon kratkog spoja U_K predstavlja vrijednost primarnog napona kod kojeg kroz kratko spojeni sekundar transformatora prolazi nazivna struja I_{N2} . Ova vrijednost se obično izražava u postocima nazivnog primarnog napona U_{N1} (3.44):

$$u_K \% = \frac{U_K}{U_{N1}} \cdot 100. \quad (3.44)$$

Pomoću $u_K\%$ možemo izračunati struju kratkog spoja, koja je važan faktor pri projektiranju zaštite transformatora i ostalih dijelova rasklopnog postrojenja (3.45).

$$I_{KS} = I_N \frac{100}{u_K\%}. \quad (3.45)$$

Trajna struja kratkog spoja I_{KS} , poteče nekoliko perioda nakon nastanka kratkog spoja. Njezin iznos ograničen je samo impedancijom transformatora. Važno je napomenuti da kratki spoj može biti vrlo opasan za transformatore s malim vrijednostima napona kratkog spoja $u_K\%$.

3.6. Nadomjesna shema transformatora

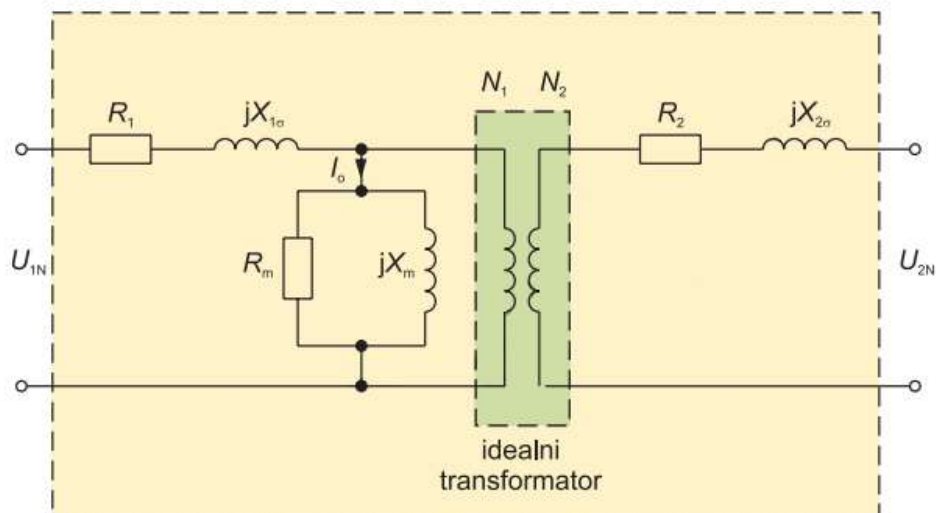
Da bismo mogli provoditi proračune i analize strujnih krugova u kojima se koriste transformatori, koristimo nadomjesnu shemu. Nadomjesna shema je pojednostavljeni shematski prikaz transformatora koja sa zadovoljavajućom točnošću opisuje ponašanje transformatora u električnoj mreži.

Prilikom konstrukcije nadomjesne sheme moramo voditi računa o fizikalnim osnovama nadomjesne sheme.

Tijekom prolaska struje kroz namote primara i sekundara transformatora, dolazi do zagrijavanja zbog gubitaka koji se javljaju u bakru. Ti gubici proporcionalni su kvadratu struje koja prolazi kroz njih. U nadomjesnoj shemi transformatora te gubitke nadomještamo otporima R_1 i R_2 koji predstavljaju otpore namota u primarnom i sekundarnom krugu.

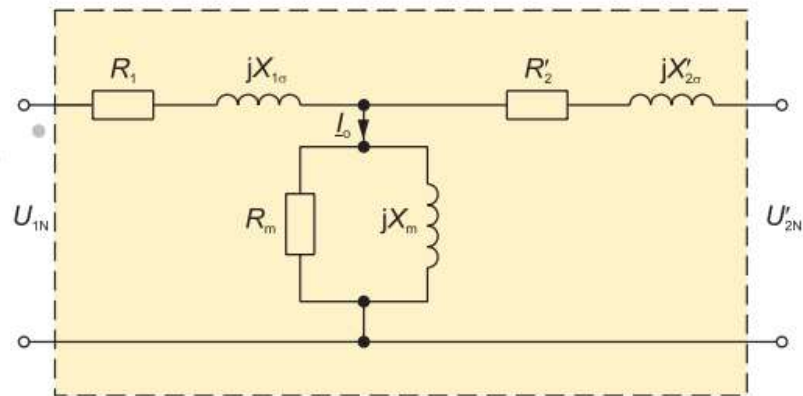
Feromagnetska jezgra transformatora se zagrijava zbog vrtložnih struja i zbog histereze. Struja praznog hoda I_0 predstavlja nam gubitke u željezu. Nadomještamo ju s dvije paralelne grane. Kroz jednu od tih grana teče struja magnetiziranja I_μ koja kasni za 90° za priključenim naponom i u njezinu granu stavljamo induktivni otpor X_θ . U drugoj grani teče djelatna komponenta struje praznog hoda I_R , koja je u fazi s priključenim naponom te u tu granu dodajemo djelatni otpor R_θ .

Primarni i sekundarni namoti imaju rasipni induktivitet, koji uzrokuje rasipni magnetski tok $\Phi_{\sigma 1}$ i $\Phi_{\sigma 2}$. Da bismo nadomjestili ove rasipne magnetske tokove u shemi koristimo zavojnice induktiviteta $L_{\sigma 1}$ i $L_{\sigma 2}$, koje imaju induktivni otpor $X_{\sigma 1}$ i $X_{\sigma 2}$, slika 3.18.



Slika 3.18. Nadomjesna shema transformatora [6]

Nakon dodavanja navedenih elemenata, primarni i sekundarni krug ostaju povezani putem idealnog transformatora. Kada je prijenosni omjer idealnog transformatora 1:1, taj transformator ne utječe na shemu i možemo ga ukloniti. Da bismo to postigli reduciramo sekundarne veličine na primarnu stranu. Taj oblik nadomjesne sheme prikazan je na slici 3.19. [6].



Slika 3.19. Nadomjesna shema transformatora reducirana na primar [6]

4. ENERGETSKI TRANSFORMATORI

Energetski transformatori su statički električki uređaji koji prenose električnu energiju s jednog nivoa napona na drugi nivo napona.

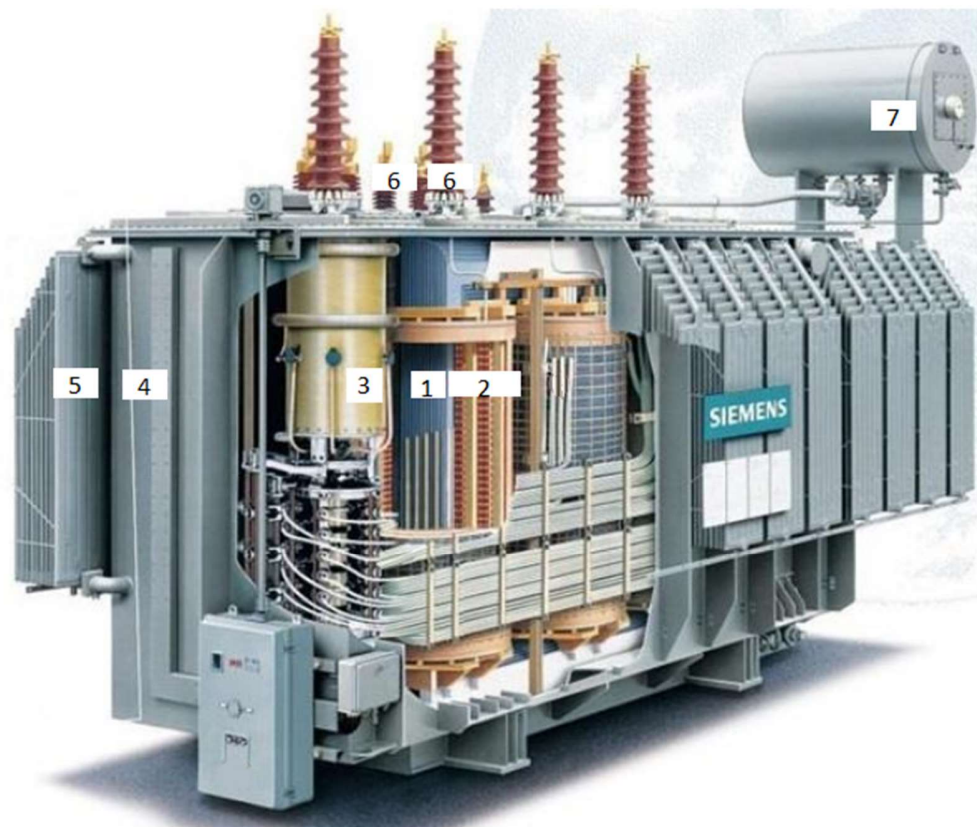
Osnovni dijelovi energetskog transformatora prikazani su na slici 4.1., a to su:

jezgra (1), namoti (2), regulacijska sklopka (3), kotao (4), hladnjaci (5), provodnici (6), konzervator (7) i ventilatori.

Osnovne dijelove možemo podijeliti na aktivne dijelove i pasivne.

Aktivni dijelovi su: jezgra, namoti i regulacijska sklopka. Aktivni dijelovi izravno sudjeluju u procesu transformacije.

Pasivni dijelovi ne sudjeluju direktno u prijenosu energije, no svojim djelovanjem poboljšavaju energetske učinkovitost i olakšavaju uporabu samog transformatora, a to su: kotao, hladnjaci, provodnici, konzervator i ventilatori [3].



Slika 4.1. Glavni dijelovi energetskog transformatora [3]

4.1. Jezgra transformatora

Ključni i neizostavni dio svakog transformatora je feromagnetska (željezna) jezgra, čija je uloga što bolje magnetsko povezivanje primarnog i sekundarnog kruga (i tercijarnog ako postoji).

Feromagnetska jezgra transformatora sastoji se od stupova na kojima se nalaze namoti i jarmova koji spajaju te stupove.

Prostor između stupova i jarmova naziva se prozor jezgre i služi za smještaj namota.

Presjek stupa jezgre može biti pravokutnog, ovalnog i okruglog oblika. Najčešće se koristi okrugli presjek. Presjek se popunjava konačnim brojem paketa transformatorskih limova.

Jezgra transformatora slaže se od tankih hladno valjanih magnetski orijentiranih limova. To je legura željeza s dodatkom silicija kao ključnim elementom i manje zastupljenim elementima aluminija i

mangana. Silicij smanjuje vodljivost, a time i vrtložne struje, dok s druge strane silicij povećava tvrdoću i krtoost materijala pa postotak silicija u leguri ne prelazi 3,2%.

Postoje tri glavne vrste transformatorskog lima:

1. konvencionalni magnetski orijentirani lim – CGO,
2. superorijentirani magnetski lim – HGO i
3. laserski tretirani superorijentirani magnetski lim - HGO-DR.

Najniže gubitke ima laserski tretirani superorijentirani magnetski lim, a najnižu buku superorijentirani magnetski limovi. Omjer korištenja konvencionalnih i superorijentiranih limova do nedavno je bio 50:50, a europskom eko direktivom o snižavanju gubitaka transformatora iz 2015. godine, u upotrebi postaju dominantni limovi s najnižim gubicima, tj. laserski tretirani superorijentirani magnetski limovi.

Razvoj transformatorskih limova pokretao je i razvoj transformatora, jer se niti jedan drugi materijal ili tehničko rješenje u transformatoru nije toliko unaprijedilo kao što je to slučaj s transformatorskim limovima.

U energetske transformatorima obično se koriste limovi debljine između 0,23 mm i 0,35 mm. Limovi jezgre moraju biti međusobno izolirani. Izolacija se nanosi samo na jednu stranu lima, a kao izolacija koristi se posebni izolacijski premaz – *carlite*. Premaz je otporan na vrlo visoke temperature koje se razvijaju u procesu proizvodnje lima. Izolacijskim premazom postiže se niski faktor kvarenja lima, niska buka jezgre i olakšano slaganje jezgre zbog glatke površine lima. Izoliranje se provodi prije mehaničke obrade.

Razlikujemo sljedeće izvedbe magnetskih jezgri transformatora:

1. prema broju faza – jednofazne i trofazne,
2. prema broju stupova – dvostupne, trostupne, četverostupne i peterostupne,
3. prema izvedbi bez ili s povratnim stupom – jezgraste i ogrnute,
4. prema načinu izvedbe – slagane i motane.

U europskoj proizvodnji transformatora najčešće se koriste slagane trofazne trostupne jezgre, što donosi prednosti u odnosu na američki tip koji se sastoji od tri odvojena jednofazna transformatora u

trofaznom spoju. Slagane trofazne trostupne jezgre omogućuju manju masu jezgre, manje dimenzije i nižu cijenu, dok je prednost američkog tipa u lakšem transportu zbog manje mase i dimenzija po jedinici i u lakšem i bržem popravku u slučaju kvara na jednoj fazi, jer je potrebno zamijeniti samo jednofazni transformator faze u kvaru, umjesto zamjene ili popravka cijele jedinice [3, 8].

4.2. Namoti transformatora

Namoti transformatora imaju funkciju da transformiraju napon, odnosno promijene prijenosni omjer na više ili na niže. Namoti su skup zavoja koji pripadaju strujnom krugu transformatora, građeni od žice. Prema [3, 8] namote u transformatorima razlikuju po izvedbi ovisno o namjeni, naponskoj razini i struji za koju su projektirani, isto će se objasniti u nastavku rada.

4.2.1. Namoti prema tijeku energije

Svaki transformator prema tijeku energije ima primarni namot, primar, koji se povezuje s izvorom energije i sekundarni namot, sekundar, preko kojeg se dobiva transformirana električna energija i na koji se priključuje trošilo. Energije se uvijek prenosi s primarnog na sekundarni namot. Primarni namot može biti viši ili niži napon u odnosu na sekundarni namot. U praksi se često primarni i sekundarni namoti transformatora namotavaju jedan preko drugoga na istom stupu magnetske jezgre kako bi se postiglo bolje povezivanje magnetskog toka.

4.2.2. Namoti prema visini napona

Prema visini napona transformator ima gornjenaponski i donjenaponski namot. Gornjenaponski namot ima veći broj zavoja, s mnogo zavoja od tanke žice, što rezultira slabijom strujom, a donjenaponski namot ima manji broj zavoja, s manje zavoja od debele žice, što rezultira većom strujom.

4.2.3. Namoti prema funkciji

Prema funkciji namoti mogu biti niženaponski (NN), srednjenaponski (SN), višenaponski (VN), stabilizacijski (ST), tercijarni (TN) i regulacijski (RN).

Niženaponski i višenaponski namoti imaju ulogu da transformiraju napon i povezuju mreže.

Uloga stabilizacijskih namota je omogućavanje prolaska struje trećeg harmonika, što rezultira postizanjem sinusnog valnog oblika inducirano napona i stabilizacijom napona u slučaju nesimetričnog opterećenja transformatora.

Tercijarni namoti su namoti treće (najniže) naponske razine kada se povezuju tri različite naponske razine. Ako nemaju vanjski priključak za povezivanje na mrežu i ako su spojeni u trokut, onda rade kao stabilizacijski.

Regulacijski namoti služe za regulaciju napona glavnog namota i to obično VN namota. Regulacija može biti izvedena tako da se dio namota koristi za regulaciju napona ili se izvodi kao jedan posebni regulacijski namot (finoregulacijski namot – FR) ili dva odvojena regulacijska namota (gruba regulacija – GR, fina regulacija – FR) koji se zatim povezuju u seriju s glavnim namotom čiji se napon regulira.

Namoti se smještaju tako da uz jezgru dolazi namot s najnižim naponom, zatim uz njega na većem promjeru namot sljedećeg većeg napona itd. Regulacijski namoti se u pravilu nalaze neposredno uz glavni namot čiji se napon regulira, obično na većem promjeru.

4.2.4. Namoti prema načinu namatanja

Prema načinu namatanja namoti kod energetskih transformatora mogu biti spiralni, preloženi, upleteni i regulacijski. Namatati se može u aksijalnom ili radijalnom smjeru. Kod aksijalnog namatanja namata se u visinu, sloj po sloj, a kod radijalnog namatanja namata se u širinu od unutrašnjeg prema vanjskom

promjeru i formira se svitak. Na aksijalan način namataju se spiralni i regulacijski namoti, a na radijalan način preloženi i upleteni namoti.

Spiralni namoti karakteristični su za većinu namota energetskih transformatora (ST, TN, NN, GR i FR).

4.2.5. Vodiči za namote energetskih transformatora

Za namote energetskih transformatora prema [3] koriste se sljedeći vodiči izgrađeni od bakra:

- profilni vodič,
- dvostruki vodič (2V),
- trostruki vodič (3V) i
- transponirani vodič (TSV).

Izolacija profilnog vodiča može biti od laka, papira ili laka i papira zajedno. Kod papira je prirast izolacije po dužoj stranici veći od prirasta po kraćoj stranici, dok je kod lak izolacije prirast u oba smjera isti.

Dvostruki i trostruki vodiči uobičajeno se koriste za izradu VN namota energetskih transformatora kada je potreban presjek vodiča između 50 – 100 mm² s tendencijom pomicanja prema nižim presjecima. Izolacija je od laka, a za očvršćivanje vodiča može se koristiti epoksidna smola.

Primjenom transponiranih vodiča (TSV) u transformatorskoj industriji postigao se najveći razvojni iskorak na području namota. Osnovna prednost korištenja TSV-a je smanjenje gubitaka skin-efekta u vodičima i brzina namatanja zbog tvornički transponiranih tankih vodiča, ne moraju se ručno raditi prepleti. Za očvršćivanje vodiča također se može koristiti epoksidna smola, čime se povećava otpornost namota na deformacije u kratkom spoju. TSV je danas najzastupljeniji vodič u proizvodnji namota energetskih transformatora, bez obzira na to što je i najskuplji.

4.2.6. Spojevi namota

Spoj transformatora daje nam informacije o načinu spajanja namota transformatora i faznom pomaku između napona namota višeg i nižeg napona. Kod trofaznih transformatora postoje tri osnovna spoja namota: spoj zvijezda, spoj trokut i spoj razlomljena zvijezda (cik-cak).

Spojevi namota označavaju se slovnim oznakom. Velika slova označavaju primarni namot, a mala slova sekundarni i tercijarni namot pa imamo:

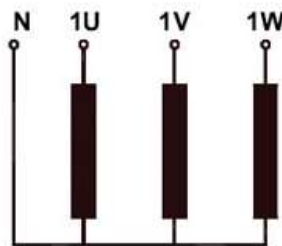
Y, y – oznake za spoj namota u zvijezdu,

D, d – oznake za spoj namota u trokut i

z – oznaka za spoj namota u razlomljenu zvijezdu.

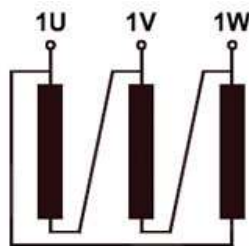
Kad se na spoju zvijezda koristi nultočka, označava se velikim slovom N na VN strani i malim slovom n na NN strani.

U spoju zvijezda (Y, y) slika 4.2. počeci namota se spajaju na linije mreže, dok se krajevi namota spajaju u zajedničkoj točki, odnosno zvjezdlištu. Fazni naponi su $\sqrt{3}$ puta manji od linijskih, a fazne i linijske struje su jednake. Spoj zvijezda ekonomičniji je za VN namote jer za postizanje istog faznog napona zahtijeva $\sqrt{3}$ puta manji broj zavoja u odnosu na spoj trokut. Spoj zvijezda omogućava direktno uzemljenje ili uzemljenje preko impedancije te ima dostupnu nultočku.



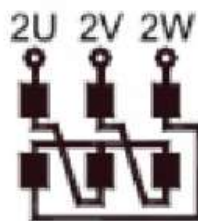
Slika 4.2. Spoj namota trofaznog transformatora u zvijezdu [3]

U spoju trokut (D, d) slika 4.3. počeci i krajevi faznih namota su ciklički spojeni. Fazni naponi u spoju trokut su jednaki linijskim naponima, dok su fazne struje $\sqrt{3}$ puta manje od linijskih struja. Spoj trokut je ekonomičnije koristiti za namote s velikim strujama i nižim naponima, jer istovremeno sprječava prijelaz nulte struje. Kombinacija spoja trokut i spoja zvijezda omogućuje smanjenje nulte impedancije i smanjuje nesimetriju faznih napona u slučaju nesimetričnih trofaznih i jednofaznih opterećenja.



Slika 4.3. Spoj namota trofaznog transformatora u trokut [3]

Spoj razlomljena zvijezda, poznati i kao cik-cak spoj (z) slika 4.4. primjenjuje se samo na sekundarnoj strani. Sekundarni namot svakog stupa je podijeljen u dvije jednake polovice, a zatim se za svaku fazu jedna polovica namota s jednog stupa spoja u suprotnom smjeru s drugom polovicom namota sljedećeg stupa. U svakoj polovici namota se inducira napon koji je jednak polovici napona cjelokupnog namota. Cik-cak spoj se često koristi kod uzemljivačkih transformatora kako bi se formirala umjetna nultočka mreže. Ovaj spoj također smanjuje naponsku nesimetriju u sustavu u kojima opterećenje tereta nije ravnomjerno raspoređeno po fazama.



Slika 4.4. Spoj namota trofaznog transformatora u razlomljenu zvijezdu [3]

Osim vrste spoja važan je i način povezivanja sekundarnog namota u odnosu na primarni. Način povezivanja određuje fazni pomak sekundarnog napona u odnosu na primarni. Označuje se satnim brojevima od 0 do 11. Satni broj transformatora ovisi o odabranom spoju i pokazuje fazni pomak između fazne vrijednosti sekundarnog i primarnog napona svake faze. Također nam pokazuje koliko puta je taj fazni kut višekratnik od kuta 30° . Kada satni broj pomnožimo s 30 dobijemo fazni pomak u stupnjevima.

Primjer: Oznaka Dy5 znači da je primarni namot spojen u trokut, sekundarni u zvijezdu i da je kut između primarnog i odgovarajućeg sekundarnog napona $5 \cdot 30^\circ = 150^\circ$ [3, 8, 10].

4.3. Regulacijska sklopka

Osnovna zadaća regulacijske sklopke je održavanje konstantnog napona neovisno o opterećenju transformatora. To se postiže promjenom prijenosnog omjera transformatora. Regulacijska sklopka se uobičajeno nalazi na VN strani transformatora na kojoj mijenja broj zavoja regulacijskog namota i time utječe na ukupan broj zavoja na VN strani. Glavna svrha regulacijske sklopke je održavanje konstantnog napona na NN strani neovisno o promjenama opterećenja. Prema izolacijskom mediju u kojemu se odvijaju sklopne operacije, regulacijska sklopka može biti uljna ili vakuumska. Promjena kontakata kod uljne regulacijske sklopke vrši se pomoću teretne sklopke koja se nalazi u posebnom ulju, odvojenom od ulja u kojem su namoti i birač položaja. Kod vakuumske regulacijske sklopke ulogu teretne sklopke preuzimaju dva vakuumska prekidača [3].

4.4. Kotao

Glavni zadatak kotla je da nosi ulje i odvodi toplinu iz transformatora u okolinu. Kotao služi kao kućište transformatora u koji se ulaže jezgra s namotima. Kotao se sastoji od poklopca, bočnih stranica, dna i hladnjaka. Izvedba kotla ovisi o veličini transformatora. Transformatorima do 30 kVA dovoljno je osigurati prirodno hlađenje putem glatke vanjske površine kotla. Međutim, kako snaga transformatora raste, tako rastu i gubici, a s njima dolazi i potreba za većom rashladnom površinom. Gubici rastu s kubikom promjene linearnih dimenzija, a rashladna površina s kvadratom. Kod većih

transformatora potrebno je proširiti površinu za hlađenje kotla. To povećavanje rashladne površine, od manjih do većih transformatora, može se postići na nekoliko načina: koristeći rebrasti lim za izradu kotla, izradom kotla s cijevima, dodavanjem radijatora uz kotao, primjenom prisilnog hlađenja uljnog kotla zrakom ili primjenom prisilnog hlađenja uljnog kotla vodom. Svaki kotao mora imati odgovarajuće mjesto za ispuštanje ulja koje se nalazi na najnižoj točki te mjesto za uzemljenje. Stijenke kotla izrađene su od čeličnog lima koji ga čvrsto zatvara zbog rashladnog ulja unutar njega. Kotao se zatvara pomoću poklopca. Poklopac na kotlu mora biti dobro zabrtvljen, jer je ulje stalno pod pritiskom. Između prirubnice kotla i poklopca nalazi se brtva od pluta ili umjetne gume koja je otporna na ulje. Na poklopcu kotla postoji otvor za postavljanje termometra koji služi za mjerenje temperature ulja [8].

4.5. Hladnjaci

Funkcija hladnjaka je hlađenje ulja koje se koristi kao izolacijsko sredstvo i provodnik topline unutar transformatora. Kod transformatora u trajnom pogonu pri nazivnom opterećenju temperatura najtoplije točke namota ograničena je na 118°C, srednja temperatura namota na 105°C i maksimalna temperatura ulja na 100°C. Hladnjaci osiguravaju da se održi prihvatljiva temperatura unutar transformatora i spriječi pregrijavanje. Pregrijavanje transformatora uzrokovalo bi smanjenje učinkovitosti, degradaciju izolacije i skraćenje životnog vijeka transformatora. Kod energetskih transformatora, hladnjak se obično sastoji od 10 do 30 članaka. Postavlja se tako da mu donji rub nije ispod razine donjeg ruba namota. Najčešće se koristi tzv. ONAN/ONAF sustav hlađenja kod kojeg se hladnjak hladi s vanjske strane prirodnim ili prisilnim strujanjem zraka [3].

4.6. Provodnici

Provodnici se nalaze na poklopcu kotla transformatora. Imaju trostruku zadaću. Prva je da omogućavaju prolaz vodiča kroz kotao čime se ostvaruje mogućnost povezivanja transformatora i energetskog postrojenja. Druga zadaća je izoliranje vodiča, odnosno visokog napona prema kotlu. Uz vodič koji prolazi kroz središte provodnika, svaki provodnik ima i izolator. Izolator može biti porculan

ili papir. Treća zadaća provodnika je odvajanje izolacijskih medija u transformatoru od drugog izolacijskog medija na koji se transformator spaja. Izolacijski mediji energetskih transformatora su transformatorsko ulje, zrak i plin SF₆. Prema izolacijskom mediju kojeg povezuju, provodnici mogu biti ulje-zrak, ulje-SF₆ i ulje-ulje. Najčešće korišteni provodnici u proizvodnji transformatora su:

- porculanski kod kojih je unutrašnji izolacijski medij ulje, a vanjski omotač je porculanski,
- kondenzatorski kojima je unutrašnji izolacijski medij papir obložen smolom ili impregniran uljem i sintetička vlakna impregnirana smolom, a vanjski omotač im je porculanski ili silikonski i
- kombinirani provodnici čiji je vodič zaliven u organsku smolu, a vanjski omotač im je od silikonske gume [3].

4.7. Konzervator

Konzervator je valjkasta posuda od čeličnog lima. Nalazi se na vrhu transformatora. Omogućuje ekspanziju ulja tokom zagrijavanja i sprečava ulazak vlage u ulje. Konzervator je povezan s kotlom pomoću tanke cijevi kako bi ulje u konzervatoru ostalo hladno. Kada hladno ulje dolazi u kontakt sa zrakom radi se o otvorenom sustavu disanja, a o zatvorenom sustavu disanja radi se kada konzervator ima separator ulja koji služi za odvajanje zraka od ulja. U oba slučaja zrak ulazi u konzervator, odnosno u separator, preko sušionika zraka koji uklanja vlagu iz zraka pomoću silika-gela. Silika-gel apsorbira vlagu iz zraka prije nego što uđe u konzervator. Kada apsorbira vlagu silika-gel mijenja boju iz plave u ružičastu. Promjena boje koristi se za provjeru zasićenosti vlage, odnosno istrošenosti silika-gela [3, 8].

4.8. Ventilatori

Ventilatori su električni uređaji koji se koriste za poboljšanje cirkulacije zraka i hlađenje transformatora. Glavna svrha im je povećati protok zraka kroz hladnjak transformatora kako bi se uklonila toplina koja se stvara prilikom rada transformatora. Često su smješteni na vanjskim

površinama hladnjaka, s bočne strane ili ispod hladnjaka. Ventilatori se najčešće uključuju iznad 60% nazivnog opterećenja [3].

5. IZVEDBA TRANSFORMATORA

Postoji više aspekata koji transformatore svrstavaju u pojedine kategorije, a jedna od njih je podjela prema izolacijskom i rashladnom sredstvu, koja transformatore dijeli na suhe transformatore i uljne transformatore.

5.1. Suhi transformatori

Suhi transformatori kao rashladni medij koriste zrak i mogu biti:

- s prirodnim hlađenjem zrakom, bez zaštitnog plašta ili s plaštem i
- s prinudnim zračnim hlađenjem.

Suhi transformatori kao izolacijsko sredstvo koriste čvrste materijale poput epoksidne smole ili poliuretanske smole.

Suhi transformatori toplinu predaju neposredno zraku koji ih okružuje. Zbog malog koeficijenta odvođenja topline u zrak primjenjuju se samo za male snage do 3 kVA i napone do 10 kV. Suhi transformatori koriste se u situacijama gdje je nezapaljivost ključna karakteristika, jer su sami po sebi nezapaljivi. Smatraju se ekološki prihvatljivima zbog odsutnosti ulja kao izolacijskog sredstva, jer nema rizika od curenja ulja koje bi moglo onečistiti tlo i podzemne vode. Mogu biti klasični suhi i zaliveni. Skuplji su od uljnih transformatora [8].

5.2. Uljni transformatori

Uljni transformatori koriste različite vrste ulja i umjetnih tekućina kao rashladni medij i izolacijsko sredstvo. Zahvaljujući dobrih izolacijskim svojstvima ulja i visokoj specifičnoj toplini, uljni transformatori se koriste za više napone i veće snage. U ovim transformatorima magnetska jezgra i namoti uronjeni su u visokokvalitetno izolacijsko ulje, obično mineralno ulje, koje pomaže održavanju stabilne radne temperature i putem kotlovskih stijenki prenosi toplinu u okolinu radi hlađenja

transformatora. Ulje u transformatoru ima svojstvo samo-gašenja, čime je smanjena zapaljivost i rizik od požara [3, 8].

5.3. Autotransformatori

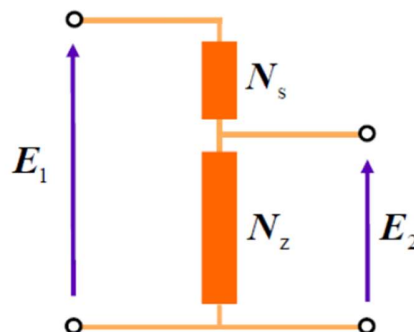
Autotransformatori ili transformatori u štednom spoju uobičajena su izvedba mrežnih transformatora. To su transformatori koji imaju jedan zajednički namot N_Z i jedan serijski namot N_S . Zajednički namot se povezuje s mrežom nižeg napona, dok se serijski spoj zajedničkog i serijskog namota povezuje s mrežom višeg napona. U autotransformatoru, dio snage transformira se induktivnim putem, dok se preostali dio prenosi direktno s primarnog namota na sekundarni namot putem galvanske veze. Sekundarni napon je određen omjerom broja zavoja sekundara i primara (5.1) [3, 8]

$$E_2 = \frac{N_2}{N_1} E_1. \quad (5.1)$$

Svaki autotransformator možemo promatrati kao silazni ili uzlazni. U silaznom spoju naponska vrijednost primara viša je od vrijednosti sekundara, taj spoj vidljiv je na slici 5.1. Primarni namot je zbroj zajedničkog i serijskog namota (5.2), a sekundarni namot je zajednički (5.3)

$$N_1 = N_Z + N_S, \quad (5.2)$$

$$N_2 = N_Z, \quad (5.3)$$

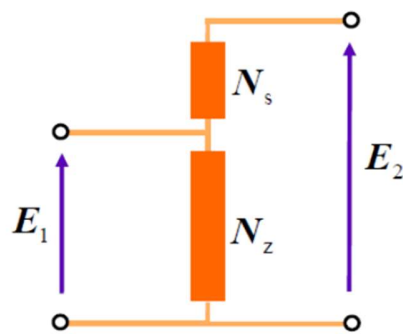


Slika 5.1. Autotransformator u silaznom spoju [8]

a u uzlaznom spoju naponska vrijednost primara niža je od sekundara, što je prikazano na slici 5.2. Primarni namot sada je zajednički (5.4), a sekundarni je zbroj zajedničkog i serijskog namota (5.5).

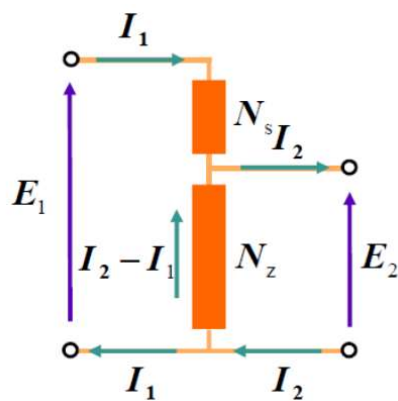
$$N_1 = N_z, \quad (5.4)$$

$$N_2 = N_z + N_s. \quad (5.5)$$



Slika 5.2. Autotransformator u uzlaznom spoju [8]

Razlika struje između sekundarnog i primarnog namota prolazi kroz zajednički namot slika 5.3. [8].



Slika 5.3. Tokovi struje u autotransformatoru [8]

Nazivna snaga u autotransformatoru prenosi se putem magnetskog polja i vodljivog spoja između namota. Ta snaga još se naziva i prolazna snaga (5.6). Tipska snaga autotransformatora je snaga koju može prenositi standardni dvonamotni autotransformator istih dimenzija (5.7). Prolazna snaga je veća u odnosu na tipsku snagu kad je razlika između primarnog i sekundarnog napona manja (5.8) [8].

$$P_p = E_1 I_1 = E_2 I_2, \quad (5.6)$$

$$P_t = (E_1 - E_2) I_1 = (I_2 - I_1) E_2, \quad (5.7)$$

$$\frac{P_p}{P_t} = \frac{E_1}{E_1 - E_2} = \frac{I_2}{I_2 - I_1}. \quad (5.8)$$

Presjek jezgre autotransformatora manji je od običnih dvonamotnih transformatora, jer je proporcionalan količini energije koja se njime prenosi, to znači da je i masa ugrađenih dinamo-limova manja. Manji presjek jezgre znači i manji opseg, što znači da je duljina zavoja namota također manja, a autotransformator je puno jeftiniji. Zbog smanjene mase feromagnetske jezgre, gubici u željezu isto su manji. Također zbog kraćih zavoja namota, gubici u bakru su manji. To znači da će i stupanj korisnosti biti veći. Autotransformatori koriste se na VN kopnenim sustavima [8].

Iz galvanske veze primarnog i sekundarnog kruga autotransformatora proizlaze neke neželjene posljedice, u slučaju prekida u zajedničkom namotu napon s VN strane pojavit će se na NN stezaljkama. Nije pogodan za transformaciju vrlo visokog napona na vrlo niski napon, jer nije siguran za ljude koji spajaju i koriste opremu na NN strani [3].

5.4. Transformatori s odvojenim namotima

Transformatori s odvojenim namotima uobičajena su izvedba distribucijskih transformatora koji se koriste za prijenos električne energije na niže napone prikladne za domaćinstvo i industriju. Sastoje se od primarnog namota koji je povezan na VN mrežu i sekundarnog namota koji je povezan na NN mrežu.

Glavne prednosti transformatora s odvojenim namotima su galvanska izolacija, koja pruža sigurnost od električnih udara i sprječava prijenos smetnji i prenapona s VN na NN mrežu, smanjenje napona i

prilagođavanje impedancije između mreže i potrošača kako bi se postigla optimalna prijenosna učinkovitost i minimizirali gubici.

Distribucijski transformatori s odvojenim namotima obično se postavljaju na stupove ili u zasebne transformatorske postaje u blizini potrošača. Oni su ključni element distribucijskih sustava jer omogućuju pouzdanu i sigurnu isporuku električne energije potrošačima [3].

6. ZAKLJUČAK

Nagli rast stanovništva posljednjih godina, prema procjenama UN-a do 2050. godine Zemlja će imati 9,3 milijarde stanovnika, povećat će i stalno rastuće potrebe za električnom energijom.

Učinkovita opskrba energijom, odnosno njena dostupnost svakom stanovniku Zemlje pogotovo onima koji nisu u mogućnosti sami proizvesti energiju, jedna je od najvažnijih ekonomskih aktivnosti među zemljama širom svijeta.

Tu važnu ulogu u prijenosu i distribuciji električne energije nose transformatori. Transformatori su jedni od najbitnijih elemenata elektroenergetskog sustava zbog njihove nezamjenjive uloge u prijenosu i distribuciji električne energije.

Temom transformatora kao jednim od najefikasnijih električnih uređaja čija je korisnost za energetske transformatore u pravilu veća od 0.995 bavi se i završni rad. U završnom radu opisani su Ampereov zakon protjecanja i Faraday – Lenzov zakon elektromagnetske indukcije koji su primijenjeni u radu transformatora te fizikalni način rada transformatora s vektorskim dijagramima i nadomjesnom shemom. Također su opisani osnovni aktivni i pasivni dijelovi energetskih transformatora te suhi i uljni transformatori, autotransformatori i transformatori s odvojenim namotima.

Iz iznesenih opisa može se zaključiti da su temeljni fizikalni principi za rad transformatora i njihova konstrukcija ostali nepromijenjeni u proteklih sto godina. Napredak je ostvaren u magnetskim i izolacijskim materijalima te primjenom računala za matematičko modeliranje.

Stalno rastuća potražnja za električnom energijom neminovno će povećati i njezinu proizvodnju, a proizvodnja će dovesti do trošenja prirodnih resursa. Svijet već danas troši više resursa nego što to naš planet može pružiti.

Da bi se ublažio utjecaj stalno rastuće potražnje za električnom energijom na okoliš, potrebno je učiniti pomake prema kružnom gospodarstvu, a koje je ključno rješenje za postizanje ciljeva održivog razvoja.

U proizvodnji proizvoda koji se koriste za proizvodnju transformatora nužno je koristiti održivu ili zelenu energiju koja obuhvaća korištenje obnovljive energije poput sunčeve svjetlosti, vjetra, kiše, valova i geotermalne topline.

Završno možemo zaključiti da je tranzicija energetike i elektroenergetskih sustava, koji su najsloženiji tehnički sustavi kreirani od strane čovjeka, na obnovljive izvore energije izuzetno važna za napredak ljudske civilizacije i temelj za razvoj svih ostalih tehničkih područja.

LITERATURA

- [1] Jakovac, P.; Vlahinić Lenz, N.: „Uloga energije s aspekta ekonomske teorije“, s Interneta, <https://hrcak.srce.hr/150388>, 26. travnja 2023.
- [2] Jerbić, G.: „Primjena transformatora s poprečnom regulacijom u Hrvatskom elektroenergetskom sustavu“, s Interneta, <https://hrcak.srce.hr/13155>, 27. travnja 2023.
- [3] Žarko, D.; Ćučić, B.: „Transformatori u teoriji i praksi“, Graphis, Zagreb, 2020.
- [4] Petković, T.: „Teslini izumi u fizici i njegov inženjerski duh“, s Interneta, <https://hrcak.srce.hr/4213>, 27. travnja 2023.
- [5] Energetika-net.com: 2022. „Končarevi transformatori od sada s ekološkim rješenjima“, s Interneta, <https://www.energetika-net.com/zastita-okolisa/koncarevi-transformatori-od-sada-s-ekoloskim-rjesenjima-34711>, 28. travnja 2023.
- [6] Varga, Z.: „Električni strojevi i uređaji“, Element, Zagreb, 2016., s Interneta, <https://element.hr/wp-content/uploads/2020/06/unutra-52106.pdf>, 22. svibnja 2023.
- [7] Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje, Ampereov zakon, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021., s Interneta, <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=2354>, ID=2354, 24. svibnja 2023.
- [8] Prenc, R.: „Transformatori“, materijali s kolegija Električni strojevi, RiTeh, Rijeka, 2022.
- [9] Furčić, N.; Varga, Z.; Bošnjak, D.: „Elektrotehnika“, Element, Zagreb, 2021., s Interneta, <https://element.hr/wp-content/uploads/2022/05/unutra-12978.pdf>, 20. lipnja 2023.
- [10] Živić Đurović, M.: „Nadomjesni modeli transformatora“, materijali s kolegija Elektroenergetske mreže, RiTeh, Rijeka, 2023.

POPIS OZNAKA I KRATICA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|----------------------|------------------|---|
| H | A/m | jakost magnetskog polja |
| dl | m | infinitesimalni dio zatvorene krivulje |
| J | A/m ² | gustoća provodnih struja u vodičima |
| ndS | m ² | jedinični vektor okomit na infinitesimalni dio površine |
| Θ | A | strujno protjecanje |
| e | V | inducirana elektromotorna sila |
| $d\Phi(t)$ | Wb/s | derivacija magnetskog polja po vremenu |
| N_1 | - | brojevi zavoja na primaru |
| N_2 | - | brojevi zavoja na sekundaru |
| U_1 | V | efektivna vrijednost napona na primaru |
| U_2 | V | efektivna vrijednost napona na sekundaru |
| E_1 | V | efektivna vrijednost induciranog napona na primaru |
| E_2 | V | efektivna vrijednost induciranog napona na sekundaru |
| f | Hz | frekvencija |
| Φ_m | Wb | magnetski tok |
| P_1 | W | snaga na primaru |
| P_2 | W | snaga na sekundaru |
| I_1 | A | efektivna vrijednost struje na primaru |
| I_2 | A | efektivna vrijednost struje na sekundaru |
| Z | Ω | impedancija |
| R | Ω | realni dio impedancije |
| X | Ω | imaginarni dio impedancije |
| $\text{tg}\varphi_2$ | - | fazni pomak između napona i struje na sekundaru |
| I_0 | A | struja praznog hoda |
| I_μ | A | struja magnetiziranja |
| I_R | A | struja koja pokriva gubitke u željeznoj jezgri i namotu primara |
| I_p | A | struja opterećenja |
| P_{Cu1} | W | gubici u bakru na primaru |
| P_{Cu2} | W | gubici u bakru na sekundaru |

| | | |
|-------------------|----------|---|
| R_1 | Ω | djelatni otpor primara |
| R_2 | Ω | djelatni otpor sekundara |
| P_h | W | gubici histereze |
| P_v | W | gubici vrtložnih struja |
| h | W/kg | jedinični gubici |
| v | W/kg | jedinični gubici |
| B_m | T | magnetska indukcija |
| m | kg | masa jezgre |
| $\Phi_{\sigma 1}$ | Wb | rasipni magnetski tok primara |
| $\Phi_{\sigma 2}$ | Wb | rasipni magnetski tok sekundara |
| S_N | VA | nazivna snaga transformatora |
| U_{N1} | V | nazivni napon primara |
| U_{N2} | V | nazivni napon sekundara |
| I_{N1} | A | nazivna struja primara |
| I_{N2} | A | nazivna struja sekundara |
| U_{R1} | V | pad napona na djelatnom otporu primara |
| U_{R2} | V | pad napona na djelatnom otporu sekundara |
| U_{X1} | V | pad napona na induktivnom otporu primara |
| j | - | imaginarna jedinica |
| X_1 | Ω | induktivni otpor primara |
| X_2 | Ω | induktivni otpor sekundara |
| U_{X2} | V | pad napona na induktivnom otporu sekundara |
| U_2' | V | reducirani napon sekundara |
| E_2' | V | reducirani inducirani napon sekundara |
| I_2' | A | reducirana struja sekundara |
| R_2' | Ω | reducirani djelatni otpor sekundara |
| U_{R2}' | V | reducirani pad napona na djelatnom otporu sekundara |
| X_2' | Ω | reducirani induktivni otpor sekundara |
| U_{X2}' | V | reducirani pad napona na induktivnom otporu sekundara |
| P_0 | W | snaga praznog hoda |
| P_{Fe} | W | Gubici u željezu transformatora |
| $\cos\varphi_0$ | - | fazni pomak |

| | | |
|-----------------|----------|--|
| U_K | V | napon kratkog spoja |
| P_K | W | snaga kratkog spoja |
| P_{Cu} | W | gubici u braku |
| $\cos\varphi_K$ | - | fazni pomak |
| $u_K\%$ | - | napon kratkog spoja izražen u postocima |
| I_{KS} | A | struja kratkog spoja |
| I_N | A | nazivna struja |
| I_u | A | udarna struja kratkog spoja |
| $L_{\sigma 1}$ | H | induktivitet primara |
| $L_{\sigma 2}$ | H | induktivitet sekundara |
| $X_{\sigma 1}$ | Ω | induktivni otpor primara |
| $X_{\sigma 2}$ | Ω | induktivni otpor sekundara |
| CGO | - | konvencionalni magnetski orijentirani lim |
| HGO | - | superorijentirani magnetski lim |
| HGO-DR | - | laserski tretirani superorijentirani magnetski lim |
| NN | - | niženaponski namot |
| SN | - | srednjenaponski namot |
| VN | - | višenaponski namot |
| ST | - | stabilizacijski namot |
| TN | - | tercijarni namot |
| RN | - | regulacijski namot |
| FN | - | fina regulacija |
| GR | - | gruba regulacija |
| 2V | - | dvostruki vodič |
| 3V | - | trostruki vodič |
| TSV | - | transponirani vodič |
| Y | - | spoj namota u zvijezdu na primaru |
| y | - | spoj namota u zvijezdu na sekundaru |
| D | - | spoj namota u trokut na primaru |
| d | - | spoj namota u trokut na sekundaru |
| z | - | spoj namota u razlomljenu zvijezdu na sekundaru |
| N | - | nultočka na VN strani |

| | | |
|--------|---|-------------------------------------|
| n | - | nultočka na NN strani |
| ONAN | - | hlađenje prirodnim strujanjem zraka |
| ONAF | - | hlađenje prisilnim strujanjem zraka |
| SF_6 | - | sumporov heksafluorid |
| N_Z | - | broj zavoja zajedničkog namota |
| N_S | - | broj zavoja serijskog namota |
| P_p | W | prolazna snaga autotransformatora |
| P_t | W | tipska snaga autotransformatora |

SAŽETAK

Transformatori su statički električni uređaji koji pretvaraju izmjenični napon jedne amplitude na drugu posredstvom magnetskog toka uz zadržavanje jednake frekvencije i snage, ali promijenjene vrijednosti napona i struja. Neizostavni su dio elektroenergetskog sustava i nužni za prijenos i distribuciju energije na veće razdaljine.

Nakon uvodnog osvrtu o transformatorima opisani su Ampereov i Faradayev zakon kao temeljni fizikalni zakoni primijenjeni u radu transformatora.

Potom je u radu prikazano fizikalno načelo rada transformatora s vektorskim dijagramima i nadomjesnom shemom.

Detaljno su opisani osnovni aktivni i pasivni dijelovi energetske transformatora.

Na kraju rada još su opisane neke uobičajene izvedbe transformatora, suhi i uljni transformatori, autotransformatori i transformatori s odvojenim namotima.

Ključne riječi: transformator, vektorski dijagram, nadomjesna shema, energetski transformator, suhi transformatori, uljni transformatori, autotransformatori

ABSTRACT

Transformers are static electrical devices that convert alternating voltage of one amplitude to another through magnetic flux, while maintaining the same frequency and power but with changed voltage and current values. They are an essential part of the power system and necessary for the transmission and distribution of energy over long distances.

After an introductory overview of transformers, Ampere's and Faraday's laws are described as fundamental physical laws applied in the operation of transformers.

Next, the physical principle of transformer operation is presented in the paper with vector diagrams and an equivalent circuit.

The basic active and passive components of power transformers are described in detail.

At the end of the paper, some common types of transformers are further described, including dry-type transformers, oil-filled transformers, autotransformers, and transformers with separate windings.

Keywords: transformer, vector diagram, equivalent circuit, power transformer, dry-type transformers, oil-filled transformers, autotransformers

POPIS SLIKA

| | str. |
|---|------|
| Slika 3.1. Osnovni dijelovi transformatora [6] | 5 |
| Slika 3.2. Struja magnetiziranja [6] | 9 |
| Slika 3.3. Struja primara [6] | 10 |
| Slika 3.4. Krivulja histereze [9] | 12 |
| Slika 3.5. Vrtložne struje [9] | 13 |
| Slika 3.6. Glavni i rasipni magnetski tok [8] | 14 |
| Slika 3.7. Shema transformatora opterećenim impedancijom Z [6] | 15 |
| Slika 3.8. Vektorski dijagram za realni transformator opterećen impedancijom Z [6] | 17 |
| Slika 3.9. Shema transformatora u praznom hodu [6] | 17 |
| Slika 3.10. Vektorski dijagram za realni transformator u praznom hodu [6] | 19 |
| Slika 3.11. Shema transformatora za vrijeme kratkog spoja [6] | 19 |
| Slika 3.12. Vektorski dijagram za realni transformator za vrijeme kratkog spoja [6] | 21 |
| Slika 3.13. Vektorski dijagram transformatora opterećenog s impedancijom Z s reduciranim veličinama na primar | 23 |
| Slika 3.14. Shema pokusa praznog hoda [6] | 24 |
| Slika 3.15. Karakteristika pokusa praznog hoda [6] | 24 |
| Slika 3.16. Shema pokusa kratkog spoja [6] | 25 |
| Slika 3.17. Karakteristika pokusa kratkog spoja [6] | 26 |
| Slika 3.18. Nadomjesna shema transformatora [6] | 28 |
| Slika 3.19. Nadomjesna shema transformatora reducirana na primar [6] | 29 |
| Slika 4.1. Glavni dijelovi energetskog transformatora [3] | 31 |
| Slika 4.2. Spoj namota trofaznog transformatora u zvijezdu [3] | 36 |

| | |
|--|----|
| Slika 4.3. Spoj namota trofaznog transformatora u trokut [3] | 37 |
| Slika 4.4. Spoj namota trofaznog transformatora u razlomljenu zvijezdu [3] | 37 |
| Slika 5.1. Autotransformator u silaznom spoju [8] | 43 |
| Slika 5.2. Autotransformator u uzlaznom spoju [8] | 44 |
| Slika 5.3. Tokovi struje u autotransformatoru [8] | 44 |