

TRANSFORMATORI

SADRŽAJ

1	TRANSFORMATORI.....	3
1.1	Osnovni elementi konstrukcije transformatora.....	3
1.2	Princip rada, osnovne jednačine	5
1.2.1	Prazan hod idealnog transformatora.....	6
1.2.2	Opterećenje idealizovanog transformatora.....	8
1.3	Prenosni odnos.....	12
1.4	Struja praznog hoda	12
1.5	Gubici praznog hoda.....	13
1.6	Ekvivalentna šema transformatora.....	14
1.7	Ogled praznog hoda	15
1.8	Gubici usled opterećenja.....	16
1.9	Ogled kratkog spoja	18
1.10	Stepen iskorišćenja.....	20
1.11	Promena napona	20
1.12	Zagrevanje.....	21
1.12.1	Vrste hlađenja	26
1.12.2	Nestacionarna termička stanja	27
1.13	Zakon sličnosti (dimenziona analiza).....	29
1.14	Prelazni procesi	30
1.14.1	Uključenje transformatora u praznom hodu	31
1.14.2	Udarni kratak spoj transformatora	34
1.14.2.1	Mehanička naprezanja namotaja transformatora u kratkom spoju.....	36
1.15	Trofazni transformatori	39
1.15.1	Glavne karakteristike pojedinih sprega trofaznih transformatora.....	40
1.16	Viši harmonici.....	42
1.17	Paralelni rad transformatora.....	45
1.18	Nesimetričan rad trofaznih transformatora	47
1.18.1	Jednofazan kratak spoj.....	50
1.19	Specijalni transformatori.....	52
1.20	Literatura	54

1 TRANSFORMATORI

Transformator je statički elektrotehnički aparat koji, pomoću elektromagnetne indukcije, pretvara jedan sistem naizmjeničnih struja u jedan ili više sistema naizmjeničnih struja iste učestanosti i obično različitih vrednosti struja i napona. Uloga transformatora u elektroenergetskom sistemu je veoma značajna jer on omogućuje ekonomičnu, pouzdanu i bezbednu proizvodnju, prenos i distribuciju električne energije pri najprikladnijim naponskim nivoima. Dakle, njegovom primenom se, uz veoma male gubitke energije, rešavaju problemi raznih naponskih nivoa i međusobne izolovanosti kola koje se nalaze na različitim naponskim nivoima. Ovde će, pre svega, biti reči o *energetskim transformatorima* (Slika 2-1).



Slika 1-1 Trofazni distributivni transformator

Transformator treba da bude projektovan i izrađen tako da izdrži moguća naprezanja kojima je izložen tokom svog životnog veka. Naprezanja u osnovi možemo da svrstamo u tri glavne grupe: električna, mehanička i toplotna. Kod električnih naprezanja pre svega treba obratiti pažnju na prenapone koji se javljaju kao posledica prekidanja u kolu, atmosferskih pražnjenja, lukova prema zemlji, kratkih spojeva, kao i ispitnih napona. Pojave praćene velikim strujama u odnosu na naznačene (nominalne, nazivne) (kratki spojevi u mreži, kao i uključjenje transformatora u praznom hodu), opasne su sa stanovišta mehaničkih i toplotnih naprezanja (ova naprezanja su proporcionalna sa kvadratom struje). Do povećanih toplotnih naprezanja dolazi i kod preopterećenja transformatora. Takođe treba obratiti pažnju i na buku transformatora.

1.1 Osnovni elementi konstrukcije transformatora

U pogledu konstrukcije, transformator se sastoji iz sledećih osnovnih delova:

- magnetskog kola,
- namotaja,
- izolacije,
- transformatorskog suda,
- pomoćnih delova i pribora.

Magnetsko kolo se gradi od visokokvalitetnih hladnovaljanih orijentisanih transformatorskih limova. Da bi se smanjila struja magnećenja (pobudna struja) teži se uzimanju što kvalitetnijeg lima, sa velikom relativnom permeabilnošću, i primenjuju se odgovarajuća konstrukciona i tehnološka rešenja u izradi magnetskog kola. Radi smanjenja gubitaka usled vihornih (vrtložnih) struja, koriste se međusobno izolovani limovi male debljine (0,30, 0,27 i 0,23 mm). Osnovni fizički elementi magnetskog kola su stubovi (jezgra), oko kojih su smešteni namotaji i jarmovi (donji i gornji). Stubovi imaju stepeničasti oblik i popunjavaju se paketima limova odgovarajuće širine, kako bi ispuna prostora opisanog kruga bilo što bolja. Kod transformatora velikih snaga, u jezgra se stavljaju kanali (podužni, širine 6 mm) i prema potrebi jedan poprečni (širine 10–15 mm), kako bi kroz njih moglo da cirkuliše ulje i hladi magnetsko kolo. Magnetsko kolo se priteže odgovarajućim steznim sistemom kako bi se dobila što bolja mehanička kompaktnost.

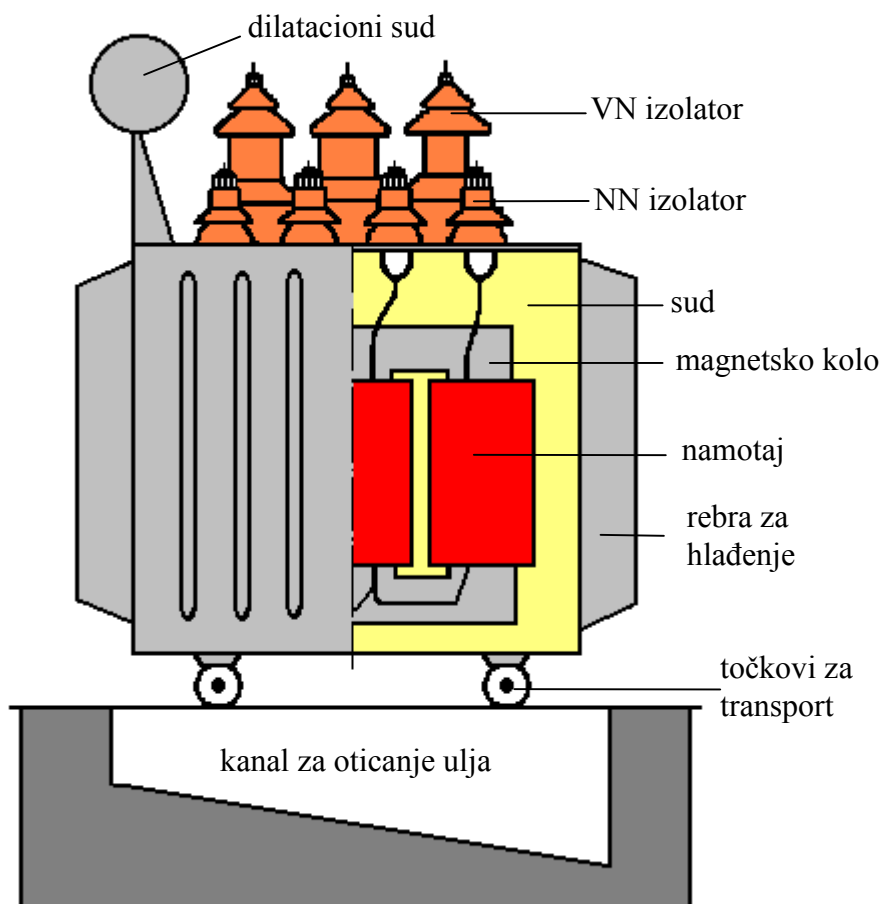
Namotaji se prave od okruglog, profilnog ili trakastog provodnika od bakra ili aluminijuma, materijala koji imaju mali električni otpor. Namotaj koji se priključuje na napajanje se naziva *primar*, dok se namotaj koji je spojen na prijemnik naziva *sekundar*. Osnovni oblici namotaja prema načinu izrade su: spiralni, slojeviti i presloženi. Gustine struje za namotaje uljnih transformatora su $2 - 4,5 \text{ A/mm}^2$.

Izolacija predstavlja kombinaciju celuloze (papir, prešpan) i izolacionog ulja u slučaju *uljnih* transformatora, odnosno čvrste izolacije (staklene tkanine impregnirane epoksidnim, silikonskim ili drugim sintetičkim smolama) u kombinaciji sa vazduhom kod *suvih* transformatora (do 36 kV). Izolaciono (transformatorsko) ulje, osim poboljšanja izolacionih svojstava, obezbeđuje i hlađenje transformatora, jer zbog svog velikog specifičnog toplotnog kapaciteta mnogo bolje odvodi toplotu sa magnetskog kola i namotaja na sud i rashladni sistem.

Međutim, treba imati u vidu da je ulje zapaljivo i da lako gori. Izolacija provodnika je najčešće lak ili papir.

Transformatorski sud postoji kod uljnih transformatora i izrađuje se od kvalitetnog čelika sa ojačanjima. Oblik suda zavisi od načina hlađenja, pa bočne strane mogu biti glatke, valovite ili sa cevima za hlađenje.

Pomoćni delovi i pribor transformatora: natpisna pločica, provodni izolatori za povezivanje sa mrežom, dilatacioni sud (konzervator), regulator napona, priključak za uzemljenje, džep termometra pokazivač nivoa ulja, slavina za ispuštanje ulja, itd.

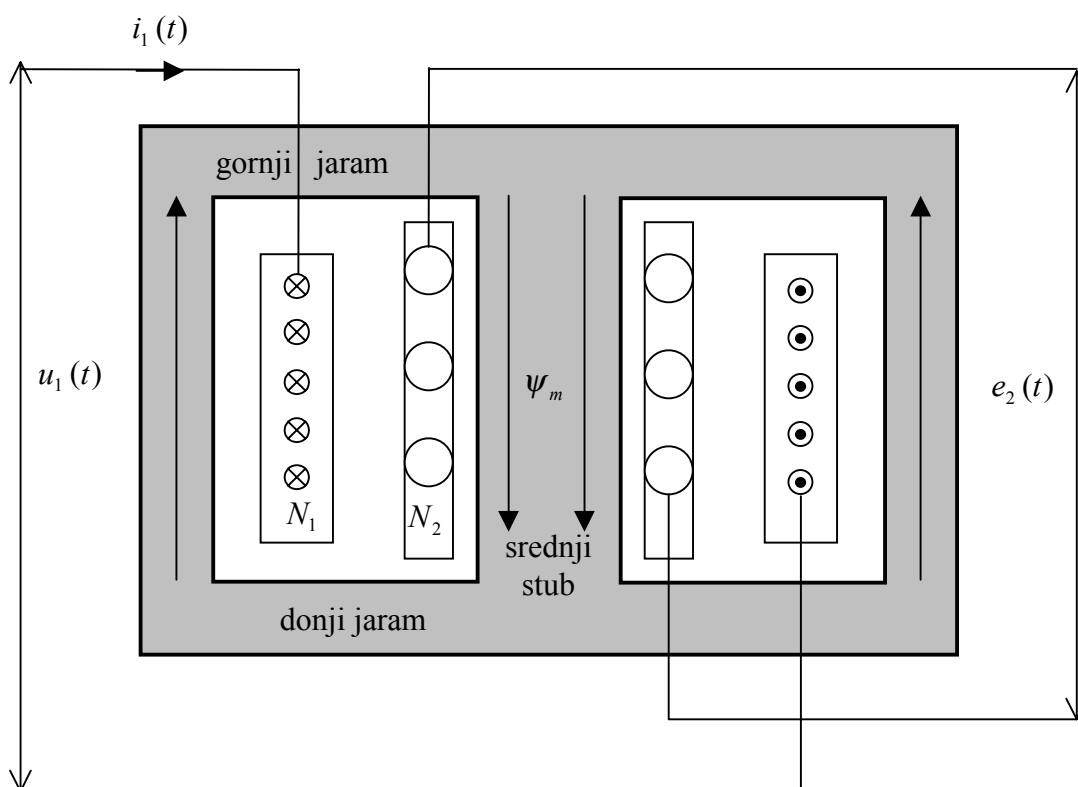


Slika 1-2 Osnovni delovi transformatora

1.2 Princip rada, osnovne jednačine

Na primarni namotaj transformatora dovodi se električna energija u obliku naizmeničnog napona, koja u magnetno spregnutom sekundarnom namotaju indukuje odgovarajuću naizmeničnu elektromotornu silu, odnosno struju, koja se koristi za napajanje prijemnika. Dakle, primarni namotaj se ponaša kao prijemnik, dok se sekundarni namotaj ponaša kao izvor električne energije.

1.2.1 Prazan hod idealnog transformatora



Slika 1-3 Jednofazni transformator jezgrastog tipa magnetskog kola u praznom hodu

Pretpostavke kojima ćemo se služiti u analizi praznog hoda idealnog transformatora su:

1. sav fluks obuhvata obadva namotaja (rasipni fluksevi primarnog i sekundarnog namotaja jednaki su nuli ($\psi_{1\sigma} = \psi_{2\sigma} = 0$) i svaki zavojak obuhvata isti fluks,
2. magnetski otpor gvođenog kola ne postoji ($\mu_{Fe} \rightarrow \infty$),
3. gubitaka u gvožđu nema ($P_{Fe} = 0$).

Za navedeni slučaj jednofaznog transformatora srednji stub je dvostrukog preseka u odnosu na krajnje stubove. Magnetski fluks se deli na dve polovine krenuvši od srednjeg ka krajnjim stubovima.

Označimo aktivni presek srednjeg stupa magnetskog kola sa S_{Fe} .

Ako na priključke primarnog namotaja priključimo napon:

$$u_1(t) = \sqrt{2} U_1 \sin \omega t$$

u njemu će se uspostaviti naizmenična struja magnetisanja $i_m(t)$ čiji se smer određuje pomoću pravila desne ruke (ili desne zavojnice), a koja će po Faradejevom zakonu indukovati protiv napon $e_1(t)$:

$$e_1(t) = -\frac{d\psi_1}{dt} = -\frac{d\psi_m}{dt},$$

gdje je ψ_1 ukupni magnetski fluks primarnog namotaja, a ψ_m ukupni zajednički magnetski fluks.

Uz navedenu pretpostavku da u svim zavojcima namotaja postoji isti fluks, imamo:

$$e_1(t) = -N_1 \frac{d\phi_1}{dt} = -N_1 \frac{d\phi_m}{dt},$$

gdje je ϕ_1 ukupni magnetski fluks primarnog namotaja po zavojku, a ϕ_m zajednički magnetski fluks po zavojku.

Prema jednačini naponske ravnoteže (II Kirhofov zakon) imamo da je zbir svih elektromotornih i elektro-otpornih sila jednak nuli, što napisano za električno kolo primarnog namotaja glasi:

$$u_1 + e_1 - R_1 i_1 = 0$$

U većini energetskih transformatora otpornost namotaja primara R_1 je relativno mala, a struja praznog hoda i_1 (odnosno i_μ) je takođe vrlo mala (0,2 do 3 procenta naznačene struje), tako da se proizvod $R_1 i_1$ može zanemariti, pa imamo:

$$u_1 + e_1 = 0,$$

odnosno:

$$\sqrt{2} U_1 \sin \omega t = N_1 \frac{d\phi_m}{dt}.$$

Iz prethodne jednačine za zajednički magnetski fluks imamo:

$$d\phi_m = \frac{1}{N_1} \sqrt{2} U_1 \sin \omega t dt \Rightarrow \phi_m = -\frac{\sqrt{2} U_1}{N_1 \omega} \cos \omega t = -\phi_{\max} \cos \omega t.$$

Za efektivnu vrednost napona priključenog na primarni namotaj, odnosno efektivnu vrednost indukovane ems u primarnom namotaju, u praznom hodu vredi:

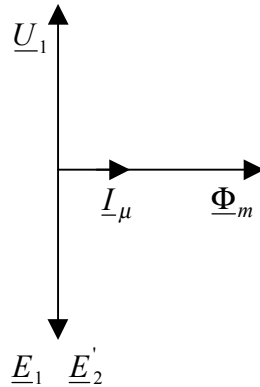
$$U_1 = -E_1 = \frac{N_1 \omega \phi_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{N_1 2\pi f B_{\max} S_{Fe}}{\sqrt{2}} = 4,44 N_1 f B_{\max} S_{Fe}.$$

Budući da isti fluks prolazi i kroz sekundarni namotaj, efektivna vrednost indukovane ems u sekundarnom namotaju je preko odnosa broja zavojaka sekundarnog i primarnog namotaja vezana sa efektivnom vrednošću indukovane ems primarnog namotaja:

$$E_2 = \frac{N_2}{N_1} E_1.$$

Kod crtanja ekvivalentne šeme i faznog dijagrama pretpostavljeno je da su *primarni i sekundarni namotaj namotani u istom smeru* oko magnetskog stuba, ta da prema tome promenljivi magnetski fluks indukuje između početnog i krajnjeg priključka primarnog i sekundarnog namota napon istog smera. Dodatno, pošto su, u opštem slučaju, naznačeni naponi primarnog i sekundarnog namotaja različiti, *potrebno je sve veličine svesti* (redukovati, transformisati) na jedan od napona, obično primarni.

Za svedenu efektivnu vrednost ems sekundarnog namotaja, E'_2 imamo: $E'_2 = \frac{N_1}{N_2} E_2$.



Slika 1-4 Fazorski dijagram veličina u praznom hodu

1.2.2 Opterećenje idealizovanog transformatora

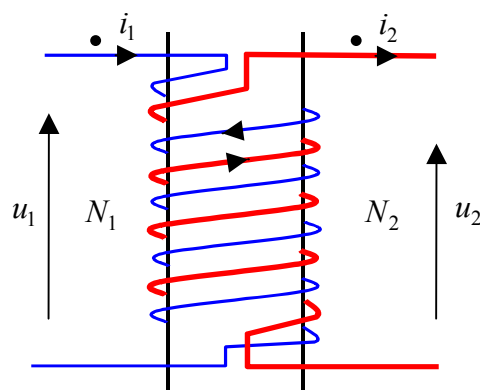
Pri analizi opterećenog idealnog transformatora pretpostavićemo da:

1. magnetski otpor gvozdenog kola ne postoji ($\mu_{Fe} \rightarrow \infty$),
2. gubitaka u gvožđu nema ($P_{Fe} = 0$).

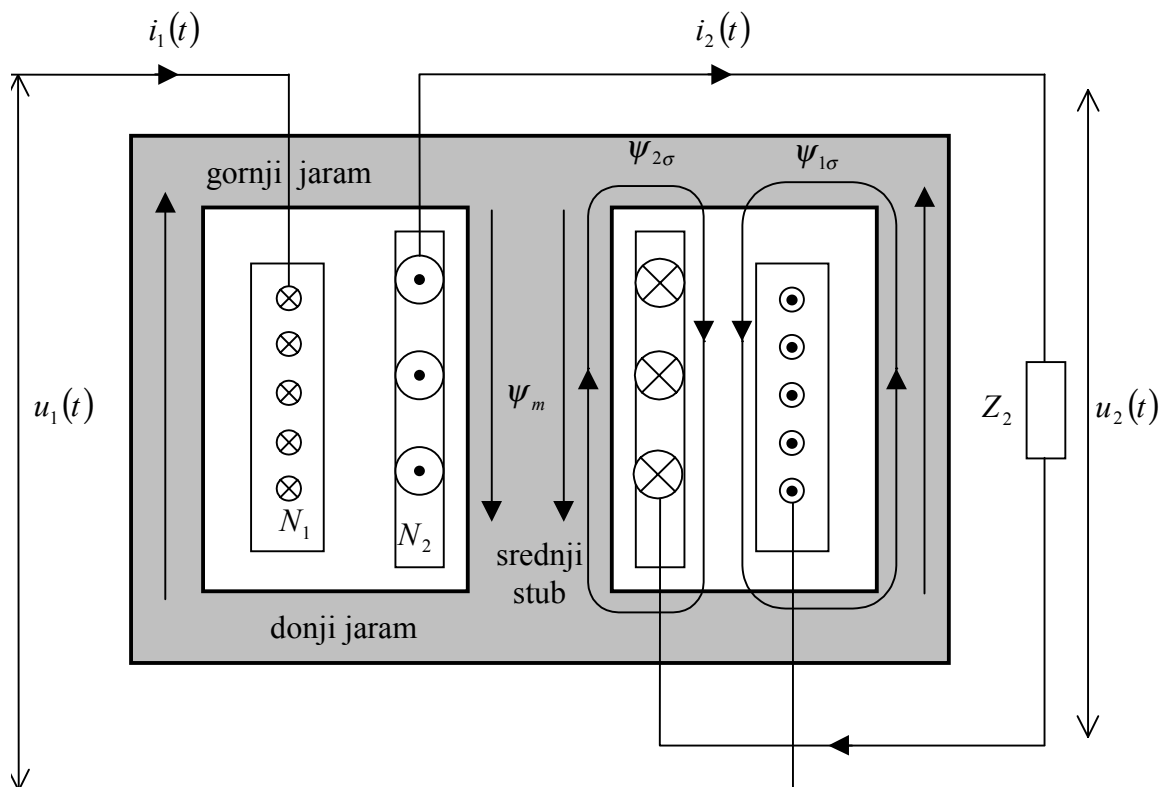
Po opterećenju prijemnikom impedanse Z_2 , uspostavi se struja u sekundarnom namotaju i_2 , koja stvara amperzavojke $N_2 I_2$. Smer indukovanе struje u sekundaru je takav da svojim fluksom teži da poništi fluks koji ju je izazvao. Radi lakšeg snalaženja, propisima su definisane oznake za priključke primarnog i sekundarnog namotaja istog polariteta. Između istoimenih priključaka se indukuje napon iste faze. Praktično pravilo: početak primara je priključak u kojeg struja ulazi, a za sekundar priključak iz kojeg struja izlazi.

Rezultantni amperzavojci proizlaze iz uticaja primarnih i sekundarnih amperzavojaka, odnosno smera motanja ovih namotaja. Na slici 2-5 je prikazan slučaj sa odmaganjem (poništanjem) delovanja primarnog i sekundarnog namotaja kod stvaranja magnetskog polja, za koji vredi sledeća jednačina amperzavojaka:

$$N_1 \underline{I}_1 - N_2 \underline{I}_2 = N_1 \underline{I}_\mu$$



Slika 1-5 Namotaji sa odmaganjem amperzavojaka sa • je označen početak namotaja



Slika 1-6 Jednofazni transformator jezgrastog tipa magnetskog kola u opterećenju

Hoćemo da se diferencijalne jednačine napišu tako, da primarni i sekundarni napon imaju istu fazu, te da se kao pozitivne računaju primarna struja koja ulazi u početak primarnog namotaja i sekundarna struja koja izlazi iz početka sekundarnog namotaja, što je u skladu sa pojmom izvora i prijemnika.

Diferencijalne jednačine naponske ravnoteže napisane za primarno i sekundarno električno kolo transformatora, za slučaj ilustrovan slikom 2-5, imaju sledeći oblik:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt},$$

odnosno pisano u fazorskom obliku,

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + j\omega L_1 \underline{I}_1 - j\omega M \underline{I}_2,$$

$$-\underline{U}_2 = R_2 \underline{I}_2 + j\omega L_2 \underline{I}_2 - j\omega M \underline{I}_1.$$

U slučaju pomaganja delovanja amperzavojaka primarnog i sekundarnog namotaja predznak člana naponske jednačine koji sadrži međuinduktivnost bio bi pozitivan.

Izrazimo sada struju primarnog i sekundarnog namotaja iz jednačine ravnoteže amperzavojaka:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_\mu + \frac{N_2}{N_1} \underline{I}_2; \quad \underline{I}_2 = \frac{N_1}{N_2} \underline{I}_1 - \frac{N_1}{N_2} \underline{I}_\mu.$$

Uvrstivši vrednost struje sekundarnog namotaja u jednačinu naponske ravnoteže primarnog električnog kola dobijamo sledeće jednačinu:

$$\underline{U}_1 = (R_1 + j\omega L_1) \underline{I}_1 - j\omega M \left(\frac{N_1}{N_2} \underline{I}_1 - \frac{N_1}{N_2} \underline{I}_\mu \right),$$

odnosno

$$\underline{U}_1 = \left[R_1 + j\omega \left(L_1 - \frac{N_1}{N_2} M \right) \right] \underline{I}_1 + j\omega \frac{N_1}{N_2} M \underline{I}_\mu = (R_1 + j\omega L_{1\sigma}) \underline{I}_1 + \underline{E}_1$$

gde smo sa $L_{1\sigma}$ označili rasipnu induktivnost primarnog namotaja. Za rasipnu induktivnost primarnog namotaja vredi izraz:

$$L_{1\sigma} = L_1 - \frac{N_1}{N_2} M.$$

Uvrstivši vrednost struje primarnog namotaja u jednačinu naponske ravnoteže sekundarnog električnog kola dobijamo sledeću jednačinu:

$$-\underline{U}_2 = (R_2 + j\omega L_2) \underline{I}_2 - j\omega M \left(\underline{I}_\mu + \frac{N_2}{N_1} \underline{I}_2 \right),$$

odnosno

$$-\underline{U}_2 = \left[R_2 + j\omega \left(L_2 - \frac{N_2}{N_1} M \right) \right] \underline{I}_2 - j\omega M \underline{I}_\mu = (R_2 + j\omega L_{2\sigma}) \underline{I}_2 - \underline{E}_2$$

gde smo sa $L_{2\sigma}$ označili rasipnu induktivnost sekundarnog namotaja:

$$L_{2\sigma} = L_2 - \frac{N_2}{N_1} M$$

Prethodnju jednačinu naponske ravnoteže sekundarnog električnog kola pomnožimo sa odnosom broja zavojava primarnog i sekundarnog namotaja (N_1/N_2) i deo vezan za indukovanu *ems* u električnom kolu sekundarnog namotaja stavimo na levu stranu jednačine:

$$\frac{N_1}{N_2} \underline{E}_2 = \left[\left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_2 + j\omega \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 L_{2\sigma} \right] \frac{N_2}{N_1} \underline{I}_2 + \frac{N_1}{N_2} \underline{U}_2$$

Svedene vrednosti sekundarnih veličina na primarnu stranu imaju oblik:

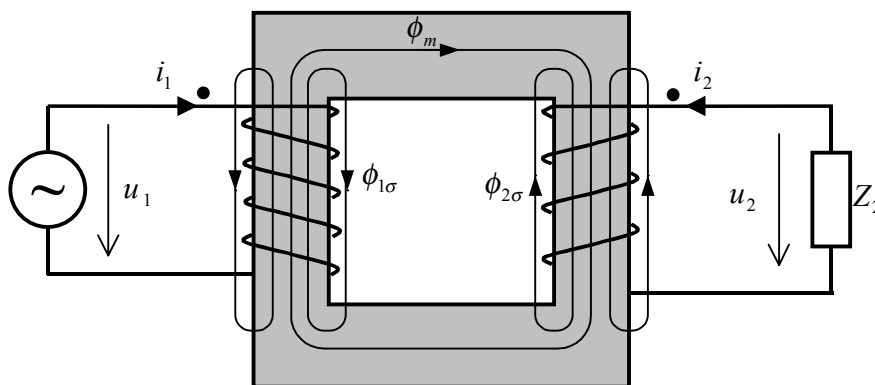
$$\underline{U}'_2 = \frac{N_1}{N_2} \underline{U}_2; \quad \underline{E}'_2 = \frac{N_1}{N_2} \underline{E}_2; \quad \underline{I}'_2 = \frac{N_2}{N_1} \underline{I}_2$$

$$R'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_2; \quad L'_{2\sigma} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 L_{2\sigma}$$

Konačno, imamo sledeću jednačinu za naponsku ravnotežu sekundarnog električnog kola, kod koje su sve veličine svedene na primarnu stranu:

$$\underline{E}'_2 = [R'_2 + j\omega L'_{2\sigma}] \underline{I}'_2 + \underline{U}'_2$$

Posmatrano preko ukupnog, odnosno zajedničnog i rasutih magnetnih flukseva, za opterećeni transformator imamo:



Slika 2-7 Princip rada transformatora

Fluksni obuhvati (ukupni magnetni fluksovi) primarnog i sekundarnog namotaja, ψ_1 i ψ_2 , su:

$$\psi_1 = N_1 \phi_1 = N_1 \phi_{1\sigma} + N_1 \phi_m = L_{1\sigma} i_1 + N_1 \phi_m,$$

$$\psi_2 = N_2 \phi_2 = N_2 \phi_{2\sigma} + N_2 \phi_m = L_{2\sigma} i_2 + N_2 \phi_m,$$

gde je:

N_1 i N_2 broj navojaka primarnog i sekundarnog namotaja, respektivno,

ϕ_1 i ϕ_2 ukupni magnetni fluks po navojku primarnog i sekundarnog namotaja, respektivno,

$\phi_{1\sigma}$ i $\phi_{2\sigma}$ rasuti magnetni fluks po navojku primarnog i sekundarnog namotaja, respektivno.

ϕ_m zajednički magnetni fluks po navojku,

$L_{1\sigma}$ i $L_{2\sigma}$ rasute induktivnosti primarnog i sekundarnog namotaja, respektivno.

Osnovne jednačine naponske ravnoteže:

$$u_1 = R_1 i_1 + \frac{d\psi_1}{dt} = R_1 i_1 + L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt} + N_1 \frac{d\phi_m}{dt},$$

$$u_2 = R_2 i_2 + \frac{d\psi_2}{dt} = R_2 i_2 + L_{2\sigma} \frac{di_2}{dt} + N_2 \frac{d\phi_m}{dt},$$

gde je:

u_1 napon na koji je priključen primarni namotaj,

u_2 napon na priključcima sekundarnog namotaja,

R_1 i R_2 aktivne otpornosti primarnog i sekundarnog namotaja, respektivno.

1.3 Prenosni odnos

Po definiciji iz propisa prenosni odnos (odnos transformacije), m , predstavlja odnos naznačenih napona istaknutih na natpisnoj pločici, $m_{12} = U_{1n} / U_{2n}$. Prenosni odnos koji se dobija merenjem u praznom hodu je funkcija odnosa broja zavoja $m'_{12} = k N_1 / N_2$, i on obično sme da odstupa od deklarisanog za $\pm 0,5\%$.

1.4 Struja praznog hoda

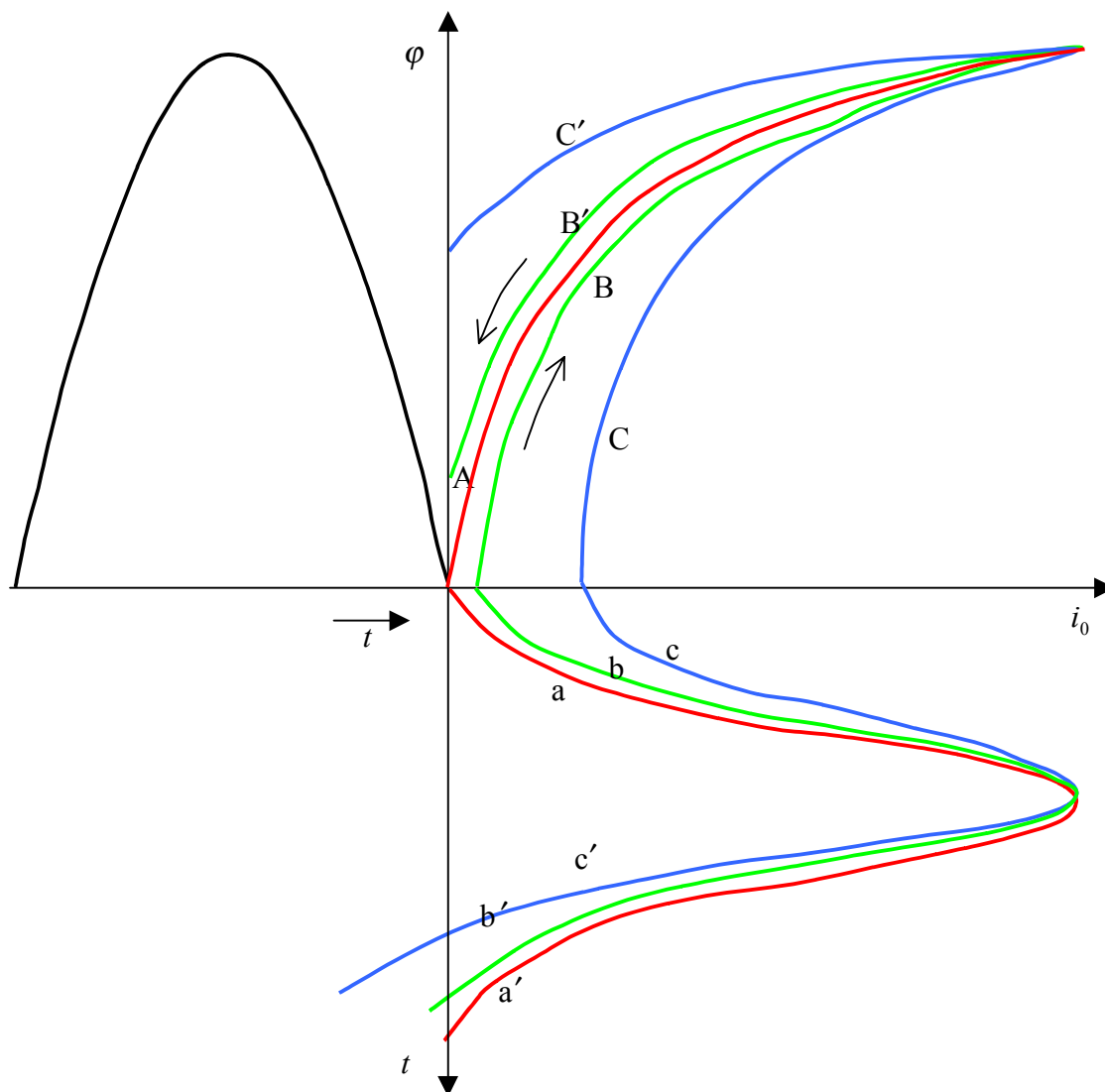
Struja praznog hoda se sastoji od dve komponente, reaktivne (struje magnećenja) kojom se magneti magnetsko kolo i aktivne kojom se uzimaju u obzir gubici praznog hoda. Zbog nelinearnosti karakteristike $B = f(H)$, struja magnećenja je nesinusoidalnog oblika, dakle sadržava i više harmonike, od kojih je najznačajniji treći. Zbog ekonomskih razloga, naznačena radna tačka se nalazi na kolenu (laktu) karakteristike $B = f(H)$.

Konstrukcija struje praznog hoda prikazana je na slici 2-8, uz sledeće oznake:

A - idealna kriva magnećenja,

BB' - kriva magnećenja uz uzimanje u obzir gubitaka histerezisa,

CC' - kriva magnećenja uz uzimanje u obzir i gubitaka usled vihornih struja.



Slika 1-8 Konstrukcija struje praznog hoda

1.5 Gubici praznog hoda

Gubici praznog hoda približno su jednaki gubicima u gvožđu, koji se sastoje od gubitaka usled histereze i gubitaka usled vihornih struja. Analizu gubitaka ćemo sprovesti za redovni slučaj iz prakse - napajanje iz izvora prostoperiodičnog napona.

Utrošena energija usled histereze po jedinici mase lima, [kg], u toku jedne periode proporcionalna je površini histerezisne petlje, odnosno zavisi o promeni amplitude indukcije B_{\max}^n , gde se n najčešće kreće zavisno od vrste limova od 1,7 do 2,2:

$$w_H = k_H B_{\max}^n \quad [\text{J/kg}] .$$

Obično se kod računanja uzima kao neka prosečna vrednost $n = 2$.

Utrošena snaga usled histereze po jedinici mase lima proporcionalna je broju perioda u sekundi, odnosno proporcionalna učestanosti:

$$p_H = f w_H = k_H f B_{\max}^2 \quad [\text{W/kg}] .$$

U masi limova m_{Fe} gubici usled histereze biće

$$P_H = m_{\text{Fe}} p_H = k_H f B_{\max}^2 m_{\text{Fe}} \quad [\text{W}] .$$

Gubitke usled vihornih struja ćemo kvalitativno izraziti preko uticajnih veličina, budući da je raspodelu i ukupni efekat ovih struja relativno teško tačno sračunati sa dovoljnom tačnošću.

Gubici usled vihornih struja proporcionalni su kvadratu indukovane ems u parazitnim kolima a obrnuto proporcionalni specifičnom otporu lima:

$$P_V \approx \frac{e^2}{\rho} .$$

Indukovana ems u kolima vihornih struja po jedinici dužine lima proporcionalna je amplitudi indukcije B_{\max} , učestanosti f i debljini lima d , pa se gubici usled vihornih struja mogu prikazati prema poznatom obrascu iz Elektromagnetike:

$$P_V = \frac{1}{24\rho} (\omega d B_{\max})^2 V_{\text{Fe}} ,$$

gde je V_{Fe} zapremina magnetskih limova, ili

$$P_V = k_V f^2 B_{\max}^2 m_{\text{Fe}} ,$$

gde je k_V koeficijent koji zavisi od specifičnog otpora, specifične mase i kvadrata debljine limova.

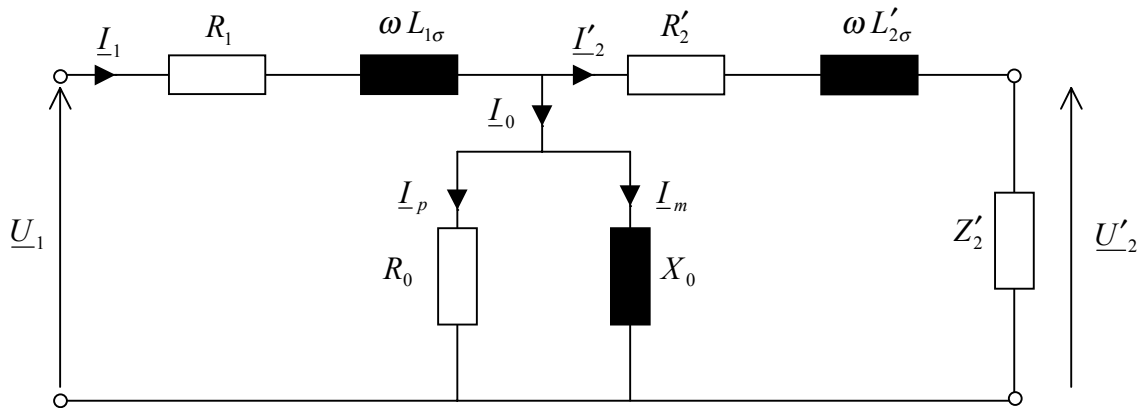
Ukupni gubici u gvožđu se mogu predstaviti izrazom:

$$P_{\text{Fe}} = P_H + P_V = (k_H f + k_V f^2) B_{\max}^2 m_{\text{Fe}} .$$

Konstruktori transformatora obično snimaju karakteristike gubitaka magnećenja za svaku vrstu lima i oblik magnetskog kola koji se upotrebljava.

1.6 Ekvivalentna šema transformatora

Ekvivalentna šema transformatora predstavlja pojednostavljeni model pomoću kojeg možemo, na posredan način, bez stvarnog opterećenja, da predvidimo ponašanje transformatora u raznim uslovima rada. Parametre ekvivalentne šeme određujemo na jednostavan način iz standardnih ispitivanja transformatora u ogledu praznog hoda i kratkog spoja. Sve veličine i parametri ekvivalentne šeme su fazne vrednosti, a veličine i parametri sekundara svedeni su na primar (preračunati sa kvadratom odnosa broja navojaka na primar, tako da je npr. $R_2' = (N_1/N_2)^2 R_2$.



Slika 1-9 Ekvivalentna šema transformatora

Veličine i parametri ekvivalentne šeme su:

I_0 struja praznog hoda,

I_p aktivna komponenta struje praznog hoda,

I_m reaktivna komponenta struje praznog hoda (struja magnećenja),

R_0 ekvivalentna otpornost u praznom hodu (fiktivna otpornost pomoću koje uzimamo u obzir gubitke u praznom hodu),

X_0 reaktansa magnećenja.

1.7 Ogljed praznog hoda

Osnovni ciljevi sprovođenja ogleda praznog hoda su određivanje:

- gubitaka praznog hoda (približno jednaki gubicima u gvožđu),
- struje praznog hoda,
- parametara ekvivalentne šeme.

Ogljed se provodi tako da na jedan od namotaja (obično nižeg napona) priključimo naznačeni (ili njemu bliski) napon, a priključke drugog namotaja ostavimo otvorenim.

Tokom ogleda meri se:

- napon napajanja, U_0 , približno ili tačno jednak sa U_n ;
- struja napajanja I_0 ;
- snaga uzeta iz mreže P_0 (snaga praznog hoda).

Izmerena snaga gubitaka praznog hoda približno je jednaka gubicima u gvožđu:

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

Pod naznačenom strujom praznog hoda smatramo onu vrednost struje napajanja koja tačno odgovara naznačenom naponu, odnosno onu koja se, u opštem slučaju, određuje prema:

$$I_{0,n} = \frac{U_n}{U_0} I_0 .$$

Relativna vrednost struje praznog hoda je oko 1-3% u odnosu na naznačenu struju (kod transformatora velikih snaga i manje od 1%).

Prilikom određivanja parametara ekvivalentne šeme obično se zanemaruje uzdužna (redna) grana šeme, budući da se pad napona na rednoj impedansi može zanemariti. Parametre poprečne grane ekvivalentne šeme (R_0 i X_0) jednofaznog transformatora tada određujemo na sledeći način:

- impedansa praznog hoda

$$Z_0 = \frac{U_0}{I_0} ,$$

- faktor snage u praznom hodu

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_0 I_0}$$

- fiktivna aktivna otpornost kojom uzimamo u obzir gubitke praznog hoda:

$$R_0 = \frac{U_0^2}{P_0} = \frac{Z_0}{\cos \varphi_0} ,$$

- reaktansa praznog hoda:

$$X_0 = \frac{Z_0}{\sin \varphi_0} .$$

1.8 Gubici usled opterećenja

Gubici usled opterećenja, P_T , sastoje se od sledećih gubitaka:

- u namotajima, koji su obično sačinjeni od bakra. U ove gubitke ubrajamo osnovne (Džulove) gubitke, $\sum(RI^2)$, i dopunske gubitke usled površinskog (skin) efekta, tj. povećanja omskog otpora koji nastaje zbog rasutog fluksa, odnosno usled indukovanih lokalnih struja u provodnicima,
- dopunske gubitke u drugim konstrukcionim delovima transformatora usled indukovanih parazitskih struja.

Dopuski gubici u namotajima se uzimaju u obzir preko faktora povećanja gubitaka, odnosno tzv. Fildovog sačinioca, k_f , koji obično iznosi nekoliko procenata.

U literaturi se često gubici usled opterećenja, uz zanemarenje dopunskih gubitaka u drugim konstrukcionim delovima, nazivaju gubicima u bakru, P_{Cu} .

Tada za gubitke usled opterećenja imamo:

$$P_T \cong P_{Cu} = \sum(k_f R I^2) .$$

Obično se gubici usled opterećenja svode na referentnu temperaturu 75°C .

Sledeća jednačina prikazuje zavisnost otpora od temperature:

$$R = R(\vartheta) = R_0 \cdot (1 + \alpha_0 \cdot \vartheta) ,$$

gde su R_0 i α_0 vrednost otpora i temperaturnog sačinioca pri temperaturi od 0°C . Za bakar imamo $\alpha_0 = 1/235$.

Odnos otpora pri temperaturama ϑ_b i ϑ_a je:

$$\frac{R_b}{R_a} = \frac{1 + \alpha_0 \vartheta_b}{1 + \alpha_0 \vartheta_a} = \frac{\frac{1}{\alpha_0} + \vartheta_b}{\frac{1}{\alpha_0} + \vartheta_a} = \frac{235 + \vartheta_b}{235 + \vartheta_a} ,$$

što ujedno predstavlja i odnos Džulovih gubitaka u namotajima.

Gubici u bakru za dvonamotajni transformator se mogu izraziti pomoću Fildovog sačinioca, otpora i struje sledećom jednačinom:

$$P_{Cu} = \sum(k_f R I^2) = k_{f1} R_1 I_1^2 + k_{f2} R_2 I_2^2$$

Pretpostavimo da su namotaji od istog materijala (npr. bakra) i da je Fildov sačinilac za oba namotaja jednak jedinici.

Izrazimo sada otpor preko proizvoda specifične otpornosti i dimenzija provodnika, a struju preko proizvoda gustine struje i preseka provodnika:

$$P_{Cu} = \rho_{Cu} \left[\frac{l_1}{S_1} (J_1 S_1)^2 + \frac{l_2}{S_2} (J_2 S_2)^2 \right] = \rho_{Cu} (l_1 S_1 J_1^2 + l_2 S_2 J_2^2) .$$

Ako zapreminu (proizvod $l \cdot S$) u gornjoj jednačini izrazimo preko odnosa mase i specifične mase, dobijamo sledeću jednačinu u kojoj su Džulovi gubici izraženi preko gustine struje i mase materijala:

$$P_{Cu} = \rho_{Cu} \left(\frac{m_{Cu,1}}{\gamma_{Cu}} J_1^2 + \frac{m_{Cu,2}}{\gamma_{Cu}} J_2^2 \right) = \frac{\rho_{Cu}}{\gamma_{Cu}} (m_{Cu,1} J_1^2 + m_{Cu,2} J_2^2) .$$

Za pojedini namotaj specifični Džulovi gubici po jedinici mase iznose:

$$p_{Cu} = k 10^{-12} J^2 \text{ [W/kg]} ,$$

gde je $k \cong 2$ za bakar na 20°C , odnosno $k \cong 2,44$ za bakar na 75°C .

Dopunski gubici usled skin efekta su srazmerni sa četvrtom potencijom širine provodnika (dimenzije upravne na magnetsko polje), s kvadratom učestanosti i obrnuto srazmerni sa kvadratom specifičnog otpora. Nasuprot osnovnim (Džulovim) gubicima u namotajima, dopunski gubici usled skin efekta opadaju značajnije sa porastom temperature namotaja.

1.9 Ogled kratkog spoja

Osnovni ciljevi sprovođenja oglada kratkog su određivanje:

- gubitaka usled opterećenja,
- napona kratkog spoja,
- parametara ekvivalentne šeme.

Ogled se provodi tako da jedan od namotaja (obično višeg napona), kod kratko spojenih priključaka drugog namotaja, priključimo na napon koji postepeno povećavamo od nule do vrednosti pri kojoj se uspostavlja naznačena (ili njoj bliska) vrednost struje, i tu vrednost napona nazivamo naponom kratkog spoja.

Tokom oglada meri se:

- napon napajanja, koji se naziva napon kratkog spoja U_k ,
- struja napajanja I_k (približno ili tačno I_n)
- snaga uzeta iz mreže P_k (snaga kratkog spoja).

Izmerena snaga gubitaka, svedena na naznačenu struju, predstavlja približno naznačene gubitke usled opterećenja transformatora P_{Tn} .

$$P_{k,n} = \frac{I_n^2}{I_k^2} P_k \cong P_{T,n} = P_{T1,n} + P_{T2,n}.$$

Napon kratkog spoja služi za određivanje promene (pada) napona u transformatoru usled opterećenja (pomoću tzv. Kapovog trougla), veličine stvarne ustaljene struje kratkog spoja i mogućnosti paralelnog rada dvaju ili više transformatora.

Pod naznačenim naponom kratkom spoja smatramo onu vrednost napona napajanja koja tačno odgovara naznačenoj struji, odnosno onu koja se, u opštem slučaju, određuje prema:

$$U_{k,n} = \frac{I_n}{I_k} U_k.$$

Prilikom određivanja parametara ekvivalentne šeme obično se zanemaruje poprečna grana šeme, budući da je struja praznog hoda puno manja od naznačene struje. Parametre uzdužne grane ekvivalentne šeme jednofaznog transformatora tada određujemo na sledeći način:

- impedansa kratkog spoja

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

- aktivna otpornost kratkog spoja

$$R_k = R_1 + R_2' = \frac{P_k}{I_k^2},$$

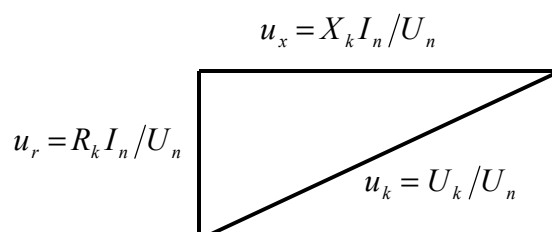
- reaktansa kratkog spoja

$$X_k = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}' = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}.$$

Približno se može uzeti da su aktivne i reaktivne otpornosti primara jednake svedenim aktivnim i reaktivnim otpornostima sekundara, tj:

$$R_1 \cong R'_2, X_{1\sigma} \cong X'_{2\sigma}.$$

Trougao koji formiraju fazori priključenog napona napajanja i radnog i reaktivnog pada napona često se predstavlja relativnim vrednostima u odnosu na naznačeni napon, pri čemu je struja, po dogovoru, naznačena.



Slika 1-10 Trougao relativnih vrednosti napona kratkog spoja (Kapov trougao)

Izrazi za relativne vrednosti napona kratkog spoja i radnog i induktivnog pada napona, izraženih u procentima. jednostavno se izvode:

$$u_k [\%] = 100 \frac{U_{k,n}}{U_n} = 100 \frac{Z_k I_n}{U_n},$$

$$u_r [\%] = 100 \frac{R_k I_n}{U_n} = 100 \frac{P_{k,n}}{S_n},$$

$$u_x [\%] = 100 \frac{X_k I_n}{U_n} = \sqrt{u_k^2 - u_r^2}.$$

Relativna vrednost napona kratkog spoja se kod distributivnih transformatora kreće od 4-6%.

Vrlo je korisno uočiti da je:

$$u_k [\%] = z_k [\%],$$

što sledi iz:

$$u_k [\%] = 100 \frac{U_k}{U_n} = 100 \frac{Z_k I_n}{U_n} = 100 \frac{Z_k}{Z_n} = z_k [\%].$$

1.10 Stepen iskorišćenja

Na osnovu poznavanja gubitaka praznog hoda i gubitaka usled opterećenja određuje se stepen iskorišćenja transformatora:

$$\eta_n = \frac{\text{izlazna snaga}}{\text{ulazna snaga}} = \frac{P_{2n}}{P_{1n}} = \frac{P_{2n}}{P_{2n} + P_{gn}} = \frac{S_n \cos \varphi}{S_n \cos \varphi + P_{0n} + P_{Tn}},$$

gde je S prividna snaga sekundara transformatora, indeks n označava naznačenu vrednost.

Kod proizvoljnog opterećenja, izraženog pomoću sačinioca β , gde je $\beta = I_2 / I_{2n}$, stepen iskorišćenja iznosi:

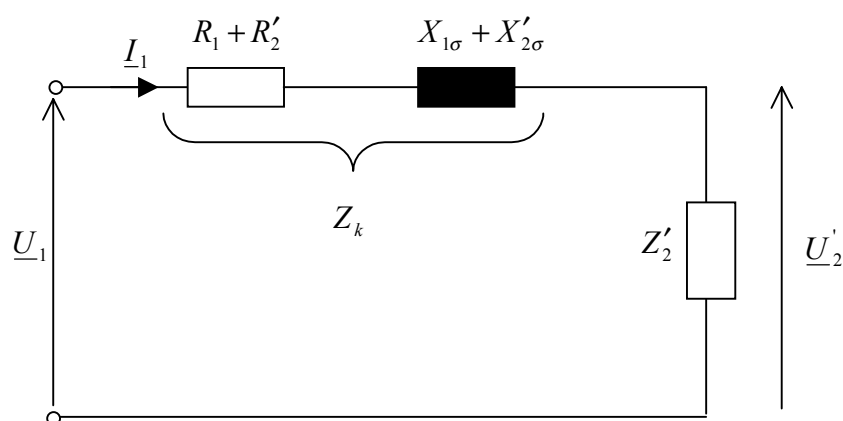
$$\eta(\beta) = \frac{\beta S_n \cos \varphi}{\beta S_n \cos \varphi + P_{0n} + \beta^2 P_{Tn}}.$$

1.11 Promena napona

Opterećenje transformatora izaziva promenu napona. Ova promena se obično ispoljava kao smanjenje (pad) napona u odnosu na onaj u praznom hodu, mada u izvesnim retkim slučajevima u praksi taj pad može da bude negativan. Izračunavanje promene napona, ΔU , se svodi na izračunavanje razlike intenziteta fazora \underline{U}_1 i \underline{U}'_2 , tj.

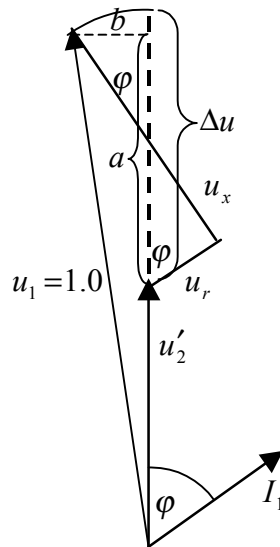
$$\Delta U = |\underline{U}_1| - |\underline{U}'_2|.$$

Obično se kod izračunavanja promene napona polazi od ekvivalentne šeme u kojoj je, zbog malih struja u poprečnoj grani ova zanemarena.



Slika 1-11 Šema za određivanje promene napona

Za induktivno opterećenje nacrtaćemo u relativnim jedinicama vektorski dijagram:



Slika 1-12 Vektorski dijagram za određivanje promene napona

Ovde su:

$$a = u_r \cos \varphi + u_x \sin \varphi$$

$$b = -u_r \sin \varphi + u_x \cos \varphi .$$

Za relativnu promenu napona vredi sledeći izraz:

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_1} = a + u_1 - \sqrt{u_1^2 - b^2} .$$

Uz $u_1 [\%] = 100$, pri zatom uglu φ , približni konačni izraz za procentualnu promenu napona je:

$$\Delta u [\%] \cong a [\%] + \frac{b^2 [\%]}{200} .$$

1.12 Zagrevanje

Pri procesu preobražaja električne energije u transformatoru jedan deo energije se pretvara u toplotu, što sa stanovišta korisnika predstavlja gubitke. Toplota proizvedena gubicima zagreva delove transformatora (magnetno kolo, namotaje, izolaciju, sud) i izaziva porast njihove temperature u odnosu na okolnu sredinu (ambijent). U odnosu na gubitke usled magnećenja ("gubici u gvožđu"), gubici u usled opterećenja ("gubici u bakru") su značajniji po veličini i posledicama, zato što izolacija provodnika namotaja predstavlja najosetljiviji deo transformatora s obzirom na toplotna naprežanja. Porast temperature, u opštem slučaju, zavisi od veličine i vremenske funkcije opterećenja (trajni rad, ciklični rad i rad u vanrednim uslovima) i načina i efikasnosti hlađenja. Sa porastom snaga transformatora problem zagrevanja postaje sve izraženiji, jer su gubici približno srazmerni sa zapreminom, a odvođenje toplote sa površinom.

Ograničenja temperature su različita za razne materijale. Kao što je već istaknuto, najosetljivija je izolacija provodnika, koja sa vremenom stari, tj. smanjuje joj se kvalitet i to utoliko brže ukoliko joj je veća temperatura na kojoj se nalazi. Dakle, vek trajanja izolacije zavisi od radne temperature mašine. Srednja vrednost veka trajanja današnjih transformatora iznosi nekoliko decenija.

Naznačena snaga je ona koja je istaknuta na natpisnoj pločici, to jest ona za koju je transformator deklarisan. Stvarna snaga je ona pri kojoj je zagrevanje transformatora jednako dozvoljenom. Sa stanovišta korisnika prihvatljivo je da stvarna snaga bude veća od naznačene snage, tj. da se transformator može opteretiti većom snagom u odnosu na deklarisanu.

Oznake koje ćemo koristiti za pojedine pojmove su sledeće:

- temperatura u uobičajenom smislu: ϑ [$^{\circ}\text{C}$],
- apsolutna temperatura: T [K],
- porast temperature u odnosu na okolinu (ambijent): θ [K]= $\vartheta - \vartheta_a$ i
- razlika dvaju temperatura na bilo kom mestu: $\Delta\theta$ [K]= $\vartheta_1 - \vartheta_2$.

Propisima je za pojedine vrste izolacije definisan odgovarajući najviši dozvoljeni porast temperature u odnosu na okolinu. Za uljne transformatore, gde se redovno upotrebljava izolacija papir u ulju (klasa A), temperatura najtoplije tačke (negde u gornjem delu transformatora) ne sme da pređe 140°C normalnim uslovima rada (trajni i ciklični rad), dok srednji porast temperature namotaja maksimalno sme da bude 65K ($\theta_{Cu} \leq 65\text{K}$). Kod suvih, vazdušno hlađenih transformatora ide se na znatno više temperature namotaja, pa se mora upotrebiti kvalitetnija izolacija, koja se razvrstava u klase.

Tabela 1-1 Klase izolacije

Klasa izolacije	A	E	B	F	H
θ_{\max} [K]= $\vartheta_{\max} - \vartheta_a$	60	75	80	100	125
Napomena: najviša vrednost temperature okoline je 40°C					

Kod uljnih transformatora moramo voditi računa i o ograničenju vezanom za porast temperature ulja u odnosu na okolinu. Za zatvorene sisteme sa dilatacionim sudom dozvoljena vrednost porasta temperature ulja u odnosu na okolinu iznosi 60K ($\theta_u \leq 60\text{K}$).

Za ostale delove transformatora nisu propisana ograničenja, već propisi nalažu da njihova temperatura ne sme nikada dostići takvu vrednost koja bi mogla da izazove oštećenja u transformatoru.

Kao i u drugim procesima, i ovde možemo da posmatramo ustaljena (stacionarna) stanja i prelazna (nestacionarna) stanja.

Ustaljeno stanje nastupa, kada se izjednači dovedena i prenešena (odvedena) toplota, odnosno kada se temperatura ustali na nekoj vrednosti. Kod prelaznih stanja usled nejednakosti između dovedene i prenešene toplote temperatura raste (zagrevanje), odnosno opada (hlađenje).

Dovod toplote nastaje usled gubitaka, dok se odvod toplote vrši na tri poznata načina: provođenjem (kondukcijom), stujanjem (konvekcijom) i zračenjem (radijacijom).

Provođenje toplote slično je provođenju električne struje i odigrava se uglavnom u čvrstim telima. Osnovni (Furijeov) zakon glasi:

$$p = \lambda S \frac{\Delta\theta}{x},$$

gde je p toplotna snaga koja prolazi kroz planparalelno telo, S površina tela, x debljina tela, a λ specifična toplotna provodnost.

Provođenje se odigrava u namotajima i jezgru sa konstrukcionim delovima. U provođenje se uračunava i prelaz toplote preko kontaktnih površina.

Strujanje je vezano za fluide - tečnosti i gasove, kod kojih se osim toplote kreću i molekuli, odnosno odnosno grupe molekula. Kod transformatora ovo je najvažniji vid prenosa toplote, a fluidi su najčešće ulje i vazduh. Obično se strujanje svrstava u dve podvrste: prirodno i prinudno.

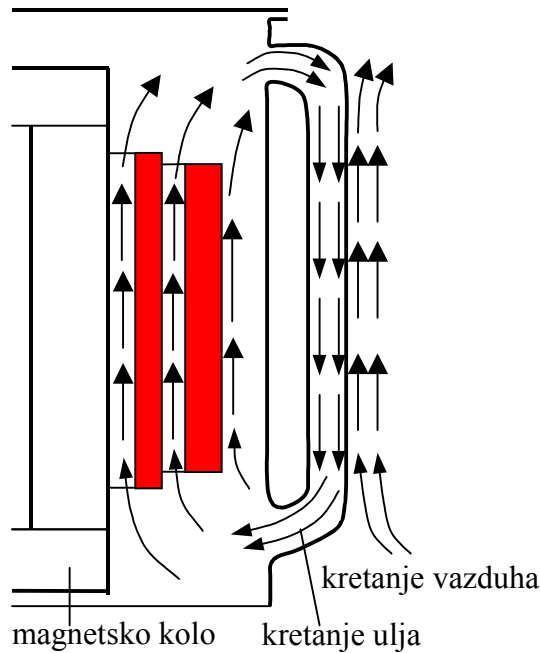
- Prirodno strujanje - npr. usled različite gustine zagrejanih i hladnih molekula, odnosno grupa molekula ulja, topliji delovi idu gore, hladniji dole i u svom kretanju, dodirujući zagrejane površine aktivnih delova odnose sa sobom izvesnu količinu toplote hladeći tako te delove. Putujući dalje, oni stižu do hladnjaka (rebara ili radijatora) i njima predaju sada tu toplotu, koja se sa ovih širi na okolinu.
- Prinudno strujanje se primenjuje kada je odvođenje toplote prirodnim strujanjem nedovoljno, što je slučaj kod transformatora velikih snaga. Cirkulacija se načini intenzivnijom ako se za tečnost (ulje) primeni pumpa, a za vazduh ventilator.

Suština pojave je ista kod prirodnog i prisilnog strujanja, bilo da se radi o ulju ili vazduhu, razlike su samo kvantitativne.

Za strujanje vredi sledeći zakon:

$$p = \alpha S \Delta\theta,$$

gde sačinilac α (specifična snaga odošenja toplote sa tela) nije konstanta, već složena funkcija temperature, porasta temperature, brzine strujanja, nagiba površine u odnosu na horizontalu, oblika i uglačnosti površine, a naročito od toga da li je kretanje fluida laminarno ili turbulentno.



Slika 1-23 Cirkulacija ulja u sudu i vazduha spolja

Zračenje je vid prenošenja toplote putem elektromagnetskih talasa relativno niske učestanosti. Njihova talasna dužina je utoliko kraća ukoliko je temperatura viša. Predata ili emitovana toplotna snaga računa se prema Štefan-Bolcmanovom zakonu:

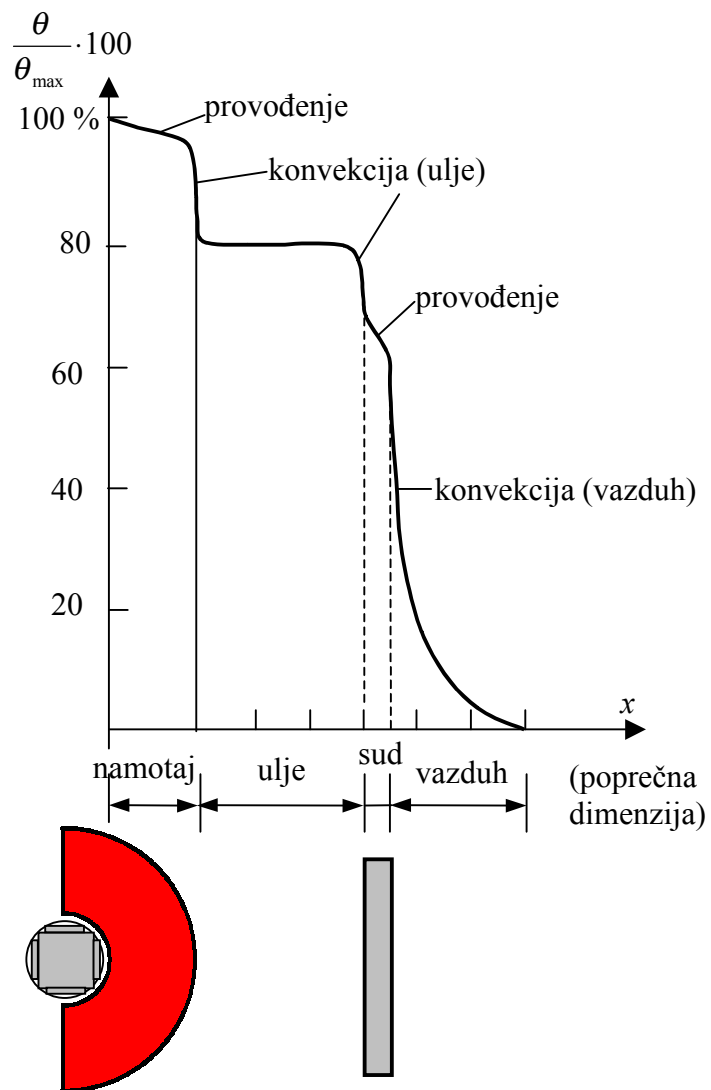
$$p = S(\sigma_1 T_1^4 - \sigma_2 T_2^4),$$

gde je T apsolutna temperatura oba tela među kojima se vrši razmena toplote, S površina a σ koeficijent koji zavisi od uglačanosti i boje površine i najveći je za crno telo.

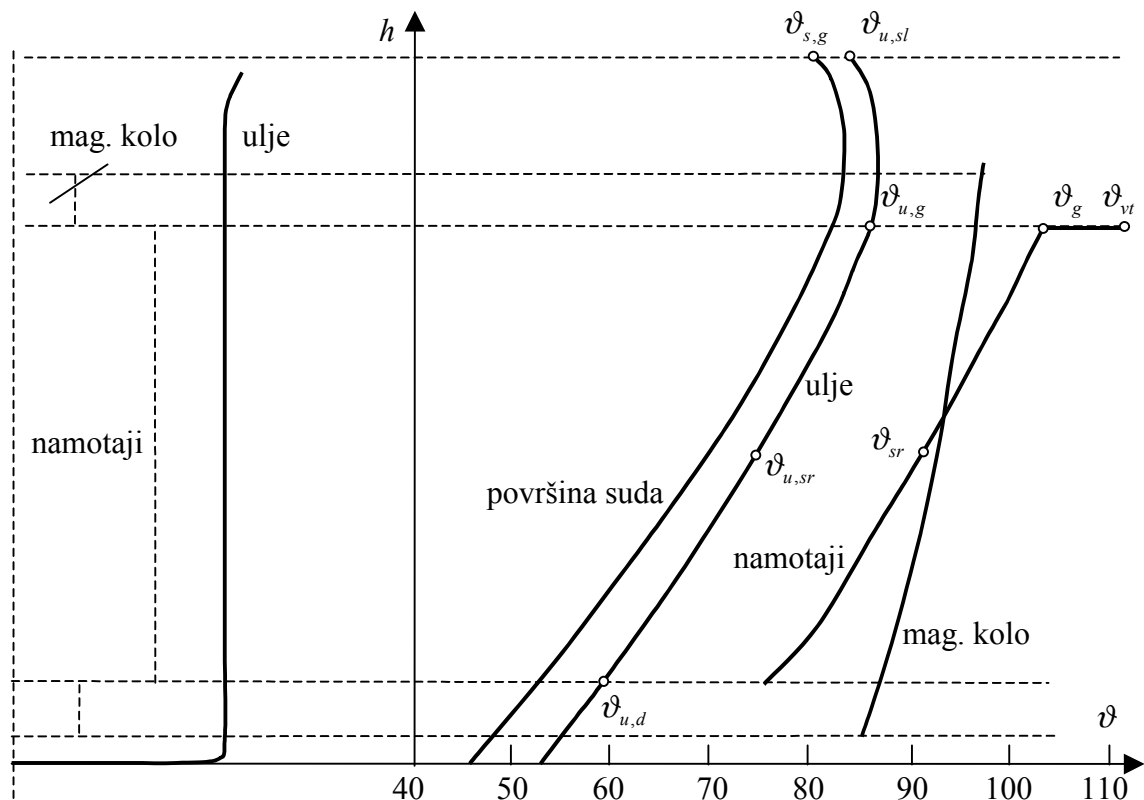
Kod transformatora se odavanje toplote zračenjem odigrava na površini suda koji zrači u okolinu i na taj način se prenošenje toplote na tom mestu odvija složeno - sabira se snaga strujanja i zračenja, pri čemu je prva značajnija, pogotovu kod prinudnog strujanja vazduha.

Prirodno je da su najvažnije temperature namotaja, posebno najveća vrednost koja je već definisana pod nazivom temperatura najtoplije tačke. Na žalost, ona je retko dostupna merenju, pa se zato određuje posredno, primenjujući obrasce definisane odgovarajućim propisima (standardima).

Američki propisi preporučuju, za transformatore čija je dozvoljena srednja vrednost porasta temperature namotaja $\theta_{sr} = 65 \text{ K}$, ovu jednostavnu formulu za izračunavanje porasta temperature u najtoplijoj tački: $\theta_{vt} = \theta_{sr} + 15 \text{ K}$.



Slika 1-14 Približni raspored porasta temperature u horizontalnom poprečnom preseku



Slika 1-15 Približni raspored porasta temperature u vertikalnom poprečnom preseku

1.12.1 Vrste hlađenja

Za obeležavanje vrste hlađenja usvojen je zapis sa 4 velika latinična slova, od kojih prvo i drugo obeležavaju vrstu i način strujanja rashladnog sredstva koje je u dodiru sa namotajem, respektivno, dok se treće i četvrto odnose na vrstu i način strujanja rashladnog sredstva u dodiru sa spoljnjim hladnjakom (ako ga ima).

Za rashladno sredstvo koje je u dodiru sa namotajem usvojene su sledeće oznake:

O (oil) za ulje, L (liquid) za sintetičku tečnost i A (air) za vazduh.

Za način strujanja usvojene su oznake:

N (natural) za prirodno i F (forced) za prinudno.

Za rashladno sredstvo koje je u dodiru sa spoljnjim hladnjakom usvojene su sledeće oznake:

A (air) za vazduh, G (gas) za gas i W (water) za vodu.

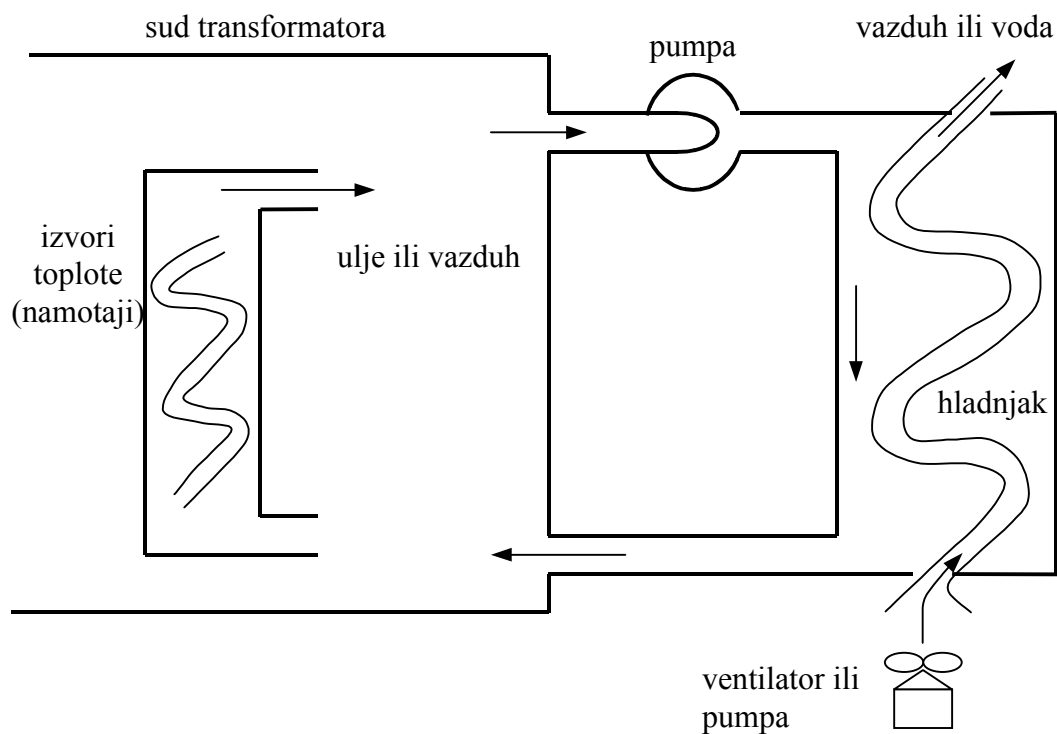
Najčešće upotrebljavani sistemi su:

AN - suvi transformator bez oklopa (zaštitnog plašta),

ANAN - suvi transformator sa oklopom (zaštitnim plaštem),

ONAN - uljni transformatori sa prirodnim strujanjem ulja iznutra i vazduha spolja,

ONAF - isto, samo sa ventilatorom spolja,
 ONAF/OFAF pumpa se uključuje samo pri velikim opterećenjima,
 OFAF - isto, samo je pumpa stalno uključena,
 ONWF - ne postoji uljna pumpa, a spolja je vodeno hlađenje sa pumpom,
 OFWF - isto, samo postoji i uljna pumpa.



Slika 1-16 Primer načina strujanja rashladnog sredstva transformatora

1.12.2 Nestacionarna termička stanja

Transformator skoro nikada ne radi u ustaljenom termičkom režimu jer mu se opterećenje svaki čas menja. Temperatura namotaja zavisi od veličine i trajanja opterećenja, promena temperature ambijenta odnosno temperature rashladnog sredstva. Za njegov vek (odnosno brzinu starenja) biće merodavna neka ekvivalentna temperatura, pri čemu se za usrednjavanje (ponderisanje) može uzeti dan, mesec ili godina. Uzimanje dana je logično, jer se opterećenje približno ponavlja prema dnevnom dijagramu, a i temperatura ambijenta ima značajne dnevne oscilacije. Takođe su značajne i sezonske promene opterećenja i temperature okoline (tipične razlike između leta i zime), pa tako uzimanje meseci i godine za period usrednjavanja izgleda sasvim opravdano.

Za analizu toplotnih prelaznih procesa poslužićemo se uprošćenim pristupom, koji tretira transformator kao jednostavno telo koje ima samo jednu vremensku konstantu.

Za postavljanje diferencijalne jednačine prostiranja toplote poći ćemo od sledećih pretpostavki:

- transformator je termički homogeno telo, što znači da sve tačke u svakom trenutku imaju istu temperaturu,
- toplotna snaga, tj. gubici su stalni - ne zavise ni od temperature, ni od vremena,
- faktor prolaza toplote α je takođe stalan, tj. ne zavisi od temperature,
- temperatura ambijenta, odnosno rashladnog sredstva je stalna.

Pod tim uslovima, jednakost oslobođene toplotne energije u kratkom intervalu vremena $P dt$ sa zbirom porasta akumulisane toplotne energije $cm d\theta$ energije predate ambijentu, odnosno rashladnom sredstvu u istom vremenskom intervalu $\alpha S \theta dt$, može se izraziti sledećom diferencijalnom jednačinom:

$$P dt = m c d\theta + \alpha S \theta dt .$$

Početni uslov $t=0$, porast temperature transformatora u odnosu na okolinu je θ_0 .

U ustaljenom stanju je promena temperature jednaka nuli, tj. $d\theta=0$, pa za porast temperature u ustaljenom stanju θ_{st} vredi:

$$P dt = \alpha S \theta_{st} dt \Rightarrow \theta_{st} = \frac{P}{\alpha S} .$$

Zgodno je uvesti oznaku za vremensku konstantu zagrevanja T :

$$T = \frac{cm}{\alpha S} .$$

Rešenje po polazne diferencijalne jednačine po θ ima sledeći oblik:

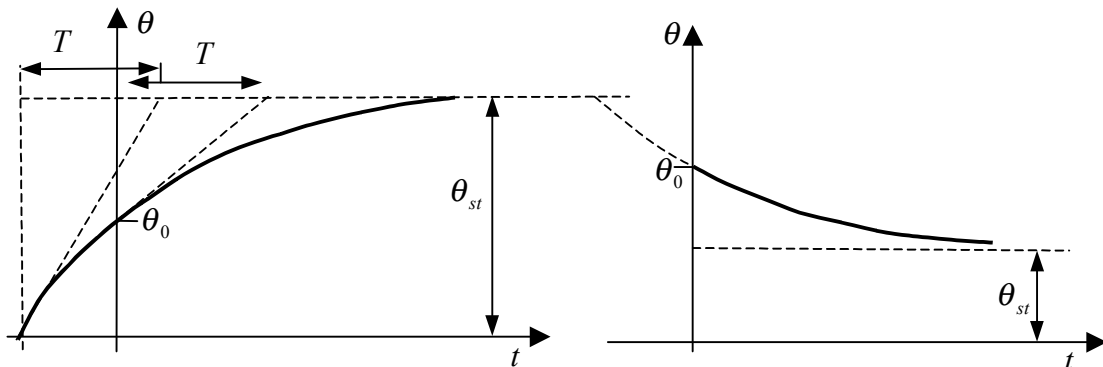
$$\theta = \theta_{st} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \theta_0 e^{-\frac{t}{T}} = (\theta_{st} - \theta_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \theta_0 .$$

Posle 4 do 5 vremenskih konstanti uspostavlja se stacionarno stanje.

Za proces hlađenja imamo da je $P=0$, pa rešenje po θ ima sledeći oblik:

$$\theta = \theta_0 e^{-\frac{t}{T}} .$$

U opštem slučaju vremenske konstante zagrevanja i hlađenja ne moraju da budu jednake .



Slika 1-17 Proces zagrevanja i hlađenja transformatora

Ovaj uprošćeni pristup se u praksi primenjuje samo za aproksimaciju srednje temperature ulja, a nikako i namotaja, magnetnog kola i suda.

Za kvalitativno tačniji pristup primenjuju se složeniji računski postupci koji uvažavaju nehomogenost transformatora, zavisnost gubitaka od temperature, zavisnost faktora α od porasta temperature, promenu temperature ambijenta i slično.

Danas se za određivanje porasta temperature, tj. toplotnih naprezanja u transformatoru koriste složeni numerički postupci.

1.13 Zakon sličnosti (dimenziona analiza)

Uz pretpostavku da su broj navojaka, gustina struje J i magnetska indukcija B_m u radnoj tački (na kolenu $B(H)$ karakteristike), stalne (jednake) veličine, analiziraćemo uticaj dimenzija transformatora na neke njegove interesantne veličine, iz čega se mogu izvući mnogi korisni zaključci.

Neka linearne dimenzije imaju odnos $k=l'/l$.

Iz tablice koja sledi mogu se izvući sledeći zaključci:

- prividna snaga raste kao k^4 ,
- relativna snaga u odnosu na masu i cenu raste sa k ,
- relativni gubici opadaju u odnosu na snagu kao $1/k$,
- porast temperature se povećava sa k ,
- vremenske konstante rastu kao k ,
- relativna struja magnećenja opada kao $1/k$,
- radna komponenta napona kratkog spoja opada kao $1/k$, a induktivna raste sa k .

Dakle, transformatori većih snaga su ekonomičniji, ali zbog porasta temperature sistem za hlađenje se mora poboljšati, primenom ulja, uvođenjem prinudnog strujanja ulja i vazduha, primenom vode za hlađenje ulja itd. Tek pod ovakvim uslovima se može zadržati ista gustina struje i ista magnetska indukcija.

Tabela 1-2 Dimenziona analiza transformatora

R. br.	Veličina	Formula	Odnos
1.	Gustina struje	J	1
2.	Magnetska indukcija	B_m	1
3.	Površine preseka i hlađenja	$S = K l^2$	k^2
4.	Zapremina i masa	$m = \gamma V = C l^3$	k^3
5.	Struja	$I = J S_{Cu}$	k^2
6.	Fluks i (induk) napon	$U = c \omega \Phi = C B_m S_{Fe}$	k^2
7.	Prividna snaga	$P_s = U I$	k^4
8.	Otpornost	$R = N \rho l / S_{Cu}$	$1/k$
9.	Gubici u bakru	$P_{Cu} = R I^2$	k^3
10.	Gubici u gvožđu	$P_{Fe} = B_m^2 V$	k^3
11.	Porast temperature	$\theta = (P_{Cu} + P_{Fe}) / (\alpha S)$	k
12.	Relativni gubici	$p_g = (P_{Cu} + P_{Fe}) / P$	$1/k$
13.	Relativna cena	$\zeta = m / P_s$	$1/k$
14.	Reaktansa rasipanja	$X_\sigma = K \delta' / h$	1
15.	Relativna reaktansa rasipanja	$x_\sigma = X_\sigma I / U$	1
16.	Relativna snaga	$p = P_s / m$	k
17.	Reaktansa magnećenja	$X_0 = \mu \omega N^2 S / l$	k
18.	Relativna reaktansa magnećenja	$x_0 = X_0 I / U$	k
19.	Relativna struja magnećenja	$i_\mu = 1 / x_0$	$1/k$
20.	Termička vremenska konstanta	$T = C / K = c m / S$	k
21.	Električna vremenska konstanta	$T_{el} = X_\sigma / (\omega R)$	k

1.14 Prelazni procesi

Za analizu i proučavanje ponašanje rada transformatora veoma su značajni prelazni procesi koji su praćeni povećanim naponima (prenaponima) ili povećanim strujama: kratak spoj i uključenje u praznom hodu. Naime, električna (naponska), mehanička i termička naprezanja koja se javljaju u ovim prelaznim stanjima mogu da ugroze funkcionisanje i izazovu značajna oštećenja transformatora. Kod električnih naprezanja

pre svega treba obratiti pažnju na prenapone koji se javljaju kao posledica prekidanja u kolu, atmosferskih pražnjenja, lukova prema zemlji, kratkih spojeva, kao i ispitnih napona. Pojave praćene velikim strujama u odnosu na naznačene (kratki spojevi u mreži, kao i uključanje transformatora u praznom hodu), značajne su sa stanovišta mehaničkih i toplotnih naprezanja (ova naprezanja su proporcionalna sa kvadratom struje). Do povećanih toplotnih naprezanja dolazi i kod preopterećenja transformatora.

Da bi se broj i težina kvarova transformatora smanjio na što moguće manju meru, mora se voditi računa o mnogim informacijama i postupcima, počevši od idejnog rešenja, izrade tendera, nuđenja, razvoja, istraživanja, projektovanja, konstruisanja, izrade, ispitivanja, transporta, montaže, puštanja u probni rad, eksploatacije, održavanja i konačno posle prestanka rada. Transformator treba da bude projektovan i izrađen tako da izdrži sva moguća naprezanja kojima je izložen tokom svog životnog veka.

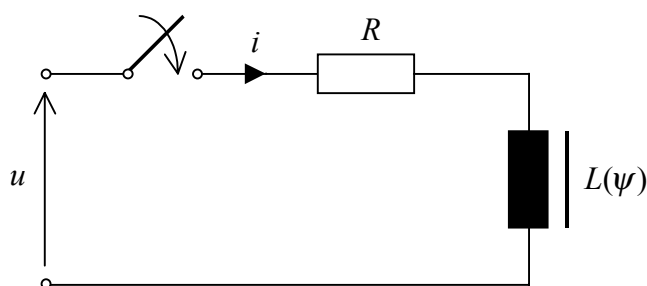
Ovde će biti više reči o dva prelazna procesa; uključanju transformatora praznom hodu i kratkom spoju transformatora.

1.14.1 Uključenje transformatora u praznom hodu

Struja prilikom uključanja transformatora na puni napon može da bude višestruko veća od naznačene struje I_n , odnosno stotinu i više puta veća od struje praznog hoda u ustaljenom stanju I_0 . Prelazna pojava traje kratko vreme, ali može da utiče na prekostrujnu zaštitu koja treba da se podesi tako da ne deluje nepotrebno i isključi transformator.

Uzrok ove pojave je u nelinearnosti magnetskog kola. Prilikom uključanja, radna tačka na karakteristici magnećenja može da se nađe duboko u oblasti zasićenja.

Primarni namotaj prilikom uključanja može se pojednostavljeno prikazati kao redno RL kolo, kod kojeg je induktivnost nelinearna i funkcija je fluksa: $L=L(\psi)$, gde je fluks $\psi=Li$.



Slika 1-18 Pojednostavljeni prikaz primarnog namotaja prilikom uključanja

Za električno kolo prikazano slikom 1-18 imamo sledeću naponsku jednačinu:

$$u = Ri + \frac{d\psi}{dt}.$$

Izrazivši struju preko induktivnosti i fluksa, dobijamo linearnu diferencijalnu jednačinu prvog reda:

$$U_m \sin(\omega t + \varphi_0) = \frac{d\psi}{dt} + \frac{R}{L(\psi)}\psi,$$

gde je pretpostavljeno napajanje sa sinusnim naponom sa početnom fazom φ_0 . U prvoj aproksimaciji uzećemo da je $L = \text{const.}$, što se može pravdati time da je drugi član na desnoj strani za jedan ili više redova veličine manji od prvog.

Rešenje se sastoji od dva člana:

- aperiodičkog, koji potiče od homogene jednačine (kod koje je desna strana jednaka nuli) i
- stacionarnog (koji predstavlja partikularni integral).

Konačni oblik jednačine fluksa je:

$$\psi = [\psi_r - \psi_m \sin(\varphi_0 - \varphi)]e^{-t/T_0} + \psi_m \sin(\omega t + \varphi_0 - \varphi),$$

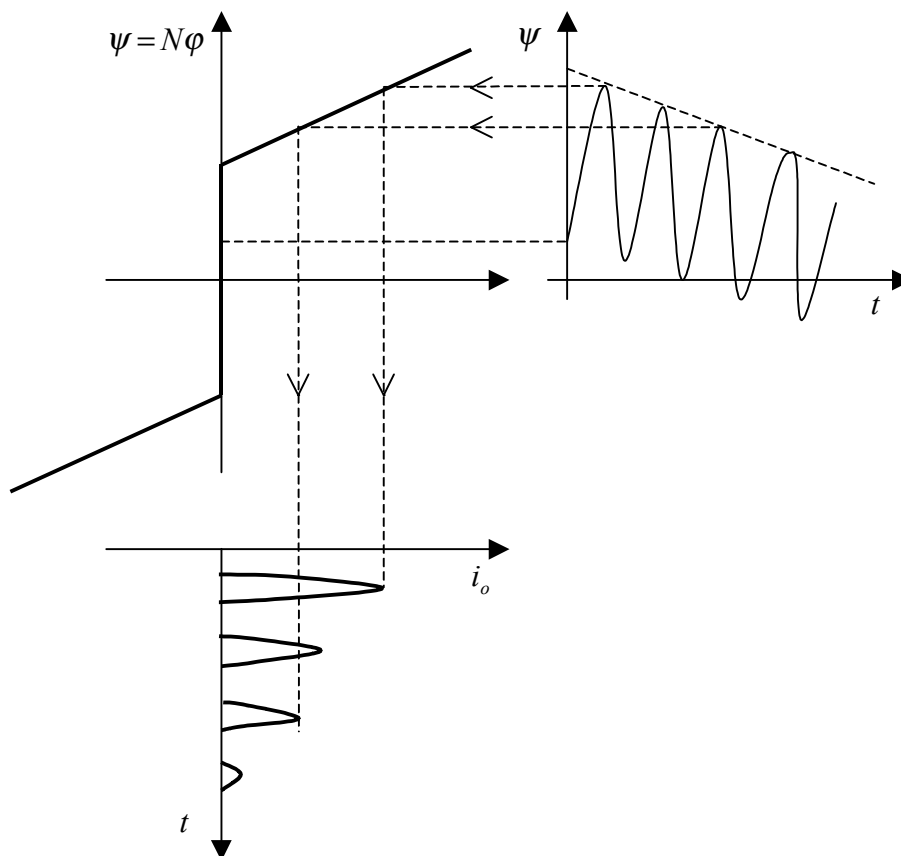
gde je:

$T_0 = L/R$ električna vremenska konstanta koja kod transformatora velikih snaga iznosi reda veličine 10s, ψ_r remanentni fluks i φ_0 ugao uključenja.

Aperiodička komponenta ima svoj maksimum za $\varphi - \varphi_0 = \pi/2$. Prvi, najveći maksimum funkcije fluksa nastaje približno za $\omega t = \pi$, i on iznosi:

$$\psi_{\max} = \psi_r + \psi_m [1 + \sin(\pi - \pi/2)] = \psi_r + 2\psi_m.$$

Dakle, fluks neposredno po uključenju može dostići vrednost preko dva puta veću od one u ustaljenom stanju, što se, usled nelinearnosti, znatno jače odražava na struju.



Slika 2-19 Vremenski tok struje uključenja

Maksimalna vrednost struje praznog hoda se danas računa numeričkim putem, pomoću računara. Radi fizičke predstave, ovde će biti objašnjen analitički postupak za približno računanje maksimalne vrednosti struje uključenja. Ako prethodnu jednačinu podelimo sa brojem navojaka, N , dobijamo:

$$\phi_{\max} = \phi_r + 2\phi_m.$$

Fluks možemo posmatrati i kao zbir komponente koja se zatvara kroz magnetsko kolo i komponente koja se zatvara kroz vazduh:

$$\phi_{\max} = \phi_{\text{Fe}} + \phi_{\text{vaz}} = B_{\text{Fe}} S_{\text{Fe}} + \mu_0 H_{\max} (S_{\text{vaz}} - S_{\text{Fe}}) = \mu_0 H_{\max} S_{\text{vaz}} + (B_{\text{Fe}} - \mu_0 H_{\max}) S_{\text{Fe}},$$

gde je S_{Fe} presek magnetnog kola, a S_{vaz} površina vazdušnog prostora namotaja (slika 2-20).

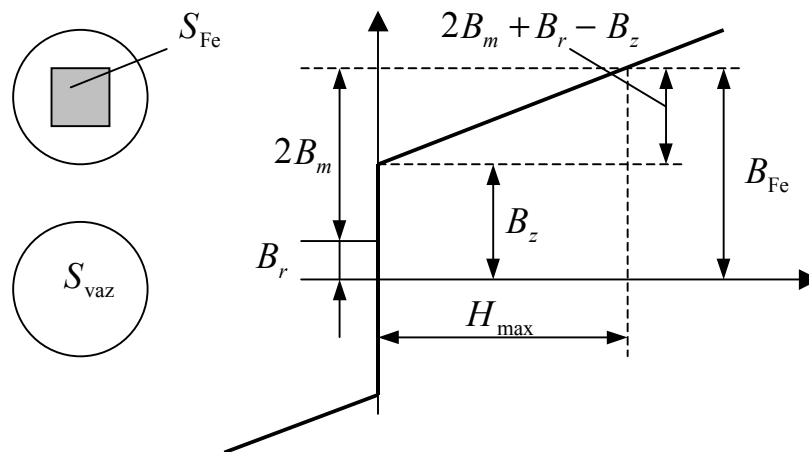
Indukcija potpunog zasićenja magnetskog materijala, B_z , je: $B_z = B_{\text{Fe}} - \mu_0 H_{\max}$

Sada možemo da pišemo:

$$\phi_{\max} = \phi_r + 2\phi_m = B_r S_{\text{Fe}} + 2 B_m S_{\text{Fe}} = \mu_0 N I_{\mu_0 \max} S_{\text{vaz}} / l + B_z S_{\text{Fe}}.$$

Odavde se dobija vrednost maksimalne struje uključenja:

$$I_{0\max} = \frac{S_{\text{Fe}}}{S_{\text{vaz}}} l \frac{2 B_m + B_r - B_z}{\mu_0 N}.$$

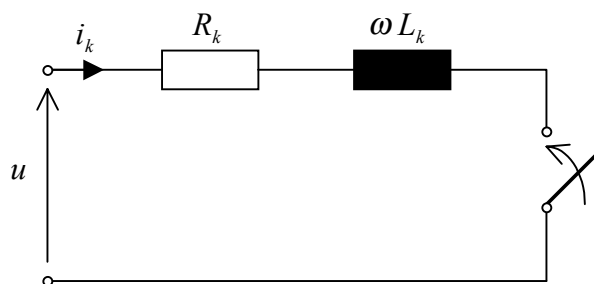


Slika 1-20 Površine gvožđa i vazdušnog prostora, te karakteristika magnecenja

Dakle, maksimalna vrednost struje uključenja je utoliko veća ukoliko se presek namotaja više približava preseku gvožđa, iz čega sledi da sa gledišta udarne struje uključenja primar treba da bude spoljašnji namotaj, što se često i čini ako je on za veći napon. Dalje, vidi se da je ta struja manja ako je remanentna indukcija B_r manja i ako su dimenzije (l) manje.

1.14.2 Udarni kratak spoj transformatora

Prilikom udarnog kratkog spoja struja je višestruko veća od naznačene struje. Za razliku od uključenja neopterećenog transformatora, prilikom kratkog spoja magnetsko kolo je nezasićeno, jer pad napona na primarnoj reaktansi i aktivnoj otpornosti iznosi približno polovinu napona. Posledica ovoga je opravdanost zanemarenja poprečne grane ekvivalentnog kola i stalnost induktivnosti L_k , pa je šema jednostavna (Slika 2-21).



Slika 1-21 Pojednostavljeni prikaz udarnog kratkog spoja

Za električno kolo prikazano slikom 1-21 imamo sledeću naponsku jednačinu:

$$U_m \sin(\omega t + \varphi_0) = R_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt},$$

gde je pretpostavljeno napajanje sa sinusnim naponom sa početnom fazom φ_0 .

Rešenje se sastoji od dva člana:

- aperiodičkog, koji potiče od homogene jednačine (kod koje je desna strana jednaka nuli) i
- stacionarnog (koji predstavlja partikularni integral).

Konačni oblik jednačine struje je:

$$i_k = I_{km} \left[\sin(\omega t + \varphi_0 - \varphi_k) - \sin(\varphi_0 - \varphi_k) e^{-t/T_k} \right],$$

gde je:

$T_k = L_k / R_k$ električna vremenska konstanta udarnog kratkog spoja. Usporedimo sada trajanje prelaznih procesa udarnog kratkog spoja i uključenja. Vremenska konstanta prilikom uključenja je: $T_0 = L_0 / R_1 \approx 2 L_0 / R_k$. Pošto je $L_0 \gg L_k$, prelazna pojava udarnog kratkog spoja traje puno kraće; ona iznosi samo nekoliko poluperioda.

Odredimo sada maksimalnu vrednost udarne struje kratkog spoja. Aperiodička komponenta ima svoj maksimum za $\varphi_0 - \varphi_k = -\pi/2$. U tom slučaju izraz za struju postaje:

$$i_k = I_{km} \left[e^{-t/T_k} - \sin(\omega t - \pi/2) \right] = I_{km} \left[e^{-t/T_k} - \cos \omega t \right]$$

Prvi, najveći maksimum funkcije fluksa nastaje približno za $\omega t = \pi$, i on iznosi:

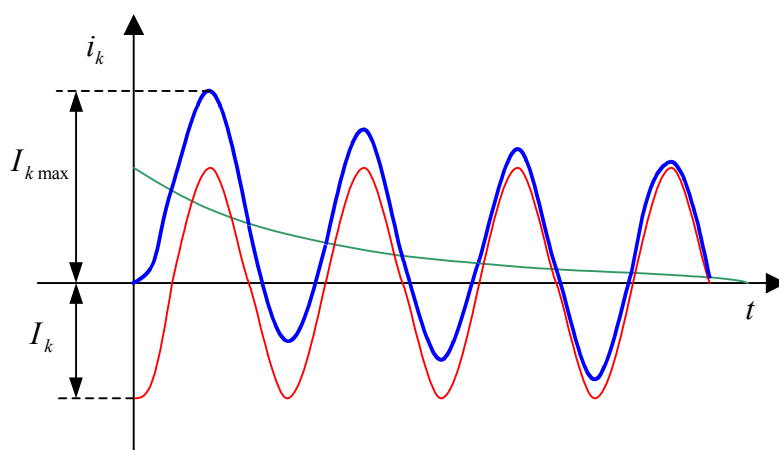
$$i_{k,\max} = I_{km} \left(1 + e^{-\pi/\omega T_k} \right) = k_m I_{km},$$

gde k_m uzima vrednosti od 1,7 do 1,8 za transformatore velikih snaga, odnosno 1,3 do 1,4 za transformatore manjih snaga.

Znajući da je ustaljena struja kratkog spoja $I_k = U_k / Z_k$, ima se za maksimalnu struju u prelaznom stanju, izraženu u procentima:

$$i_{k,\max} [\%] = \sqrt{2} 100 k_m / u_k [\%].$$

Struja kratkog spoja je i u ustaljenom stanju velika, dok joj najveća vrednost u prelaznom stanju dostiže 30% do 80% više od amplitude ustaljene struje kratkog spoja.



Slika 1-22 Vremenski tok struje udarnog kratkog spoja

Posledice struje kratkog spoja u prelaznom stanju su dvojake- termičke i mehaničke. Termičke posledice nisu značajne, jer je prelazna pojava kratkotrajna, a porast temperature, iako premašuje vrednost u normalnom radu, nije značajan, jer kvar mora da bude detektovan i transformator odmah isključen.

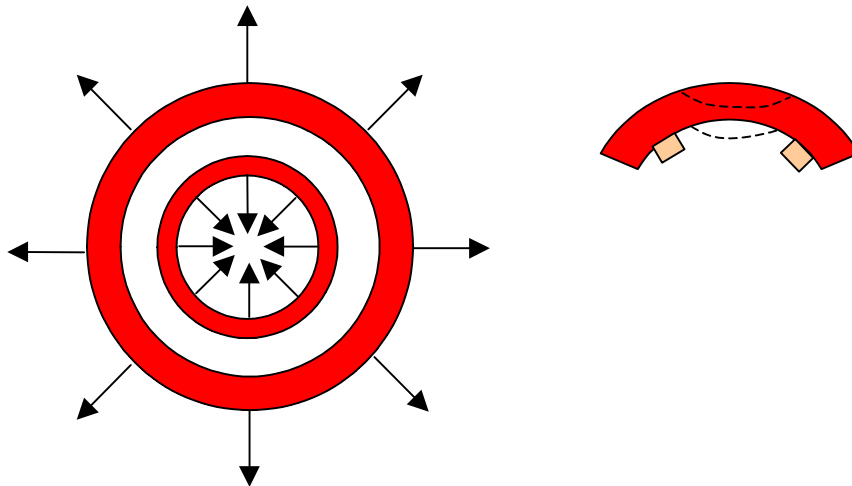
Mehaničke posledice su povećane elektromagnetske sile na namotaje, o čemu će biti više reči u narednom poglavlju.

1.14.2.1 Mehanička napreznja namotaja transformatora u kratkom spoju

Transformatori su tokom normalnog rada, a pogotovu tokom kvarova, izloženi dejstvu mehaničkih sila, odnosno mehaničkom napreznju. Zbog potrebe za pouzdanim radom, prilikom projektovanja i tokom ispitivanja transformatora vodi se računa o nizu faktora i problema vezanih za mehanička napreznja.

Da bi prikazali napreznja namotaja koja se imaju, potrebno je ukratko opisati sile koje deluju na namotaj pri ovim napreznjima, a to su radijalna i aksijalna komponenta sile.

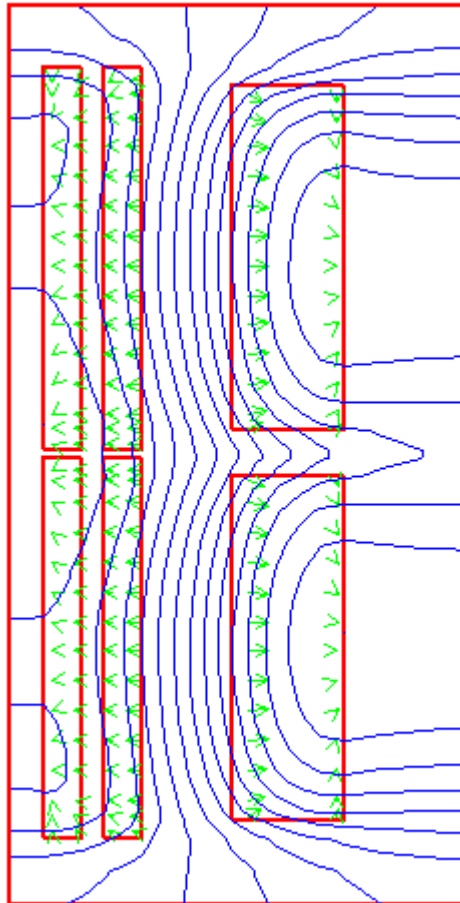
Usled radijalne komponente sile pojavljuje se pritisak na unutrašnji namotaj koji teži da ga nasloni na stub (suzi), a na spoljašnji koji teži da ga istegne. Da bi povećali otpornost provodnika namotaja s obzirom na radijalne sile namotaj se stavlja na izolacione podupirače ("letvice", "lajsne"), koji se oslanjaju na izolacioni cilindar od prešpana, dok se u rashladne aksijalne kanale, na odgovarajućem razmaku, stave pogodno isečeni komadi prešpana ("kanalni umeci"). Delovi namotaja opterećeni su slično gredi sa kontinualnim opterećenjem koje teži da stvori ugib. Na slici 2-23 prikazane su radijalne sile na namotaj transformatora i napreznja kojima je pri ovim silama namotaj izložen. Dimenzionisanje se svodi na određivanje potrebnog broja podupirača i umetaka, uz izbor njihove širine iz niza standardnih dimenzija, tako da se dobije rastojanje kod kojeg su napreznja materijala provodnika manja od dozvoljenog. Prisutnost podupirača ima za posledicu pojavu lokalnih savijanja, o čemu se takođe mora voditi računa.



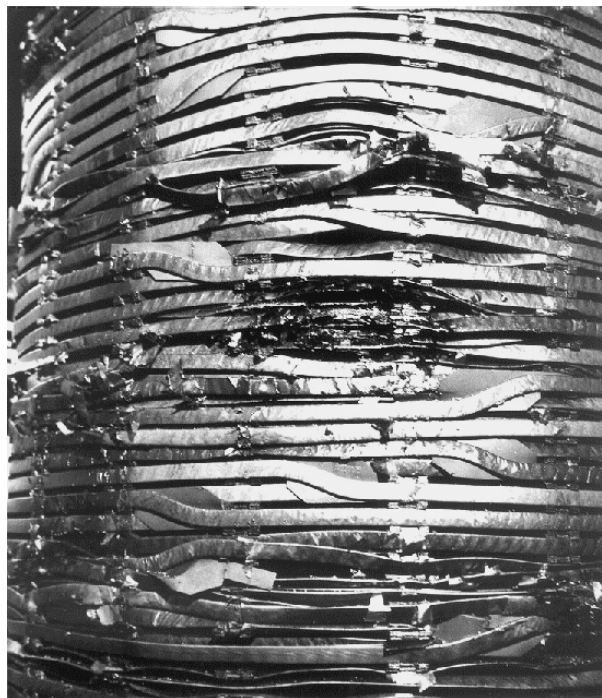
Slika 1-23 Dejstvo radijalnih sila na namotaj transformatora

Aksijalne sile nastoje da sabiju, odnosno pomere namotaj iz strujnog težišta. Da bi osigurali izdržljivost izolacije namotaja, s obzirom na aksijalne sile, u rashladne radijalne kanale namotaja stavlja se odgovarajući broj izolacionih podmetača ("repića") potrebne širine. Dimenzionisanje se svodi na određivanje potrebnog broja podmetača, uz izbor njihove širine iz niza standardnih dimenzija, tako da se dobije rastojanje kod kojega su naprezanja materijala izolacije namotaja manja od dozvoljenog. Na stubove se stavlja odgovarajući stezni sistem dimenzionisan tako da osigura kompaktnost aktivnog dela prilikom montaže i održavanja, odnosno delovanja sila kratkog spoja.

Da bi pravilno dimenzionisali namotaje potrebno je da se izračunaju naprezanja kojima su oni izloženi, za šta se danas koriste numerički proračuni na računaru (slika 2-24). Smanjenje specifičnih naprezanja postiže se povećanjem količine ugrađenog materijala, odnosno povećanjem impedanse transformatora, što, u krajnjoj liniji, povećava cenu transformatora.



Slika 1-24 Primer numeričkog proračuna sila kratkog spoja



Slika 1-25 Oštećenje namotaja transformatora usled kratkog spoja

1.15 Trofazni transformatori

Kod trofaznih transformatora moguća su, u osnovi, dva tehnička rešenja - grupa od tri jednofazna transformatora, sa zasebnim magnetskim kolima ili jedan trofazni transformator sa zajedničkim magnetskim kolom. Grupa jednofaznih transformatora se obično primenjuje za velike jedinice u Americi (*američka transformacija*) i ima prednost vezanu za transport, održavanje i obezbeđenje rezerve, jer su kvarovi transformatora uobičajeno na jednoj fazi, ali je u osnovi skuplja (oko 15%) jer se ne koristi činjenica da je zbir trenutnih vrednosti uravnoteženih fluksova u sve tri daze jednak nuli i zahteva više prostora. Trofazni transformatori sa zajedničkim magnetnim kolom se često primenjuju u Evropi (*evropska transformacija*).

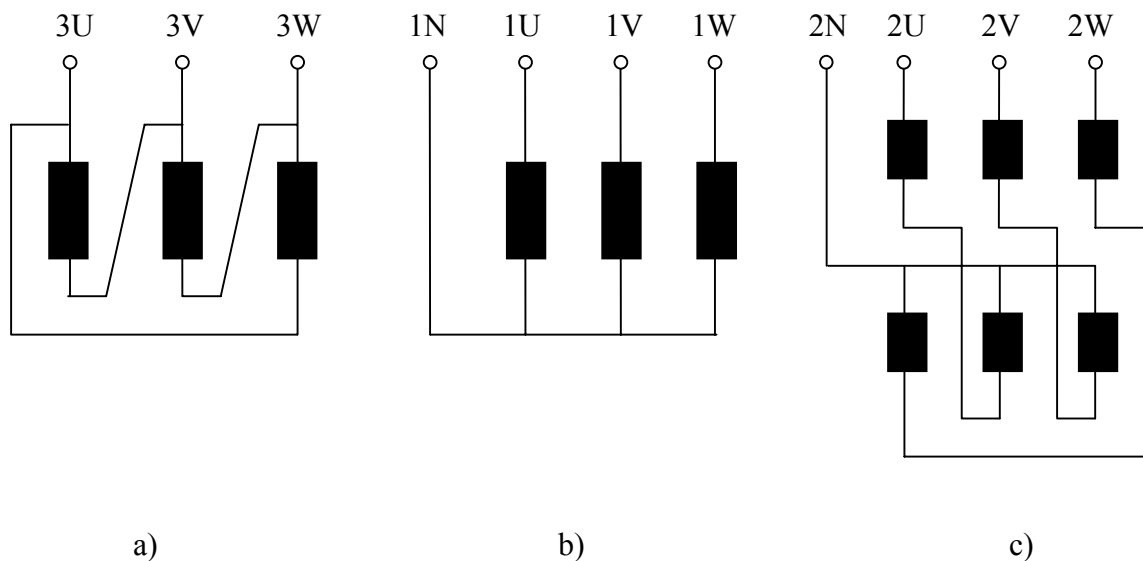


Slika 1-26 Trofazni suvi transformator

Namotaji trofaznih transformatora sprežu se u:

- trougao,
- zvezdu
- slomljenu zvezdu (cik-cak sprega)

Prema važećim standardima priključne stezaljke, odnosno provodni izolatori označavaju se sa slovnim oznakama U, V, W, N (ranije A, B, C, N). Ispred slovne oznake za pojedinu fazu se stavljaju brojčane oznake za označavanje visine napona namotaja: broj "1" za visokonaponski namotaj (VN), "2" za niskonaponski namotaj (NN) kod dvonamotajnih transformatora, odnosno srednjenaponski namotaj (SN) kod tronamotajnih transformatora i "3" za NN namotaj kod tronamotajnih transformatora. Krajevi namotaja označavaju se brojnim oznakama "1" za početak i "2" za kraj (svršetak), i to posle slovne oznake, npr. 1U2 za svršetak VN namotaja prve faze. Uz krajeve potrebno je definisati i smer motanja namotaja oko stuba ("desni" ili "levi").



Slika 1-27 Primeri trofaznih namotaja:

NN namotaj spojen u trougao a) i slomljenu zvezdu c), i VN namotaj spojen u zvezdu b)

1.15.1 Glavne karakteristike pojedinih sprega trofaznih transformatora

- trougao (oznaka **D** za VN, odnosno **d** za NN) - budući da su međufazni i fazni naponi jednaki, ova sprega, u odnosu na spregu zvezda, zahteva veći broj navojaka, manjeg preseka (radi $\sqrt{3}$ puta manje struje) uz veće učešće izolacije. Ovo ima za posledicu veću količinu bakra kod visokonaponskih transformatora.
- zvezda* (oznaka **Y** za VN, odnosno **y** za NN) - fazni napon je $\sqrt{3}$ puta manji od međufaznog (priključenog) napona. Ako je namotaj sekundarni postoji mogućnost primene dva napona, međufaznog, između krajeva priključaka i faznog napona između jedne faze i neutralne tačke.
- slomljena zvezda* (oznaka **z**) - ova sprega se isključivo primenjuje za NN namotaje. Namotaj pojedine faze sačinjavaju dva redno povezana polunamotaja koji nisu na istom stubu. U odnosu na spregu zvezda, ovaj namotaj je zahteva 15,5% više bakra, međutim lako podnosi nesimetrično opterećenje, pa se unatoč tome što je skuplji primenjuje kod distributivnih transformatora manjih snaga.

Kada je izveden i priključak na zvezdište ili neutralnu tačku oznaci spregu dodaje se i slovo **N**, odnosno **n**.

Sprega **Yyn** primenjuje se kod distributivnih transformatora manje snage. Prednosti upotrebe ove spregu su manja potrošnja bakra i izolacije u odnosu na z-spregu (sa gledišta proizvođača), odnosno mogućnost raspolaganja sa dva naponska nivoa- linijski napon za elektro motore, a fazni za osvetljenje i jednofazne potrošače (sa gledišta korisnika). Nedostatak ove spregu je znatno odstupanje od normalnih vrednosti kada je opterećenje nesimetrično, što je naročito izraženo kada se primenjuje grupa od tri jednofazna transformatora. Zato se ova sprega isključivo koristi kod trofaznog trostubnog transformatora.

Sprega **Yd** se takođe upotrebljava u distributivnim mrežama, kada su snage i naponi veći nego u prethodnom slučaju. Ovakvi transformatori se uglavnom koriste za napajanje trofaznih potrošača.

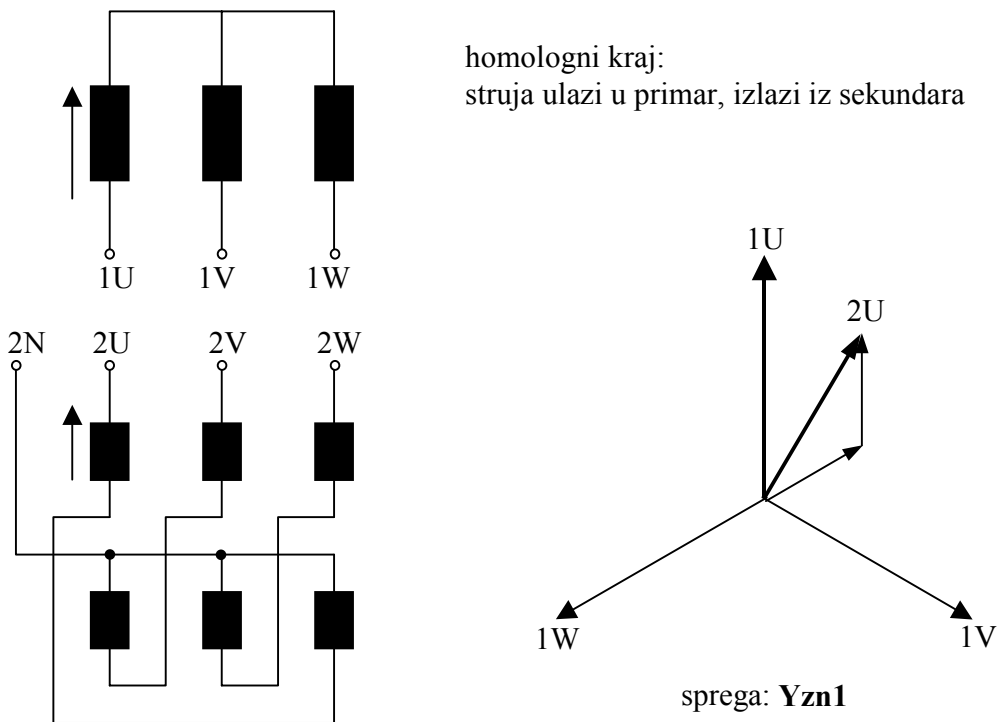
Sprega **Dyn** se primenjuje često, u širokom dijapazonu snaga i u mnogim primenama- kod elektrana (za povišenje napona), odnosno kod prijemnika (za sniženje napona).

Sprega **Yzn** ima sve dobre osobine sprege **Yyn** u pogledu raspoloživosti linijskih i faznih napona, a uticaj nesimetrije je zanemarljivo mali. To je plaćeno oko 15% većim utroškom bakra za namotaje u odnosu na spregu zvezda. Specijalno je ova sprega povoljna za napajanje tiristorskih i diodnih ispravljača, jer doprinosi redukciji viših harmonika koji se iz ispravljača prenose u mrežu na koju je priključen primar i koji izazivaju izobličenje napona.

Uz sprege, potrebno je definisati *grupu sprege (satni broj)* tj. *fazni stav (pomeraj)* između primarnih i sekundarnih napona istoimenih faza. Termin satni broj je uveden zbog analogije sa satom (fazori se obeležavaju kao kazaljke sata), dok fazni stav o kome je reč iznosi $n \cdot 30^\circ$, gde je n ceo broj od 0 do 11. Obično se fazor primarnog napona prve faze (**U**, stara oznaka **A**) stavlja u položaj 0 (12) sati, bez obzira na njegovu spregu i fizičko postojanje. Kod nas su standardizovane sledeće sprege: grupa "0" - primenjuju se sprege **Yy0**, grupa "5" - primenjuju se sprege **Yd5**, **Dy5** i **Yz5**.

Pri određivanju faznih stavova primenjivaćemo sledeći postupak:

1. fazor primarnog napona faze **U** namotaja višeg napona stavlja se u položaj 12 sati, bez obzira na njegovu spregu i fizičko postojanje,
2. svi namotaji na istom jezgru imaju isti fazni stav napona, a smer im je pozitivan ako se homologni krajevi podudaraju,
3. satni broj namotaja nižeg naponskog nivoa se određuje položajem fazora faznog napona faze **u** (**a**) bez obzira na fizičko postojanje.



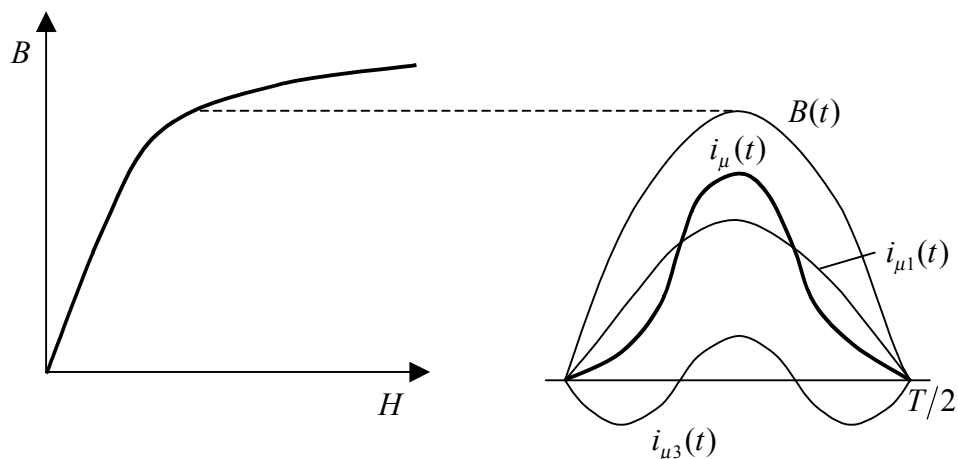
Slika 1-28 Primeri određivanja grupe sprega

1.16 Viši harmonici

U daljnjem tekstu biće analizirana pojava viših harmonika struje ili fluksa (indukovanog napona) za različite slučajeve sprega primarnog namotaja (strane magnećenja) trofaznih transformatora.

Kod transformatora čiji su primarni namotaji spregnuti u zvezdu sa nul-vodom (YN) struja magnećenja je izobličena zbog nelinearnog odnosa $B = f(H)$ i sadrži više harmoničke članove reda 3, 5, 7, 9 itd. Dakle, u ovom slučaju struja magnetisanja predstavlja izvor viših harmonika kod transformatora. U analizi koja sledi zanemarićemo petlju histereze i uzećemo u obzir krivu prvog magnećenja. Za američku transformaciju i uobičajeni oblik krive prvog magnećenja, Furijeova analiza daje ove amplitude pojedinih harmonika:

1. harmonik 100%
3. harmonik 24,5% (negativna sinusoida)
5. harmonik 3,43%
7. harmonik 1,72%
9. harmonik 0,26%



Slika 1-29 B (H) karakteristika i sadržaj prvog i trećeg harmonika

U daljnjem razmatranju uzećemo u obzir samo osnovni (prvi) i treći harmonik, a ostale ćemo zanemariti.

Struje magnetisanja prvog harmonika će biti:

$$i_{\mu 1U} = I_{\mu 1U, \max} \sin \omega t ,$$

$$i_{\mu 1V} = I_{\mu 1V, \max} \sin (\omega t - 120^\circ) ,$$

$$i_{\mu 1W} = I_{\mu 1W, \max} \sin (\omega t - 240^\circ) .$$

Struje magnetisanja trećeg harmonika će biti:

$$i_{\mu 3U} = -I_{\mu 3U, \max} \sin 3\omega t ,$$

$$i_{\mu 3V} = -I_{\mu 3V, \max} \sin (3\omega t - 3 \cdot 120^\circ) = -I_{\mu 3V, \max} \sin 3\omega t ,$$

$$i_{\mu 3W} = -I_{\mu 3W, \max} \sin (3\omega t - 3 \cdot 240^\circ) = -I_{\mu 3W, \max} \sin 3\omega t .$$

Zaključujemo da su treći harmonici istofazni.

U nulvodu je zbir prvih harmonika jednak nuli,

$$i_{\mu 1U} + i_{\mu 1V} + i_{\mu 1W} = 0 ,$$

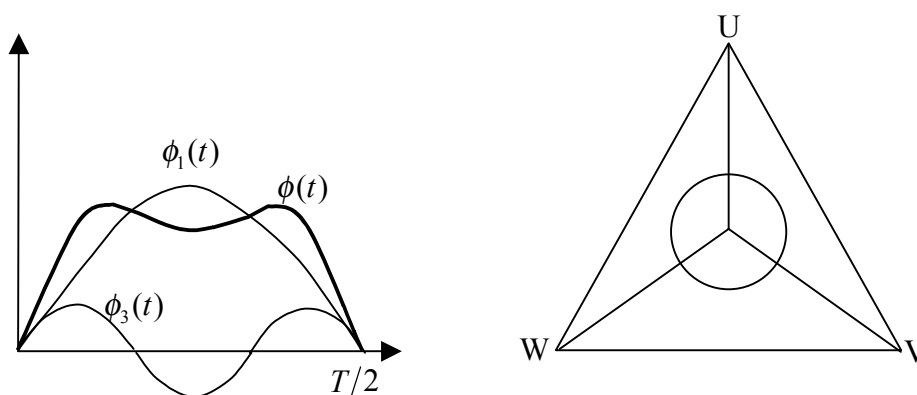
Dok, zbog istofaznosti, kod trećih harmonika imamo:

$$i_{\mu 3U} + i_{\mu 3V} + i_{\mu 3W} = 3i_{\mu 3}$$

Dakle, neutralni vod predstavlja putanju za povratak tri treća harmonika struje.

U Evropi se upotrebljava sistem VN mreža bez uzemljenog nulvoda, jer bi svaki dozemni kratki spoj predstavljao puni kratki spoj faze. Dozemni spojevi su česti, pa bi to bilo uzrok čestim prekidima pogona. U ovom slučaju, kada je primarni namotaj spregnut u zvezdu bez nul voda (Y) nije moguće uspostavljanje trećeg harmonika struje, pa je struja je praktično sinusoidalna. Fluks tada mora da bude izobličen zbog nelinearnog odnosa $B = f(H)$, što ima za posledicu pojavu viših harmoničkih članova u indukovanom naponu. Osnovni harmonik fluksa indukuje osnovni harmonik protivnapona koji drži

ravnotežu sa naponom mreže. Treći harmonik fluksa u svim fazama indukuje napone trostruke frekvencije. Ovi naponi ne menjaju linijske napone, već čine da nultačka *igra (pleše)* sa trostrukom frekvencijom ono nultačke trofaznog sistema mreže, menjajući tako fazne napone.



Slika 1-30 Plesanje neutralne tačke trofaznog sistema

Amplituda trećeg harmonika fluksa zavisi od konstrukcije magnetskog kola transformatora.

Kod trostubnih trofaznih transformatora, zbog velikog magnetskog otpora trećem harmoniku fluksa, koji se zatvara od jarma do jarma preko vazduha, suda i konstrukcionih delova transformatora, amplituda ovog harmonika je redukovana i problem u izobličenju indukovanih napona nije izražen. Međutim, zatvarajući se kroz sud i konstrukcine delove, koji se u ovom slučaju ponašaju kao kratkospojeni namotaj, treći harmonik fluksa izaziva dopunske gubitke u gvožđu, koji iznose $5 - 20\% P_{Fe}$, a prema tome i dopunsko zagrevanje. Ovi dopunski gubici, odnosno zagrevanje se može smanjiti uvođenjem debelog bakarnog prstena oko magnetskog kola (jezge), ili dodavanjem namotaja spregnutog u trougao, čime se postiže bolje prigušenje.

Za transformatore sa magnetskim povratnim putem za treće harmonike fluksa – grupa jednofaznih transformatora (američka transformacija) i trofazne peterostupne transformatore ova amplituda može, zbog malog magnetskog otpora, kod većih zasićenja da iznosi i do 30% amplitude osnovnog harmonika.

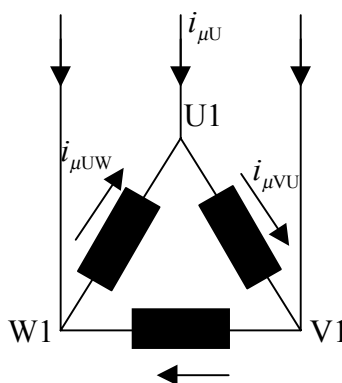
Uz trostruku frekvenciju to može uzrokovati da indukovani napon trećeg harmonika može doseći i 90% vrednosti faznog napona:

$$U_3 = 4,44 (0,30 \phi_{1m}) N 3f = 0,9 (4,44 \phi_{1m} N f),$$

što onemogućuje primenu sprege **Y** za navedene konstrukcije magnetskog kola transformatora. Jedan od načina da se ovo izobličenje napona suzbije jeste da se omogući uspostavljanje trećeg harmonika struje magnećenja dodavanjem namotaja spregnutog u trougao. Ovaj namotaj ima značajno manju snagu u odnosu na primar i sekundar. Ako se tereti nazivamo ga *tercijar*, a ako se ne tereti nazivamo ga *stabilizacioni* namotaj.

Treba napomenuti da izobličenje napona u sprezi cik-cak (**z**) ne izaziva primetno izobličene krive napona, jer se istofazni indukovani naponi trostruke učestanosti u pojedinim polunamotajima svake faze međusobo oduzimaju, a zbog njihove jednakosti i istofaznosti njihova razlika je jednaka nuli.

Pogledajmo sada više harmonike u trofaznom sistemu sa primarnom stranom spregnutom u trougao (**D**).



Slika 1-31 Linijske i fazne struje primarnog namotaja spregnutog u trougao

Svaki fazni namotaj uzima iz mreže potrebne harmoničke članove struje:

$$i_{\mu VU} = i_{\mu VU1} + i_{\mu VU3} + \dots$$

$$i_{\mu UW} = i_{\mu UW1} + i_{\mu UW3} + \dots$$

$$i_{\mu WV} = i_{\mu WV1} + i_{\mu WV3} + \dots$$

Linijske struje možemo prikazati kao razliku dviju odgovarajućih faznih struja trougla:

$$i_{\mu U} = i_{\mu VU} - i_{\mu UW} = (i_{\mu VU1} - i_{\mu UW1}) + (i_{\mu VU3} - i_{\mu UW3}) + \dots$$

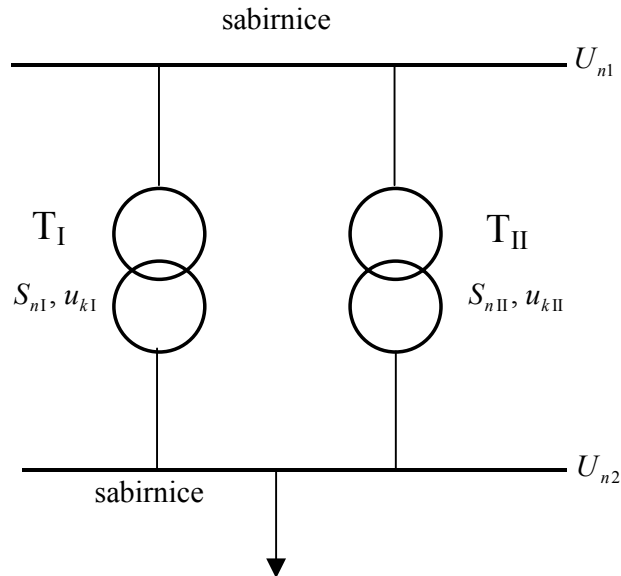
$$i_{\mu V} = i_{\mu WV} - i_{\mu VU}$$

$$i_{\mu W} = i_{\mu UW} - i_{\mu WV}$$

S obzirom da su treći harmonici struje magnećenja istofazni i jednaki, njihova razlika je jednaka nuli, tj. oni se ne pojavljuju u linijskim strujama magnetisanja, ali nesmetano postoje u zatvorenom električnom kolu što ga čine tri namotaja spregnuta u trougao. Treći harmonik struje magnećenja se dakle javlja kao kružna (cirkularna) struja unutar trougla. U ovom slučaju ni fluks, pa prema tome ni indukovani napon nemaju treći harmonik.

1.17 Paralelni rad transformatora

Paralelni rad dvaju ili više transformatora se ostvaruje spajanjem istoimenih priključaka visokonaponske strane svih transformatora na odgovarajuće faze visokonaponske mreže i spajanjem istoimenih priključaka niskonaponske strane svih transformatora na odgovarajuće faze niskonaponske mreže. Paralelni rad se može vršiti preko sabirnica ili preko mreže. Iako je u osnovi ovo rešenje skuplje nego izbor jednog transformatora veće snage, njemu se pribegava u slučajevima podmirivanja potrebe dodatnih prijemnika koji ranije nisu bili predviđeni, podmirjenja povremenih dodatnih opterećenja, etapne izgradnje trafostanice ili potrebe za većom pogonskom sigurnošću koja se ogleda u držanju rezervnog transformatora za slučaju kvara jednog od transformatora.



Slika 1-32 Paralelni rad dva transformatora

Uslovi koje transformatori moraju da ispune, da bi radili u paralelnom radu, su sledeći:

- primarni namotaji moraju da budu predviđeni za isti napon i odnosi transformacije moraju biti jednaki ($m_I = m_{II} = \dots = m_n$), da bi sekundarni naponi u praznom hodu bili jednaki. Pod odnosom transformacije, prema standardu, podrazumevamo odnos naznačenih napona prikazan na natpisnoj pločici.
- Da bi sekundarni naponi bili u fazi, transformatori moraju pripadati *istoj grupi sprege*.
- Da bi izbegli struje izjednačenja (uravnoteženja), koje izazivaju preopterećenje jednog, odnosno podopterećenje drugog transformatora, *relativni naponi kratkog spoja moraju biti jednaki* - dozvoljava se tolerancija $\pm 10\%$ u odnosu na aritmetičku srednju vrednost relativnih napona kratkog spoja svih transformatora. S ovim u vezi je i *preporuka* da naznačene snage transformatora trebaju da budu približno jednake (nema smisla povezivati u paralelni rad transformatore koji imaju *odnose naznačenih snaga* veći od 1:3).

Odnos snage prvog transformatora i ukupne snage svih paralelno vezanih transformatora je sledeći:

$$\frac{S_I}{S} = \frac{100 I_{nI}}{u_{kI} [\%] U_{nI}} \frac{U_{nI}}{100} \frac{1}{\Sigma(I_{ni}/u_{ki})} = \frac{S_{nI}}{u_{kI} [\%]} \frac{1}{\Sigma(S_{ni}/u_{ki})} = \frac{S_{nI}}{u_{kI} [\%]} K.$$

Za posmatranu snagu i date transformatore u paralelnom radu, zbir $\Sigma(S_{ni}/u_{ki})$ je konstantan.

Iz prethodne relacije se može zaključiti da je relativno opterećenje transformatora obrnuto proporcionalno njegovom relativnom naponu kratkog spoja.

Kompleksna vrednost struje izjednačenja (cirkulacione struje) je:

$$\underline{I}_i = \frac{\Delta U}{\underline{Z}_{kI} + \underline{Z}_{kII}} = \frac{U_1 \left[\frac{1}{m_{II}} - \frac{1}{m_I} \right]}{\underline{Z}_{kI} + \underline{Z}_{kII}}.$$

Ako usvojimo da su fazni uglovi obeju impedansi jednaki ($\varphi_{kI} = \varphi_{kII}$) prethodna jednačina postaje algebarska. Uvodeći procentualne vrednosti impedansi (ili što je isto, napona) kratkog spoja, dobija se konačno:

$$I_i = \frac{(m_I - m_{II})100}{\left[\frac{u_{kI} [\%]}{I_{nI}} + \frac{u_{kII} [\%]}{I_{nII}} \frac{m_I}{m_{II}} \right] m_I}.$$

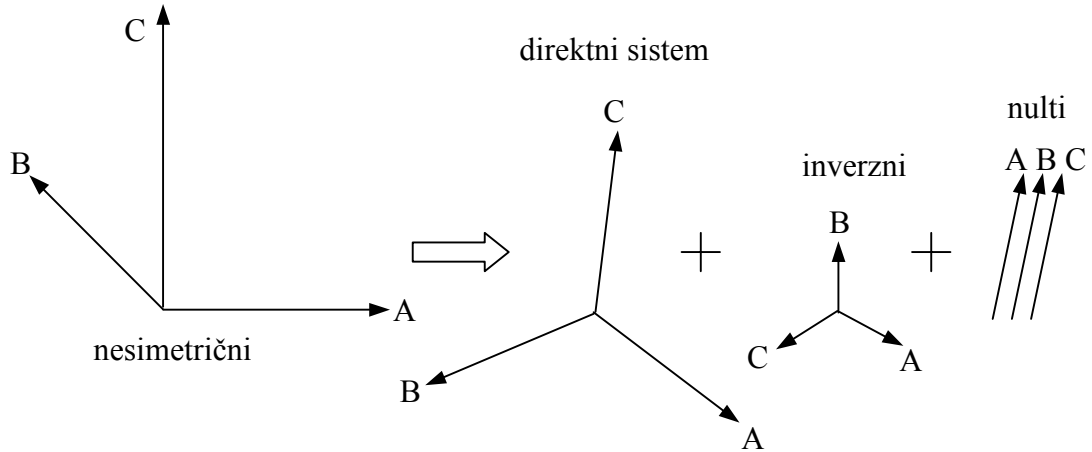
Osnovno pravilo vezano za paralelni rad je da *ne sme doći do trajnog preopterećenja* jednog od transformatora.

1.18 Nesimetričan rad trofaznih transformatora

Nesimetrične pojave kod trofaznih transformatora mogu biti izazvane nesimetrijama u naponu napajanja (primarnom naponu) ili nesimetričnim opterećenjima pojedinih faza. Ekstremni slučajevi nesimetričnih opterećenja su kratki spojevi i prekidi.

Nesimetrija u naponima sekundara transformatora ima nepovoljan uticaj kako na trofazne prijemnike (npr. veoma rasprostranjen trofazni asinhroni motor), tako i na monofazne prijemnike (npr. rasvetu). Ujedno nesimetrija može da bude opasna i za sam transformator izazivajući strujna i naponska preopterećenja. Naponska preopterećenja su opasna ne toliko sa stanovišta ugrožavanja izolacije, koliko zbog izazivanja zasićenja feromagnetskog kola i njegovih posledica.

Za analizu nesimetričnog rada trofaznih transformatora koristi se metoda simetričnih komponenti. Osnov ove metode predstavlja rastavljanje polaznog nesimetričnog (neuravnoteženog) trofaznog sistema na tri simetrična trofazna sistema: direktni, inverzni i nulti. Direktni sistem ima isti redosled faza, a inverzni suprotni u odnosu na polazni nesimetrični sistem. Nulti sistem se sastoji od tri po veličini i faznom stavu jednaka vektora.



Slika 1-33 Primer primene Metode simetričnih komponenti

Kada se saberu sve komponente koje pripadaju jednoj fazi, dobiće se kao rezultanta fazor odgovarajuće faze:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{Ad} + \underline{I}_{Ai} + \underline{I}_{A0} = \underline{I}'_A + \underline{I}_0,$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{Bd} + \underline{I}_{Bi} + \underline{I}_{B0} = \underline{I}'_B + \underline{I}_0,$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{Cd} + \underline{I}_{Ci} + \underline{I}_{C0} = \underline{I}'_C + \underline{I}_0.$$

Polazni nesimetrični sistem ima redosled faza u smeru kazaljke na satu. Uvedimo sada kompleksni operator $a = e^{j2\pi/3}$ koji je jednak jediničnom vektoru koji ima fazni stav $2\pi/3$ u pozitivnom smeru (suprotnom od kazaljke na satu!).

Uzimajući fazu A kao referentnu i primenjujući kompleksni operator a , za fazore polaznog nesimetričnog sistema imamo:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{Ad} + \underline{I}_{Ai} + \underline{I}_{A0}$$

$$\underline{I}_B = a^2 \underline{I}_{Ad} + a \underline{I}_{Ai} + \underline{I}_{A0}$$

$$\underline{I}_C = a \underline{I}_{Ad} + a^2 \underline{I}_{Ai} + \underline{I}_{A0}$$

Prethodni sistem jednačina se može napisati i u matričnom obliku:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{Ad} \\ \underline{I}_{Ai} \\ \underline{I}_{A0} \end{bmatrix}$$

Za komponente struje imamo:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{Ad} \\ \underline{I}_{Ai} \\ \underline{I}_{A0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix}$$

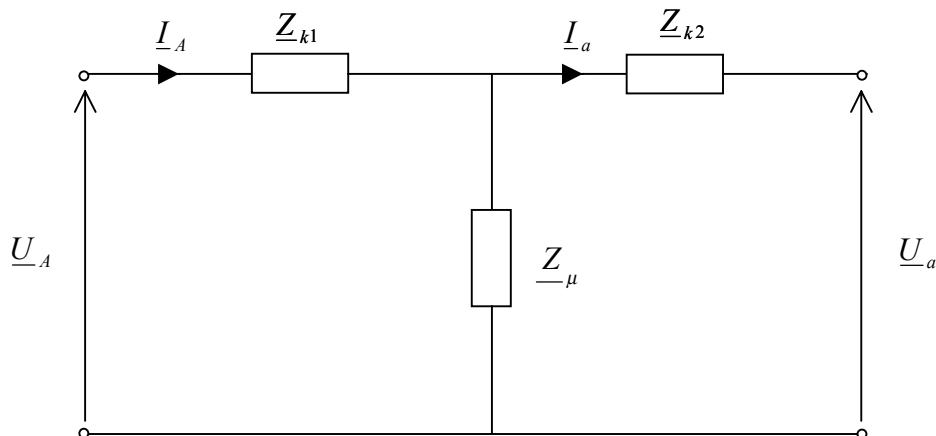
Analogne relacije važe za napone.

Impedansa trofaznog sistema takođe se može rastaviti na simetrične komponente. Budući da transformator statički aparat i da nijedan redosled faza nije privilegovan, kod transformatora je direktna impedansa jednaka inverznoj. Ako zanemarimo granu magnećenja, direktna i inverzna impedansa približno su jednake impedansi kratkog spoja u slučaju simetričnog opterećenja:

$$\underline{Z}_d = \underline{Z}_i \cong \underline{Z}_{k12} = \underline{Z}_{k1} + \underline{Z}_{k2} = R_k + jX_k.$$

Impedansa nultog sistema zavisi od sprege primarnog i sekundarnog namotaja i načina uzemljenja neutralne tačke.

Za analizu nesimetričnih opterećenja koristimo uobičajenu ekvivalentnu šemu, gde su redne impedanse impedanse, \underline{Z}_{k1} i \underline{Z}_{k2} , impedansa rasipanja primara, odnosno svedena impedansa rasipanja sekundara, respektivno, a šantna impedansa, \underline{Z}_μ , impedansa magnećenja. Sa indeksom A su označene fizičke veličine sa primara u fazi A, dok su sa indeksom a označene fizičke veličine sekundara svedene na primar u fazi A. Radi jednostavnosti pretpostavićemo da je odnos broja navojaka $n_{12} = N_1/N_2 = 1$.



Slika 1-34 Ekvivalentna šema transformatora za analizu nesimetričnih opterećenja

Kod direktnog i inverznog sistema obično zanemarujemo poprečnu granu, budući da je impedansa magnećenja Z_μ puno veća od impedansi rasipanja Z_{k1} i Z_{k2} .

Struje nultog sistema su po definiciji istovremene u sva tri fazna namotaja, stoga njihov zbir, kao ni zbir flukseva koje stvaraju nije jednak nuli. Ova pojava je, donekle, slična trećim harmonicima struje magnećenja. Zato se ekvivalentna šema za nulte komponente razlikuje od gornje šeme.

Redne nulte komponente impedanse, Z_{k10} i Z_{k20} , su one kroz koju se nulta komponenta struje uspostavlja od jednog namotaja transformatora prema drugom, i one su približno iste kao i kod simetričnih struja. U slučaju da se u namotaju ne mogu uspostaviti nulte komponente struje (npr. zvezda bez nul voda), u rednoj grani tog namotaja ćemo imati prekid, pa ekvivalentno kolo (četvoropol) sa odgovarajuće strane ima otvorene priključke. U slučaju sprege namotaja u trougao (npr. primar), koji za istovremene nulte struje praktično predstavlja kratak spoj odgovarajući napon (npr. \underline{U}_{A0}) biće jednak nuli, tako da su ekvivalentnom kolu sa odgovarajuće strane priključci kratko spojeni.

Šantna nulta komponenta impedanse, $Z_{\mu 0}$, je ona kroz koju se nulta komponenta uspostavlja iz voda ka nuli i zavisi od snage (struje) magnećenja, odnosno od načina uzemljenje i vrste konstrukcije magnetnog kola, s obzirom na postojanje magnetnog povratnog puta nultim (jednofaznim) strujama.

1. za spregu **Yyn**

- a) magnetsko kolo sa magnetnim povratnim putem: $\underline{Z}_0 = \underline{Z}_{k2} + \underline{Z}_{\mu 0} \cong \underline{Z}_\mu$, jer je $\underline{Z}_{\mu 0} \cong \underline{Z}_{\mu d}$, pa se može zanemariti redna komponenta nulte impedanse,
- b) magnetsko kolo bez magnetnog povratnog puta: $\underline{Z}_0 = \underline{Z}_{k2} + \underline{Z}_{\mu 0} \ll \underline{Z}_\mu$ - zbog potrebne velike struje magnećenja, u ekvivalentnom kolu se javlja mala impedansa, koju ne možemo da zanemarimo.

2. za spregu **Dyn**

Napon na grani magnećenja je približno $U_{a0}/2$, intenzitet magnećenja je slab, pa se slično kao i kod ogleđa kratkog spoja može uzeti da je nulta komponenta struje u poprečnoj grani jednaka nuli, odnosno da je šanta nulta komponenta impedanse beskonačna. Za ovaj slučaj se nulta impedansa približava vrednostima impedanse kratkog spoja, tj.

$$\underline{Z}_0 \cong \underline{Z}_{k12} = \underline{Z}_{k1} + \underline{Z}_{k2}$$

1.18.1 Jednofazan kratak spoj

Jednofazan kratak spoj predstavlja ekstremni slučaj nesimetričnog rada. Ovaj slučaj kratkog spoja ilustrovaćemo za nekoliko različitih sprega. Poznat je (ne) simetričan sistem primarnih napona, a potrebno je odrediti struje u primarnom i sekundarnom namotaju, kao i napone na sekundaru.

1. Sprega Y_{yn}

Ovde nulte komponente struje mogu da postoje samo u sekundaru. Pošto se tim komponentama ne suprotstavlja primarna struja, njihov magnetski fluks zatvaraće se kroz vazduh i konstrukcione delove i sud kod trostubnih transformatora, odnosno 4. i 5. stub kod peterostubnih transformatora.

Neka je nastao kratak spoj između kraja a i neutralne tačke (zemlje). U namotajima faza b i c nema struje:

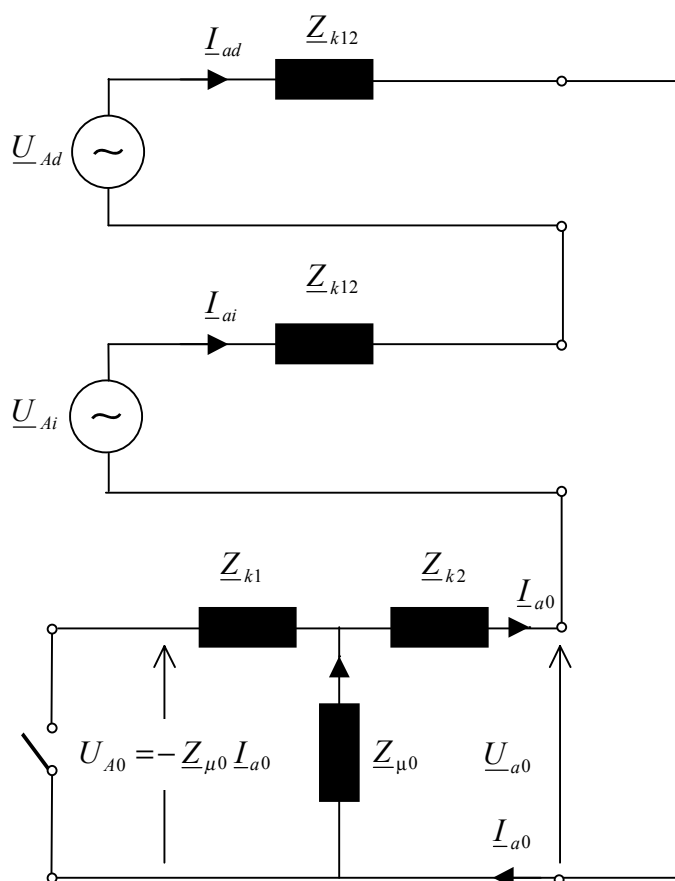
$$\underline{I}_b = \underline{I}_c = 0$$

Sa slike koja sledi i ranijeg izlaganja imamo:

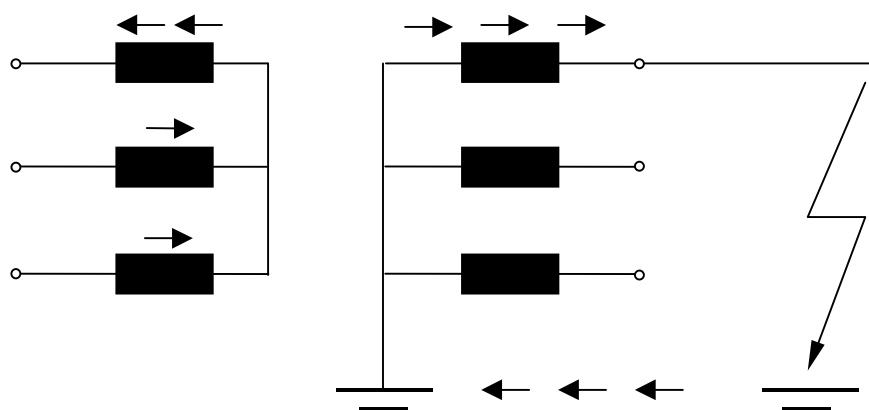
$$\underline{I}_{ad} = \underline{I}_{ai} = \underline{I}_{a0} = \frac{\underline{I}_a}{3} = \frac{\underline{U}_{Ad} + \underline{U}_{Ai}}{2\underline{Z}_{k12} + \underline{Z}_{k2} + \underline{Z}_{\mu 0}}$$

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ad} + \underline{I}_{ai} = \frac{2}{3} \underline{I}_a$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_C = -\underline{I}_{a0} = -\frac{1}{3} \underline{I}_a$$



Slika 1-35 Ekvivalentno kolo za jednofazni kratak spoj transformatora Y_{yn}



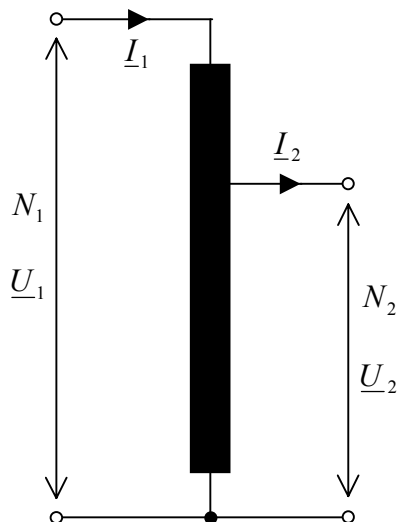
Slika 1-36 Principijelna raspodela struja za jednofazni kratak spoj transformatora Yyn

Sa prethodne slike je vidljivo da u svakoj fazi postoje neuravnotežene nulte komponente magnetskih napona (amperzavojaka), odnosno dodatni fluksevi. Ova pojava je ekvivalentna delovanju tri dodatna redno spojena namotaja, a priključenih na izvor jednofazne struje koja daje struju $I_0 = 1/3 I_k$. Ova jednofazna, tj. nulta komponenta struje stvara odgovarajući fluks, ϕ_0 , koji nazivamo jednofaznim fluksem. Taj jednofazni fluks se superponira glavnom fluksu, ali po veličini i delovanju zavisi od vrste konstrukcije transformatora. Kod transformatora sa magnetskim povratnim putem postiže znatnu vrednost i može značajno da utiče na fazne vrednosti napona na sekundaru transformatora i time onemogućava rad ove, Yy, sprege. Za transformatore bez magnetskog povratnog puta, magnetski otpor je daleko veći, pa je deformacija faznih napona u granicama od 10%, što je podnošljivo. Tada se ova sprega može primeniti u industriji, gde preovladavaju trofazni prijemnici (motori). U visokonaponskim mrežama često moramo primeniti i na sekundaru i na primaru spregu zvezda, jer moramo da uzemljimo nultačku (direktno ili preko Petersenove prigušnice). Istofazni fluks možemo, isto kao i kod trećeg harmonika, poništavati tercijarnim namotajem.

1.19 Specijalni transformatori

Pod *standardnim* (najznačajnijim i najčešćim) transformatorom do sada smo podrazumevali energetski, uljni, po broju faza trofazni ili jednofazni, po broju faznih namotaja dvonamotajni (i to razdvojeni), po vrsti napona sinusnog oblika učestanosti 50 Hz. No, postoji veliki skup drugih *specijalnih* (nestandardnih) transformatora, koji se, barem po nekoj osobini, razlikuju od standardnih. Ovde ćemo nabrojati i ukratko opisati samo najznačajnije:

- *tronamotajni transformatori*. Ovi transformatori imaju, osim primara i sekundara, još jedan namotaj za prenos snage. Moguće kombinacije su sa jednim primarom i dva sekundara, odnosno dva primara i jednim sekundrom. Upotrebljavaju se u razvodnim postrojenjima sa tri različita naponska nivoa.
- *autotransformatori*. Oni imaju samo jedan namotaj - primar i sekundar su fizički (galvanski) sjedinjeni, ali postoji visokonaponska i niskonaponska strana. Ovakva izvedba je, u odnosu na dvonamotajne iste snage, ekonomičnija jer ima manju masu aktivnog dela (magnetskog kola i namotaja), uz veći stepen iskorišćenja; međutim manje je pouzdana zbog postojanja galvanske veze između (delova) namotaja, a rektansa rasipanja je mnogo manja. Trofazni autotransformatori se često prave za velike snage.



Slika 2-37 Autotransformator

Kod autotransformatora se razlikuju dve (prividne) snage: jedna je ona koju on prenosi - *prenosna* ili *prolazna* snaga ($S_p = U_1 I_1 = U_2 I_2$), a druga ona koja određuje njegovu fizičku veličinu, pa i cenu - *instalirana* ili *tipska* snaga. Za dvonamotajni transformator su ove dve snage po definiciji jednake. Posmatra li se gornji deo namotaja na slici 2-37, može se zaključiti da je on predviđen samo za deo napona ($U_2 - U_1$), tako da je njegova tipska ili instalirana snaga:

$$S_{T1} = (U_1 - U_2) I_1 = U_1 (1 - 1/m) I_1 = S_p (1 - 1/m).$$

Drugi deo namotaja je napravljen za napon U_2 i struju $(I_2 - I_1)$, pa je njegova tipska ili instalirana snaga:

$$S_{T2} = U_2 (I_2 - I_1) = U_2 I_2 (1 - 1/m) = S_p (1 - 1/m).$$

Dakle, dobijen je isti rezultat kao za prvi deo namotaja. Označavajući razliku $1 - 1/m = \alpha$, može se zaključiti: $S_T / S_p = \alpha$.

Tipska snaga autotransformatora smanjena je za faktor α u odnosu na dvonamotajni. Najveća ušteda u tipskoj snazi postiže se za odnose m bliske 1, pa se autotransformatori obično ne prave za $m > 2$.

Zbog uštede, drugo ime ovog uređaja je *transformator u štednom spoju*.

Treba napomenuti da se razlika između prolazne i tipske snage ne prenosi preko magnetskog jezgra, ona je čisto električna, i iz primarne prelazi na sekundarnu stranu zahvaljujući električnom spoju, tj. kontaktu. Zbog manje mase gvožđa i bakra, jasno je da će gubici u gvožđu i bakru biti manji. Kako se stepen iskorišćenja, η , računa u odnosu na prolaznu snagu, on ima vrlo visoke vrednosti. Nedostaci autotransformatora su:

1. izgubljena je izolacija između primarnog i sekundarnog kola;
2. zbog galvanskog spoja, prenaponi sa visokonaponske strane se oštrije prenose na niskonaponsku stranu;
3. reaktansa rasipanja je mnogo manja, a to ima dve važne posledice:
 - struja kratkog spoja, pa prema tome i mehaničke sile su daleko značajnije, te sama konstrukcija mora da bude ojačana,
 - pad napona je manji, što je često povoljno.

- *transformatori sa izvodima (regulacioni transformatori)* se koriste tamo gde je potrebno da se odnos preobražaja menja: u elektrolučnim pećima radi prilagođenja napona proizvodnom ciklusu, odnosno u elektroenergetskim sistemima radi održavanja napona u propisanim granicama jer se padovi napona znatno menjaju sa opterećenjem. To se tehnički sprovodi promenom "aktivnog" broja navojaka jednog namotaja. Biranje izvoda se vrši u beznaponskom stanju ili pod opterećenjem, što je složenije jer se struja ne sme prekidati, niti se dva susedna navojka ili grupe navojaka smeju direktno spojiti, jer bi u tom slučaju njima tekla struja kratkog spoja.
- *merni transformatori* su uređaji čije su osnovne funkcije svodenje velikih struja (*strujni*) i napona (*naponski*) na one struje i napone koji se mogu meriti standardnom mernom opremom i povećanje sigurnosti rada putem galvanskog odvajanja od kola sa velikim strujama i naponima. Oni moraju verno da prenose, sa što manjom greškom, amplitudu i fazni pomeraj primarnih struja, odnosno napona.
- pretvarači za pretvaranje broja faza (3 u 2, 6, 12),
- *transformatori za energetske pretvarače* - sa nesinusoidalnim naponima i strujama,
- *suvi transformatori* (Slika 2-26) – porast potrošnje električne energije i ograničavanje građevinskog prostora za smeštaj trafo stanice, nametnuli su zahtev da se transformator umesto u posebnim i udaljenim trafo stanicama ugrađuje u samim centrima potrošnje, kao što su: veliki stambeni, poslovni, sportski, industrijski i drugi objekti. U ovakvim objektima postavljaju se veoma strogi zahtevi za nezapaljivost transformatora, smanjenje smeštajnog prostora, nižu buku, jednostavnu i jeftinu montažu i održavanje i zaštitu prirodne sredine. Radikalna razvoj izolacionih materijala u visokim termičkim klasama (nomex, delmat, vitroplast, teflon...), kao i izolacionih lakova za impregnaciju namotaja, omogućio je postizanje viših temperatura namotaja nego kod uljnih (viša klasa izolacije). Međutim, uz iste parametre (snaga, naponi), obično su nekoliko puta skuplji nego uljni. Veliku pažnju treba posvetiti tehnologiji izrade namotaja.

Kao posebnu vrstu spomenućemo transformatore koji se upotrebljavaju u *uređajima za zavarivanje*. Njegova osnovna uloga je da smanji napon mreže (380 V, 220 V), na napon od 50 V, koji je dovoljan za paljenje luka, a bezopasan za rukovaoca. Zbog neprestanih kratkih spojeva koje stvaraju kapljice istopljenog metala elektrode, aparati za zavarivanje mogu da imaju poseban izvor struje, obrtnu mašinu ili specijalni transformator. Dodatno, kako ne bi došlo do trenutnog topljenja elektrode, struja kratkog spoja aparata za zavarivanje mora biti ograničena na najviše dva puta veću vrednost od naznačene. Da bi se to postiglo, transformator mora imati veliko rasipanje (relativni napon kratkog spoja oko 80%), ili se transformator izrađuje sa normalnim rasipanjem, a na red sa njim se stavlja navoj velike induktivnosti ili, ponekad, otpornost velikog omskog otpora.

1.20 Literatura

[1] Đ. Kalić, *Transformatori*, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1991.

[2] A. Dolenc, *Transformatori*, ETF Zagreb,