

TRANSFORMATORJI

Učbenik

**Jožef
RITONJA**

**Ivan
ZAGRADIŠNIK**



Univerzitetna založba
Univerze v Mariboru





Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko

TRANSFORMATORJI

UČBENIK

Avtorja

Jožef Ritonja

Ivan Zagradišnik

Avgust 2020

Naslov <i>Title</i>	Transformatorji <i>Transformers</i>
Podnaslov <i>Subtitle</i>	Učbenik <i>Textbook</i>
Avtorja <i>Authors</i>	Jožef Ritonja (Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko) Ivan Zagradišnik (Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko)
Recenzija <i>Review</i>	Damijan Miljavec (Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko) Anton Hamler (Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko)
Lektoriranje <i>Language editing</i>	Vlasta Praprotnik
Tehnični urednik <i>Technical editors</i>	Jan Perša (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)
Oblikovanje ovitka <i>Cover designer</i>	Jan Perša (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)
Grafične priloge <i>Graphic material</i>	Tine Marčič, Miralem Hadžiselimović, Mitja Hribernik in avtorja.
Grafike na ovitku <i>Cover graphics</i>	Transformator avtorja WikimediaImages iz Pixabay.com

Založnik/Published by
Univerza v Mariboru
Univerzitetna založba
Slomškovo trg 15, 2000 Maribor, Slovenija
<https://press.um.si>, zalozba@um.si

Izdajatelj/Co-published by
Univerza v Mariboru
Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko
Koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenija
<https://feri.um.si/>, feri@um.si

Izdaja
Edition Prva izdaja

Izdano
Published at Maribor, avgust 2020

Vrsta publikacije
Publication type E-knjiga

Dostopno na
Available at <https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/492>

CIP - Kataložni zapis o publikaciji
Univerzitetna knjižnica Maribor

621.314(075.8)(0.034.2)

621.314(075.8)(0.034.2)

RITONJA, Jožef
Transformatorji [Elektronski vir] : učbenik /
avtorja Jožef Ritonja, Ivan Zagradišnik ;
[grafične priloge Tine Marčič ... et al.]. - 1.
izd. - E-knjiga. - Maribor : Univerzitetna
založba, 2020

Način dostopa (URL):
<https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/492>
ISBN 978-961-286-373-9 (PDF)
doi: 10.18690/978-961-286-373-9
1. Zagradišnik, Ivan
COBISS.SI-ID 25942019

© Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba
/ University of Maribor, University Press



Tekst / Text
© Ritonja, Zagradišnik2020

To delo je objavljeno pod licenco Creative Commons
Priznanje avtorstva- Nekomercialno-Brez predelav 4.0
Mednarodna. / This work is licensed under the Creative
Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs - 4.0
International License.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

ISBN 978-961-286-373-9 (pdf)

DOI <https://doi.org/10.18690/978-961-286-373-9>

Cena
Price Brezplačen izvod

Odgovorna oseba založnika
For publisher prof. dr. Zdravko Kačič,
rektor Univerze v Mariboru

TRANSFORMATORJI

UČBENIK

JOŽEF RITONJA IN IVAN ZAGRADIŠNIK

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor,
Slovenija, e-pošta: jozef.ritonja@um.si, ivan.zagradisnik@guest.um.si

Povzetek Učbenik opisuje delovanje idealnega in realnega enofaznega transformatorja. V nadaljevanju sledi obravnava enofaznih, trifaznih in posebnih transformatorjev. V zaključku je še prikazan primer načrtovanja malega trifaznega transformatorja.

Ključne besede:

transformatorji,
napetostni
transformatorji,
tokovni
transformatorji,
načrtovanje,
učbenik.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Definicija transformatorja	1
1.2	Osnovni principi konstrukcije in delovanja	2
1.3	Priključek primarnega navitja na električno omrežje	11
1.4	Nekaj podatkov o transformatorjih.....	12
2	ENOFAZNI TRANSFORMATOR Z ŽELEZNIM JEDROM	14
2.1	Delovanje idealnega transformatorja	14
2.1.1	Značilnosti idealnega transformatorja	14
2.1.2	Prosti tek in obremenitev idealnega transformatorja z vsiljeno napetostjo	18
2.1.3	Transformirane ali reducirane veličine na sekundarni strani	20
2.2	Delovanje realnega transformatorja.....	22
2.2.1	Delovanje tokovno idealnega realnega transformatorja.....	23
2.2.2	Delovanje napetostno idealnega realnega transformatorja.....	26
2.3	Analitična obravnava	31
2.3.1	Splošne enačbe za stacionarno obratovanje	31
2.3.2	Nadomestno vezje transformatorja.....	34
2.3.3	Približne razmere	36
2.4	Preskusi transformatorja	37
2.4.1	Preskus prostega teka	38
2.4.2	Preskus kratkega stika	39
2.4.3	Tipične vrednosti serijsko izdelanih energetske transformatorjev.....	43
2.5	Obratovanje transformatorja na togem omrežju.....	43
2.5.1	Vpliv faznega kota bremena na sekundarno napetost	43
2.5.2	Kappov diagram in zunanja karakteristika (napetostnega) transformatorja.....	44
2.6	Zakon o rasti geometrijsko podobnih transformatorjev	45
2.7	Energijska bilanca, izgube in izkoristek	48
2.7.1	Energijska bilanca	48
2.7.2	Izgube	48
2.7.3	Izkoristek	50
2.8	Tokovni transformator	52
2.8.1	Idealni tokovni transformator	52
2.8.2	Realni tokovni transformator	53
2.8.3	Merilni tokovni transformator ali tokovnik.....	54
3	TRIFAZNA TRANSFORMACIJA	57
3.1	Osnovne vezave navitij, fazni premik in vezalne skupine	57
3.1.1	Osnovne vezave navitij	57
3.1.2	Fazni premik	58

II

3.1.3	Vežalne skupine.....	58
3.2	Transformacija s tremi enofaznimi transformatorji (transformer bank).....	60
3.3	Nesimetrična obremenitev.....	60
3.4	Transformacija z enim trifaznim transformatorjem	61
3.4.1	Trifazni plaščni transformator	61
3.4.2	Trifazni jedrni transformator	64
3.4.3	Nesimetrična obremenitev trifaznega transformatorja	64
3.5	Nesimetrični trifazni sistem	69
3.5.1	Splošno o nesimetričnem trifaznem sistemu	69
3.5.2	Magnetilni tokovi	70
3.6	Uporabnost vezij in vezalnih skupin transformatorjev	73
4	IZRAČUN IMPEDANCE TRANSFORMATORJA	74
4.1	Izračun razsipane reaktance s skupnim razsipanjem	74
4.2	Izračun razsipane reaktance za ločena navitja	79
4.3	Izračun induktivnega padca napetosti.....	81
4.4	Izračun ohmskega padca.....	82
4.5	Kratkostična napetost	83
5	PARALELNO OBRATOVANJE TRANSFORMATORJEV	84
5.1	Paralelno obratovanje pri različnih kratkostičnih napetostih	85
5.2	Paralelno obratovanje pri različnih faznih kotih kratkostičnih napetosti.....	86
6	PREHODNI POJAVI TRANSFORMATORJA	87
6.1	Vklopni tok transformatorja	87
6.2	Udarne kratkostični tok	92
6.2.1	Kratkostične sile	99
6.2.2	Energijska bilanca v kratkem stiku	101
7	PRENAPETOSTI	102
7.1	Splošno o prenapetostih	102
7.2	Vzroki in vrste prenapetosti	102
7.2.1	Pojavi obratovalnih procesov	102
7.2.2	Pojavi atmosferskega značaja	103
7.3	Obravnavanje pojava prenapetosti v transformatorju	104
7.3.1	Nadomestno vezje transformatorja pri prenapetostih	104
7.3.2	Začetna in končna porazdelitev napetosti vzdolž navitja	106
7.3.3	Prenapetostna zaščita transformatorja	108
7.3.4	Visokonapetostni preskus transformatorja.....	110
8	STOPENJSKO NASTAVLJANJE PRESTAVE.....	113
8.1	Transformatorsko navitje z odcepi	113
8.2	Regulacijska transformatorska stikala	113
9	POSEBNE IZVEDBE TRANSFORMATORJEV	116

III

9.1	Avtotransformator ali varčni transformator	116
9.2	Vezava V dveh enofaznih transformatorjev	117
9.3	Usmerniški transformator	120
10	SEGREVANJE IN OHLJEVANJE TRANSFORMATORJA	122
10.1	Segrevanje transformatorja	122
10.2	Ohlajevanje transformatorja	124
10.3	Dimenzioniranje hladilnih površin	124
10.4	Toplotno nadomestno vezje	126
11	PODATKI RAZDELILNIH ENERGETSKIH TRANSFORMATORJEV	128
12	IZRAČUN MALEGA TRIFAZNEGA TRANSFORMATORJA	131
12.1	Izpeljava enačbe za presek stebra železnega jedra	131
12.2	Izračun aktivnega dela - železno jedro	132
12.3	Navitje	134
12.4	Upornosti navitij, padci napetosti in kratkostična napetost	137
12.5	Izgube	140
12.6	Magnetilni tok	141
12.7	Dodatek za standardne premere okroglih žic in magnetilno krivuljo	142
13	SLIKE VELIKIH ENERGETSKIH TRANSFORMATORJEV	145
14	LITERATURA	151
15	SEZNAM SIMBOLOV IN OZNAK	152

TRANSFORMATORJI

1 UVOD

Transformator je izjemen član družine električnih strojev – je statična naprava, medtem ko so "pravi" električni stroji dinamične naprave, ne glede na to ali so gibanja njihovih delov rotacijska ali linearna. Transformator nima gibajočih se delov, torej ne opravlja nobenega mehanskega dela – sprejema električno in oddaja električno energijo. Električni stroji v pravem pomenu besede pa bodisi sprejemajo mehansko in oddajajo električno energijo (generatorji) bodisi sprejemajo električno in oddajajo mehansko energijo (motorji).

1.1 Definicija transformatorja

Transformator je statična naprava za prenos električne moči, ki z elektromagnetno indukcijo pretvarja sistem izmenične napetosti in toka v drug sistem napetosti in toka, navadno drugačnih velikosti in iste frekvence. Na primer:

Primar		Sekundar
enofazni sistem	→	enofazni sistem ali dvofazni sistem
trifazni sistem	→	trifazni sistem ali šestfazni sistem ali dvanajstfazni sistem

na splošno: m_1 fazni sistem → m_2 fazni sistem ($m_1 = m_2$ ali $m_1 \neq m_2$).

Tehnično uporaben transformator je bil razvit in proizveden ob koncu 19. stoletja. Omogočil je ustvarjanje visokih izmeničnih napetosti, tako da je postal prenos električne energije na velike razdalje ekonomičen. S ponovno transformacijo visoke prenosne napetosti na nizko napetost potrošnikovega omrežja je tudi energija daljnega izvora postala neposredno dostopna. To je tudi pospešilo razvoj električnih strojev za eno in večfazne sisteme električnih tokov in napetosti.

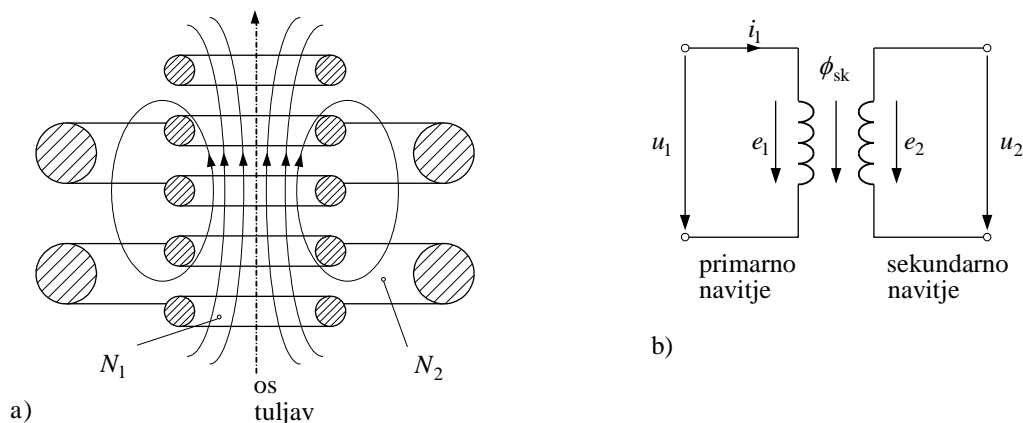
Vse bolj razširjena uporaba električne energije zahteva izredno razvejano električno omrežje različnih napetostnih nivojev, ki povezujejo med seboj izvore energije s potrošniki. Bistveni členi tega energetskega prenosnega sistema so močnostni transformatorji. V gosto naseljenih in močno industrializiranih področjih doseže instalirana moč transformatorjev do petkratno vrednost instalirane moči izvorov električne energije na tem področju. Iz tega sledi zahteva, da morajo biti transformatorji najbolj ekonomične naprave. Imeti morajo največji možni izkoristek, tj. večjega kot sami izvori električne energije generatorji in njihovi pogoni.

Za določene vrste priključnih naprav ali strojev so potrebne posebne vrste transformatorjev, kot so npr. varilni, usmerniški, merilni, regulacijski, zaščitni ... Nepogrešljivi so tudi v elektronskih napravah, npr. vhodni in izhodni, pa nizko, srednje in visokofrekvenčni transformatorji.

1.2 Osnovni principi konstrukcije in delovanja

Najelementarnejšo izvedbo transformatorja predstavljata dve tuljavi z različnim ali enakim številom ovojev in sta med seboj induktivno povezani. Tuljavo, ki ji dovajamo električno energijo, imenujemo primarno navitje. Tuljavo, ki oddaja električno energijo, imenujemo sekundarno navitje.

Ti dve navitji sta običajno galvanjsko ločeni, kot je prikazano na sliki 1a. Tuljavi imata isto smer navijanja ovojev in njuni osi se tedaj pokrivata. Na isti sliki so s smernimi puščicami vrisane gostotnice magnetnega pretoka – fluksa ϕ_1 , ki ustrezajo smeri toka i_1 skozi navitje z večjim številom ovojev N_1 . Amper-ovoji $i_1 N_1$ ustvarijo z magnetno napetostjo magnetni pretok ϕ_1 . Navitje z manjšim številom ovojev je brez toka. Na sliki 1b je prikazana ustrezna električna shema transformatorja s slike 1a. Ta prikazuje skupni fluks ϕ_{sk} , napetosti na sponkah primarnega navitja u_1 in tok i_1 , inducirane napetosti e_1 in e_2 ter napetost na sponkah sekundarnega navitja u_2 . V tem primeru ima primarno navitje $N_1 = 5$ ovojev in sekundarno navitje $N_2 = 2$ ovoja.



Slika 1 Skica navitja in ustrezna električna shema transformatorja

S pomočjo slike 1a si lahko nazorno pojasnimo pojem števila magnetnih sklepov ψ , ki se pojavlja v enačbah za inducirane napetosti. Fluks ϕ_1 je prikazan s šestimi gostotnicami. Vseh šest objemajo le trije ovoji primarnega navitja N_1 , skrajna dva ovoja pa objemata štiri gostotnice. Število magnetnih sklepov primarnega navitja je tedaj:

$$\psi_1 = \left(3 \times \frac{6}{6} + 2 \times \frac{4}{6} \right) \phi_1 = 4 \frac{1}{3} \phi_1 = 4,33 \phi_1. \quad (1a)$$

V idealnem primeru, ko bi vseh pet ovojev objemalo celoten fluks ϕ_1 , bi bilo število magnetnih sklepov:

$$\psi_{1id} = 5\phi_1. \quad (1b)$$

Sekundarno navitje na sliki 1a objema samo štiri gostotnice fluksa ϕ_1 , torej je število magnetnih sklepov sekundarnega navitja:

$$\psi_2 = \left(2 \times \frac{4}{6}\right)\phi_1 = 1\frac{1}{3}\phi_1 = 1,33\phi_1 \quad (2a)$$

in v idealnem primeru

$$\psi_{2id} = 2\phi_1. \quad (2b)$$

Obema navitjema je skupen fluks $\phi_{sk1} = \frac{4}{6}\phi_1 = \frac{2}{3}\phi_1$, ki sodeluje v procesu transformacije. Del primarnega fluksa, ki gre le skozi tri primarne ovoje in skozi noben sekundarni ovoj, v procesu transformacije ne sodeluje in ga imenujemo razsipani fluks primarnega navitja $\phi_{\sigma1} = \frac{2}{6}\phi_1 = \frac{1}{3}\phi_1$

ter tvori s primarnim navitjem število magnetnih sklepov $\psi_{\sigma1} = 3 \times \frac{2}{6}\phi_1 = \frac{6}{6}\phi_1 = \phi_1$.

Torej lahko tudi zapišemo

$$\phi_{sk} = \phi_1 - \phi_{\sigma1} = \phi_1 - \frac{1}{3}\phi_1 \text{ ali } \phi_1 = \phi_{sk} + \phi_{\sigma1} = \frac{2}{3}\phi_1 + \frac{1}{3}\phi_1 \text{ in ustrezni magnetni sklepi so:}$$

$$\psi_1 = \psi_{sk1} + \psi_{\sigma1} = \left(5 \times \frac{2}{3}\right)\phi_1 + \left(3 \times \frac{1}{3}\right)\phi_1 = 4\frac{1}{3}\phi_1 = 4,33\phi_1.$$

V primeru na sliki 1a je sekundarno navitje z ovoji N_2 brez toka, $i_2 = 0$, zato so tudi amper-ovoji $i_2N_2 = 0$ in to navitje ne ustvarja svojega magnetnega polja oziroma fluksa. Torej je število magnetnih sklepov sekundarnega navitja odvisno le od ϕ_{sk} in je $\psi_2 = \psi_{sk2} = 1,33\phi_1$.

Sedaj lahko razložimo osnovni princip delovanja transformatorja. Predpostavimo, da navitji transformatorja nimata ohmskih upornosti, torej $R_1 = R_2 = 0$.

Mehanizem delovanja transformatorja, katerega primarno navitje z N_1 ovoji je priključeno na omrežje izmenične napetosti, njegovo sekundarno navitje pa je odprto, je naslednji: napetost omrežja u_1 , ki je pritisnjena na sponke primarnega navitja z N_1 ovoji, bo pognala skozenj tok i_1 . Ta bo ustvaril tolikšne amper-ovoje oziroma magnetno napetost $\theta_1 = i_1N_1$, da bo ta v navitju ustvarila magnetni fluks ϕ_1 , ki bo s primarnim navitjem tvoril ustrezno število magnetnih sklepov ψ_1 , tako da bo doseženo ravnotežje med pritisnjeno napetostjo u_1 in v primarnem navitju inducirano napetostjo nasprotne smeri e_1 , tj. $u_1 = -e_1$ oziroma:

$$u_1 = -e_1 = -\left(-\frac{d\psi_1}{dt}\right) = \frac{d\psi_1}{dt} = \frac{d(\psi_{sk1} + \psi_{\sigma1})}{dt} = -(e_{sk1} + e_{\sigma1}). \quad (3a)$$

Istočasno se inducira v sekundarnem navitju z N_2 ovoji napetost e_2 , ki je enaka napetosti na sponkah sekundarnega navitja, v skladu z dogovorom:

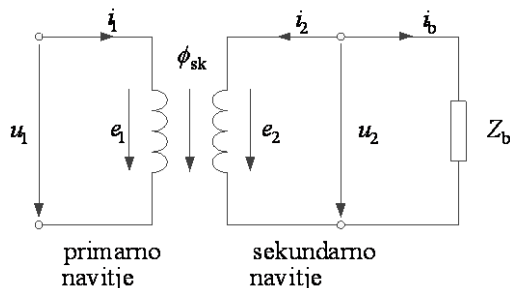
$$-e_2 = -\left(-\frac{d\psi_{sk2}}{dt}\right) = \frac{d\psi_{sk2}}{dt} = u_2. \quad (3b)$$

V primeru, da bi imel transformator več (x) sekundarnih navitij, bi se v vsakem od njih inducirala napetost e_{2x} , ustrezno s številom magnetnih sklepov ψ_{sk2x} posameznega navitja.

V procesu transformacije ne sodeluje primarni razsipani fluks $\phi_{\sigma 1}$ oziroma ustrezni magnetni sklepi $\psi_{\sigma 1}$, zato se inducirana napetost nasprotne smeri $e_{\sigma 1} = -(d\psi_{\sigma 1}/dt)$ imenuje induktivni padeč napetosti v primarnem navitju.

Razumevanje bistva delovanja transformatorja nam omogoči obravnava t. i. idealnega transformatorja. Tak transformator ima navitji brez ohmskih upornosti $R_1 = R_2 = 0$. Njegova navitja nimajo razsipanih fluksov niti odgovarjajočih sklepov razsipanja $\psi_{\sigma 1} = \psi_{\sigma 2} = 0$, eksistira torej le ϕ_{sk} . Permeabilnost sredstva, v katerem je navitje na sliki 1a, naj bo neskončno velika $\mu \rightarrow \infty$. Tedaj so tudi potrebni amper-ovoji za ustvarjanje fluksa ϕ_{sk} neskončno majhni $i_{1\mu} N_1 \rightarrow 0$ oziroma, ker ima N_1 končno vrednost, gre $i_{1\mu} \rightarrow 0$ in je torej zanemarljiv.

Obravnavali bomo neobremenjen transformator (prosti tek) slika 1b in nato z bremensko impedanco Z_b , priključeno na sponke sekundarnega navitja, obremenjen transformator, slika 2.



Slika 2 Električna shema obremenjenega Transformatorja

Prosti tek

V prostem teku idealnega transformatorja (slika 1b) veljajo naslednje predpostavke:

$$i_2 = 0, \quad u_2 = -e_2,$$

$$i_{1\mu} \rightarrow 0, \quad u_1 = -e_1$$

in zato velja

$$u_1 = -\frac{d(-\psi_{sk1})}{dt} = N_1 \frac{d\phi_{sk1}}{dt} = -e_1, \quad (4a)$$

$$u_2 = -\frac{d(-\psi_{sk2})}{dt} = N_2 \frac{d\phi_{sk2}}{dt} = -e_2. \quad (4b)$$

Z deljenjem teh dveh enačb dobimo prestavno razmerje napetosti v idealnem prostem teku:

$$K_U = \frac{u_1}{u_2} = \frac{-e_1}{-e_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (5)$$

Obremenitev

Podobno velja za obremenitev idealnega transformatorja (slika 2), ko imamo naslednje veličine:

$$\begin{aligned} i_{2b} &= -i_2, & u_2 \\ i_1, & & u_1. \end{aligned}$$

Zaradi $R_1 = R_2 = 0$ in $\psi_{\sigma 1} = \psi_{\sigma 2} = 0$ ne bo padcev napetosti in ostane v veljavi $u_1 = -e_1$ oziroma $u_2 = -e_2$, torej tudi enak ϕ_{sk} , kot smo ga imeli v prostem teku. Zato velja za $i_{1\mu} \rightarrow 0$ in ta ne vpliva na velikost toka i_1 .

Transformator nima izgub, saj so izgube v navitju $i_1^2 R_1 + i_2^2 R_2 = 0$. To pomeni, da je sprejeta moč enaka oddani moči. Bilanca moči $p_1 = p_2$, če je impedanca $Z_b = R_b$, tj. čisto ohmsko breme, je:

$$u_1 i_1 = u_2 i_{2b} = u_2 (-i_2) = -\frac{N_2}{N_1} u_1 i_2. \quad (6)$$

V tem izvajanju je izražena prava ideja transformatorja: $u_1 i_1 = u_2 i_{2b}$ in iz enačbe (6) dobimo prestavno razmerje bremenskih tokov

$$K_I = \frac{i_1}{i_2} = \left| -\frac{N_2}{N_1} \right| = \frac{N_2}{N_1}. \quad (7)$$

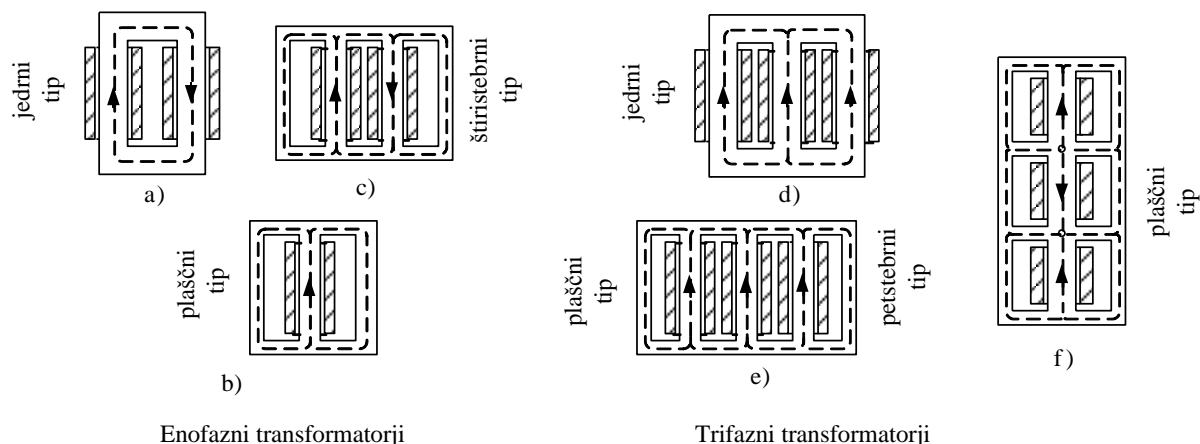
V idealnem transformatorju se moč prenaša brez izgub iz električnega omrežja, ki je priključeno na primarno navitje transformatorja z N_1 ovoji, v dvopol z impedanco Z_b . Ta je priključen na sekundarno navitje z N_2 ovoji, pri čemer se spremeni nivo napetosti ustrezno enačbi (5):

$$u_2 = u_1 \frac{N_2}{N_1} = \frac{u_1}{K_U}.$$

Elementarno izvedbo transformatorja podano na sliki 1a, imenujemo transformator z zračnim jedrom. Tak transformator ima relativno velika razsipana fluksa $\phi_{\sigma 1}$ oziroma $\phi_{\sigma 2}$, ker je relativna permeabilnost zraka $\mu_{\text{zr}} = 1$. Skupni fluks $\phi_{sk} = \phi_1 - \phi_{\sigma 1}$ je majhen, majhno je tudi število magnetnih sklepov sekundarnega navitja ψ_{sk2} , zato je transformacija primarne napetosti na sekundarno stran šibka. Potrebna je takšna konstrukcija transformatorja, ki bo zmanjšala delež razsipanega in povečala delež skupnega fluksa.

Iz slike 1a sledi ugotovitev, da bi speljali gostotnice fluksa skozi material, ki ima znatno večjo relativno permeabilnost kot zrak. Takšne lastnosti imajo feromagnetni materiali, katerih najpomembnejši predstavnik je železo. Zato uporabimo za vodenje fluksa jedro iz feromagnetnega materiala, tj. orientirane hladno valjane transformatorske pločevina z relativno permeabilnostjo ($\mu_{\text{Fe}} \approx 4000 \div 50000$). Tako pridemo do konstrukcije transformatorja z železnim jedrom. Na sliki 3 so prikazane osnovne izvedbe železnih jeder enofaznih in trifaznih transformatorjev. Osnovne izvedbe jeder enofaznih transformatorjev so prikazane na sliki 3a, b, in c. Plaščni tip

jedra (slika 3b), pri katerem se silnice fluksa zaključujejo po plašču in jedrni tip železnega jedra (slika 3a), pri katerem potekajo silnice fluksa po jedru. Pri plaščnem tipu jedra sta obe navitji nameščeni na enem stebru, pri jedrnem tipu je na vsakem stebru ena polovica primarnega in sekundarnega navitja. Stebre povezujejo v zaključen magnetni krog deli jedra, ki jih imenujemo jarne. Pri plaščni izvedbi gre skozi jarne polovica skupnega fluksa in so manjšega (polovičnega) preseka kot pri jedrnem tipu. Torej je višina železnega jedra plaščnega tipa nižja, kar je včasih pomembno glede dopustnih višin transportne trase; to je bolj pogosto pri trifaznih transformatorjih. Trifazni transformatorji so prikazani na slikah 3d, e in f in tudi na teh slikah so vrisane poti silnic fluksa.

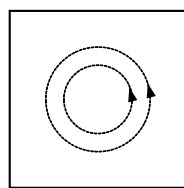


Enofazni transformatorji

Trifazni transformatorji

Slika 3 Osnovne izvedbe železnih jeter eno in trifaznih transformatorjev

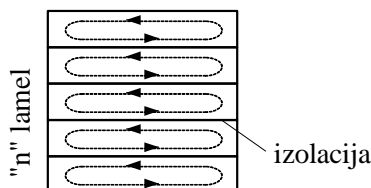
Jedra niso iz masivnega železa, temveč iz tankih transformatorskih pločevin, ki so visoko legirane s silicijem do 4,5 %, kar poveča specifično ohmsko upornost železa. Vse to zmanjša izgube zaradi vrtničnih tokov v železnem jedru, ki jih povzročijo pravzaprav izmenični magnetni pretok. Na sliki 4a in 4b sta prikazana presek masivnega in presek lameliranega jedra z vrisanimi tokovnicami vrtničnih tokov, ki jih poganjajo ustrezne inducirane napetosti $e = -d\phi / dt$.



a) masivno jedro

$$\phi, R_{Fe}, e$$

$$i_v = -\frac{d\phi}{dt} \frac{1}{R_{Fe}}$$



b) lamelirano jedro

$$\phi/n, nR_{Fe}, e/n$$

$$i_v = -\frac{d(\phi/n)}{dt} \frac{1}{nR_{Fe}} = -\frac{1}{n^2} \frac{d\phi}{dt} \frac{1}{R_{Fe}}$$

Slika 4 Masivno in lamelirano železno jedro

Če so izgube zaradi vrtničnih tokov ($i_v = e / R_{Fe}$) pri masivnem jedru $p_v = e i_v$, so pri "n" krat lameliranem jedru debeline lamele "d":

$$p_{vn} = n \frac{e i_v}{n n^2} = \frac{p_v}{n^2} \rightarrow p_{vn} = f\left(\frac{1}{n^2}\right) = f(d^2). \quad (8)$$

Čim večji bo "n" oziroma čim tanjše bodo pločevine, tem manjše bodo izgube zaradi vrtničnih tokov. Zaradi izmeničnega magnetenja se pojavljajo še histerezne izgube.

Izgube v železu, ki so odvisne od gostote fluksa v jedru, od njegove frekvence, debeline transformatorske pločevine d ter od kvalitete pločevine, so po klasični teoriji podane z izrazom za specifične izgube na kilogram mase (W/kg):

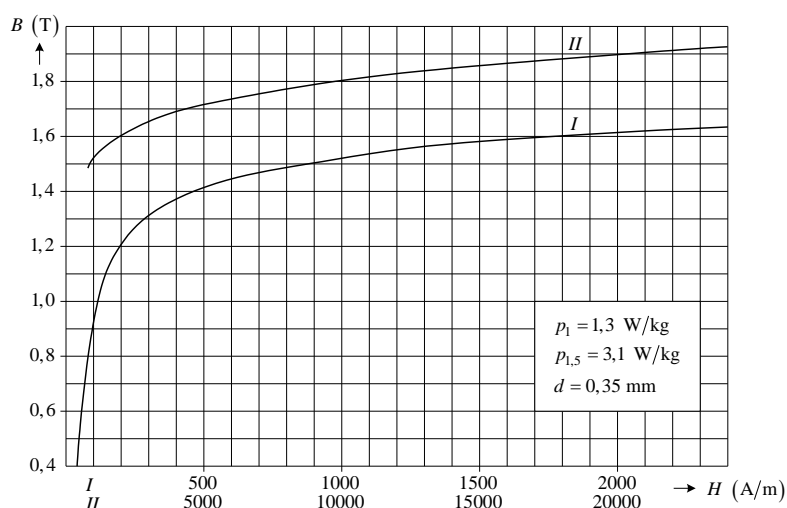
$$p_{Fe} = k_h f B^x + k_v d^2 f^2 B^2. \quad (9)$$

Histerezne izgube se spreminjajo s frekvenco linearno, vrtnične s kvadratom frekvence in debelino pločevine d . Odvisnost od gostote magnetnega pretoka B je za vrtnične izgube kvadratna, za histerezne pa eksponentna. Vrednosti "x" so v mejah od 1,6 do 2,8, odvisno od vrednosti B .

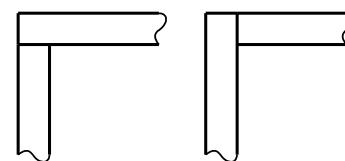
Ker se faktor "x" močno spreminja, ne računamo specifičnih izgub po prej navedeni formuli, ki zahteva tudi poznavanje obeh koeficientov k_h in k_v , temveč uporabljamo merjene vrednosti izgub pločevine določene kvalitete in debeline d v odvisnosti od gostote magnetnega pretoka pri določeni frekvenci, npr.: $p_{Fe} = f(B)$ pri $f = 50$ Hz. V katalogih proizvajalcev magnetnih pločevin so za posamezne pločevine podane krivulje specifičnih izgub in magnetilne krivulje. Na sliki 5a je podana magnetilna krivulja $B = f(H)$ za $f = 50$ Hz, debeline 0,35 mm in to za hladno valjano orientirano transformatorsko pločevino v vzdolžni smeri in v dveh različnih merilih označenih z I in II. Vrednost za H je podana v efektivnih vrednostih (RMS). Specifične izgube so podane pri 1 in 1,5 T.

Hladno valjane orientirane pločevine se izključno uporabljajo v gradnji transformatorskih jeder energetskih in distribucijskih transformatorjev, saj imajo zelo majhne specifične izgube. Njihova pomanjkljivost je, da pri poteku fluksa prečno na smer valjanja nastanejo večje izgube, kot so v vzdolžni smeri. Zato morajo biti stiki lamel jedra pod kotom 45° pri hladno valjanih pločevinah, medtem ko so pri manjših transformatorjih pod kotom 90° , kot je prikazano na sliki 5b. Tudi permeabilnost orientirane hladno valjane transformatorske pločevine v smeri valjanja je večja kot prečno na smer valjanja.

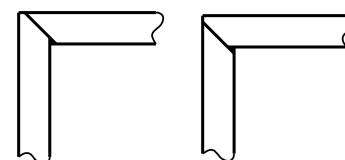
Evropski standard EN 10107 zajema minimalne zahtevane gostote magnetnega pretoka B (T) za določene vrednosti magnetne poljske jakosti H (A/m) za hladno valjane orientirane transformatorske pločevine debelin $d = 0,23$ do $0,35$ mm in specifične izgube pri $f = 50$ Hz za gostote $B = 1$ T in $1,5$ T (ali $1,5$ T in $1,7$ T za večje energetske transformatorje).



Slika 5a Magnetilna krivulja hladno valjane transformatorske pločevine debeline 0,35 mm



90° – stik stebra z jarmom



45° – stik stebra z jarmom

Slika 5b Izvedbi stikov lamel jedra

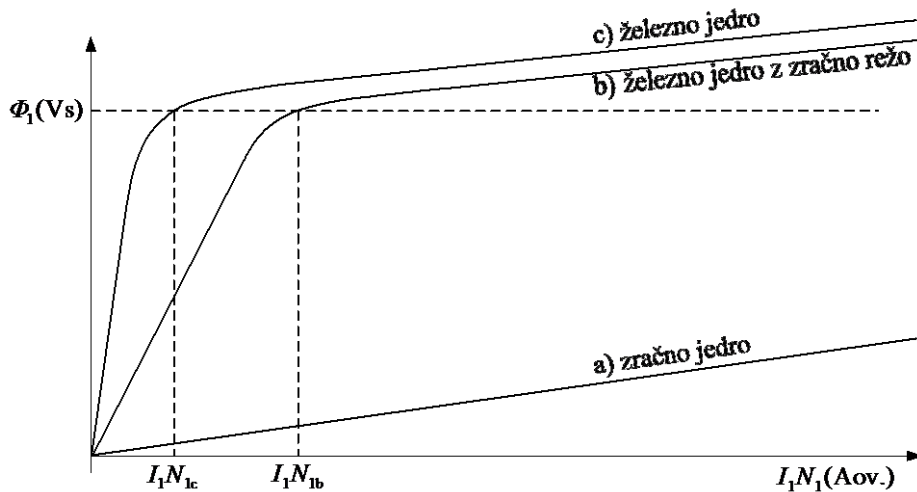
Hladno valjane orientirane transformatorske pločevine, izolirane z izolacijskim lakom, se večinoma dobavljajo v trakovih ustreznih širin, navitih na kolute. Razen lamelirane transformatorske pločevine se uporabljajo tudi amorfni materiali.

Pri transformatorju z železnim jedrom se pojavijo izgube v železu, ki jih transformator z zračnim jedrom nima, ima pa manjše izgube v navitjih. Inducirana napetost je funkcija frekvence, števila ovojev in fluksa. Za efektivno vrednost inducirane napetosti velja $E = k f N \Phi = k f N A_{\text{Fe}} B$, kjer pomeni A_{Fe} presek, skozi katerega prehaja fluks Φ gostote B . Če sedaj primerjamo transformatorja z zračnim in železnim jedrom, ki sta priključena na omrežje napetosti U in frekvence f , lahko poenostavimo izraz za efektivno vrednost inducirane napetosti $E = k (N A_{\text{Fe}} B)$. Transformator z železnim jedrom dopušča znatno višje vrednosti B , torej je lahko delni produkt $N A_{\text{Fe}}$ znatno manjši kot pri zračnem jedru. Na splošno bo imel tak transformator manj ovojev, ki bodo razen tega krajši, saj objemajo jedro manjšega preseka. Masa materiala navitja bo manjša oziroma tudi ohmska upornost navitja bo manjša. To pomeni manjše dimenzije in pri enakem bremenskem toku tudi manjše ohmske padce napetosti ter manjše joulske izgube. To enostavno razmišljanje potrjuje upravičenost železnega jedra. Zato se gradijo transformatorji z železnim jedrom, upoštevajoč izraz $E = k f N \Phi$, za področje frekvenc do 20 kHz. Nad to mejo se uporabljajo feritna jedra in za izredno visoke frekvence transformatorji z zračnim jedrom (telekomunikacije in podobno Teslov transformator).

Magnetilna karakteristika transformatorja podaja odvisnost fluksa od magnetne napetosti $\Phi = f(IN)$. Transformator z zračnim jedrom ima linearno karakteristiko, transformator z železnim jedrom pa nelinearno karakteristiko, podobno magnetilni krivulji železa $B = f(H)$.

Železna jedra so sestavljena iz leg pločevin tako, da se stiki stebrih in jarmskih pločevin prekrivajo (sliki 5b), so pa tudi izvedbe - imenovane topi stik - kjer je med stebrom in jarmom

zračna reža δ , debeline nekaj milimetrov, izpolnjena z izolacijo. Za prehod fluksa skozi zračno režo δ so potrebni dodatni amper-ovoji in magnetilna karakteristika ima manj izrazito koleno (slika 6).



Slika 6 Magnetilne karakteristike različnih vrst transformatorjev

Bistven konstrukcijski del transformatorja so navitja, saj se v njih pojavljajo električne napetosti in tokovi. Za navitja uporabljamo materiale z nizko specifično ohmsko upornostjo. Najbolj pogost material je elektrolitski baker kot žica okroglega ali profilnega preseka. Kot zanimivost naj omenimo še uporabo drugih materialov. Med drugo svetovno vojno, ko se je baker prednostno uporabljal v oboroževalni industriji, so v Evropi začeli izdelovati navitja iz aluminija, v ZDA pa so v manjših transformatorjih vgradili navitja iz srebra, ne iz aluminija, ki je bil nujno potreben letalski industriji. Omenjena dva primera potrjujeta znano definicijo, da je tehnika rezultat fizike in ekonomike, pri čemer je ekonomika podvržena hitrejšim spremembam kot fizika. Današnja tehnologija izdelave navitij že omogoča širšo uporabo aluminija – poleg okroglih in profilnih žic – se v novejši gradnji transformatorjev uporabljajo vodniki iz aluminijevskih folij. V novejšem času posega na to področje tudi fizika, ki obravnava obnašanje snovi pri nizkih absolutnih temperaturah okoli 2 do 4 K in nastala je nova tehniška veda imenovana kriotehnika. Pri tako nizkih temperaturah postanejo vodniki superprevodni. Takšno navitje torej nima ohmskih padcev napetosti, ne jouskih izgub. Za sedaj se ta tehnika uporablja samo v specialnih napravah, saj so potrebne zahtevne dodatne aparature za ustvarjanje tako nizkih temperatur, tudi sami vodniki so drugače konstruirani kot normalne bakrene, aluminijaste žice ali profili.

Splošna strojogradnja v elektrotehniko bo še lep čas uporabljala baker in aluminij, ki bo pri obratovanju segret na temperature od 90 °C do 200 °C, odvisno od vrste izolacije.

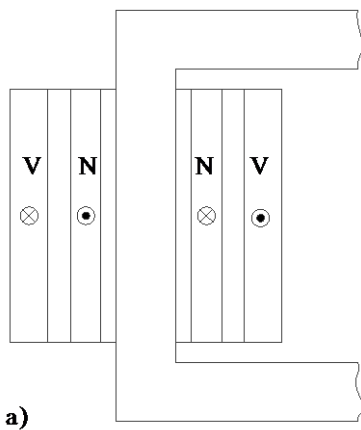
IEC standard 182-1-2 obravnava bakreno žico za električne stroje in transformatorje iz bakra okroglega profila, premera 0,04 do 6,00 mm, ki mora imeti minimalno prevodnost 57 Sm/mm^2

pri 20 °C. V standardu za okroglo bakreno žico je ta izolirana z lakom za manjšo debelino označeno z L1, oziroma za večjo debelino, L2.

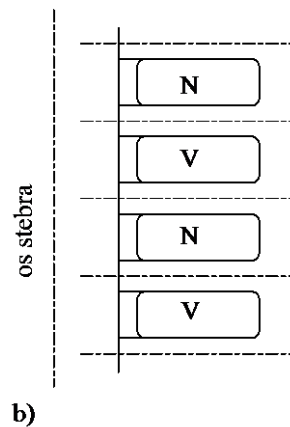
Aluminijaste žice za transformatorje so večjega premera, ker je prevodnost le 37 Sm/mm^2 pri 20 °C. Transformator z aluminijским navitjem bo imel tako vodnike večjega preseka pri enakem nazivnem toku in to v razmerju prevodnosti bakra proti prevodnosti aluminija, tj. $57 : 37 \approx 1,5$. To pomeni, da ima transformator z aluminijским navitjem večje dimenzije kot tisti z bakrenim navitjem.

Navitja transformatorjev so sestavljena iz ovojjev tokovodnikov, ki predstavljajo konstrukcijsko eno samo ali več delnih tuljav. Pri transformatorju z železnim jedrom jih nasadimo na stebre jedra, seveda z določeno vmesno izolacijo oziroma z ustreznimi izolacijskimi razdaljami med navitji različnih napetostnih nivojev.

Simetrala stebra je tudi os navitij. Medsebojni položaj je v principu lahko dvojen, tako da imamo koncentrična ali cilindrična navitja (slika 7a) in ploščata navitja (slika 7b).

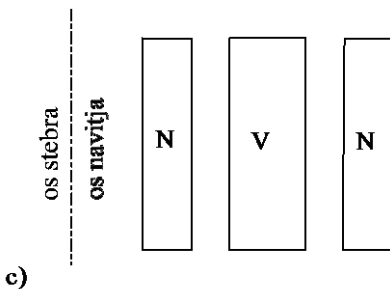


Slika 7a Cilindrično navitje

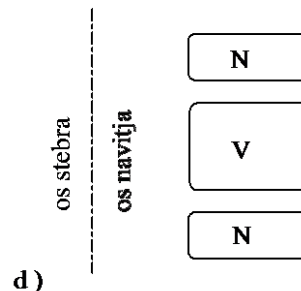


Slika 7b Ploščato navitje

Osnovni izvedbi na sliki 7a in 7b omogočata tudi izvedbe z deljenimi navitji. Najenostavnejša primera sta prikaza za cilindrična navitja na sliki 7c in za ploščata navitja na sliki 7d. Nizkonapetostno navitje (N) je razpolovljeno in sta njuni polovici nameščeni na obeh straneh visokonapetostnega navitja (V).



Slika 7c Deljeno cilindrično navitje



Slika 7d Deljeno ploščato navitje

Tako dobimo manjše in lažje enote navitja. To sicer olajša montažo in remont, toda pravi smisel delitve je v tem, da z njo zmanjšamo induktivnost navitij oziroma število sklepov razsipanega fluksa.

Navitji na sliki 7a in 7b imata na primer število magnetnih sklepov razsipanega fluksa ψ_{σ} , oziroma induktivnost razsipanja $L_{\sigma} = \psi_{\sigma} / i$. Navitji na sliki 7c in 7d imata zaradi delitve na $n=2$ delni skupini (eno delno skupino tvorita polovici nizko in visokonapetostnega navitja) in induktivnost delne skupine $(1/n^2)L_{\sigma} = (1/2^2)L_{\sigma} = (1/4)L_{\sigma}$. A ker so deljena navitja vezana n -krat v serijo, je nova induktivnost razsipanja $L_{\sigma\text{nova}} = n \times (1/n^2)L_{\sigma} = (1/n)L_{\sigma} = L_{\sigma} / 2$ oziroma je število magnetnih sklepov sedaj $\psi_{\sigma\text{novi}} = iL_{\sigma\text{novi}} = i(1/2)L_{\sigma} = \psi_{\sigma} / 2$. Torej lahko z ustrezno izvedbo navitij dosežemo zahtevane induktivne padce napetosti oziroma zahtevane kratkostične napetosti. Te so odločilne za velikost kratkostičnih tokov, o čemer bo govora v kasnejših poglavjih.

Cilindrična navitja se uporabljajo pri jedrni izvedbi, ploščata navitja pri plaščni izvedbi jeder transformatorjev in omogočajo fino delitev oziroma večji "n".

Navitja in jedro aktivno sodelujejo v procesu transformacije, zato jih imenujemo aktivni del transformatorja. Teoretična obravnava transformatorja bo zajemala pojave v aktivnem delu.

Konstrukcija transformatorja seveda ni tako enostavna. Najmanj kar je potrebno, so priključne sponke. Te so lahko navadne lestenčne sponke ali (zelo veliki) izolatorji – skozniki pri visokih napetostih. Transformatorje ločimo po sredstvu, ki obdaja aktivni del. Če je to sredstvo zrak, ustrezni plin, umetna smola ali kremenčev pesek, jih imenujemo suhi transformator. Če je to sredstvo tekoče, jih imenujemo po njem oljni transformator, »clophenski« transformator in podobno. Najpogostejše sredstvo je transformatorsko olje. V takih primerih morajo imeti transformatorji oljni kotel z ustrezno veliko hladilno površino za odvod toplote. Toploto povzročajo izgube v aktivnem delu. Če sama površina kotla ne zadošča, moramo uporabiti prisilno hlajenje.

Vsa ta sredstva, ki obdajajo aktivni del, morajo biti dobri izolanti, da ne pride do prebojev napetosti med navitji različnih napetostnih nivojev oziroma med navitji in kovinskimi deli – jedro, kotel ali konstrukcijski deli. Hkrati morajo biti ta sredstva še dobri prevodniki toplote. Obe zahtevi zadovoljivo izpolnjujejo seveda le malokateri izolanti. Transformator mora biti, če je pretežak za ročni prenos, opremljen tudi z elementi, ki omogočajo uporabo dvigal in s podvozjem za krajše premike.

1.3 Priključek primarnega navitja na električno omrežje

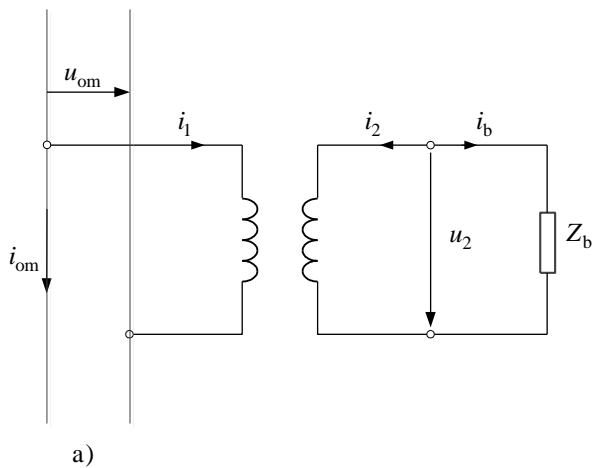
Priključek primarnega navitja na električno omrežje je mogoč na dva načina.

1. Če je primarno navitje priključeno na omrežje paralelno, je na sponkah primarnega navitja ista napetost, kot je v omrežju $u_1 = u_{\text{om}}$. Napetost je pri relativno močnem omrežju, ne glede na moč

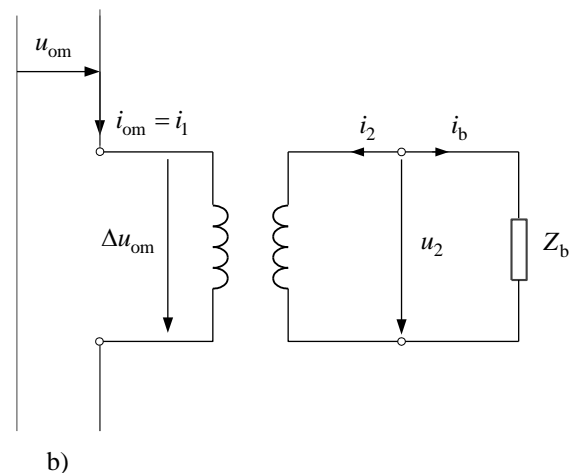
transformatorja, praktično neodvisna od obremenitve transformatorja – imamo napetostni transformator (sliki 8a).

2. Če je primarno navitje vključeno v omrežje serijsko, teče skozenj tok omrežja, tako da velja $i_{om} = i_1$. Ta je praktično neodvisen od obremenitve transformatorja – imamo tokovni transformator (sliki 8b).

Naj poudarimo, da za oba primera veljajo popolnoma iste zakonitosti delovanja, le da je transformatorju v 1. primeru vsiljena napetost, v 2. primeru je vsiljen tok omrežja.



Slika 8a Napetostni transformator



Slika 8b Tokovni transformator

Večina transformatorjev v uporabi spada po gornjih kriterijih med napetostne, manjšina med tokovne transformatorje.

1.4 Nekaj podatkov o transformatorjih

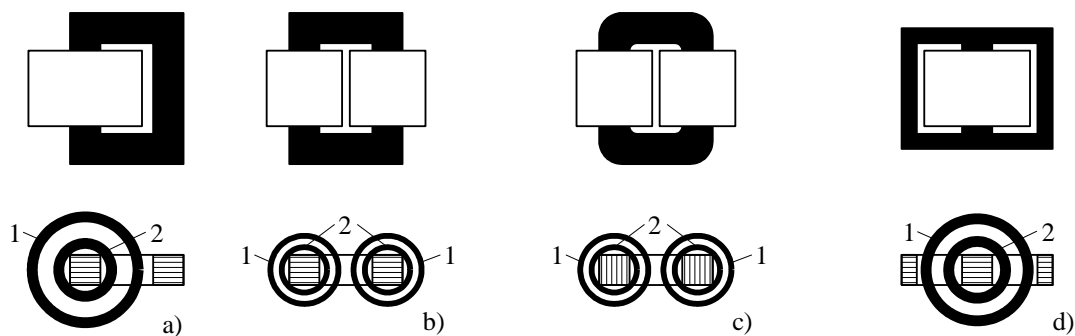
Transformatorji se gradijo za moči od nekaj mW do nekaj tisoč MW, odvisno od njihove funkcije. Če se omejimo na energetske transformatorje, velja zanje naslednje. Za moči $50 \div 1600$ kVA in napetosti do 35 kV se proizvajajo serijsko, za večje moči in višje napetosti pol serijsko, za največje moči in najvišje napetosti posamično, glede na posebne zahteve.

Mejna moč transformatorjev je odvisna od raziskovalnih izsledkov, tehnologije in transportnih možnosti danega časa, torej je relativno omejena. Že leta 1974 je zahodnonemška tovarna zgradila za neko jedrsko elektrarno trifazni oljni transformator moči 1020 MVA, napetosti 415/25 kV, frekvence 50 Hz, z regulacijo napetosti pod obremenitvijo. Glavne dimenzije transformatorja s skožnjiki, brez hladilne naprave, so bile: dolžina 16 m, širina 3,9 m, višina 11,3 m. Masa transformatorja brez hladilne naprave je bila 520 t. Takrat je bil to transformator mejne moči s frekvenco 50 Hz. Sedaj pa se že izdelujejo transformatorji moči 3000 MVA.

Ta uvod sklenimo z omembo, da bo v naslednjih poglavjih obdelana teorija enofaznega transformatorja z železnim jedrom. Temu bo sledila obravnava transformacije in transfor-

matorjev trifaznega sistema in na koncu še nekatere posebne izvedbe transformatorjev. Težišče bo na obravnavi stacionarnih stanj, prehodna stanja bodo podana pretežno fizikalno in grafično. Večina razlag bo podanih za napetostni transformator, dodatne razlage bodo podane za tokovni transformator.

V zaključku uvodnega dela učbenika so na sliki 9 prikazane različne oblike jeder in razporeditev navitij okoli jeder za male enofazne transformatorje. Na sliki 9a je pri jedrnem tipu primarno navitje "1" in sekundarno navitje "2" nameščeno na enem ali na sliki 9b na dveh stebrih, ki jih povezuje jarem. Enako velja za prerezano tračno jedro (slika 9c), narejeno iz neskončnega traku. Pri plaščnem tipu (slika 9d) je fluks v jarmu polovičen, glede na fluks v stebru (polovičen presek jarma). Zato je polovična višina jarma in s tem je manjša višina transformatorja.



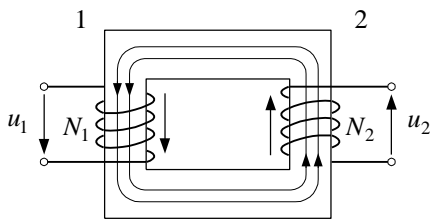
Slika 9 Slika jeder malih enofaznih transformatorjev in razporeditev navitja

Slike razdelilnih in večjih energetskih trifaznih transformatorjev ter nekaj slik iz proizvodnje bodo prikazane na koncu tega učbenika.

2 ENOFAZNI TRANSFORMATOR Z ŽELEZNI JEDROM

Obravnavali bomo delovanje transformatorja z vsiljeno napetostjo ali napetostni transformator, pri katerem bomo imeli vsiljeno napetost u_1 nespremenljivo, tj. togo napetost. Opisana bo definicija pozitivne smeri delovanja v osnovni konstrukciji enofaznega napetostnega transformatorja.

V nadaljnjih poglavjih bomo naša izvajanja priredili osnovni konstrukciji enofaznega jedrnega transformatorja na sliki 10. Tu sta primarno in sekundarno navitje nameščeni vsako na svojem stebri. To ne odgovarja resničnim konstrukcijam, kjer sta obe navitji na istem stebri (slika 7a do d) in to bomo morali upoštevati pri obravnavanju razsipanih polj.



Slika 10 Smeri puščic transformatorja

Osnovna konstrukcija ima obe tuljavi (navitji) desno naviti in je opremljena s puščicami smeri delovanja padcev napetosti ter tokov in s tem tudi s smermi delovanja tokovnih pretokov (amper-ovojev), fluksov oziroma magnetnih sklepov. Puščice so prirejene po naslednji metodi: Če izhajamo iz padca napetosti na navitju 1, sledi, da moramo tok skozi navitje 1 šteti pozitivno v istem smislu. S tem je določena pozitivna smer toka v navitju 2, saj naj bi obe navitji magnetili v isti smeri pri pozitivnih tokovih skozi desno naviti tuljavi. Padec napetosti na navitju 2 štejemo kot pozitiven v istem smislu kot tudi tok skozi to navitje.

Puščice smeri delovanja veljajo tako za tokove, ki tečejo skozi tuljavi, kakor tudi za magnetne sklepe tuljav (ψ) oziroma za magnetni pretok (ϕ) v magnetnem krogu.

Ta predpostavka ima še to posledico, da pozitivno usmerjen tok ustvarja pozitivni prispevek tokovnega pretoka (amper-ovojev) na integracijski poti, ki poteka skozi tuljavi v smeri puščice.

2.1 Delovanje idealnega transformatorja

2.1.1 Značilnosti idealnega transformatorja

Za lastnosti uporabljenih materialov aktivnega dela velja slednje:

- permeabilnost magnetnega kroga $\mu_{\text{Fe}} = \infty$,
- električna prevodnost magnetnega kroga $\gamma_{\text{Fe}} = 0$,
- permeabilnost obdajajočega zraka $\mu_{\text{zr}} = 0$,
- električna prevodnost vodnikov (navitja) $\gamma_{\text{v}} = \infty$,
- magnetni krog je brez zračnih rež $\delta_{\text{zr}} = 0$.

Zaradi $\gamma_{\text{Fe}} = \infty$ je povsod v magnetnem krogu, neodvisno od vrednosti magnetne indukcije B , poljska jakost $H_{\text{Fe}} = 0$ in s tem tudi zaključeni integral po integracijski poti $\oint \vec{H}_{\text{Fe}} \cdot d\vec{l} = 0$. To pomeni, da ni nobenih padcev magnetne napetosti v magnetnem krogu. Ni pojava histereze in histereznih izgub. Zaradi $\gamma_{\text{Fe}} = 0$ ne morejo nastopiti v magnetnem krogu vrtničasti tokovi in tako tudi ni izgub vrtničastih tokov. S pogojem $\mu_{\text{zr}} = 0$ dosežemo, da izven magnetnega kroga ni magnetnih pretokov. S pogojem $\gamma_{\text{v}} = \infty$ pa izginejo vse ohmske upornosti navitij in s tem ohmski padci napetosti in joulske izgube v navitjih.

Idealni transformator torej nima nobenih izgub in tako je dovedena moč enaka oddani moči.

Osnovni zakoni

Napetostni enačbi obeh navitij ustrezata splošni enačbi tuljave (slika 11) z ohmsko upornostjo R in padcem napetosti Ri :

$$u = Ri - e = Ri + \frac{d\psi}{dt},$$

ker je $R = 0$ in s tem $Ri = 0$. Velja:

$$u = -e = \frac{d\psi}{dt}$$

in tako lahko napišemo napetostni enačbi navitij 1 in 2:

$$u_1 = -e_1 = \frac{d\psi_1}{dt}, \quad (10a)$$

$$u_2 = -e_2 = \frac{d\psi_2}{dt}. \quad (10b)$$

Magnetni pretok eksistira samo v magnetnem krogu. Skozi navitje 1 z ovoji N_1 poteka fluks ϕ_1 in skozi navitje 2 z ovoji N_2 poteka fluks ϕ_2 .

Iz nakazanih pozitivnih smeri puščic na sliki 12 in ker so silnice fluksa vase zaključene linije, velja:

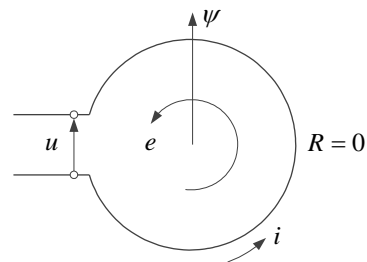
$$\phi_1 = \phi_2 = \phi \text{ in za število magnetnih sklepov obeh}$$

navitij dobimo:

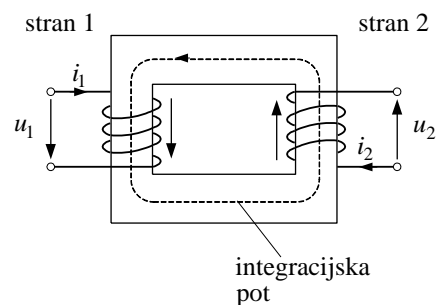
$$\psi_1 = N_1 \phi, \quad (11a)$$

$$\psi_2 = N_2 \phi. \quad (11b)$$

Ker ni vrtničnih tokov, delujejo vzdolž integracijske poti samo amper-ovoji $i_1 N_1$ in $i_2 N_2$. Ker zaradi neskončne vrednosti permeabilnosti železa ($\mu_{\text{Fe}} = \infty$) ni treba upoštevati padca magnetne napetosti, velja: $\sum iN = \theta = 0$ ali



Slika 11 Zanka navitja z enim ovojem



Slika 12 Integracijska pot transformatorja

$$i_1 N_1 + i_2 N_2 = 0. \quad (12)$$

Enačbe 10, 11 in 12, ki opisujejo delovanje idealnega transformatorja, predstavljajo sistem linearnih enačb. V primeru, da so zaradi zunanjih pogojev podane časovno sinusno se spreminjajoče veličine (npr. U_1 podana kot napetost togega omrežja 1 in magnetni sklep $\underline{\Psi} = \hat{\Psi} e^{j\omega t}$), bodo tudi vse druge veličine sinusne. V tem primeru je smiselno, da preidemo na računanje oziroma prikazovanje s kompleksnimi veličinami:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 = j\omega \frac{\underline{\Psi}_1}{\sqrt{2}} = j\omega N_1 \frac{\underline{\Phi}}{\sqrt{2}}, \quad (13a)$$

$$\underline{U}_2 = -\underline{E}_2 = j\omega \frac{\underline{\Psi}_2}{\sqrt{2}} = j\omega N_2 \frac{\underline{\Phi}}{\sqrt{2}}, \quad (13b)$$

$$\underline{I}_1 N_1 + \underline{I}_2 N_2 = 0. \quad (13c)$$

Iz prvih dveh enačb dobimo napetostno prestavo:

$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \frac{N_1}{N_2} \text{ in od tod } \frac{U_1}{U_2} e^{j(\varphi_{u1} - \varphi_{u2})} = \frac{N_1}{N_2} \text{ ter za } \varphi_{u1} = \varphi_{u2} \text{ velja } \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$

Amplitude oziroma efektivne vrednosti napetosti so v enakem sorazmerju kot sorazmerje ovojev, če med napetostma ni faznega premika. To je lastnost napetostne transformacije transformatorja. Razmerje ovojev imenujemo napetostno prestavno razmerje:

$$K_U = \frac{N_1}{N_2}. \quad (14)$$

To prestavno razmerje velja le v idealnem prostem teku, ko zanemarimo padce napetosti. Napetostno prestavno razmerje ovojev je enako kot za idealni transformator (enačba 5).

Iz prvih dveh enačb (13) dobimo še naslednji izraz:

$$\underline{\Phi} = \frac{\sqrt{2} \underline{U}_1}{j\omega N_1} = \frac{\sqrt{2} \underline{U}_2}{j\omega N_2}. \quad (15)$$

V primeru, da je ena od napetosti dana (vsiljena napetost), določa napetost velikost (amplitudo) in fazno lego fluksa. Za amplitudo velja:

$$\hat{\Phi} = \frac{\sqrt{2} U_1}{\omega N_1} = \frac{\sqrt{2} U_2}{\omega N_2}, \quad (16)$$

za fazni kot fluksa pa velja

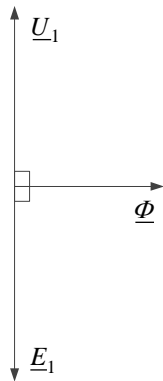
$$\varphi_{\Phi} = \varphi_{u1} - \frac{\pi}{2} = \varphi_{u2} - \frac{\pi}{2} = \varphi_{e1} + \frac{\pi}{2} = \varphi_{e2} + \frac{\pi}{2}. \quad (17)$$

Efektivna vrednost inducirane napetosti v primarnem oziroma sekundarnem navitju je:

$$E_1 = \omega N_1 \frac{\hat{\Phi}}{\sqrt{2}} = 4,44 f N_1 \hat{\Phi}, \quad (18a)$$

$$E_2 = \omega N_2 \frac{\hat{\Phi}}{\sqrt{2}} = 4,44 f N_2 \hat{\Phi}. \quad (18b)$$

Konstanta 4,44 je: $4,44 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} = 4 \frac{\pi}{\sqrt{2}} = 4 \cdot 1,11$ ter 1,11 znani faktor oblike za sinusni časovni potek. Ustrezni kazalčni diagram \underline{U}_1 , \underline{E}_1 in $\underline{\Phi}$ je podan na sliki 13.



Iz njega je zelo nazorno razviden pogoj ravnotežja med vsiljeno napetostjo \underline{U}_1 in proti inducirano napetostjo \underline{E}_1 :

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1.$$

Iz prvih dveh enačb (13) sledi za razmerje magnetnih sklepov:

$$\frac{\underline{\Psi}_1}{\underline{\Psi}_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (19)$$

Slika 13 Kazalčni diagram

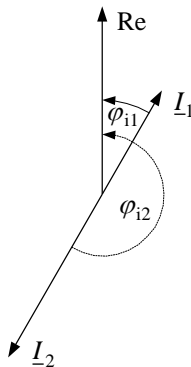
Iz tretje enačbe (13c) dobimo razmerje tokov: $\frac{I_1}{I_2} = -\frac{N_2}{N_1}$ in od tod:

$$K_1 = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (20)$$

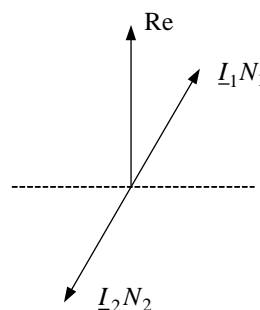
za $\varphi_{i2} = \varphi_{i1} - \pi$.

Amplitudi oziroma efektivni vrednosti tokov sta obratno sorazmerni s številom ovojev, med njima je fazni premik 180° . To je lastnost tokovne transformacije transformatorja.

Na sliki 14 je podan kazalčni diagram tokov za primer $N_1 > N_2$. Iz enačbe (13c) sledi $I_1 N_1 = I_2 N_2$.



Slika 14 Kazalčni diagram tokov



Slika 15 Kazalčni diagram amper-ovojev

Na sliki 15 je prikazan kazalčni diagram amper-ovojev $\underline{I}_1 N_1 = -\underline{I}_2 N_2$ oziroma $\underline{I}_1 N_1 + \underline{I}_2 N_2 = 0$, kar imenujemo tudi pogoj ravnotežja primarnih in sekundarnih amper-ovojev.

2.1.2 Prosti tek in obremenitev idealnega transformatorja z vsiljeno napetostjo

Navitje 1 je priključeno na omrežje toge napetosti \underline{U}_{om} . V prostem teku je navitje 2 odprto, pri obremenitvi pa je sklenjeno preko bremenske upornosti \underline{Z}_b . Na sliki 16 je podana osnovna shema vezave obremenjenega transformatorja, pri čemer pomeni \underline{Z}_b kompleksno upornost bremenskega dvopola.

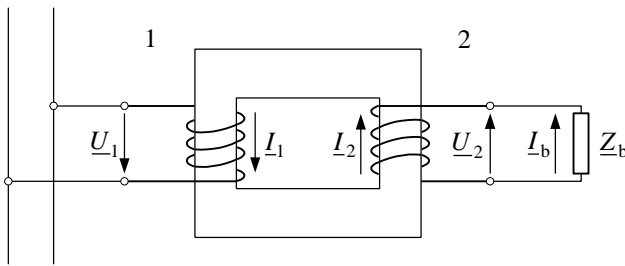
V prostem teku so pogoji obratovanja naslednji:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_{om}, \quad (21a)$$

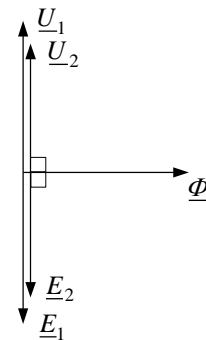
$$\underline{I}_2 = 0 \quad (21b)$$

in ustrezno enačbi (13b) velja za sekundarno navitje:

$$\underline{U}_2 = -\underline{E}_2 = \frac{N_2}{N_1} \underline{U}_1 = -\frac{N_2}{N_1} \underline{E}_1 = j\omega N_2 \frac{\Phi}{\sqrt{2}}. \quad (21c)$$



Slika 16 Shema obremenjenega transformatorja



Slika 17 Kazalčni diagram v prostem teku

Za $\underline{I}_2 = 0$ sledi iz pogoja $\underline{I}_1 N_1 + \underline{I}_2 N_2 = 0$, da je tudi: $\underline{I}_1 = 0$, torej ne teče noben tok prostega teka. Ta presenetljivi pojav je posledica $\mu_{Fe} = \infty$ pri idealnem transformatorju.

Na sliki 17 je prikazan kazalčni diagram idealnega transformatorja z vsiljeno napetostjo omrežja \underline{U}_{om} v prostem teku za primer $N_1 > N_2$.

Pri obremenitvi so naslednji pogoji obratovanja:

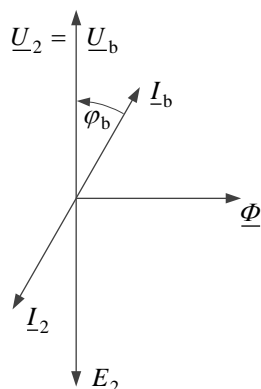
$$\underline{U}_1 = \underline{U}_{om}, \quad (22a)$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_2, \quad (22b)$$

$$\underline{I}_b = -\underline{I}_2, \quad (22c)$$

$$\underline{Z}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{I}_b}. \quad (22d)$$

Bremenski dvopol in sekundarno navitje tvorita zaprt tokovni krog. V tem električnem tokokrogu inducira fluks $\underline{\Phi}$, ki poteka po magnetnem krogu, napetost \underline{E}_2 , ki poganja tok \underline{I}_2 oziroma \underline{I}_b . Tokova \underline{I}_2 in \underline{I}_b sta po dogovoru smiselno pozitivna, tako da sta prirejena isti napetosti $\underline{U}_b = \underline{U}_2$ in v skladu z znanim izrekom zakona o vozliščih $\underline{I}_b = -\underline{I}_2$ se v kazalčnem diagramu pojavita dva tokovna kazalca za sekundarno stran. To je prikazano v kazalčnem diagramu tokov in napetosti sekundarnega navitja na sliki 18 za ohmsko-induktivno obremenitev z $\underline{Z}_b = R_b + jX_b$.



Slika 18 Kazalčni diagram tokov in napetosti sekundarnega navitja za ohmsko-induktivno obremenitev

Pri tem moramo upoštevati izrek o pretoku moči. Električne moči so po smislu pozitivne, če v opazovani element vezja pritekajo (potrošnik), so pa po smislu negativne, če iz opazovanega elementa vezja odtekajo (izvor) in za obravnavano sekundarno navitje torej velja, izraženo s kompleksnimi veličinami:

$$\operatorname{Re}(\underline{U}_b \underline{I}_b^*) > 0 \text{ in } \operatorname{Re}(\underline{U}_2 \underline{I}_2^*) < 0.$$

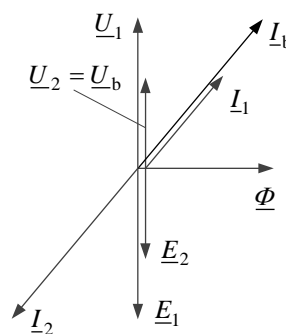
Obremenitev idealnega transformatorja nič ne vpliva na odnose med napetostmi ter na iznos in fazno lego fluksa. Iz prvih dveh enačb (13) sledi pri obremenitvi, da je enaka sekundarna napetost kot v prostem teku (enačba 21c).

Da zadovoljimo pogoju ravnotežja amper-ovojev tudi pri obremenitvi, mora, razen toka \underline{I}_2 v navitju 2, teči še tok \underline{I}_1 v navitju 1, ki bremenske amper-ovoje kompenzira na vrednost nič. Velikost ustreznega primarnega toka sledi iz enačbe (13c):

$$\underline{I}_1 N_1 = -\underline{I}_2 N_2 \text{ oziroma } \underline{I}_1 = -\frac{N_2}{N_1} \underline{I}_2.$$

Mehanizem, ki sproži tok \underline{I}_1 , se za obravnavani ekstremni primer za $\mu_{Fe} = \infty$ težje zasleduje kot pri realnih pogojih. Pri $\mu_{Fe} = \infty$ lahko eksistirajo končne vrednosti fluksa le tako dolgo, dokler je vsota amper-ovojev $\underline{\mathcal{O}} = 0$. Vsako odstopanje od vrednosti $\underline{\mathcal{O}} = 0$ bi imelo za posledico porast fluksa preko vseh meja. Tako bi njegova primarna inducirana napetost ne bila več v ravnotežju z vsiljeno napetostjo \underline{U}_1 . Zato omrežje poganja tok \underline{I}_1 , ki narašča tako dolgo, da je ponovno vzpostavljeno ravnotežje bremenskih amper-ovojev.

Na sliki 19 je prikazan popolni kazalčni diagram idealnega transformatorja z vsiljeno napetostjo na primarni strani (1) in s priključenim bremenskim dvopolom z impedanco $\underline{Z}_b = R_b + jX_b$ na sekundarni strani (2) za primer $N_1 > N_2$.



Za sprejeto in bremenu oddano delovno moč, izraženo s kazalci efektivnih vrednosti, dobimo:

Slika 19 Popolni kazalčni diagram idealnega transformatorja

$$P_1 = \operatorname{Re}(\underline{U}_1 \underline{I}_1^*) = -\operatorname{Re}\left(\frac{N_1}{N_2} \underline{U}_2 \frac{N_2}{N_1} \underline{I}_2^*\right) = -\operatorname{Re}(\underline{U}_2 \underline{I}_2^*) = -P_2 = \operatorname{Re}(\underline{U}_b \underline{I}_b^*) = P_b. \quad (23)$$

S tem je izražena prava ideja transformatorja. Pri idealnem transformatorju se prenaša moč iz omrežja, ki je priključeno na navitje 1, brez izgub v bremenski dvopol, ki je priključen na navitje 2. Pri tem se spremeni nivo napetosti, ustrezno izrazu

$$\underline{U}_2 = \frac{N_2}{N_1} \underline{U}_1, \text{ in tudi velikost toka } \underline{I}_2 = -\frac{N_1}{N_2} \underline{I}_1.$$

2.1.3 Transformirane ali reducirane veličine na sekundarni strani

Risanje kazalčnih diagramov na razpoložljivem prostoru postane problematično, če je prestavno razmerje N_1 / N_2 znatno večje ali manjše od 1. Zato si zamislimo, da ima sekundarno navitje enako število ovojev kot primarno navitje, s čimer dobimo prestavno razmerje 1. V takem sekundarnem navitju seveda ni več dejanskih sekundarnih veličin, temveč njihove transformirane ali reducirane vrednosti, ki ustrezajo številu ovojev $N_2 \equiv N_1$. Te transformirane veličine označujemo s črtico nad njenim simbolom, npr. I' , U' ... Prikazovanje s kazalčnimi diagrami postane neodvisno od dejanskega prestavnega razmerja. Tudi matematična obravnava z uvedbo transformiranih sekundarnih veličin pridobi na enostavnosti prikaza transformatorja kot celote. Transformirane sekundarne veličine napetosti in tokov:

$$U'_2 = \frac{N_1}{N_2} U_2 = K_U U_2, \quad (24a)$$

$$I'_2 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = K_I I_2 = \frac{1}{K_U} I_2. \quad (24b)$$

Z uporabo reduciranih ali transformiranih veličin mora ostati računana moč ista kot pri računanju z dejanskimi veličinami:

$$U'_2 I'_2 = \frac{N_1}{N_2} U_2 \frac{N_2}{N_1} I_2 = U_2 I_2. \text{ Navidezna moč } S'_2 = S_2 \text{ in zato je tudi } P'_2 = P_2.$$

Z uvedbo transformiranih veličin na sekundarni strani dobijo do sedaj obravnavane enačbe naslednje formulacije:

$$\underline{U}_1 = j\omega \frac{\Psi_1}{\sqrt{2}} = j\omega N_1 \frac{\Phi}{\sqrt{2}}, \quad (25a)$$

$$\underline{U}'_2 = j\omega \frac{N_1}{N_2} \frac{\Psi_2}{\sqrt{2}} = j\omega \frac{N_1}{N_2} N_2 \frac{\Phi}{\sqrt{2}} = j\omega N_1 \frac{\Phi}{\sqrt{2}}. \quad (25b)$$

Tako dobimo za idealni transformator razliko obeh enačb: $\underline{U}_1 - \underline{U}'_2 = 0$.

Iz druge enačbe (25b) sledi transformirana vrednost števila sekundarnih magnetnih sklepov:

$$\Psi'_2 = \frac{N_1}{N_2} \Psi_2 = K_U \Psi_2 \quad (26)$$

in je $\Psi_1 - \Psi'_2 = 0$.

Za tokovno enačbo (13c) dobimo z uvedbo I'_2 iz enačbe (24b) $\underline{I}_1 N_1 + \underline{I}'_2 N_1 = 0$ končno obliko tokovne enačbe:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = 0. \quad (27)$$

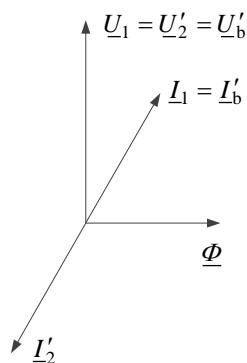
Pri obremenitvi s kompleksno upornostjo \underline{Z}_b in ustrezno obratovalnim pogojem (22) velja:

$$\underline{U}'_b = \frac{N_1}{N_2} \underline{U}_b \quad \text{in} \quad \underline{I}'_b = \frac{N_2}{N_1} \underline{I}_b$$

ter izračunamo transformirano upornost bremena

$$\underline{Z}'_b = \frac{\underline{U}'_b}{\underline{I}'_b} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \underline{Z}_b = K_U^2 \underline{Z}_b. \quad (28)$$

Na sliki 20 je prikazan popolni kazalčni diagram obremenjenega idealnega transformatorja z vsiljeno napetostjo in uvedbo transformiranih veličin sekundarne strani.



Slika 20 Kazalčni diagram obremenjenega idealnega transformatorja

2.2 Delovanje realnega transformatorja

Razlike med realnim in idealnim transformatorjem so:

- permeabilnost magnetnega kroga ima končne vrednosti $\mu_{Fe} \neq \infty$, s tem pa tudi velja

$$\oint_K \vec{H}_{Fe} \cdot d\vec{l} = \sqrt{2} \underline{I}_1 N_1 + \sqrt{2} \underline{I}_2 N_2 \neq 0, \text{ tako da velja za tokova vsota } \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 \neq 0;$$

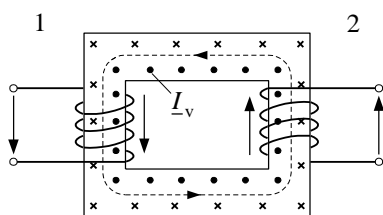
- magnetenje železa ne poteka po magnetilni krivulji, ampak po histerezni zanki, zato nastopijo histerezne izgube P_{Feh} v železnem jedru;
- zaradi nelinearnosti magnetenja železa $B = f(H)$ se lahko pojavijo višje harmonske komponente;
- zaradi končnih vrednosti električne prevodnosti železa $\gamma_v \neq \infty$ se pojavijo vrtilni tokovi in izgube vrtilnih tokov P_{Fev} v železnem jedru,
- permeabilnost obdajajočega zraka ima končno vrednost $\mu_{zr} = \mu_0$, zaradi česar magnetni pretok ne poteka samo v predpisanem magnetnem krogu (jedru), temveč tudi v obdajajočem prostoru. Pojavijo se magnetna polja, ki so sklenjena le z enim delom navitja, tako da gresta skozi navitji različna fluksa $\Phi_2 \neq \Phi_1$ in s tem tudi velja neenakost $\Psi_1 / \Psi'_2 \neq N_1 / N_2$. Z uvedbo transformirane sekundarne veličine $\Psi'_2 = (N_1 / N_2) \Psi_2$ velja: $\Psi_1 - \Psi'_2 = \Psi_\sigma > 0$, to pomeni, da med obema navitjema nastopijo razsipana polja.
- Zaradi končne vrednosti električne prevodnosti vodnikov navitij $\gamma_v \neq \infty$, se pojavijo ohmske upornosti navitij in s tem ustrezni ohmski padci napetosti $R_1 I_1$ in $R_2 I_2$ ter joulske izgube v navitjih $P_{Cu} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2$;
- zaradi razsipanih polj, ki prečkajo eventualne masivne vodnike navitij, lahko nastopijo še dodatne izgube zaradi vrtilnih tokov v vodnikih P_{Cud} ;
- ohmski padci napetosti in razsipanje fluksov povzroči, da je $\underline{U}_1 - \underline{U}'_2 \neq 0$.

V osnovni konstrukciji enofaznega transformatorja so poleg že znanih smernih puščic dodatno s križci in pikami označene smeri vrtilnih tokov v jedru (slika 21). Vsoto vseh tokov označimo z I_v , ki teče po namišljenem enem ovoju (jedru) in tvori amper-ovoje $I_v \cdot l = \underline{I}_v$.

Prikaz delovanja realnega transformatorja z železnim jedrom ob upoštevanju vseh vplivov je zelo težaven. Značilni sta dve obravnavi, ki delno upoštevata lastnosti idealnega transformatorja:

- tokovno idealni realni transformator in
- napetostno idealni realni transformator.

Realni transformator se za specifično obratovalno stanje (prosti tek, obremenitev, kratki stik) v katerem se znajde, bolj ali manj približa eni od teh predpostavk.



Slika 21 Enofazni transformator

Veljajo naslednje enačbe:

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{d\Psi_1}{dt}, \quad (29a)$$

$$\underline{U}_2 = R_2 \underline{I}_2 + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{d\Psi_2}{dt}, \quad (29b)$$

$$\underline{I}_1 N_1 + \underline{I}_2 N_2 + \underline{I}_v = \frac{\Theta}{\sqrt{2}}. \quad (29c)$$

2.2.1 Delovanje tokovno idealnega realnega transformatorja

Transformator je tokovno idealen, če velja značilnost:

$$\underline{I}_1 N_1 + \underline{I}_2 N_2 = 0$$

oziroma s transformiranimi veličinami:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = 0,$$

za kar mora biti izpolnjen predpogoj: $\mu_{Fe} = \infty$ in $\gamma_{Fe} = 0$. Nasprotno pa velja $\mu_{zr} = \mu_0 \neq 0$ in $\gamma_v \neq \infty$. Torej se pojavi razsipanje med obema navitjema ter ohmski padci napetosti, tako da je:

$\underline{U}_1 - \underline{U}'_2 \neq 0$ in glede napetosti transformator ni idealen.

Splošne enačbe

Zaradi $\mu_{Fe} = \infty$ in $\mu_{zr} = \mu_0$ je sistem linearen:

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + j\omega \frac{\Psi_1}{\sqrt{2}}, \quad (30a)$$

$$\underline{U}_2 = R_2 \underline{I}_2 + j\omega \frac{\Psi_2}{\sqrt{2}}, \quad (30b)$$

$$\underline{I}_1 N_1 + \underline{I}_2 N_2 = 0. \quad (30c)$$

Odstopanje napetosti postane očitno z uvedbo transformiranih veličin:

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + j\omega \frac{\Psi_1}{\sqrt{2}}, \quad (31a)$$

$$\underline{U}'_2 = R'_2 \underline{I}'_2 + j\omega \frac{\Psi'_2}{\sqrt{2}}, \quad (31b)$$

$$\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = 0. \quad (31c)$$

Zaradi pogoja, da morajo transformirane veličine dati enako vrednost jouskih izgub kot dejanske veličine v sekundarnem navitju, lahko izračunamo transformirano vrednost ohmske upornosti sekundarnega navitja R'_2 iz $I_2'^2 R'_2 = I_2^2 R_2$ in od tod:

$$R'_2 = \left(\frac{I_2}{I'_2} \right)^2 R_2 = K_U^2 R_2. \quad (32)$$

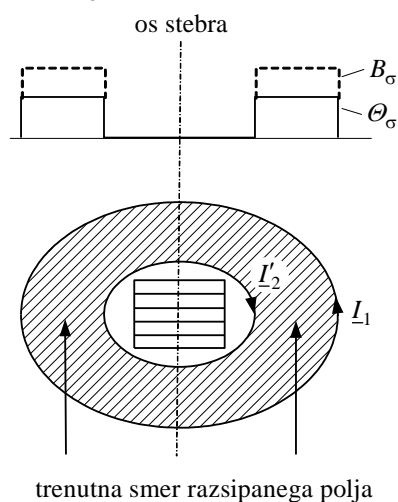
Z upoštevanjem tretje enačbe (29c), tj. $I'_2 = -I_1$, dobimo odstopanje od idealnih razmer:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 - \underline{U}'_2 &= R_1 \underline{I}_1 - R'_2 \underline{I}'_2 + j\omega(\underline{\Psi}_1 - \underline{\Psi}'_2) / \sqrt{2} = \\ &= (R_1 + R'_2) \underline{I}_1 + j\omega(\underline{\Psi}_1 - \underline{\Psi}'_2) / \sqrt{2} = \underline{U}_r + \underline{U}_\sigma. \end{aligned} \quad (33)$$

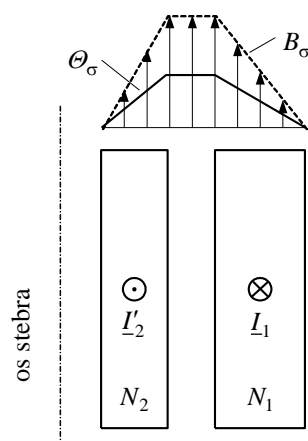
Del $\underline{U}_r = (R_1 + R'_2) \underline{I}_1$, ki je v fazi s tokom je ohmski padec napetosti. Če vpeljemo s strani 1 gledano skupno ohmsko upornost $R = R_1 + R'_2$, dobimo: $\underline{U}_r = R \underline{I}_1$.

Del $\underline{U}_\sigma = j\omega(\underline{\Psi}_1 - \underline{\Psi}'_2) / \sqrt{2}$, ki prehiteva sklepe $\underline{\Psi}_1 - \underline{\Psi}'_2$ za 90° , je induktivni padec napetosti. Ker je $\underline{I}_1 = -(N_2 / N_1) \underline{I}_2 = -\underline{I}'_2$, si amper-ovoji navitij v stebru jedra nasprotujejo in magnetni sklep $\underline{\Psi}_1 - \underline{\Psi}'_2$ eksistira samo s poljem oziroma fluksom v zračnem prostoru. Vrednost gostote magnetnega pretoka razsipanega fluksa v zraku B_σ je sorazmerna \underline{I}_1 .

Ponazoritev razsipanega polja je podana na sliki 22. Vsako navitje je prikazano z enim samim ovojem in v preseku steber jedra. Šrafirano ploskev A_σ sekajo gostotnice B_σ in razsipani fluks je $\Phi_\sigma = A_\sigma B_\sigma$. S polno črto so prikazani amper-ovoji razsipanja Θ_σ , s črtkano črto oblika krivulje B_σ .



Slika 22 Ponazoritev razsipanega polja



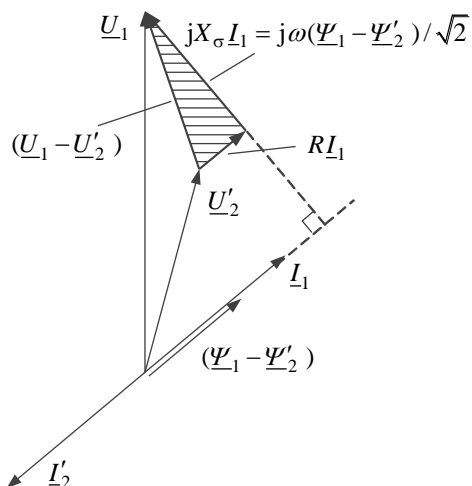
Slika 23 Ponazoritev razsipanega polja realnega navitja

Pri pravih navitjih, ki imajo končno debelino, sta slika amper-ovojev Θ_σ skupnega razsipanega in slika krivulje B_σ podani nad presekom navitij (slika 23) – polna črta Θ_σ , črtkana črta B_σ .

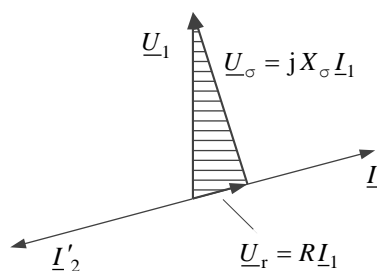
Velikost magnetnega sklepa $\underline{\Psi}_1 - \underline{\Psi}'_2$ dobimo z integracijo razdelitve gostote B_σ preko ploskve preseka navitij. Ker velja proporcionalnost med amplitudami, lahko prikažemo magnetni sklep razsipanega tudi v naslednji obliki: $\underline{\Psi}_1 - \underline{\Psi}'_2 = L_\sigma \underline{I}_1 \sqrt{2}$, kjer je L_σ s strani 1 gledana skupna induktivnost razsipanega transformatorja in njej prirejena reaktanca $X_\sigma = \omega L_\sigma$ je skupna reaktanca razsipanega. Torej lahko pišemo:

$$\underline{U}_1 - \underline{U}'_2 = \underline{U}_r + \underline{U}_\sigma = (R + jX_\sigma)I_1. \quad (34)$$

Enačbi (35) ustreza kazalčni diagram tokovno idealnega realnega transformatorja s primarno vsiljeno napetostjo \underline{U}_1 in na sekundarni strani obremenjenega z dvopolom, čigar impedanca bremena je $\underline{Z}_b = R_b + jX_b$ – slika 24.



Slika 24 Kazalčni diagram tokovno idealnega realnega transformatorja



Slika 25 Kazalčni diagram kratkosklenjenega transformatorja

$\underline{U}_1 - \underline{U}'_2$ je hipotenuza pravokotnega trikotnika, katerega kateta $R\underline{I}_1$ je v fazi s tokom, kateta $X_\sigma\underline{I}_1$ je pravokotna na kazalec toka. To je Kappov trikotnik, njegove stranice so sorazmerne toku.

Z $\underline{I}_1 = -\underline{I}'_2$ in $\underline{U}'_2 = \underline{U}'_b$ je transformatorju dovedena moč:

$$P_1 = \text{Re}(\underline{U}_1 \underline{I}_1^*) = \text{Re}(\underline{U}'_b \underline{I}'_b^* + (R_1 + R'_2) \underline{I}_1 \underline{I}_1^*) = P_b + R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 = P_b + P_{\text{Cu}}, \quad (35)$$

ki razen moči, dovedene bremenu, krije še izgube v navitju $P_{\text{Cu}} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2$ (izgub v železu tukaj ni).

Kratki stik tokovno idealnega realnega transformatorja nastopi, ko je sekundarno navitje kratko vezano, na primarno navitje pa je vsiljena napetost omrežja U_{om} . Tedaj velja:

$\underline{U}_1 = U_{\text{om}}$ ter $\underline{U}_2 = 0$ in enačba (34) preide v obliko

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_r + \underline{U}_\sigma = (R + jX_\sigma)I_1. \quad (36)$$

V kratkem stiku pokriva \underline{U}_1 padca napetosti \underline{U}_r in \underline{U}_σ ter postane hipotenuza Kappovega trikotnika. To je prikazano v kazalčnem diagramu kratkosklenjenega transformatorja na sliki 25.

Kratkostični tok iz enačbe (36):

$$\underline{I}_1 = -\underline{I}'_2 = \frac{\underline{U}_1}{R + jX_\sigma}. \quad (37)$$

Kratkostična tokova I_{1k} in I_{2k} sta pri vsiljeni nazivni napetosti U_{1N} večja od nazivnih bremenskih tokov I_{1N} in I_{2N} pri nazivni obremenitvi v razmerju povečanja Kappovega trikotnika:

$$\frac{I_{1k}}{I_{1N}} = \frac{U_{1N}}{\left| \underline{U}_{1N} - \underline{U}'_2 \right|}.$$

V kratkem stiku realnega transformatorja se najbolj približamo pogoju $\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = 0$ oziroma $\underline{I}_1 = -\underline{I}'_2$. Torej je kratkosklenjeni realni transformator praktično tokovno zelo idealen.

Impedanca, ki omejuje kratkostični tok se imenuje kratkostična impedanca \underline{Z}_k in iz enačbe (37) sledi:

$$\underline{Z}_k = R + jX_\sigma. \quad (38)$$

Torej lahko omejujemo kratkostični tok s povečano upornostjo R transformatorja, kar pa bi povzročalo velike jouske izgube v normalnem obratovanju. Zato raje izvedemo to s povečano $X_\sigma = \omega L_\sigma$. Skupna induktivnost razsipanja L_σ se da spreminjati z ustrezno konstrukcijo navitij.

2.2.2 Delovanje napetostno idealnega realnega transformatorja

Realni transformator je napetostno idealen, če veljajo naslednje značilnosti:

$$\underline{U}_1 - \underline{U}'_2 = 0 \text{ ob potrebnih pogojih}$$

$$\mu_x = 0 \quad \text{in} \quad \gamma_v = \infty$$

$$\mu_{Fe} \neq \infty \quad \text{ter} \quad \gamma_{Fe} \neq 0.$$

To pomeni, da eksistirajo izgube v železnem jedru in eventualne višje harmonske komponente magnetilnih amper-ovojev oziroma magnetilnega toka zaradi nelinearnosti stvarne magnetilne krivulje transformatorskega železnega jedra. Padcev električne napetosti ni, zato velja:

$$\Psi_1 = N_1 \Phi \quad \text{in} \quad \Psi_2 = N_2 \Phi$$

in napetostni enačbi dobita naslednji izraz

$$u_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt},$$

$$u_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt}.$$

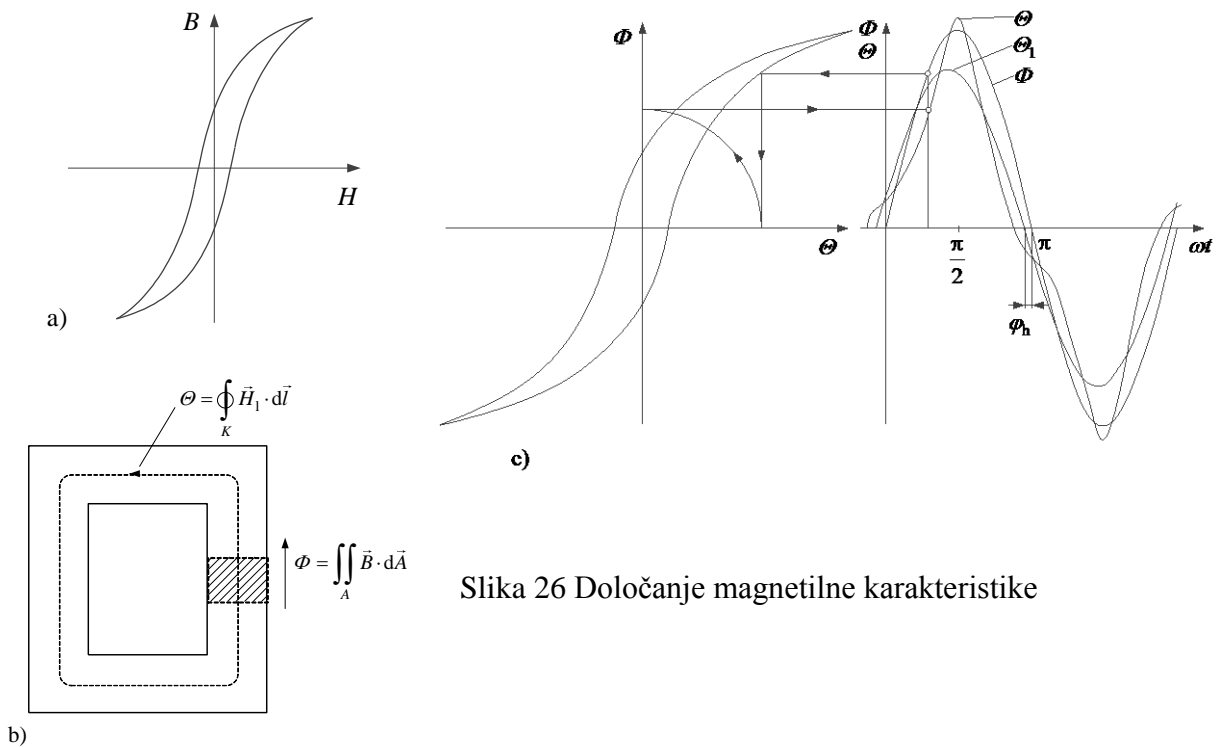
Pri obratovanju transformatorja na togem omrežju, ki ima napetost sinusne oblike $u_1 = \hat{U}_1 \cos(\omega t + \varphi_{u1})$, je tudi magnetni pretok časovno sinusna oziroma kosinusna funkcija in je podobno kot pri idealnem transformatorju po velikosti in fazi diktiran od vsiljene napetosti.

$$\phi = \frac{\hat{U}_1 \cos(\omega t + \varphi_{u1} - \pi/2)}{\omega N_1} = \hat{\Phi} \sin(\omega t + \varphi_{u1}). \quad (39)$$

Pojavi magnetenja pri obratovanju na togem omrežju

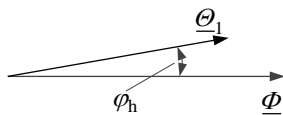
Magnetilna krivulja železa $B = f(H)$ uporabljenega materiala (slika 26a) podaja skupno z geometrijskimi dimenzijami jedra in definicijami $\Phi = \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$ ter $\Theta = \oint_K \vec{H}_1 \cdot d\vec{l}$ (slika 26b) magnetilno karakteristiko: $\Phi = f(\Theta)$ magnetnega kroga transformatorja (slika 26c).

Toga sinusna napetost diktira časovno sinusni potek magnetnega pretoka (enačba 39). Zaradi nelinearne dinamične magnetilne karakteristike $\Phi = f(\Theta)$ so za nastanek tega fluksa potrebni nesinusni vzbujalni amper-ovoji (slika 26c).

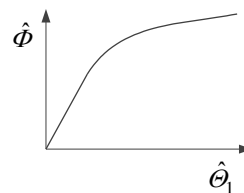


Slika 26 Določanje magnetilne karakteristike

Funkcija $\Theta = f(t)$ ima razen osnovnega vala še višje harmonske valove lihih frekvenc ($\nu = 3, 5, 7, \dots$). Osnovni val $\Theta_1 = f(t)$ prehiteva dejanske amper-ovoje $\Theta = f(t)$ oziroma magnetni pretok Φ za kot $\varphi_h = \varphi_\Theta - \varphi_\Phi$ (slika 27).



Slika 27 Fazni premik med Θ_1 in Φ



Slika 28 Magnetilna karakteristika

Med amplitudama $\hat{\Phi}$ in $\hat{\Theta}_1$ velja soodvisnost, glede na sliko 28, ki ima karakter nasičenja. Tudi kot φ_h je nelinearna funkcija vzbujanja, odvisen od nasičenja magnetnega kroga.

Histerezne izgube v jedru

$$P_{\text{Feh}} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \Theta \, d\Phi = f \int_t^{t+T} \Theta \, d\Phi = f(f, \Phi). \quad (40a)$$

Ploskev histerezne zanke je sorazmerna amplitudi fluksa $\hat{\Phi}$ in približno velja:

$$P_{\text{Feh}} \propto f \hat{\Phi}^2.$$

Vrtinčni tokovi v jedru

Zaključena tokovnica vrtinčnega toka v jedru (v posameznih lamelah jedra) je kratkostična zanka z napetostno enačbo $0 = R_v \underline{I}_v - \underline{E}_v$ za $\underline{E}_v = -j\omega \underline{\Phi} / \sqrt{2}$ bo $\underline{I}_v = \underline{E}_v / R_v = -j(\omega / R_v) \underline{\Phi} / \sqrt{2}$. Ta tok v jedru prispeva k amper-ovojem integracijske poti skozi magnetno jedro (število ovojev $N_{\text{vrt}} = 1$):

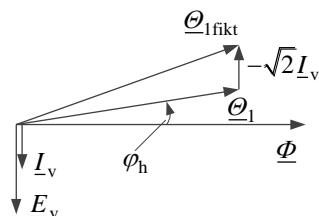
$$\underline{\Theta}_1 = (\underline{I}_1 N_1 + \underline{I}_2 N_2 + \underline{I}_v) \sqrt{2}. \quad (41a)$$

Amper-ovoji $\underline{\Theta}_1$ so po amplitudi in fazi, preko magnetilne karakteristike magnetnega kroga, določeni samo s fluksom $\underline{\Phi}$.

Enako velja v primeru konstantne frekvence tudi za vrtinčni tok. Zato je smiselno, da združimo $\underline{\Theta}_1$ in \underline{I}_v v skupne fiktivne amper-ovoje, ki jih ustvarjata samo tokova obeh navitij \underline{I}_1 in \underline{I}_2 :

$$\underline{\Theta}_{\text{fikt}} = \underline{\Theta}_1 - \sqrt{2} \underline{I}_v = \sqrt{2} \underline{I}_1 N_1 + \sqrt{2} \underline{I}_2 N_2. \quad (42)$$

Na sliki 29 je podan ustrezni kazalčni diagram z upoštevanjem vrtinčnega toka.



Slika 29 Kazalčni diagram

Izgube vrtinčnih tokov v jedru

$$P_{\text{Fev}} = I_v^2 R_v = \left(\frac{\omega \hat{\Phi}}{R_v \sqrt{2}} \right)^2 R_v = \frac{\omega^2}{2R_v} \hat{\Phi}^2 = f(f, \hat{\Phi})^2 \quad (40b)$$

Skupne izgube magnetenja jedra

$$P_{\text{Fe}} = P_{\text{Feh}} + P_{\text{Fev}} = f(f, \hat{\Phi}) \quad (40c)$$

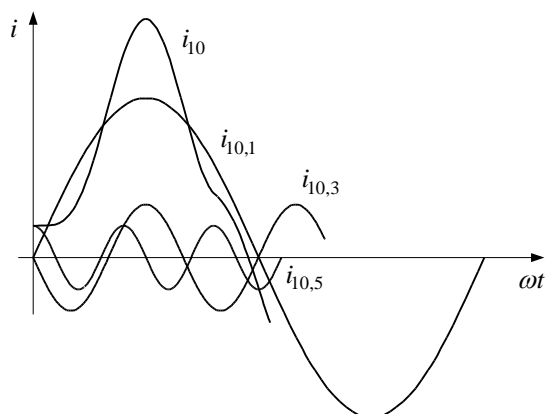
Tok prostega teka transformatorja

Pri $i_2 = 0$ nastopi v primarnem navitju tok prostega teka i_{10} , ki vsebuje tudi višje harmonske komponente, ustrezno poteku krivulje magnetilnih amper-ovojev $\Theta = f(t)$.

Vrtinčni tok je sinusne oblike in osnovne frekvence. Vpliva torej samo na osnovni val ($\nu = 1$) vzbujanja $i_{10} = ((\theta_1 - i_\nu) + \theta_3 + \theta_5 + \dots + \theta_\nu) / N_1$ in s tem na tok prostega teka (slika 30), tj. na $i_{10,1}$.

Trenutna vrednost toka prostega teka je:

$$i_{10} = i_{10,1} + i_{10,3} + i_{10,5} + \dots + i_{10,\nu}. \quad (43)$$



Slika 30 Oblika toka prostega teka

Če zanemarimo višje harmonske komponente amper-ovojev vzbujanja oziroma toka prostega teka, imamo samo sinusne veličine osnovne frekvence. Torej lahko uporabljamo prikaz s kompleksnimi vrednostmi in postavimo ustrezne enačbe napetostno idealnega realnega transformatorja.

Napetostni enačbi:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 = j\omega \frac{\Psi_1}{\sqrt{2}} = j\omega N_1 \frac{\Phi}{\sqrt{2}}, \quad (45a)$$

$$\underline{U}_2 = -\underline{E}_2 = j\omega \frac{\Psi_2}{\sqrt{2}} = j\omega N_2 \frac{\Phi}{\sqrt{2}} \quad (45b)$$

oziroma transformirana vrednost za \underline{U}_2 je

$$\underline{U}'_2 = -\underline{E}'_2 = j\omega \frac{\Psi'_2}{\sqrt{2}} = j\omega N_1 \frac{\Phi}{\sqrt{2}}. \quad (45c)$$

Od tod sledi:

$$\underline{U}_1 - \underline{U}'_2 = 0, \text{ tj. napetostno idealno,}$$

$$\Psi_1 - \Psi'_2 = 0 \text{ in ni razsipanah polj.}$$

Ravnotežje amper-ovojev magnetnega kroga je dano z:

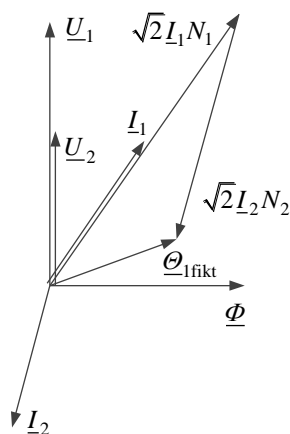
$$\underline{I}_1 N_1 + \underline{I}_2 N_2 = \frac{\Theta_1}{\sqrt{2}} - \underline{I}_\nu$$

oziroma s transformiranimi vrednostmi

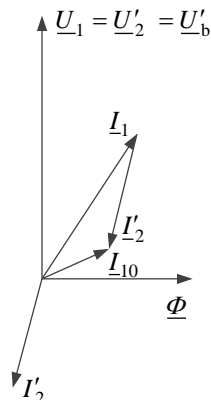
S Fourierjevo harmonsko analizo dobimo amplitude sinusnih funkcij $\hat{I}_{10,n}$ in od tod efektivne vrednosti $I_{10,n} = \hat{I}_{10,n} / \sqrt{2}$ in

$$I_{10} = \sqrt{I_{10,1}^2 + I_{10,3}^2 + I_{10,5}^2 + \dots + I_{10,n}^2}. \quad (44)$$

Vsaka sprememba I_2 povzroči spremembo I_1 , da je $I_{10} = \text{konst.}$. V primerjavi z idealnim transformatorjem dobi tok I_1 še dodatno delovno komponento, ki pokriva izgube v železu in dodatno jalovo komponento, ki je potrebna za ustvarjanje magnetnega pretoka (slika 33).



Slika 32 Kazalčni diagram pri obremenitvi



Slika 33 Kazalčni diagram pri obremenitvi (transformirane vrednosti)

Z $\underline{U}'_2 = \underline{U}'_b$ in $-\underline{I}'_2 = \underline{I}'_b$ velja za moči:

$$P_1 = \text{Re}(\underline{U}_1 \underline{I}_1^*) = \text{Re}(\underline{U}_b \underline{I}_b^* + \underline{U}_1 \underline{I}_{10}^*) = P_b + P_{\text{mag}} = P_b + P_{\text{Fe}}.$$

Dovedena moč P_1 pokriva moč porabnika P_b in izgube v železu P_{Fe} , ne pa tudi izgub v navitju. Te so pri napetostno idealnem transformatorju enake nič.

2.3 Analitična obravnava

2.3.1 Splošne enačbe za stacionarno obratovanje

V prejšnjih poglavjih smo si pojasnili delovanje transformatorja pri raznih približkih in pri tem preučili fizikalni mehanizem delovanja. V naslednjih poglavjih je prikazana izpeljava zaključene analitične obravnave. Vseh vplivov ne bomo mogli upoštevati, zato bomo tudi te raziskave izvedli z določenimi približki.

Glede lastnosti materialov moramo predpostaviti:

$$\mu_{\text{Fe}} = \text{konst.}, \quad \rightarrow \text{ni histerezne zanke} \quad \text{ter } \gamma_{\text{Fe}} = 0 \rightarrow \text{torej } P_{\text{Fe}} = 0$$

$$\mu_{\text{zr}} = \mu_0 = \text{konst.} \quad \text{in } \gamma_v = \text{konst.}$$

Takšen transformator ne bo idealen niti glede napetosti niti glede tokov.

Zaradi konstantne μ_{Fe} vladajo linearne magnetne razmere, ni histerezne zanke in zaradi $\gamma_{\text{Fe}} = 0$ tudi ni vrtilčnih tokov in njihovih izgub v železnem jedru. Tak transformator nima izgub v železu.

Na ta način dobimo linearno teorijo transformatorja brez izgub v železu (slika 34).



Slika 34 Linearna odvisnost $B = f(H)$ oziroma $\Phi = f(\Theta)$

Zaradi predpostavljene linearnosti magnetnih razmerij (slika 34) veljajo linearni odnosi med magnetnimi sklepi in tokovi, zato jih lahko napišemo v naslednji obliki:

$$\underline{\Psi}_1 = L_1 \sqrt{2} \underline{I}_1 + L_{12} \sqrt{2} \underline{I}_2, \quad (47a)$$

$$\underline{\Psi}_2 = L_{21} \sqrt{2} \underline{I}_1 + L_2 \sqrt{2} \underline{I}_2. \quad (47b)$$

L_1 in L_2 sta lastni induktivnosti navitij 1 in 2, L_{21} in L_{12} sta medsebojni induktivnosti teh navitij in velja $L_{21} = L_{12}$.

Obravnavamo stacionarna stanja, kjer so vse veličine časovno sinusne in zato lahko preidemo na prikazovanje s kompleksnimi vrednostmi. Z upoštevanjem enačb (47) in (27) in z uvedbo reaktanc $X_{12} = \omega L_{12} = X_{21} = \omega L_{21}$ dobimo novi napetostni enačbi:

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + j\omega \frac{\underline{\Psi}_1}{\sqrt{2}} = R_1 \underline{I}_1 + jX_{11} \underline{I}_1 + jX_{12} \underline{I}_2, \quad (48a)$$

$$\underline{U}_2 = R_2 \underline{I}_2 + j\omega \frac{\underline{\Psi}_2}{\sqrt{2}} = R_2 \underline{I}_2 + jX_{21} \underline{I}_1 + jX_{22} \underline{I}_2. \quad (48b)$$

Pri obravnavi tokovno idealnega transformatorja smo vpeljali pojem celotne ali skupne reaktance razsipanja X_σ , ki je soodgovorna za velikost kratkostičnih tokov. Pri dovolj visoki frekvenci bo veljalo $R \ll X_\sigma$ in kratkostični tok bo določala samo reaktanca X_σ . Pri velikih energetskih transformatorjih velja $R \ll X_\sigma$ že pri omrežni frekvenci $f = 50$ Hz.

Idealni kratki stik je obratovalno stanje, ki je okarakterizirano z $\underline{U}_2 = 0$ in $\omega \rightarrow \infty$ ali $R_1 = R_2 = 0$ ter dobimo iz enačbe (48a in b), če lahko zanemarimo ohmske upornosti:

$$0 = jX_{21} \underline{I}_1 + jX_{22} \underline{I}_2 \rightarrow \underline{I}_2 = -\frac{X_{21}}{X_{22}} \underline{I}_1.$$

Če s to vrednostjo eliminiramo tok \underline{I}_2 v prvi enačbi (48a) za $R_1 = 0$, dobimo končno:

$$\underline{U}_1 = j \left(X_{11} - \frac{X_{12}^2}{X_{22}} \right) \underline{I}_1, \quad (49)$$

to ustreza prejšnjemu razmišljanju in lahko iz izraza

$$\underline{U}_1 = jX_\sigma \underline{I}_1 \quad (50)$$

definiramo za skupno reaktanco razsipanja naslednji izraz

$$X_{\sigma} = X_1 - \frac{X_{12}^2}{X_2}. \quad (51)$$

Zadnjo enačbo lahko zapišemo tudi na naslednji način:

$$X_{\sigma} = X_1 \left(1 - \frac{X_{12}^2}{X_1 X_2} \right)$$

in dobimo Blondelov faktor celotnega razsipanja

$$\sigma = 1 - \frac{X_{12}^2}{X_1 X_2} \quad (52)$$

ter

$$X_{\sigma} = \sigma X_1. \quad (53)$$

Faktor razsipanja zajema vrednosti v območju $0 \leq \sigma \leq 1$. Pri tem pomeni v primeru $\sigma = 1$, da je pri idealnem kratkem stiku po enačbi (50) enaka reaktanca kot v prostem teku oziroma obe navitji sta popolnoma nesklenjeni. Nasprotno je pri $\sigma = 0$ za $\underline{U}_2 = 0$ tudi $\underline{U}_1 = 0$, torej $d\underline{\Psi}_2/dt = 0$ ali $d\underline{\Psi}_1/dt = 0$ za $\underline{\Psi}_2 = 0$ in tudi $\underline{\Psi}_1 = 0$, v tem primeru imamo popolni sklep. Iz tega primera lahko izpeljemo izraz za X_{12} :

$$0 = X_1 \left(1 - \frac{X_{12}^2}{X_1 X_2} \right) \rightarrow 0 = X_1 X_2 - X_{12}^2 \text{ in od tod } X_{12} = \sqrt{X_1 X_2}.$$

Transformatorji normalnih konstrukcij imajo faktor razsipanja z vrednostjo približno nič ($\sigma \rightarrow 0$).

Enačbe s transformiranimi veličinami navitja 2

Z že znanimi transformiranimi veličinami:

$$\underline{U}'_2 = K_U \underline{U}_2, \quad \underline{I}'_2 = K_I \underline{I}_2, \quad \underline{\Psi}'_2 = K_U \underline{\Psi}_2 \quad (54)$$

lahko zelo enostavno prikažemo odstopanja od idealnega transformatorja

$$(\underline{U}_1 - \underline{U}'_2), (\underline{\Psi}_1 - \underline{\Psi}'_2) \text{ in } (\underline{I}_1 - \underline{I}'_2).$$

Sedaj uvedemo v splošne enačbe (48) izraze iz (54) in dobimo:

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + j\omega \frac{\underline{\Psi}_1}{\sqrt{2}} = R_1 \underline{I}_1 + jX_{11} \underline{I}_1 + jX'_{12} \underline{I}'_2, \quad (55a)$$

$$\underline{U}'_2 = R'_2 \underline{I}'_2 + j\omega \frac{\underline{\Psi}'_2}{\sqrt{2}} = R'_2 \underline{I}'_2 + jX'_{21} \underline{I}_1 + jX'_2 \underline{I}'_2. \quad (55b)$$

Pri tem smo uvedli definicije:

$$X'_{12} = X'_{21} = K_U X_{12}, \quad X'_2 = K_U^2 X_2 \quad \text{in} \quad R'_2 = K_U^2 R_2. \quad (56)$$

Odstopanje od napetostno idealnega transformatorja dobimo neposredno iz enačb (55a in b):

$$\underline{U}_1 - \underline{U}'_2 = R_1 \underline{I}_1 - R'_2 \underline{I}'_2 + j\omega(\underline{\Psi}_1 - \underline{\Psi}'_2) / \sqrt{2}, \quad (57)$$

pri čemer je $(\underline{\Psi}_1 - \underline{\Psi}'_2)$ število magnetnih sklepov celotnega razsipanja med obema navitjema.

V primeru idealnega kratkega stika, ko velja $\underline{U}_2 = 0$ in upornost kratkega stika $R_k = 0$, sledi iz enačb (49) in (57):

$$\underline{U}_1 = j\omega(\underline{\Psi}_1 - \underline{\Psi}'_2) / \sqrt{2} = jX_1 \left(1 - \frac{X_{12}^2}{X_1 X_2} \right) \underline{I}_1,$$

torej

$$\omega(\underline{\Psi}_1 - \underline{\Psi}'_2) / \sqrt{2} = X_1 \left(1 - \frac{X_{12}^2}{X_1 X_2} \right) \underline{I}_1 = X_\sigma \underline{I}_1.$$

Pri idealnem kratkem stiku je celotno razsipanje med obema navitjema določeno s skupno reaktanco razsipanja X_σ po enačbi (51).

2.3.2 Nadomestno vezje transformatorja

Resnični transformator z dvema galvansko ločenima navitjema, tj. z ločenima tokokrogoma, pretvorimo v vezje, kjer sta tokokroga galvansko povezana.

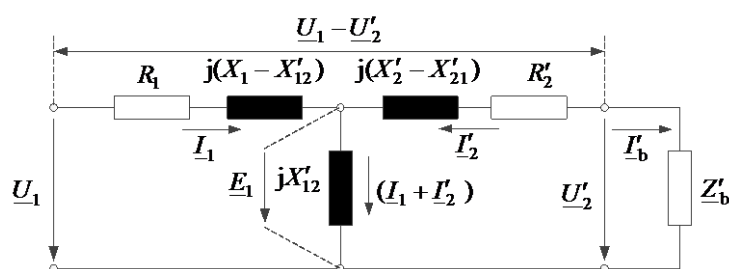
Enačbi (55a in b) lahko čisto formalno postavimo kot izrek o zanki za neko vezje, ki ima dve zanki z eno skupno vejo. Poskrbeti moramo, da se v obeh enačbah pojavi padec napetosti na skupni veji. Pri tem moramo paziti, da prevaja ta veja, v skladu z zakonom o vozliščih, na eni od obeh spojnih točk dveh zank vsoto (ali diferenco) obeh tokov. Ostali členi obeh enačb smejo biti potem odvisni le še od lastnega toka.

Študij enačb (55) pokaže, da to dosežemo, če dodamo prvi enačbi $\pm jX'_{12} \underline{I}_1$ in drugi enačbi $\pm jX'_{21} \underline{I}'_2$. S smiselnim združevanjem dobimo:

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + j(X_1 - X'_{12}) \underline{I}_1 + jX'_{12}(\underline{I}_1 + \underline{I}'_2) = R_1 \underline{I}_1 + j(X_1 - X'_{12}) \underline{I}_1 - \underline{E}_1, \quad (58a)$$

$$\underline{U}'_2 = R'_2 \underline{I}'_2 + j(X'_2 - X'_{21}) \underline{I}'_2 + jX'_{21}(\underline{I}_1 + \underline{I}'_2) = R'_2 \underline{I}'_2 + j(X'_2 - X'_{21}) \underline{I}'_2 - \underline{E}'_2. \quad (58b)$$

Enačbama (58a in b) ustreza nadomestno vezje na sliki 35, ki ga imenujemo nadomestno vezje transformatorja. Načelno lahko podamo tudi drugačna nadomestna vezja, npr. takšna, ki nastanejo neposredno iz enačb (55a in b). Toda nadomestno vezje na sliki 35 ima pred drugimi vezji to prednost, da lahko iz njega neposredno odčitamo odstopanje realnega in idealnega transformatorja.



Slika 35 Nadomestno vezje transformatorja

Odstopanje od napetostno idealnega transformatorja se pojavi kot padec napetosti ($\underline{U}_1 - \underline{U}'_2$) preko vzdolžnih členov, odstopanje od tokovno idealnega transformatorja pa kot magnetilni tok $\underline{I}_\mu = (\underline{I}_1 + \underline{I}'_2)$ preko prečnega člena.

Kot spojni člen obeh zank se pojavi na primarno stran reducirana reaktanca X'_{12} , ki je prirejena medsebojni induktivnosti. Ohmski upornosti obeh zank sta upornost R_1 navitja 1 in na navitje 1 reducirana upornost navitja 2, tj. R'_2 .

Težje je razumeti smisel induktivnih členov vezja ($X_1 - X'_{12}$) in ($X'_2 - X'_{21}$). Pogosto jih enostavno označujemo kot reaktanci razsipanja obeh navitij. Toda, ker eksistira le eno skupno razsipanje med obema navitjema (izjema je le primer ločenih navitij 1 in 2, vsako na svojem stebru) in ločenih reaktanc razsipanja ne moremo kar tako vpeljati, jih bomo definirali z nadomestnim vezjem po sliki 35 oziroma enačbama (58a in b). Če sta navitji ločeni, je $X_1 - X'_{12} = X_{\sigma 1}$ in $X'_2 - X'_{21} = X'_{\sigma 2}$.

V tem primeru moramo povedati, da so tako vpeljane reaktance dejansko le okrajšave za reaktance, ki pridejo do izraza zaradi matematičnega formalizma. Če se ne bi vezali na ta formalizem, ne bi več obstajala fizikalna interpretacija.

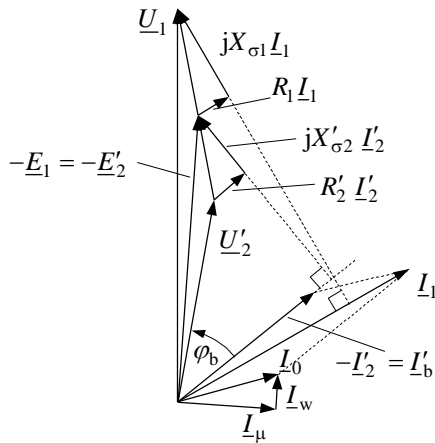
Ker leži člen vezja ($X_1 - X'_{12}$) v zanki 1, je učinkovit tudi tedaj, ko je $\underline{I}'_2 = 0$. Če opazujemo skupno razsipanje, ko je $\underline{I}'_2 = 0$, dobimo z enačbami (57), (55) ali (58):

$$\underline{U}_1 - \underline{U}'_2 = R_1 \underline{I}_1 + j\omega(\Psi_1 - \Psi'_{12}) = R_1 \underline{I}_1 + j(X_1 - X'_{12}) \underline{I}_1 \text{ in torej velja: } \omega(\Psi_1 - \Psi'_{12}) = (X_1 - X'_{12}) \underline{I}_1.$$

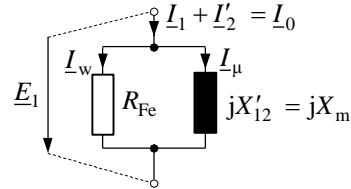
Reaktanca ($X_1 - X'_{12}$) je torej prirejena skupnemu razsipanju v prostem teku na strani 2. Analogno temu je reaktanca ($X'_2 - X'_{21}$) prirejena skupnemu razsipanju v prostem teku navitja na strani 1.

Pri cilindričnem navitju je lahko ena od teh reaktanc negativna. Sedaj lahko narišemo popolni kazalčni diagram obremenjenega transformatorja z impedanco $\underline{Z}_b = R_b + jX_b$ za primer ločenih navitij - vsako na svojem stebru (slika 36).

Z upoštevanjem izgub v železu $P_{10} = P_{Fe}$ ($\underline{I}_0 = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2$) dodamo v nadomestnem vezju vzporedno k magnetilni (glavni) reaktanci $X'_{12} = X_m = X_g$ še nadomestno upornost izgub v železu s členom R_{Fe} (slika 37).



Slika 36 Popolni kazalčni diagram

Slika 37 Upornost izgub v železu – člen R_{Fe}

Povezava med skupno reaktanco X_{σ} in induktivnima členoma vezja ($X_1 - X'_{12}$) ter ($X'_2 - X'_{21}$).

Z uvedbo X'_{12} in X'_{21} po enačbi (56) v enačbo (51) dobimo:

$$X_{\sigma} = X_1 - \frac{X'_{12}{}^2}{X'_2} = X_1 - X'_{12} \frac{X'_{12}}{X'_2} = X_1 - X'_{12} \frac{X'_{12} + (X'_2 - X'_{21}) - (X'_2 - X'_{21})}{X'_2 - X'_{21} + X'_{12}} =$$

$$= (X_1 - X'_{12}) + \frac{1}{\frac{1}{X'_{12}} + \frac{1}{(X'_2 - X'_{21})}}.$$

To je s strani 1 gledana reaktanca v idealnem kratkem stiku ($R=0$), kot jo za to obratovalno stanje lahko odčitamo iz nadomestnega vezja.

Na splošno velja $(X'_2 - X'_{21}) \ll X'_{12}$, približno velja $(1/X'_{12}) \rightarrow 0$ in dobimo relacijo:

$$X_{\sigma} \approx (X_1 - X'_{12}) + (X'_2 - X'_{21}). \quad (59)$$

2.3.3 Približne razmere

Če izključimo iz opazovanja obratovanje v prostem teku pri zelo majhnih obremenitvah, potem bodo amper-ovoji $\mathcal{O}_{1\text{fikt}}$ v splošnem majhni v primerjavi z $I_1 N_1$ oziroma z $I_2 N_2$. Transformator se obnaša precej podobno kot tokovno idealni transformator, tako da velja $I_1 N_1 + I_2 N_2 = 0$ oziroma $\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = 0 \rightarrow \underline{I}'_2 = -\underline{I}_1$ ter iz enačb (58a in b) sledi:

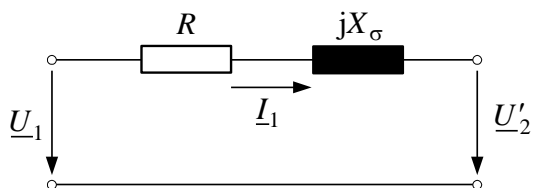
$$\underline{U}_1 - \underline{U}'_2 = (R_1 + R'_2)\underline{I}_1 + j((X_1 - X'_{12}) + (X'_2 - X'_{21}))\underline{I}_1.$$

Z uvedbo skupne ohmske upornosti $R = R_1 + R'_2$ ter skupne reaktance razsipanja X_{σ} po enačbi (59) sledi:

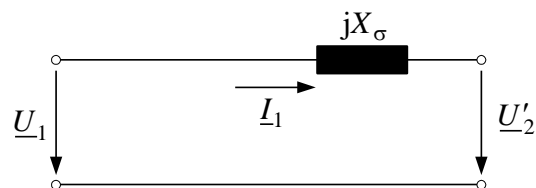
$$\underline{U}_1 - \underline{U}'_2 = (R + jX_{\sigma})\underline{I}_1 \quad (60)$$

in to je odvisnost oziroma razlika med napetostma tokovno idealnega transformatorja.

Enačbo (60) lahko ponazorimo z nadomestnim vezjem na sliki 38.



Slika 38 Nadomestno vezje po enačbi (60)



Slika 39 Nadomestno vezje po enačbi (61)

Pri večjih transformatorjih je $X_{\sigma} > 3R$, tako da ohmska upornost nima več vpliva na kratkostični tok:

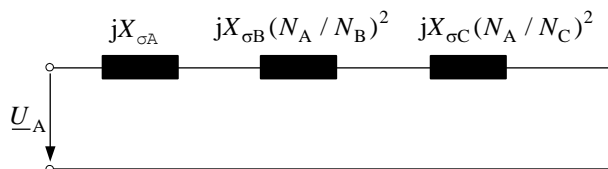
$$Z_k = \sqrt{X_{\sigma}^2 + R^2} = X_{\sigma} \sqrt{1 + (R/X_{\sigma})^2} = X_{\sigma} \sqrt{1 + (1/3)^2} = X_{\sigma} \sqrt{1,11} = 1,05X_{\sigma} \text{ in za izračun}$$

kratkega stika dobimo izraz

$$\underline{U}_1 - \underline{U}'_2 = jX_{\sigma} \underline{I}_1, \quad (61)$$

kateremu ustreza nadomestno vezje na sliki 39.

Pri izračunih kratkih stikov v omrežjih ($\underline{U}'_2 = 0$) predstavlja transformator njegova reaktanca razsipanja preračunana na isti napetostni nivo. Na sliki 40 sta tako na isti napetostni nivo, tj. nivo transformatorja A (z ovoji N_A), preračunani reaktanci razsipanja transformatorja B, tj. $X_{\sigma B}$ (z ovoji N_B) in C, tj. $X_{\sigma C}$ (z ovoji N_C).



Slika 40 Preračun reaktanc v kratkem stiku

2.4 Preskusi transformatorja

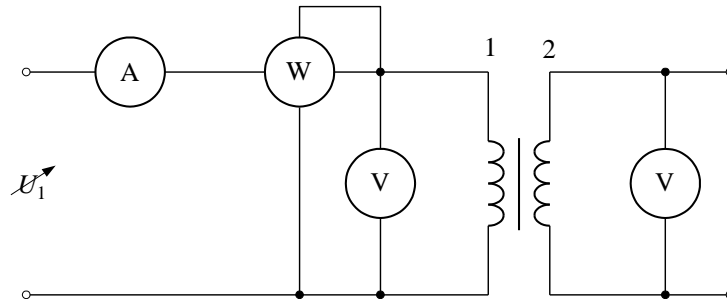
V prejšnjih poglavjih smo obravnavali delovanje transformatorja postopoma – idealni transformator – realni transformator s podvariantama tokovno idealnega in napetostno idealnega transformatorja – analitična obravnava. Ta je pripeljala do nadomestnega vezja transformatorja z železnim jedrom brez izgub v železu. Torej nobena od dosedanjih obravnav ni v celoti zajela vseh dejanskih lastnosti transformatorja z železnim jedrom, ker bi bilo to preveč komplicirano in bi zameglilo bistvene zakonitosti delovanja.

Dejanske razmere pri delovanju transformatorja nam lahko zagotovijo le preskusi, pri čemer bomo upoštevali predhodna znanja in se odločali, katere kvantitativno izmerjene veličine so pomembne in katere zanemarljive pri določenem režimu obratovanja.

V tem poglavju si bomo ogledali rezultate preizkusov pri dveh karakterističnih obratovalnih režimih, tj. pri prostem teku in pri trajnem kratkem stiku transformatorja z železnim jedrom.

2.4.1 Preskus prostega teka

Napetostni transformator je trajno priključen na izmenični izvor električne energije, katerega napetost \underline{U}_1 je spremenljiva (variabilna). Z ustreznimi merilnimi instrumenti merimo napetosti \underline{U}_1 in \underline{U}_2 , tok \underline{I}_{10} , ki je tok prostega teka ter na primarni strani sprejeto moč prostega teka P_{10} . Stikalna shema te meritve je prikazana na sliki 41.



Slika 41 Stikalna shema za meritve prostega teka

Ker je tok $\underline{I}_2 = 0$ in tok $\underline{I}_2 = 0 \rightarrow \underline{I}_1 = \underline{I}_{10} \ll \underline{I}_{1N}$, se transformator obnaša napetostno idealno in tako je nazivno prestavno razmerje dobljeno iz meritev za enofazni transformator:

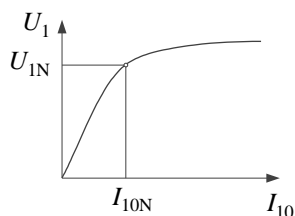
$$K_U = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (62)$$

Sinusna napetost \underline{U}_1 pa zaradi napetostnega ravnotežja $\underline{U}_1 + \underline{E}_1 = 0$ diktira amplitudo glavnega magnetnega pretoka v jedru:

$$\hat{\Phi}_g = \frac{\sqrt{2}U_1}{\omega N_1}.$$

Magnetno napetost oziroma vzbujalne amper-ovoje $\hat{\Theta}_{1\text{fikt}}$, ki so potrebni za ustvarjanje tega fluksa v železnem jedru, povzroči tok prostega teka \underline{I}_{10} , ki teče skozi primarne ovoje N_1 po naslednji relaciji (če zanemarimo višje harmonske komponente toka): $\hat{\Theta}_{1\text{fikt}} = \sqrt{2}I_{10}N_1$.

Karakteristika prostega teka transformatorja je zaradi odvisnosti $U_1 = f(\hat{\Phi})$ in $\hat{\Theta}_{1\text{fikt}} = f(I_{10})$ podobna magnetilni karakteristiki transformatorja $\hat{\Phi}_1 = f(\hat{\Theta}_{1\text{fikt}})$. Karakteristika prostega teka $U_1 = f(I_{10})$ velja za neko frekvenco $f = \text{konst.}$ in je prikazana na sliki 42.



Slika 42 Karakteristika prostega teka transformatorja

Relativna ali "per unit" vrednost toka prostega teka je:

$$i_{10}^* = \left(\frac{I_{10N}}{I_{1N}} \right)_{U=U_N} . \quad (63)$$

Pri nazivni napetosti U_{1N} sprejeta delovna (vatna) moč pokriva izgube magnetenja železnega jedra v prostem teku P_{mag} in izgube v primarnem navitju $R_1 I_{10}^2$. Pri nazivni obremenitvi so izgube v navitjih ($R_1 I_{1N}^2 + R_2 I_{2N}^2$) velikostnega reda izgub magnetenja (niso pa enake), torej velja, da so izgube $R_1 I_{10}^2 \ll P_{\text{mag}}$ in jih v prostem teku lahko zanemarimo. Tudi vrednost magnetnega pretoka transformatorja se od prostega teka do nazivne obremenitve bistveno ne spremeni, tako da je $P_{\text{mag}} \approx \text{konst.}$ Iz tega sledi, da je vatna moč, ki jo transformator jemlje iz omrežja v prostem teku pri nazivni napetosti, približno enaka izgubam magnetenja pri nazivni obremenitvi:

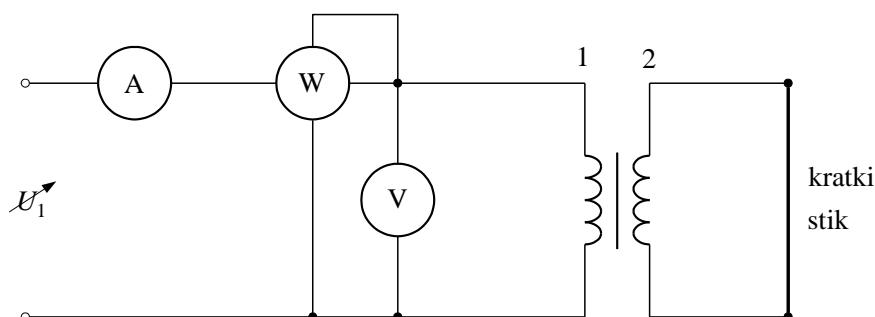
$$P_{\text{magN}} \approx (P_{10})_{U=U_{1N}} . \quad (64)$$

Torej je ta del celotnih izgub neposredno dostopen meritvam in izgube prostega teka so:

$$P_0 = (P_{10})_{U=U_{1N}} \approx P_{\text{magN}} . \quad (65)$$

2.4.2 Preskus kratkega stika

Napetostni transformator je trajno priključen na izmenični izvor električne energije, katerega primarna napetost \underline{U}_1 je spremenljiva. Z ustreznimi merilnimi instrumenti merimo pri kratko vezanem sekundarnem navitju napetost \underline{U}_1 , tok kratkega stika \underline{I}_{1k} in na primarni strani sprejeto moč kratkega stika P_{1k} . Stikalna shema te meritve je prikazana na sliki 43.



Slika 43 Stikalna shema za meritve kratkega stika

Zanima nas predvsem ena delovna točka, in sicer, ko teče skozi navitje kratkostični tok, ki je po vrednosti enak nazivnemu toku $\underline{I}_{1k} \equiv \underline{I}_{1N}$. Ker se transformator v področju med nazivno obremenitvijo in trajnim kratkim stikom obnaša glede tokov idealno $\underline{I}_1 = -\underline{I}'_2$, teče tudi v kratko vezanem sekundarnem navitju kratkostični tok $\underline{I}_{2k} \equiv \underline{I}_{2N}$.

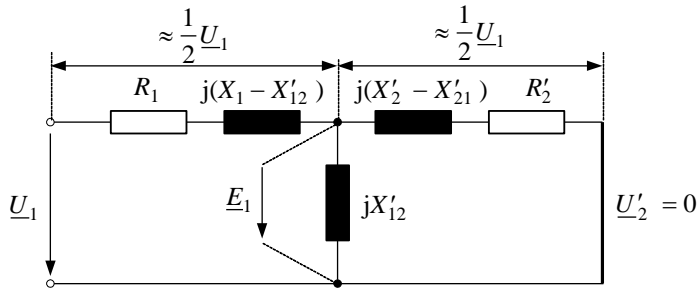
Ker velja, da so primarne upornosti in na primarno stran reducirane upornosti enakega velikostnega reda, velja dovolj približno $R_1 \approx R'_2$ in $(X_1 - X'_{12}) \approx (X'_2 - X'_{21})$, in zato je: $R_1 + j(X_1 - X'_{12}) \approx R'_2 + j(X'_2 - X'_{21})$.

Pritisnjena napetost \underline{U}_1 se v nadomestnem vezju približno enako porazdeli na omenjene vzdolžne člene: $U_1 \approx U_1/2 + U_1/2$. Če upoštevamo ta približek, je v primarnem navitju potrebna proti inducirana napetost, iz $\underline{U}_1 \approx \underline{U}_1/2 + \underline{E}_1/2$, enaka približno $\underline{E}_1 \approx \underline{U}_1$. Torej tudi pri $\underline{U}_1 = \underline{U}_{1N}$ je $\underline{E}_1 \approx \underline{U}_{1N}$ in tudi $\hat{\Phi}_k \approx \hat{\Phi}_{0N}/2$ v kratkem stiku.

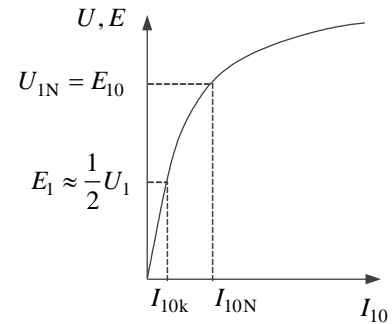
Torej je tudi gostota magnetnega pretoka, v kratkem stiku z nazivno napetostjo, približno polovica gostote v prostem teku $\hat{B}_k \approx \hat{B}_0/2$ in so izgube v železu $P_{0k} \approx (1/2)^2 P_0 \approx P_0/4$. Tudi magnetilni tok je manjši od tistega v prostem teku pri nazivni napetosti $\underline{U}_1 = \underline{U}_{1N}$:

$$\underline{I}_{10k} < \underline{I}_{10N} \ll \underline{I}_{1N} \ll \underline{I}_{1k}.$$

Torej je magnetilni tok v kratkem stiku, tudi ko je $\underline{I}_{1k} \equiv \underline{I}_{1N}$, zanemarljiv. Enako velja za izgube v železu. Res lahko predpostavimo, da je $I_1 = -I_2'$. Za gornja izvajanja sta podani sliki 44 in 45.



Slika 44 Nadomestno vezje v kratkem stiku



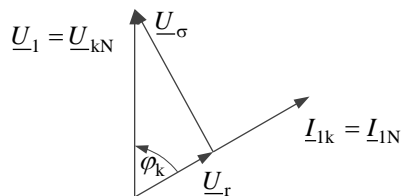
Slika 45 Inducirana napetost

Kratkostična napetost je tista napetost, pri kateri tečeta skozi navitji transformatorja kratkostična tokova, ki sta enaka nazivnima tokovoma. Iz slike 44 je razvidno, da je kratkostična napetost:

$$\underline{U}_{1k} = ((R_1 + R_2') + jX_\sigma) \underline{I}_{1N} \quad (66)$$

in je torej hipotenuza Kappovega trikotnika s katetama $\underline{U}_r = R \underline{I}_1$ in $\underline{U}_\sigma = jX_\sigma \underline{I}_1$ oziroma izraženo v efektivnih kompleksnih vrednostih (slika 46):

$$\underline{U}_{kN} = \underline{U}_r + \underline{U}_\sigma = R \underline{I}_{1N} + jX_\sigma \underline{I}_{1N}.$$



Slika 46 Kazalčni diagram v kratkem stiku

Kot φ_k na sliki 46 dobimo iz:

$$\cos \varphi_k = \frac{P_{1k}}{(U_1 I_1)_{U_2=0}} \quad (67)$$

in kateti Kappovega trikotnika sta

$$U_r = U_{kN} \cos \varphi_k, \quad (68a)$$

$$U_\sigma = U_{kN} \sin \varphi_k. \quad (68b)$$

Kratkostično napetost v praksi podajamo kot relativno (per unit) ali odstotno vrednost nazivne napetosti:

$$u_k^* = \frac{U_k}{U_N} \text{ ali } u_{k\%} = \frac{U_k}{U_N} 100 \quad (69)$$

in podobno za

$$- \text{ relativni induktivni padec napetosti } u_\sigma^* = \frac{U_{\sigma N}}{U_N}, \quad (70a)$$

$$- \text{ relativni ohmski padec napetosti } u_r^* = \frac{U_{rN}}{U_N}. \quad (70b)$$

Trajni tok kratkega stika pri nazivni napetosti je $I_k = U_N / Z_k$, če je $Z_k = \sqrt{R^2 + X_\sigma^2}$ oziroma $I_k Z_k = U_k$ in relativna vrednost trajnega toka kratkega stika je:

$$i_k^* = \frac{I_k}{I_N} = \frac{U_N}{Z_k I_N} = \frac{U_N}{U_k} = \frac{1}{u_k^*}. \quad (71)$$

Vrednost trajnega toka kratkega stika je dana z:

$$I_k = \frac{1}{u_k^*} I_N \text{ ali } I_{k\%} = \frac{100}{u_k^*} I_N. \quad (72)$$

Z uvedbo pojma skupne relativne reaktance razsipanja dobimo:

$$u_\sigma^* = \frac{U_\sigma}{U_N} = \frac{X_\sigma I_N}{U_N} = \frac{X_\sigma}{Z_N} = x_\sigma = \frac{X_\sigma I_N^2}{U_N I_N} = \frac{Q_{\sigma N}}{S_N} = q_{\sigma N}^* \quad (73)$$

$q_{\sigma N}^*$ je relativna jalova moč razsipanja.

Relativni induktivni padec napetosti zaradi razsipanih polj je številčno enak relativni reaktanci razsipanja x_σ , če je referenčna impedanca nazivna impedanca Z_N .

Če poznamo nazivne vrednosti U_N in I_N oziroma nazivno impedanca $Z_N = U_N / I_N$ ter relativni induktivni padec razsipanih polj u_σ^* , lahko iz te relacije izračunamo vrednost skupne reaktance razsipanja X_σ : $X_\sigma I_N = x_\sigma U_N$ in

$$X_\sigma = x_\sigma \frac{U_N}{I_N} = x_\sigma Z_N = u_\sigma^* Z_N. \quad (74)$$

Podobno dobimo relativne vrednosti za ohmske padce napetosti:

$$u_r^* = \frac{R I_N}{U_N} = \frac{R}{Z_N} = r. \quad (75)$$

Relativni ohmski padec napetosti je številčno enak relativni ohmski upornosti.

Iz enačbe (75) sledi:

$$u_r^* = r = \frac{R I_N}{U_N} = \frac{R I_N^2}{U_N I_N} = \frac{P_{CuN}}{S_N} = P_{CuN}^* \quad (76)$$

Relativni ohmski padec napetosti oziroma relativna ohmska upornost je številčno enaka razmerju izgub v navitju pri nazivni obremenitvi glede na nazivno navidezno moč.

Pri večjih transformatorjih se u_r^* manjša (višji izkoristek η) in je kratkostična napetost u_k^* določena predvsem z razsipanjem.

Pri preizkusu kratkega stika z $I_{1k} = I_{1N}$ oziroma $I_{2k} = I_{2N}$ so izgube v navitju enake kot pri nazivni obremenitvi. Izgube v železu so zanemarljivo majhne glede na izgube v železu v prostem teku oziroma pri nazivni obremenitvi (glej predhodna izvajanja).

Primer

– v prostem teku: U_N , $\hat{\Phi}_N$, \hat{B}_N in P_{0N}

– v kratkem stiku:

$$U_k \approx 0,04 U_N, \hat{\Phi}_k \approx (0,04 / 2) \hat{\Phi}_N, \hat{B}_k \approx 0,02 \hat{B}_N,$$

$$P_{0k} \approx (\hat{B}_k / \hat{B}_N)^2 P_{0N} = 0,02^2 P_0 = 0,0004 P_0 \rightarrow 0.$$

Torej lahko izgube v železu pri preskusu kratkega stika popolnoma zanemarimo in sprejeta moč pokriva v glavnem izgube v navitjih (v vodnikih navitij) $P_{1k} \approx P_{CuN}$, tj. izgube v navitjih pri nazivni obremenitvi. Tako je drugi del celotnih izgub neposredno dostopen meritvam. Te izgube bomo na kratko označevali s P_k in jih imenovali kratkostične izgube:

$$P_k = (P_{1k})_{I_1=I_N} \approx P_{CuN} = I_{1N}^2 (R_1 + R_2'). \quad (77)$$

Trajni tok kratkega stika je merodajen za termično obremenitev, njegovo trajanje je časovno omejeno, da ne prekorači dopustnega segrevanja transformatorja. Njegova relativna vrednost je obratno sorazmerna relativni vrednosti kratkostične napetosti (enačba 71). Zato je v predpisih podana tabela termične trdnosti transformatorja v odvisnosti od u_k (%), tj. dopustno trajanje trajnega kratkega stika pri nazivni napetosti. Približno dopustno trajanje kratkega stika za distribucijske transformatorje je podano v tabeli I.

Tabela I Približno dopustno trajanje kratkega stika

1	Kratkostična napetost u_k (%)	do 4	6	7 in več
2	Razmerje tokov I_k / I_N	25	16,7	14 in manj
3	Dopustno trajanje kratkega stika t_k (s)	1,8	4,0	5,5

2.4.3 Tipične vrednosti serijsko izdelanih energetskih transformatorjev

V ponazoritev gornjih izvajanj so v naslednji tabeli podane karakteristične poprečne vrednosti tokov prostega teka i_{10} (%), izgub v navitjih pri nazivni obremenitvi oziroma P_k , izgub v železu, ki so praktično enake P_0 , razmerja izgub $P_k : P_0$ in kratkostičnih napetosti u_k (%) za razne moči oziroma velikosti transformatorjev.

Tabela II Tipične vrednosti za serijsko izdelane energetske transformatorje

Nazivna moč S_N (kVA)	100	250	630	1000	1600
Tok prostega teka i_{10} (%)	0,32	0,26	0,21	0,17	0,16
Izgube prostega teka (pri $U_1 = U_N$) P_0 (kW)	0,32	0,65	1,30	1,75	2,50
Izgube kratkega stika (pri $I_k = I_N$) P_k (kW)	1,75	3,25	6,5	13,5	19,8
Razmerje P_k / P_0	5,47	5,0	5,0	7,7	7,92
Kratkostična napetost u_k (%)	4	4	4	6	6

Opomba: V tabeli je za moč 100 kVA vezava Yzn, za vse ostale moči je vezava Dyn.

2.5 Obratovanje transformatorja na togem omrežju

Togo omrežje ima praktično konstantno napetost in frekvenco. Napetostni transformator ima primarno navitje paralelno vezano na omrežje napetosti \underline{U}_1 , na sekundarno navitje pa je priključeno breme z impedanco \underline{Z}_b . Iz enačbe (60) izrazimo napetost \underline{U}'_2 :

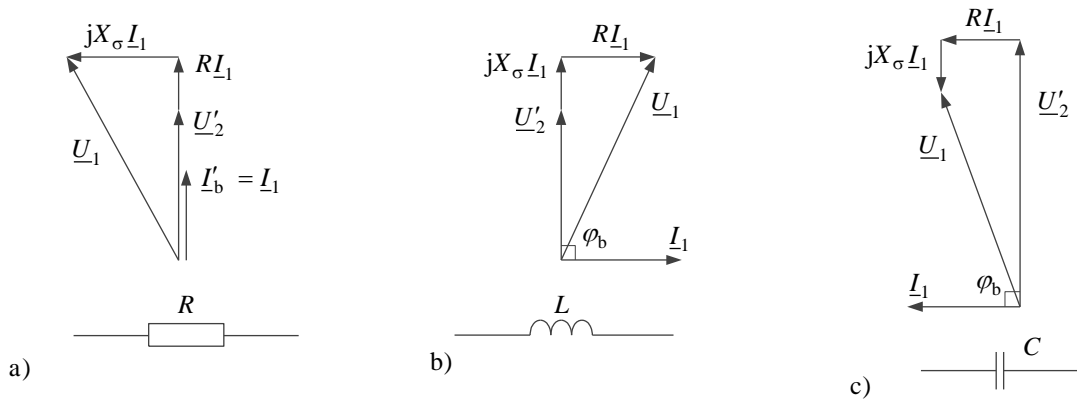
$$\underline{U}'_2 = -(R + jX_\sigma)\underline{I}_1 + \underline{U}_1. \quad (78)$$

Napetost \underline{U}_2 oziroma \underline{U}'_2 se pri togi napetosti \underline{U}_1 spreminja v odvisnosti od velikosti in faze $\underline{I}_1 = -\underline{I}'_2 = \underline{I}'_b$.

2.5.1 Vpliv faznega kota bremena na sekundarno napetost

Vpliv faznega kota bremena na velikost in fazo napetosti pri $\underline{U}_1 = \text{konst.}$ dobimo iz tirnice napetosti. Na slikah 47a, b in c velja prikaz za primere: $\underline{U}'_2 = f(\varphi_b)$ pri $\underline{U}_1 = \text{konst.}$, \underline{I}'_2 oz. $\underline{I}_1 = \text{konst.}$ za $(I / I_N) = 1$ in za fazni kot Kappovega trikotnika $\varphi_k = \text{konst.}$ Slika 47 velja za a) $\varphi_b = 0$ (čisto ohmska obremenitev), b) $\varphi_b = \pi/2$ (čisto induktivna obremenitev) in c) $\varphi_b = -\pi/2$ (čisto kapacitivna obremenitev).

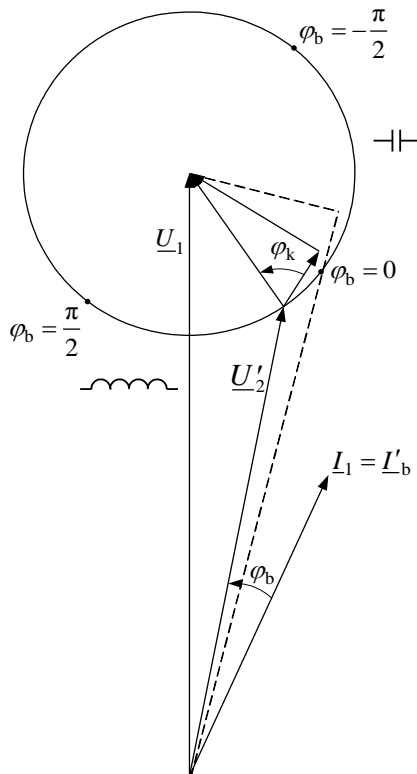
Pri spremembi kota bremena od 0 do 360° hipotenuza Kappovega trikotnika opiše krožnico s premerom $(R + jX_\sigma)\underline{I}_1$, ki velja za obe smeri energijskega pretoka. Za nek poljuben kot bremena je praktična uporaba te konstrukcije zelo težavna, ker je določanje točk φ_b na krožnici (tirnici) zelo zamudno. V področju induktivnih obremenitev \underline{U}'_2 pada, v območju kapacitivnih obremenitev \underline{U}'_2 raste (slika 48).



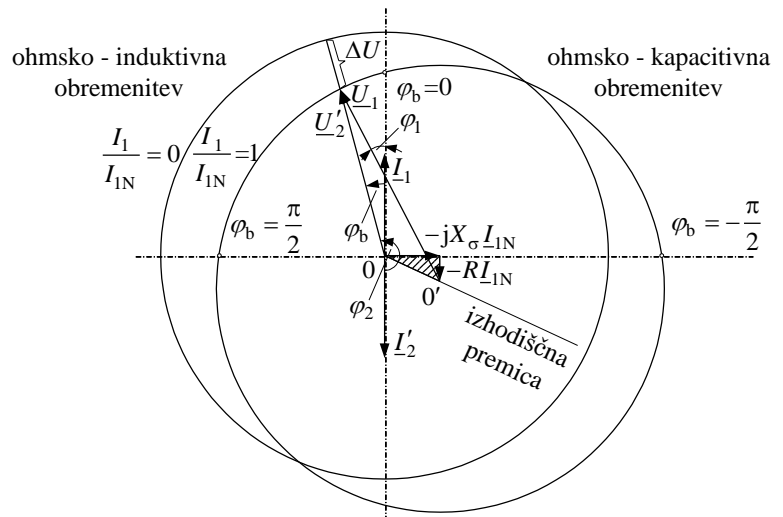
Slika 47 Velikost sekundarne napetosti \underline{U}'_2 v odvisnosti od faznega kota bremena

2.5.2 Kappov diagram in zunanja karakteristika (napetostnega) transformatorja

Prej omenjene težave pri določanju točke \underline{U}'_2 na tirnici (slika 48) odpravimo z uvedbo grafične konstrukcije, ki se imenuje Kappov diagram. Tukaj ne izhajamo iz $\underline{U}_1 = \text{konst.}$, temveč iz $\underline{I}_1 = \text{konst.}$, tako da se fazna lega \underline{U}_1 spreminja v odvisnosti od φ_b , to pa ni pomembno, saj nas zanimajo le relativni fazni pomiki med posameznimi veličinami. Namen tega je, da ostane z $\underline{I}_1 = \text{konst.}$ tudi lega Kappovega trikotnika nespremenjena.



Slika 48 Tirnica napetosti



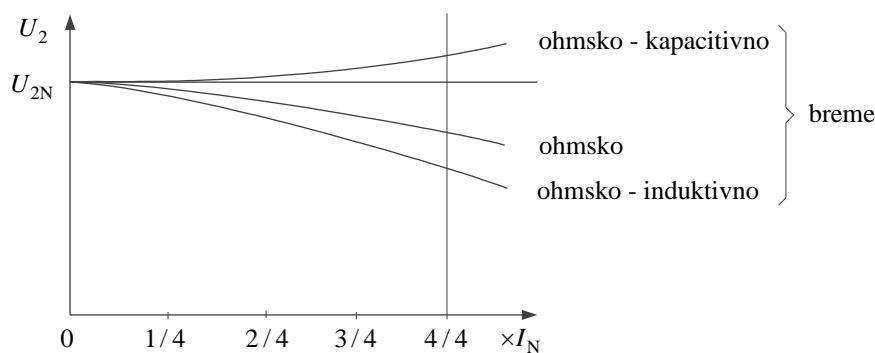
Slika 49 Kappov diagram

Ustrezno enačbi $\underline{U}'_2 = -(R + jX_\sigma)\underline{I}_1 + \underline{U}_1$ leži \underline{U}'_2 na krogu z radijem \underline{U}_1 , ki izhaja iz fiksne točke $-(R + jX_\sigma)\underline{I}_1$, kot je razvidno iz Kappovega diagrama na sliki 49. Neposredno lahko

vrišemo kot φ_b , saj je to kot med veličinami $\underline{U}'_2 = \underline{U}'_b$ in $\underline{I}_1 = \underline{I}'_b$. Vnesemo lahko tudi kot φ_2 , kar je priporočljivo, če je trajektorija risana za obe smeri pretoka energije, kot je to na sliki 49.

V odvisnosti od \underline{I}_1 se premika središče kroga $0'$ po izhodiščni premici $-(R + jX_\sigma)\underline{I}_1$. Za poseben primer $\underline{I}_1 = 0$ (prosti tek) dobimo krog s središčem v izhodišču 0. Za ta krog velja $\underline{U}'_2 = \underline{U}_1$ in je torej neodvisen od φ_b . Diferenčni odsek med krogom prostega teka ($I/I_N = 0$) in obremenitve ($I/I_N > 0$), na sliki 49 za ($I/I_N = 1$), nam da neposredno spremembo napetosti $\Delta U = U_1 - U'_2$ glede na prosti tek.

Iz Kappovega diagrama lahko določimo potek obremenilne ali zunanje karakteristike, ki je podana kot funkcija $\underline{U}_2 = f(\underline{I}_1)$ za nek $\cos \varphi_b$ oziroma $\varphi_b = \text{konst.}$, pri $\underline{U}_1 = \text{konst.}$ Na sliki 49 ustreza točka $0'$ nazivnemu bremenskemu toku I_{1N} . Ko narišemo bremenske kroge ($I/I_N = 1/4, 1/2, 3/4$), dobimo na izhodiščni premici ustrezne točke $0'$ kot središča teh krogov. Za določen φ_b odčitamo spremembe napetosti še pri $I = (1/4)I_N, (1/2)I_N$ in $(3/4)I_N$, ki jih vnesemo v diagram na sliki 50. To je zunanja karakteristika transformatorja.



Slika 50 Zunanja karakteristika

2.6 Zakon o rasti geometrijsko podobnih transformatorjev

Konstrukcije strojev so odsev tehničnih dosežkov določenega obdobja. Če projektanti ustvarijo neko konstrukcijo, na primer transformator, ki je po svojih karakteristikah, po porabi materiala in stroških obratovanja ter glede zanesljivosti in še kakšnih drugih kriterijih najboljša možna konstrukcija, tedaj je to optimalni transformator za neko nazivno moč S_N .

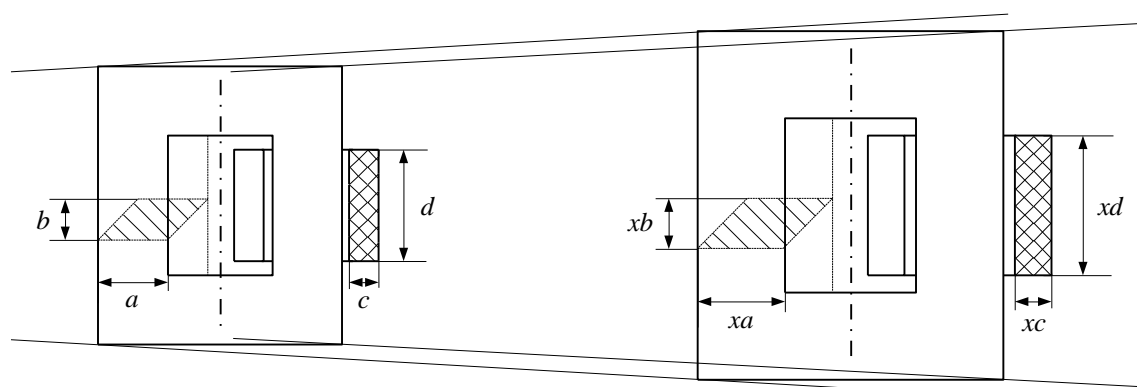
Kakšna bo konstrukcija transformatorjev, katerih moč bo večja ali manjša od moči izdelanega modela S_N ? Ali ne velja neka zakonitost za projektiranje družine transformatorjev za neko področje moči $S_{N_{x\min}} < S_N < S_{N_{x\max}}$?

Če se pri teh razmišljanjih omejimo le na aktivni del transformatorja, tj. železno jedro in navitja, v katerem se odvija proces transformacije napetosti in tokov, lahko zelo enostavno pridemo do zakonitosti. Te dajejo možnost projektiranja transformatorja nove nazivne moči S_{Nx} na osnovi znanih geometrijskih, materialnih, magnetnih in električnih podatkov modela moči S_N .

Najlažje bomo našli to zakonitost, če linearne dimenzije modela moči S_N spremenimo za faktor x ($x > 1$ ali $x < 1$). Pri tem moramo za osnovno izvajanje nekatere od omenjenih podatkov obdržati nespremenjene. Te konstante so:

- frekvenca f (Hz)
- število ovojev N
- gostota magnetnega pretoka \hat{B} (T) in enaka transformatorska pločevina
- gostota toka v vodnikih J (A / mm²) in enak material vodnikov.

Za razlago si oglejmo primer $x > 1$, ki ga shematično prikazuje slika 51, kjer smo osnovni model v neki projekciji povečali: $x = 1,3$ in $N = 1$.



Slika 51 Model osnovnega in povečanega transformatorja

$$\text{Presek stebra:} \quad A_{\text{Fe}} = ab \qquad A_{\text{Fex}} = xa \, xb = x^2 A_{\text{Fe}}$$

$$\text{Presek navitja:} \quad A_{\text{Cu}} = cd \qquad A_{\text{Cux}} = xc \, xd = x^2 A_{\text{Cu}}$$

Pri tem predpostavimo: $U \approx E$ in $I_1 \approx I_2'$ oziroma $I_0 = 0$.

Moč se glede na izvajanja, prikazana v tabeli III, spreminja s četrto potenco spremembe linearnih dimenzij transformatorja. Iz tega izpeljemo dva pomembna zaključka.

1. dobit moči iz enote mase aktivnega materiala:

$$f_{\text{dob}} = \frac{S_N}{m} \text{ (VA / kg)} \qquad f_{\text{dobx}} = \frac{S_{N_x}}{m_x} = \frac{x^4 S_N}{x^3 m} = x f_{\text{dob}} \text{ (VA / kg)}$$

Bolj ekonomično je zgraditi en večji transformator moči S_{N_x} kot več manjših, ki bi imeli skupaj enako moč S_{N_x} , ker dobimo x -krat večji dobit.

2. Izgube se kot toplota odvajajo preko hladilne površine transformatorja v okolico, za kar je potrebna temperaturna razlika $\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_{\text{ok}}$. Temperatura $\vartheta = \Delta\vartheta + \vartheta_{\text{ok}}$, kjer pomeni $\Delta\vartheta$ nadtemperaturo glede na temperaturo okolice, ki je v letnem povprečju za naš klimatski pas $\vartheta_{\text{ok}} = 273,2 + 20 = 293$ K.

Tabela III Vpliv spremembe dimenzij na moč transformatorja

	Osnovni model transformatorja	Enako	Novi model transformatorja
Napetost	$U = k_u \Phi = k_u A_{Fe} B$ (V)	f (Hz)	$U_x = k_u A_{Fex} B = x^2 U$ (V)
Tok	$I = A_{Cu} J$ (A)	Ovoji N	$I_x = J A_{Cux} = x^2 I$ (A)
Moč	$S_N = UI$ (VA)	B (T)	$S_{Nx} = U_x I_x$ (VA)
Volumen	V_{Fe} (m ³)	J (A / mm ²)	$V_{Fex} = x^3 V_{Fe}$ (m ³)
Masa	$m_{Fe} = \rho_{Fe} V_{Fe}$ (kg)		$m_{Fex} = \rho_{Fe} V_{Fex} = x^3 m_{Fe}$ (kg)
Izgube	$P_0 = k_1 m_{Fe} B^2$ (W)		$P_{0x} = k_1 x^3 m_{Fe} B^2 = x^3 P_0$ (W)
	$P_k = k_2 m_{Cu} J^2$ (W)		$P_{kx} = k_2 x^3 m_{Cu} J^2 = x^3 P_k$ (W)
	$P_i = P_0 + P_k$ (W)		$P_{ix} = P_{0x} + P_{kx} = x^3 P_i$ (W)
Hladilna površina	A_{hl} (m ²)		$A_{hlx} = x^2 A_{hl}$ (m ²)
in od tod			
Nova moč	$S_{Nx} = U_x I_x = x^2 U x^2 I = x^4 UI = x^4 S_N$		
	$S_{Nx} = x^4 S_N$ (79)		
Sprememba linearnih dimenzij	$x = \sqrt[4]{\frac{S_{Nx}}{S_N}}$ (79a)		

Pri tej temperaturi okolice je dopustna nadtemperatura transformatorskega olja $\Delta \vartheta_0 = 60$ K in maksimalna temperatura olja $\vartheta_{\text{omax}} = 293 + 60 = 353$ K ali v staremu sistemu merskih enot je $\vartheta_{\text{omax}} = 353 - 273 = 80$ °C. Dopustna nadtemperatura navitij je odvisna od razreda izolacije.

Novi model je iz enakih materialov kot osnovni model in bodo zanj veljala enaka dopustna segrevanja oziroma dopustne nadtemperature; iz tega sledi, da bi tudi novi model odvajal na enoto hladilne površine enako gostoto toplotnega toka Φ_{tA} (W / m²). Ali je to res? Ne! Če primerjamo gostoto toplotnega toka osnovnega modela in novega modela, se izkaže naslednje.

Osnovni model transformatorja:

$$\Phi_{tA} = \frac{P_i}{A_{hl}} \text{ (W / m}^2\text{)}.$$

Novi model transformatorja:

$$\Phi_{tAx} = \frac{P_{ix}}{A_{hlx}} = \frac{x^3 P_i}{x^2 A_{hl}} = x \Phi_{tA} \text{ (W / m}^2\text{)}.$$

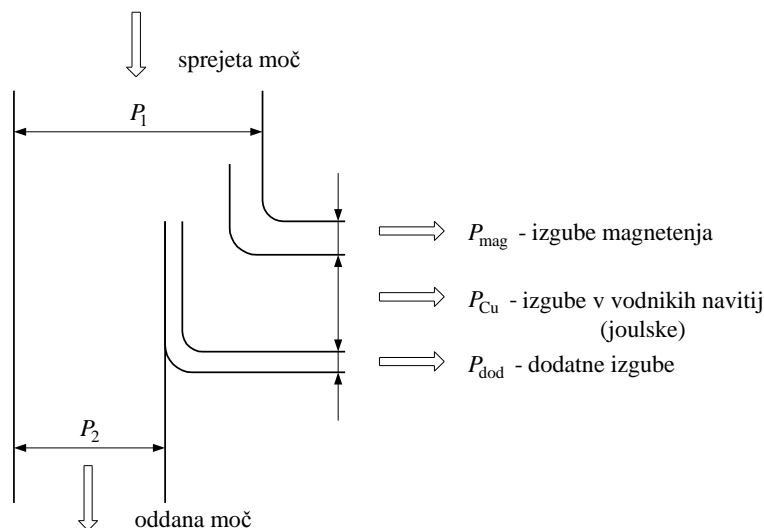
Če je toplotna prevodnost približno konstantna, bo zaradi x -krat večje gostote toplotnega toka $\Phi_{tAx} = x\Phi_{tA}$ narasla nadtemperatura na $\Delta\vartheta_x \approx x\Delta\vartheta$, to pa ni dopustno. Biti mora $\Delta\vartheta_x = \Delta\vartheta$, to lahko dosežemo s povečanjem hladilne površine $A_{hlx} > x^2 A_{hl}$. Če to ne zadošča ali ni mogoče, moramo bodisi izboljšati ventilacijo ali celo prisilno hladiti olje v posebni hladilni napravi. Nasprotno pa, če je novi model manjši ($x < 1$), bo tudi $\Phi_{tAx} < \Phi_{tA}$ in ne bo težav s hlajenjem.

Povzetek točk 1 in 2 je naslednji. Smiselno je graditi transformatorje za večje moči, ker je izkoristek aktivnega materiala večji (ta material je tudi najdražji). Ker se pri tem njihova sposobnost hlajenja manjša, moramo poskrbeti za boljše hlajenje; to sicer poveča ceno, toda to je še vedno cenejše kot več manjših transformatorjev za transformacijo enake moči, tj. manj prostora, manj stikal in merilnih ter zaščitnih aparatov v transformatorski postaji.

2.7 Energijska bilanca, izgube in izkoristek

2.7.1 Energijska bilanca

Diagram pretoka moči je prikazan na sliki 52.



Slika 52 Diagram pretoka moči transformatorja

Sprejeta moč se porabi za pokrivanje izgub magnetenja v železu, izgub v vodnikih in dodatnih izgub, ki bodo podrobneje opisane v naslednjem poglavju. Ostanek je neto oddana moč na sekundarni strani transformatorja.

2.7.2 Izgube

Skupne izgube so:

$$P_1 = P_{Fe} + P_{Cu} + P_{dod}. \quad (80)$$

Pri preskušanju transformatorjev upoštevamo dejstvo, da so dodatne izgube sestavljene iz dveh delov:

- prvi del, ki je odvisen od napetosti (to so izgube magnetenja) in je že zajet v izgubah prostega teka P_0 ;
- drugi del, ki je odvisen od toka (izgube vrtilnih tokov v vodnikih masivnih presekov, ki leže v izmeničnem razsipanem polju, katerega jakost je sorazmerna bremenskim tokovom) in je ravno tako že zajet v izgubah kratkega stika P_k .

Pojavijo se še dodatne izgube v neaktivnih delih transformatorja, tj. v konstrukcijskih delih (in ne v navitju) kot vrtilne izgube oziroma histerezne izgube v mehkem železu (in ne v aktivnem jedru). Tudi te zajamemo z meritvijo izgub v prostem teku in kratkem stiku.

Torej lahko izgube pri nazivni obremenitvi formalno zapišemo:

$$P_{iN} = P_{0N} + P_{kN}. \quad (81)$$

Kadar transformator ni obremenjen z nazivnim tokom, a je še vedno primarno priključen na nazivno napetost, lahko enostavno postavimo odvisnost, da se vse tokovno odvisne izgube menjajo s kvadratom toka v skladu z enačbo:

$$P_{Cu} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2. \quad (82)$$

To so tako imenovane ohmske izgube, vezane na ohmsko upornost faznega navitja transformatorja. Tukaj naj pojasnimo še naslednje. Ohmske izgube lahko izrazimo tudi s pomočjo gostote toka J in mase materiala vodnikov m_{Cu} , tj. mase navitja primarja: $R_1 I_1^2 = k J_1^2 m_{Cu1}$ oziroma sekundarja $R_2 I_2^2 = k J_2^2 m_{Cu2}$. Na splošno velja za izgube v navitju pri poljubni temperaturi enačba:

$$P_{Cu} = k \frac{235 + \vartheta}{255} J^2 m_{Cu}. \quad (83a)$$

Konstanta k v enačbi (83a) je enaka razmerju specifične ohmske upornosti pri 20°C $\rho_{20} = 0,0175 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ in gostote bakra $\rho_{mCu} = 8,9 \cdot 10^3 \text{ kg} / \text{m}^3$. Za baker je $k = 1,97$, če se podaja gostota toka J (A / mm^2).

S podobnim izrazom se dajo določiti izgube vrtilnih tokov v masivnih vodnikih, enačba pa vsebuje v svoji konstanti k_v seveda še druge pogoje:

$$P_{Cuv} = k_v \frac{255}{235 + \vartheta} J^2 m_{Cu}. \quad (83b)$$

Povsod velja torej kvadratna odvisnost, saj je $J = I / A_{Cu}$. Opazimo lahko, da se vrtilne izgube v vodnikih po enačbi (83b) s temperaturo manjšajo.

Izgube, ki so odvisne od napetosti, tj. izgube v železu $P_{Fe} = P_{0N}$, ostanejo praktično konstantne.

Za izgube v vodnikih $P_{Cu} = P_{kN}$ velja, da se spreminjajo s kvadratom toka. Zato velja enačba:

$$P_i = P_{0N} + P_{kN} (I / I_N)^2 \quad (84)$$

in če uvedemo še pojem

$$y = \frac{I}{I_N} = \frac{U_N I}{U_N I_N} = \frac{S}{S_N}, \quad (85)$$

dobimo izraz

$$P_1 = P_{0N} + P_{kN} y^2. \quad (84a)$$

Relativne izgube pri nazivni obremenitvi, tj. za $y = 1$, so :

$$p_{iN}^* = \frac{P_{iN}}{S_N} = \frac{P_{0N}}{S_N} + \frac{P_{kN}}{S_N} = p_{0N}^* + p_{kN}^* y^2 = p_{0N}^* + p_{kN}^*. \quad (86)$$

Za neko splošno obremenitev pa so relativne izgube:

$$p_i^* = \frac{P_i}{S} = \frac{P_{0N}}{S_N} \frac{S_N}{S} + \frac{P_{kN}}{S_N} \frac{S_N}{S} y^2 = \frac{p_{0N}^*}{y} + p_{kN}^* y. \quad (86a)$$

Na sliki 53 je prikazana funkcija p_i^* iz enačbe (86a) kot superpozicija dveh delnih funkcij, tj. funkcije za izgube v prostem teku (železu) in kratkem stiku (vodnikih).

2.7.3 Izkoristek

Izkoristek je definiran kot kvocient oddane P_2 in sprejete moči P_1 . Kot je že bilo omenjeno, je pritisnjena primarna napetost nazivne vrednosti $U_N = \text{konst.}$ Torej se oddana moč spreminja v odvisnosti od faktorja moči bremena $\cos \varphi_b$, ali na kratko $\cos \varphi$, in dejanske vrednosti toka

$$I = y I_N, \text{ tako da lahko pišemo } S = U_N y I_N = y S_N.$$

Oddana delovna moč je $P_2 = S \cos \varphi = y S_N \cos \varphi$ in s tem velja za sprejeto moč:

$$P_1 = P_2 + P_i = y S_N \cos \varphi + P_{0N} + P_{kN} y^2.$$

Izkoristek je:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{y S_N \cos \varphi}{y S_N \cos \varphi + P_{0N} + P_{kN} y^2}. \quad (87)$$

Uvedemo relativne vrednosti za izgube:

$$\eta = \frac{P_1 - P_i}{P_1} = 1 - \frac{P_i}{P_1} = 1 - \frac{P_i}{y S_N \cos \varphi + P_i} = 1 - \frac{1}{\frac{y S_N}{P_i} \cos \varphi + 1} \text{ in}$$

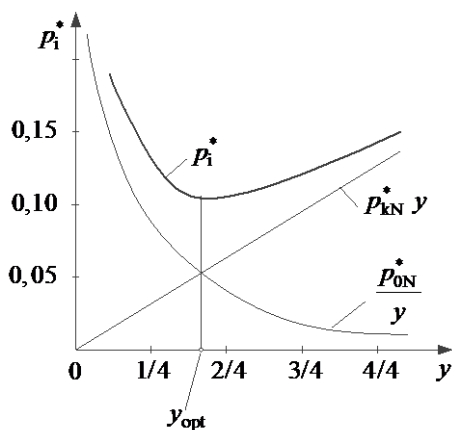
$$\eta = 1 - \frac{1}{\frac{S}{P_i} \cos \varphi + 1} = 1 - \frac{1}{\frac{\cos \varphi}{p_i^*} + 1} = 1 - \frac{p_i^*}{\cos \varphi + p_i^*} = \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi + p_i^*}. \quad (88)$$

Faktor moči ima v področju bremenskega kota $\varphi_b = (\pi/2 \div -\pi/2)$ vedno pozitivno vrednost, ker je $\cos \varphi > 0$. To ustreza gornjemu področju Kappovega diagrama, tj. za smer pretoka moči na sliki 52. Pri neki določeni vrednosti bremenskega toka $I = y_{\text{opt}} I_N$ so celotne relativne izgube najmanjše in je izkoristek maksimalen η_{max} . Iz slike 53 je razvidna točka y_{opt} pri minimumu funkcije p_i^* in tedaj velja, da ima transformator enake izgube v železu in v navitju:

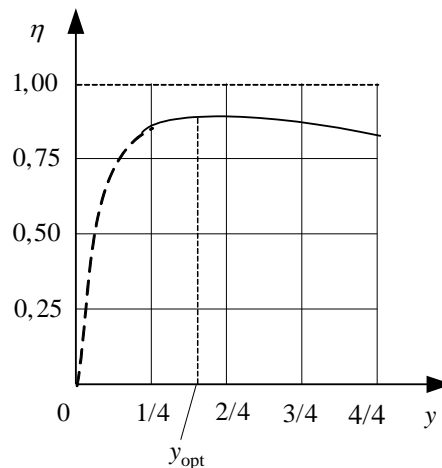
$$\frac{P_{0N}^*}{y} = y P_{kN}^* \rightarrow P_{0N}^* = y^2 P_{kN}^* \rightarrow y_{\text{opt}}^2 = \frac{P_{0N}^*}{P_{kN}^*} \text{ in za } \xi = \frac{P_{kN}^*}{P_{0N}^*} \text{ je}$$

$$y_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{P_{0N}^*}{P_{kN}^*}} = \sqrt{\frac{1}{\xi}}. \quad (89)$$

Faktor razmerja izgub ξ ima pri serijsko izdelanih energetskih transformatorjih vrednost $\xi = 4 \div 8$. To lahko ugotovimo v tabeli IV za podana razmerja $P_k : P_0$, kjer so P_k podane pri $I_k = I_N$ in P_0 podane pri $U = U_N$. Na sliki 54 je prikazana funkcija η v odvisnosti od obremenitve $y = I/I_N$ za $\cos \varphi = \text{konst.}$



Slika 53 Funkcija p_i^* kot superpozicija dveh delnih funkcij



Slika 54 Funkcija $\eta = f(y)$ za $\cos \varphi = \text{konst.}$

Tabela IV prikazuje izkoristke in ostale pomembne podatke za energetske (distribucijske) transformatorje napetosti 10 ali 20 kV/0,4 kV.

Tabela IV Izkoristki serijsko izdelanih distribucijskih transformatorjev

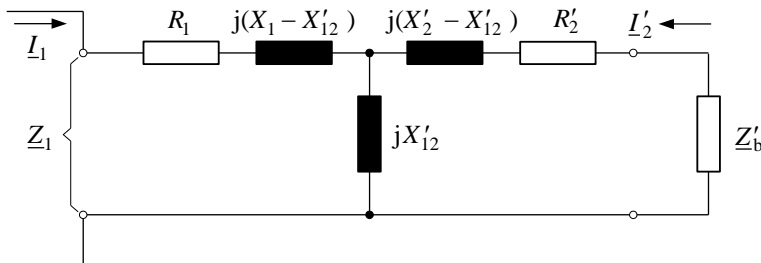
Nazivna moč S_N (kVA)	20	400	1000	y
Izkoristek η (%) za $\cos \varphi = 1,0$	97,05	98,48	98,80	4/4
Izkoristek η (%) za $\cos \varphi = 0,8$	96,31	98,09	98,50	4/4

2.8 Tokovni transformator

V poglavju 2.1 do 2.3 smo obravnavali delovanje transformatorja z vsiljeno napetostjo \underline{U}_1 ali napetostni transformator, ko je napetost nespremenjena, tj. toga.

Tokovni transformator deluje pri vsiljenem toku \underline{I}_1 , ki naj bi bil nespremenljiv. Seveda ne moremo računati s tem, da bo tok v nekem tokokrogu ostal nespremenjen, če vanj zaporedno vežemo tokovni transformator. Zanj veljajo enake zakonitosti kot za napetostni transformator, torej tudi enako nadomestno vezje in enak kazalčni diagram. Na sliki 8b je narisana stikalna shema tokovnega transformatorja. Na transformatorju se pojavi neka končna vrednost padca napetosti $\Delta \underline{U}_{om} = \underline{U}_1$, ki povratno vpliva na tokokrog (omrežje).

Že v uvodu smo povedali, da veljajo iste zakonitosti za tokovni in napetostni transformator. Torej velja enako nadomestno vezje - slika 55.



Slika 55 Nadomestno vezje tokovnega transformatorja

2.8.1 Idealni tokovni transformator

Velja : $\underline{I}_1 N_1 + \underline{I}_2 N_2 = 0 \rightarrow \underline{I}_2 = -\frac{N_1}{N_2} \underline{I}_1 = -\frac{\underline{I}_1}{K_I}$ ali $\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = 0 \rightarrow \underline{I}'_2 = -\underline{I}_1$.

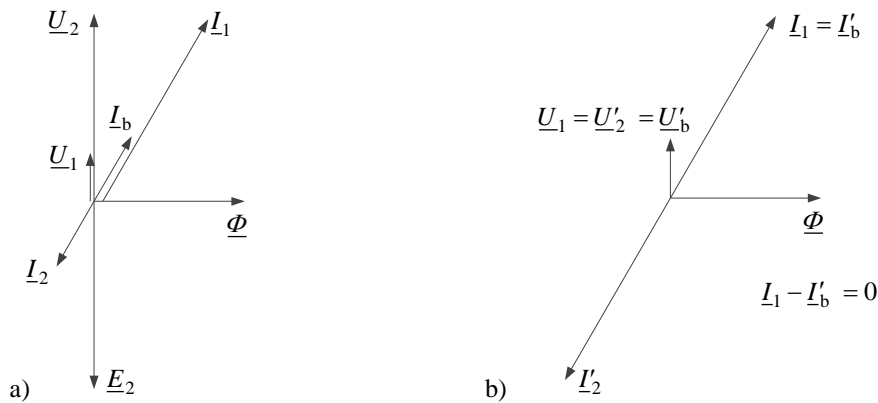
Bremenski tok $\underline{I}_b = -\underline{I}_2$ povzroči na kompleksni upornosti dvopola \underline{Z}_b padec napetosti $\underline{U}_b = \underline{Z}_b \underline{I}_b = -\underline{Z}_b \underline{I}_2 = \underline{U}_2$.

Ker velja za napetost idealnega transformatorja $\underline{U}_1 = K_U \underline{U}_2$ in $\underline{Z}'_b = K_U^2 \underline{Z}_b$, bo:

$$\underline{U}_1 = K_U \underline{U}_2 = K_U (-\underline{Z}_b \underline{I}_2) = K_U \underline{Z}_b K_U \underline{I}_1 = K_U^2 \underline{Z}_b \underline{I}_1 = \underline{Z}'_b \underline{I}_1. \quad (90)$$

\underline{U}_1 je napetost na primarni strani in istočasno padec napetosti na transformatorju. Zato mora biti impedanca \underline{Z}_b majhna, glede na impedanco tokokroga 1, ki določa tok \underline{I}_1 . Vključitev tokovnega transformatorja v tokokrog 1 bo le tedaj brez znatnega povratnega delovanja na tok \underline{I}_1 .

Kazalčni diagram obremenjenega idealnega tokovnega transformatorja je prikazan na sliki 56a in z uvedbo transformiranih sekundarnih vrednosti na sliki 56b.



Slika 56 Kazalčna diagrama tokovnega transformatorja

2.8.2 Realni tokovni transformator

Iz padca napetosti na sekundarnem navitju $\underline{U}_2 = R_2 \underline{I}_2 + jX_{21} \underline{I}_1 + jX_2 \underline{I}_2$ in z uvedbo izraza za

$\underline{U}_2 = -\underline{Z}_b \underline{I}_2 = -(R_b + jX_b) \underline{I}_2$ dobimo odvisnost tokov:

$$\underline{I}_2 = -\frac{jX_{21}}{R_2 + jX_2 + \underline{Z}_b} \underline{I}_1. \quad (91)$$

Tok \underline{I}_2 je še vedno proporcionalen toku \underline{I}_1 , toda fazni premik med njima ni več 180° . Proporcionalni faktor je odvisen od lastnosti bremena. Padec napetosti na primarnem navitju je:

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1 + jX_{12} \underline{I}_2 = \left(R_1 + jX_1 + \frac{X_{12}^2}{R_2 + jX_2 + \underline{Z}_b} \right) \underline{I}_1 = \underline{Z}_1 \underline{I}_1. \quad (92)$$

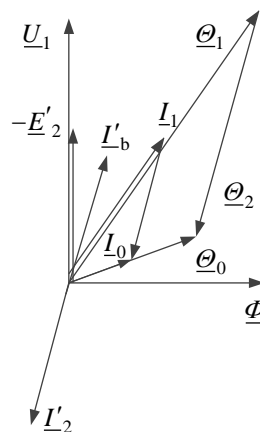
Kompleksna upornost \underline{Z}_1 je po nadomestnem vezju na sliki upornost med vhodnimi sponkami na primarni strani tokovnega transformatorja. Očitno je, da se ta upornost \underline{Z}_1 v primerjavi z upornostjo \underline{Z}'_b iz enačbe (90) poveča zaradi vzdolžnih členov vezja in zmanjša zaradi prečnega člena.

Za realni tokovni transformator velja enačba vzbujanja primarnega in sekundarnega navitja:

$$\underline{I}_1 N_1 + \underline{I}_2 N_2 = \underline{I}_0 N_1 \quad \text{ali} \quad \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_0$$

ter $\underline{I}_1 - \underline{I}'_b = \underline{I}_0 > 0$,

kar je narisano na sliki 57.



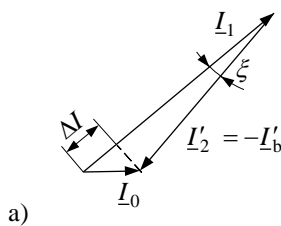
Slika 57 Kazalčni diagram tokovnega transformatorja

V primeru, da bi uporabili tokovni transformator kot energetska vir, bi moral imeti zagotovljeno konstantno vrednost toka $I_1 = \text{konst.}$, ker je $U_1 = f(I_1)$. Tok določajo potrošniki na omrežju, v katero je tokovni transformator vključen zaporedno in zato bi napetost U_2 zelo nihala. Za vrednost $I_1 = 0$ je tudi $U_2 = 0$. Zato ne uporabljamo tokovnega transformatorja za vir napetosti, ampak za meritve.

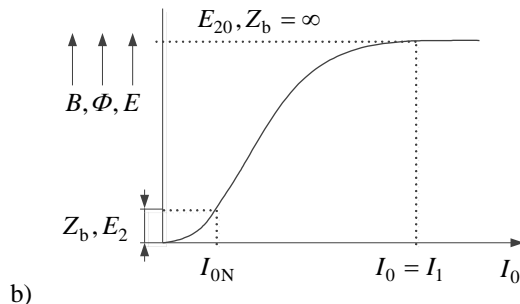
2.8.3 Merilni tokovni transformator ali tokovnik

V takšni izvedbi je tokovni transformator najbolj razširjen. Glavni problem je točnost glede prestave kot tudi faze tokov I_1 in I_2 . Pri idealnem transformatorju je ta dosežena, pri realnem pa ne. Pogrešek povzročijo vzbujaalni amper-ovoji oziroma njihov tok I_0 . Z izbiro ustreznega materiala za železno jedro lahko to razliko tokov $I_1 + I'_2 = I_0 > 0$ ali $I_1 - I'_2 = I_0$ za realni transformator zmanjšamo, odpraviti pa je ne moremo.

Zaradi odstopanja od idealnih razmer, dobimo pogrešek prestave in pogrešek kota (slika 58a).



Slika 58a Kazalčni diagram



Slika 58b Magnetilna karakteristika

Pogreška

Podaja se pogrešek prestave:

$$e_{\text{TT}} = \frac{\Delta I}{I_1} 100 \text{ (\%)} \quad (93)$$

in pogrešek kota $\xi \rightarrow$ v stopinjah ali minutah.

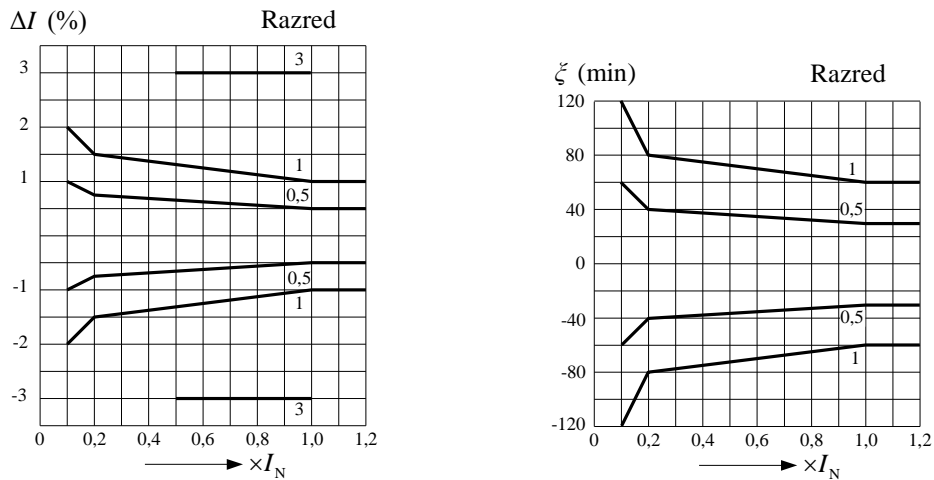
Tokovni transformator obratuje v linearnem delu magnetilne karakteristike ($B = 0,08 \div 1 \text{ T}$) (slika 58b), da sta ta dva pogreška čim manjša.

Razred točnosti (0,1 – 0,2 – 0,5 – 1 – 3 – 5) definira oba pogreška, npr. razred 1 $\rightarrow e_{\text{TT}} = \pm 1 \%$ in $\xi = \pm 1^\circ = \pm 60'$.

Ker se z večanjem obremenitve nad nazivno vrednost pogrešek prestave spremeni, poznamo kot podatek še nadtokovno število.

Nadtokovno število je tisti mnogokratnik nazivnega toka, pri katerem doseže pogrešek prestave vrednost -10% .

Dejanske vrednosti pogreškov naj bodo med pozitivnimi in negativnimi vrednostmi na sliki 59.



Slika 59 Dopustni pogreški

Nevarnost odprtih sponk na sekundarju tokovnega transformatorja

Iz enačbe vzbujanja (amper-ovojev) pri normalni obremenitvi sledi: $0 < \underline{Z}_b \ll \infty$ in velja $\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_{0N}$. Fluks Φ gostote magnetnega pretoka B inducira napetost E_2 in nastanejo izgube v železu jedra P_{FeN} . V prostem teku bo za:

$\underline{Z}_b = \infty \rightarrow \underline{I}_2 = 0$, $\underline{I}_1 \equiv \underline{I}_0$ in glede na sliko 58b bodo izredno narasle omenjene veličine na nove vrednosti Φ_0 , B_0 in E_{20} . Zaradi $\Phi_0 = x\Phi \rightarrow B_0 = xB$ se izredno povečajo izgube v železu

$P_{Fe} = k \left(\frac{B_0}{B} \right)^2 = x^2 P_{FeN}$ in segrevanje jedra lahko uniči tokovni transformator.

Zaradi $\Phi_0 = x\Phi \rightarrow E_{20} = xE_2$ (povišanje napetosti na sponkah). Zato je treba po odstranitvi bremena sekundarne sponke vezati na kratko.

Na sliki 60 je prikazan primer napisne ploščice tokovnega transformatorja za dve jedri (eno jedro za merjenje in drugo za zaščito) za Si 123 vezanega za dva nazivna primarna tokova.

"Naziv proizvajalca"	Nr. <input type="text"/>	CT – <input type="text"/>
Tip <input type="text" value="APU-123"/>	<input type="text" value="50 Hz"/> <input type="text" value="2 x 300/5/5"/> A	ext <input type="text" value="120"/> %
<input type="text" value="123/230/550"/> kV	<input type="text" value="B"/> 1k <input type="text" value="30"/> VA Cl <input type="text" value="0,5"/>	Fs <input type="text" value="5"/>
I_{th} / I_{dyn} <input type="text" value="30 - 60/ -120"/>	<input type="text" value="O"/> 2k <input type="text" value="60"/> VA Cl <input type="text" value="5 P 10"/>	

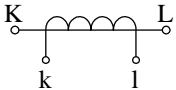
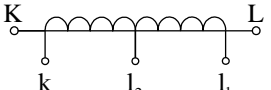
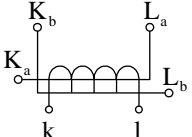
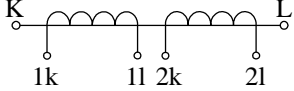
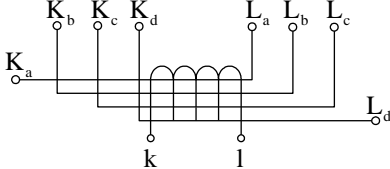
Izvrtina za plombiranje in nad to izvrtino je črka B za oznako razreda izolacije.

Slika 60 Primer napisne ploščice tokovnega transformatorja

Označevanje priključnih sponk

Označevanje priključnih sponk tokovnih transformatorjev je prikazano v tabeli V.

Tabela V Oznake priključnih sponk

Primarni priključki Sekundarni Priključki	 <p>Tokovni transformator z eno transformacijo</p>	 <p>Tokovni transformator z odcepom na sekundarni strani</p>
Primarni priključki Sekundarni Priključki	 <p>Tokovni transformator s primarnim navitjem v dveh sekcijah za vezavo zaporedno in vzporedno</p>	 <p>Tokovni transformator z dvema jedroma</p>
Primarni priključki Sekundarni Priključki	 <p>Tokovni transformator s primarnim navitjem v štirih sekcijah za vezavo zaporedno in vzporedno</p>	

3 TRIFAZNA TRANSFORMACIJA

Trifazni sistem izmeničnih tokov in napetosti je najbolj razširjen sistem na svetu za proizvodnjo, prenos in uporabo električne energije. Eden od razlogov za to je v tem, da moč v simetričnem trifaznem sistemu nima izmeničnega deleža, kot je to primer v enofaznem sistemu ampak le konstantni delež. To je zelo ugodno za proces elektromehanske pretvorbe energije v rotacijskih strojih. Uporaba trifaznega sistema omogoča izkoriščanje fizikalnega pojava vrtilnih magnetnih polj, kar vodi do ugodnih konstrukcijskih izvedb električnih rotacijskih strojev.

Skratka potrebne so izvedbe transformatorjev, ki povezujejo trifazne sisteme različnih napetostnih nivojev. V nadaljevanju bomo obravnavali samo transformatorje z železnim jedrom in vsiljeno primarno napetostjo, ki omogočajo trifazno transformacijo.

Najenostavnejša rešitev je ustrezna povezava treh enofaznih transformatorjev za prenos določene moči. Cenejša pa je izvedba z enim trifaznim transformatorjem za prenos enake moči, to je pokazal zakon o rasti geometrijsko podobnih transformatorjev v poglavju 2.6.

3.1 Osnovne vezave navitij, fazni premik in vezalne skupine

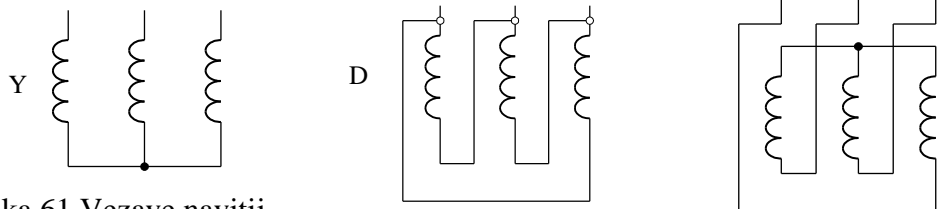
3.1.1 Osnovne vezave navitij

Navitja skupine treh enofaznih ali enega trifaznega transformator so lahko povezan v tri tipične vezave (slika 61):

- a) zvezdno Y,
- b) trikotno D,
- c) cikcak Z.

Za zvezdno in cikcak vezavo velja $\sum I = 0$, če navitje nima ničelnega vodnika. V primeru nesimetrične obremenitve ničelnega vodnika velja, da je vsota $\sum I = I_{0\text{vod}}$.

Pri trikotni vezavi so lahko v primeru nesimetrične obremenitve fazni in linijski tokovi med fazami različni.



Slika 61 Vešave navitij

Vešavo visoko napetostnega navitja (VN) označimo z velikimi črkami Y, D, Z ter ničelni vodnik z dodatno črko "N". Vešavo nizko napetostnega navitja (NN) označimo z malimi črkami y, d, z ter ničelni vodnik z dodatno črko "n". Odprta navitja pa označimo z I, I, I in i, i, i.

3.1.2 Fazni premik

Ta nastane med primarno in sekundarno dejansko ali namišljeno fazno napetostjo.

Fazni premik je: $n \times 30^\circ$ električnih ($n = 0 \div 12$). Tipični premiki so: $n = 0, 5, 6, 11$.

Podaja se kot fazni zaostanek kazalca nižje fazne napetosti proti kazalcu višje napetosti. Fazni premik je identičen premiku urnih kazalcev za cele ure. Veliki kazalec je vedno na 12. uri, mali kazalec pa kaže cele ure. Pri tem se mali kazalec pokriva z vektorjem, ki prikazuje napetost med ničelno točko (stvarno ali navidezno) in priključkom nižje fazne napetosti (slika 62).

3.1.3 Vežalne skupine

Vežalna skupina označuje vezavo navitij. Vežalna skupina transformatorja z dvema navitjema se označi tako, da se najprej navede vezava visokonapetostne strani in nato vezava nizkonapetostne strani in na koncu je še oznaka faznega premika.

Primer označevanja: Dy5

Velika črka:

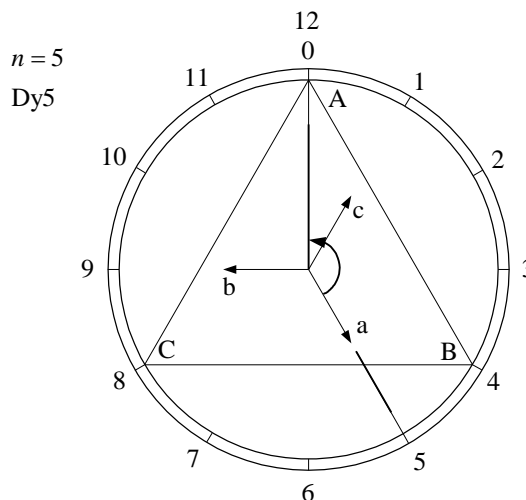
– trikotna vezava primarne strani;

mala črka:

– zvezdna vezava sekundarne strani;

številka:

– fazni premik ($5 \times 30^\circ = 150^\circ$).



Slika 62 Vežalna skupina Dy5

Vežalno skupino Dy5 lahko spremenimo v Dy11 in obratno s ciklično permutacijo dveh sponk na primarni in naslednjih dveh sponk na sekundarni strani, vendar lahko to storimo v okviru iste skupine karakterističnih števil. Skupine so naslednje:

skupina I	<u>0</u> ,	4,	8
skupina II	2,	<u>6</u> ,	10
skupina III	1,	<u>5</u> ,	7, <u>11</u>

Vežalno skupino 5 lahko spremenimo v 11, če na visoko napetostni strani zamenjamo sponki C in B, zaporedje je tedaj A, C, B. Na nizko napetostni strani zamenjamo naslednji dve sponki, tj. c in a, zaporedje je tedaj c, b, a.

Vežalno skupino Yy0 (skupina I) lahko spremenimo v Yy6 (skupina II) in obratno z zamenjavo začetkov in koncev navitij, ki so vezani v zvezdišče na primarni ali na sekundarni strani.

Standardne vežalne skupine trifaznih in enofaznih transformatorjev so prikazane v tabeli VI.

Tabela VI Vežalne skupine trifaznih energetskih transformatorjev

Vežalna skupina	Trifazni energetski transformatorji			
0	Dd0 	Yy0 	Dz0 	
	Dy5 	Yd5 	Yz5 	
	Dd6 	Yy6 	Dz6 	
11	Dy11 	Yd11 	Yz11 	
	Vežalna skupina	Enofazni energetski transformator		
	0	li0		

— — s prekinjeno črto označene vežalne skupine naj se prednostno uporabljajo pri novih instalacijah

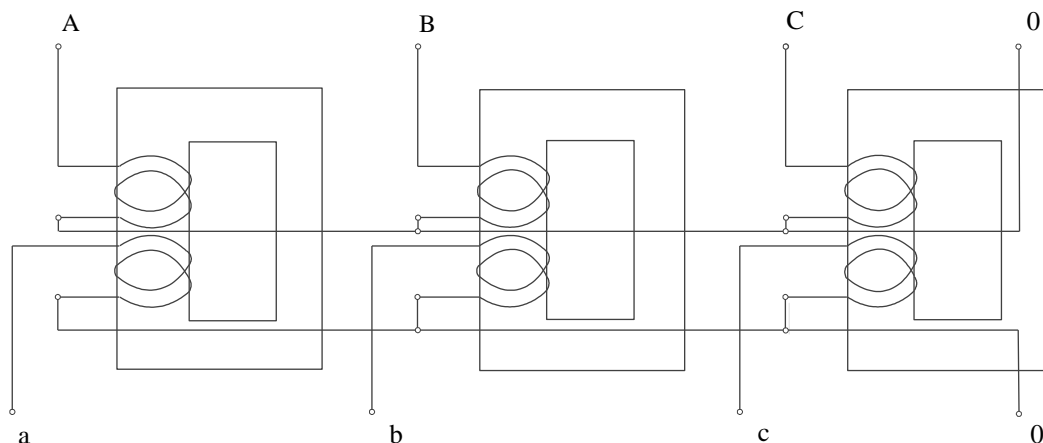
3.2 Transformacija s tremi enofaznimi transformatorji (transformer bank)

Tak sistem se največ uporablja v ZDA, kjer naj ne bi bila pomembna cena treh enofaznih transformatorjev in še četrtega rezervnega, ampak zanesljivost dobave električne energije. V Evropi se tak sistem uporablja v posebnih primerih, npr. v vozliščih super omrežja.

Uporabljamo enofazne transformatorje jedrne ali plaščne izvedbe. Magnetni krogi so v tem primeru popolnoma neodvisni eden od drugega. Torej imamo svobodne magnetne sklepe. Integracijske poti v jedrih so enake dolžine: $l_{FeA} = l_{FeB} = l_{FeC}$. Iz tega sledi, da so potrebni enaki vzbujalni amper-ovoji in enaki ustrezni magnetilni tokovi $I_{0A} = I_{0B} = I_{0C}$ v vsakem faznem navitju pri enakih napetostih. Možne so različne vezalne skupine. Ogleдали si bomo dve tipični vezalni skupini

- zvezda z ničelnim vodnikom / zvezda z ničelnim vodnikom (YNyn) in
- trikot / zvezda z ničelnim vodnikom (Dyn).

Na sliki 63 je prikazana skupina treh jedrnih enofaznih transformatorjev v vezavi YNyn.



Slika 63 Trije enofazni transformatorji v vezavi YNyn z ničelnim vodnikom na primarni in sekundarni strani

Vsi trije enofazni transformatorji morajo biti enake izvedbe, tj. plaščni ali jedrni. V nadaljevanju bomo opisali delovanje te skupine transformatorjev s svobodnimi magnetnimi sklepi tako glede magnetilnih tokov kot tudi nesimetričnih obremenitev na sekundarni strani v odvisnosti od vezave navitij.

3.3 Nesimetrična obremenitev

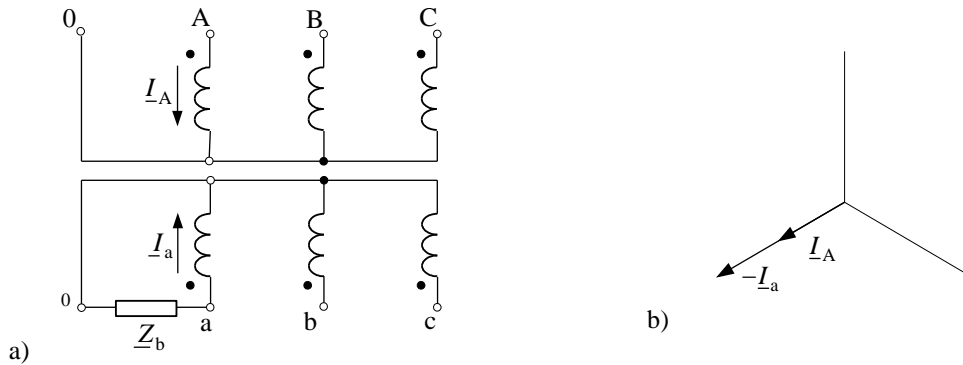
- Vezava zvezda z ničelnim vodnikom na primarni in na sekundarni strani (YNyn)

Opazujemo ekstremni primer obremenitve le ene sekundarne faze in pri tem zanemarimo tok prostega teka $I_0 \rightarrow 0$. Na sliki 64 a) in b) je prikazana vezava navitij in kazalčni diagram za

obremenitev ene faze (faze a).

Pri enofazni obremenitvi trifaznega transformatorja mora biti izpolnjen pogoj ravnotežja amper-ovojev: $\underline{I}_a N_2 + \underline{I}_A N_1 = 0$.

Ta pogoj bo izpolnjen, če lahko teče tok \underline{I}_A . Ta primer ni problematičen, ker je $\underline{I}_A = \underline{I}_{0\text{vod}}$.



Slika 64 a) Obremenitev ene faze in b) kazalčni diagram tokov

b) Vezava trikot na primarni in zvezda z ničelnim vodnikom na sekundarni strani (slika 67b).

Tok \underline{I}_A priteče po liniji v navitje, npr. faze A, in odteče po drugi liniji mimo navitja drugih dveh faz (B, C) in tudi v tem primeru enofazna obremenitev ni problematična.

Transformacija trifaznega sistema napetosti in tokov s tremi enofaznimi transformatorji (transformer bank) ne dela težav pri nesimetrični obremenitvi razen vezave Yyn, tj. zvezda brez ničelnega vodnika na primarni strani.

3.4 Transformacija z enim trifaznim transformatorjem

Trifazni transformator je lahko:

1. plaščni
2. jedrni

3.4.1 Trifazni plaščni transformator

a) Magnetno simetrična izvedba

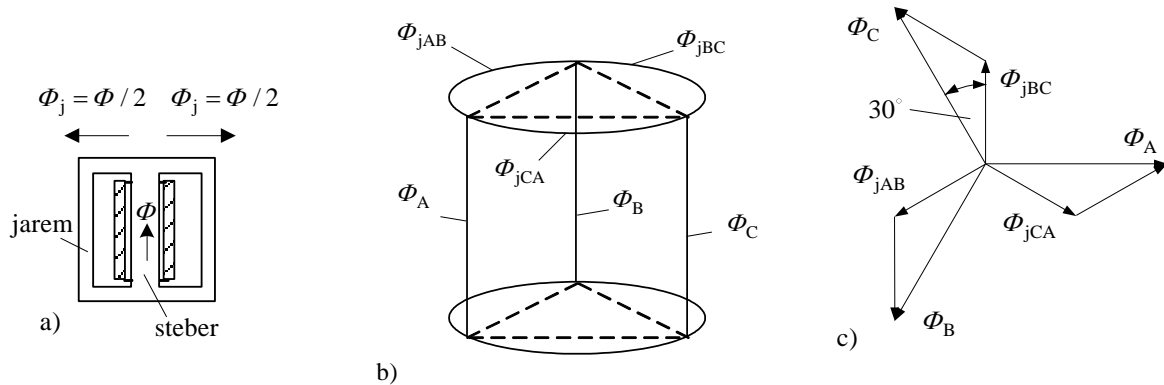
Ta nastane, če tri enofazne transformatorje (slika 65a) zvijemo v krožno konstrukcijo s tremi stebri, kot je prikazano na sliki 65b. Pri tem stranski jarem odpade. To obliko imenujemo tudi tempelj oblika. Takšno jedro se običajno uporablja za trifazne magnete.

Za to magnetno simetrično jedro velja dolžina integracijske poti magnetnega pretoka:

$$l_{\text{FeA}} = l_{\text{FeB}} = l_{\text{FeC}}.$$

Pri tej konstrukciji bodo fluksi v jarmih enaki (kazalčni diagram slika 65c). Iz slike sledi:

$$|\underline{\Phi}| = |\underline{\Phi}_{jCA} - \underline{\Phi}_{jAB}| = |\underline{\Phi}_{jAB} - \underline{\Phi}_{jBC}| = |\underline{\Phi}_{jBC} - \underline{\Phi}_{jCA}| \text{ in je} \\ \Phi_j = \Phi / \sqrt{3}. \quad (94)$$

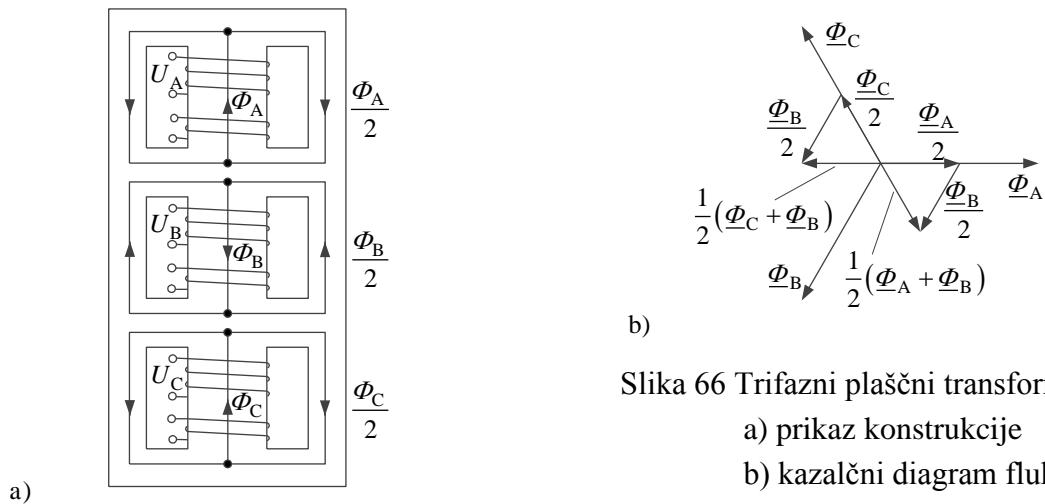


Slika 65 Magnetno simetrično trifazno jedro

b) Praktična konstrukcija za trifazni plaščni transformator

Dobimo ga z nadzidavo treh enofaznih transformatorjev na sliki 66a, ki je identična sliki 3f. Jarem plaščnega transformatorja ima polovičen presek stebra, če je navitje na srednjem stebri navito v nasprotni smeri kot skrajni dve ali je obrnjeno zaporedje priklopa navitja na srednjem stebri (fazi). Velja $\underline{\Phi}_j = \underline{\Phi}_A / 2 + \underline{\Phi}_B / 2$ ali $\underline{\Phi}_C / 2 + \underline{\Phi}_B / 2$ in $\Phi_j = \Phi / 2$.

Zato bo presek jarmov polovičen glede na presek stebrov.



Slika 66 Trifazni plaščni transformator
a) prikaz konstrukcije
b) kazalčni diagram tokovov

Pri trifaznih plaščnih transformatorjih je treba paziti pri remontu, da so priključne sponke pravilno vezane na izvode navitja faze B, sicer bomo dobili fluks v jarmih $\Phi_j = \sqrt{3}\Phi / 2$ namesto $\Phi_j = \Phi / 2$. To povzroči povečano segrevanje srednjih dveh jarmov.

Bolj običajna izvedba trifaznega plaščnega transformatorja je petstebna izvedba na sliki 3e, ki nastane z vodoravno združitvijo treh enofaznih transformatorjev. V tem primeru je fluks v jarmih

in zunanjih dve stebrih polovičen glede na fluks na treh notranjih stebrih, na katerih je nameščeno navitje. Takšen petstebni transformator ima manjšo višino kot tritestbni.

Trifazno plaščno jedro je simetrično (slika 3e in 3f). Transformator ima svobodne povratne magnetne sklepe magnetnega kroga in so tako lahko fluksi v stebrih poljubne velikosti, kajti vedno je dana možnost, da se zaključijo preko razpoložljivih poti v jedru.

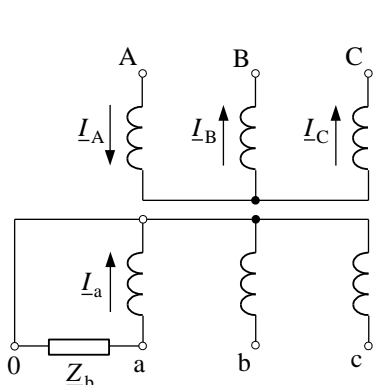
Za zaključek lahko ugotovimo, da je lastnost svobodnih magnetnih sklepov skupna tako trifaznemu plaščnemu transformatorju kot skupini treh enofaznih transformatorjev (transformer bank).

1) Magnetilni tokovi

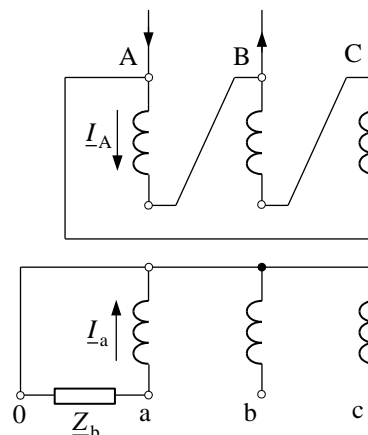
Ti so glede na magnetno simetrijo jedra enaki $I_{\mu A} = I_{\mu B} = I_{\mu C}$. Tečejo lahko le v vezavi primarnega navitja YN ali D.

2) Nesimetrična obremenitev

Problemov ni pri vezavah YNyn in Dyn (slika 67b). Pri vezavi Yyn, tj. z ničelnim vodnikom samo na sekundarni strani nastane nesimetrija. Najneugodnejši primer je čista enofazna obremenitev. Na sliki 67a vidimo, da v sekundarnem navitju faz B in C ne teče tok ($I_b = I_c = 0$). Zaradi ravnotežja amper-ovojev (pri $I_{\mu} \rightarrow 0$) bo $\underline{I}'_a = \underline{I}_A = 0$ in skozi navitje faze A teče tok I_A . Tok I_A se zaradi odsotnosti ničelnega vodnika lahko vrača v omrežje le skozi navitji B in C. Ker v sekundarnih navitjih b in c ni toka, tudi ni ustreznih sekundarnih amper-ovojev, ki bi nasprotovali amper-ovojem $\underline{I}_B N_1$ in $\underline{I}_C N_1$. Zato delujeta tokova I_B in I_C kot magnetilna tokova. To ima za posledico, da se bosta fluksa $\underline{\Phi}_B$ in $\underline{\Phi}_C$ spreminjala z obremenitvijo. Zato se bodo spremenile fazne napetosti primarne strani in nastanejo motnje simetrije trifaznega sistema. V naslednjem poglavju bomo to spreminjanje ovrednotili na primeru trifaznega jedrnega transformatorja.



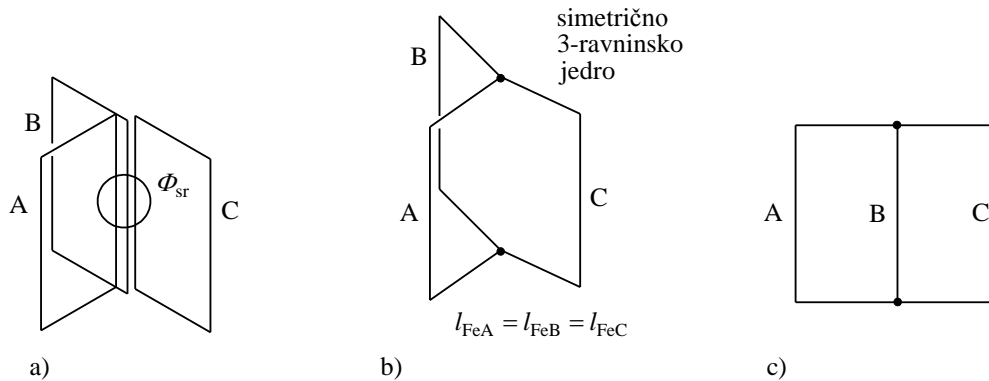
Slika 67a Enofazna obremenitev trifaznega transformatorja v vezavi Yyn



Slika 67b Enofazna obremenitev trifaznega transformatorja v vezavi Dyn

3.4.2 Trifazni jedrni transformator

To je najbolj razširjena konstrukcija trifaznega transformatorja. Nastal je iz treh enofaznih transformatorjev (slika 68a in b) kot magnetno simetrična izvedba in je tehnično uporaben kot nesimetrična izvedba (slika 68c).

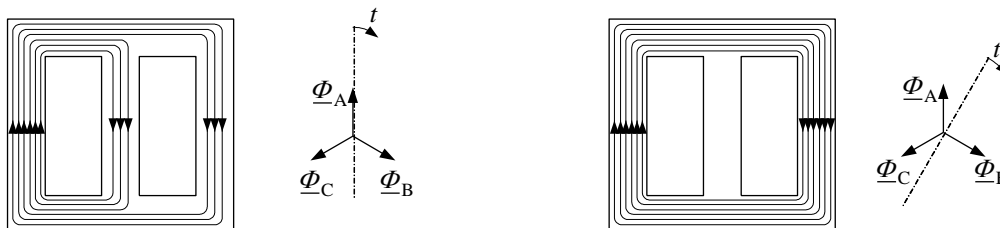


Slika 68 Nastanek trifaznega magnetno nesimetričnega transformatorja

Na sliki 68b in c imamo dve magnetni vozlišči, v katerih velja pogoj:

$$\underline{\Phi}_A + \underline{\Phi}_B + \underline{\Phi}_C = 0 \quad (95)$$

Zato je lahko končna konstrukcija transformatorja lažja za tri stebre enofaznih jeder. Izvedba je magnetno simetrična toda triravninska, kar ni praktično. Praktično je uporabna magnetno močno nesimetrična izvedba. Slika 69 prikazuje potek silnic za $\underline{\Phi}_A = \hat{\Phi}_A$ ($\omega t = 0$) in $\underline{\Phi}_B = 0$ ($\omega t = \pi/6$).



Slika 69 Potek fluksov za dva časovna trenutka

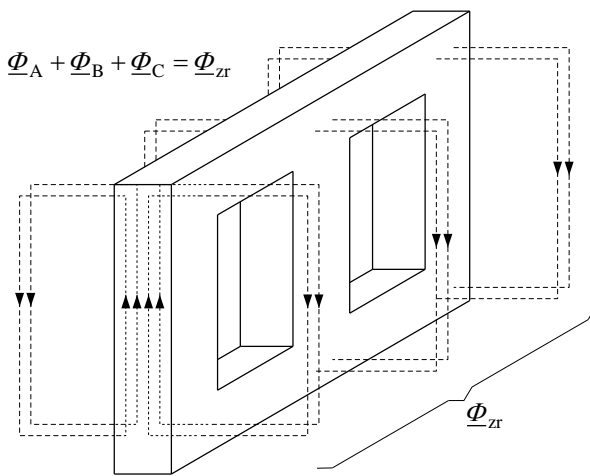
3.4.3 Nesimetrična obremenitev trifaznega transformatorja

- V vezavi zvezda z ničelnim vodnikom - zvezda z ničelnim vodnikom (\mathbb{Y}° / y_0) ni težav.
- V vezavi zvezda brez ničelnega vodnika – zvezda z ničelnim vodnikom (Y / y_0) nastanejo težave pri nesimetrični obremenitvi.

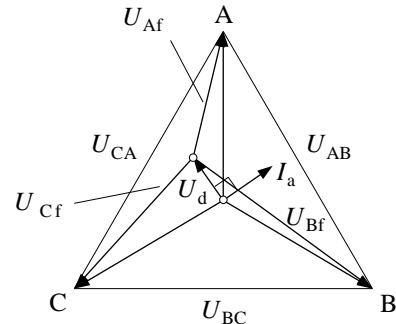
Najneugodnejši primer je čista enofazna obremenitev (slika 67a)

Za primarno navitje velja, da mora biti izpolnjen pogoj po enačbi za zvezdišče $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$. Torej lahko tečejo v primarno navitje kljub nesimetrični obremenitvi le simetrični tokovi.

Na sekundarni strani teče tok le v prvi fazi in se vrača po ničelnem vodniku. Zaradi ravnotežja amper-ovojev $\underline{I}_A + \underline{I}'_a = 0$ (pri $I_\mu \approx 0$) mora skozi primarno navitje teči bremenski tok, ki pa se lahko vrača le skozi navitji sosednjih faz B in C. V teh dveh fazah nimamo kompenziranih amper-ovojev sekundarja in tokova I_B in I_C delujeta kot magnetilna tokova. To pomeni določene spremembe magnetnih sklepov, ki ustvarijo dodatni razsipani fluks po zraku (slika 70) in s tem spremembe faznih napetosti U_{Af} , U_{Bf} in U_{Cf} (slika 71). Togo omrežje predstavlja enakostranični trikotnik medfaznih napetosti, medtem ko so fazne napetosti znotraj trikotnika lahko različne. To pomeni, da lahko pride do določene spremembe faznih napetosti za vrednost ΔU ali dodatne napetosti U_d med izoliranim zvezdiščem in umetnim (namišljenim) ničelnim vodnikom omrežja (slika 71).



Slika 70 Potek jarnskega fluksa



Slika 71 Nesimetrične fazne napetosti

Pri nesimetrični obremenitvi velja, da je ta razlika faznih napetosti enaka:

$$\underline{U}_d = \underline{U}_{Rf} - \underline{U}_{Af} = \underline{U}_{Sf} - \underline{U}_{Bf} = \underline{U}_{Tf} - \underline{U}_{Cf}. \quad (96)$$

Za simetrični trifazni sistem omrežnih faznih napetosti in nesimetrično obremenitev velja

$$3\underline{U}_d = (\underline{U}_{Rf} - \underline{U}_{Af} + \underline{U}_{Sf} - \underline{U}_{Bf} + \underline{U}_{Tf} - \underline{U}_{Cf}) = -(\underline{U}_{Af} + \underline{U}_{Bf} + \underline{U}_{Cf}) \text{ oziroma:} \quad (96a)$$

$$\underline{U}_d = -\frac{1}{3}(\underline{U}_{Af} + \underline{U}_{Bf} + \underline{U}_{Cf}).$$

Na splošno velja za fazno napetost na primarni oziroma sekundarni strani enačba $\underline{U}_{Af} = j\omega\underline{\Phi}_A N_1 / \sqrt{2}$ oziroma $\underline{U}_{af} = j\omega\underline{\Phi}_A N_2 / \sqrt{2}$, in je dodatna napetost:

$$\underline{U}_d = -j\omega \frac{N_1}{3} (\underline{\Phi}_A + \underline{\Phi}_B + \underline{\Phi}_C) / \sqrt{2}. \quad (97)$$

V primeru nesimetrične obremenitve vsota fluksov ne bo nič, vendar to ne pomeni, da bodo lahko imeli poljubne vrednosti. Pojavi se sofazni jarnski fluks skozi zrak $\underline{\Phi}_{zr} = 3\underline{\Phi}_0$ (slika 70) na desni strani enačbe (95):

$$\underline{\Phi}_A + \underline{\Phi}_B + \underline{\Phi}_C = \underline{\Phi}_{zr} = 3\underline{\Phi}_0. \quad (95a)$$

Velikost tega fluksa je določena s produktom magnetne napetosti med jarmi Θ_{zr} in ustrezne magnetne prevodnosti Λ_{zr} . Ta magnetna prevodnost ima neko končno vrednost, medtem ko za železno jedro velja pri $\mu_{Fe} \rightarrow \infty$, da je idealno. Z uvedbo fluksa Φ_{zr} v enačbo (95a) dobimo:

$$\underline{U}_d = -j\omega \frac{N_1}{3} \frac{\Phi_{zr}}{\sqrt{2}} = -j\omega \frac{N_1}{3} \Lambda_{zr} \frac{\Theta_{zr}}{\sqrt{2}}. \quad (97a)$$

Fazni položaj dodatne napetosti je odvisen od karakterja enofaznega bremena in je pravokoten na bremenski tok (slika 71).

Z upoštevanjem zakona o amper-ovojih dobimo glede na sliko 67a na posameznih stebrih A, B in C rezultirajoče amper-ovoje $\Theta_{zr} = I_x N_1$ in s tem bilanco:

$$\underline{I}_a N_2 + \underline{I}_A N_1 = \underline{I}_x N_1 \quad \rightarrow \quad \underline{I}_A N_1 = -\frac{2}{3} \underline{I}_a N_2 \quad \rightarrow \quad \underline{I}_A = -\frac{2}{3} \underline{I}'_a$$

$$0 + \underline{I}_B N_1 = \underline{I}_x N_1 \quad \rightarrow \quad \underline{I}_B N_1 = \frac{1}{3} \underline{I}_a N_2 \quad \rightarrow \quad \underline{I}_B = \frac{1}{3} \underline{I}'_a$$

$$\underline{0} + \underline{I}_C N_1 = \underline{I}_x N_1 \quad \rightarrow \quad \underline{I}_C N_1 = \frac{1}{3} \underline{I}_a N_2 \quad \rightarrow \quad \underline{I}_C = \frac{1}{3} \underline{I}'_a$$

$$\underline{I}_a N_2 + (\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C) N_1 = 3 \underline{I}_x N_1 = 3 \underline{\Theta}_{zr} / \sqrt{2}.$$

V zvezdi brez ničelnega vodnika je $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$ in iz vsote vzbujanja vseh treh stebrov dobimo vzbujanje $\underline{\Theta}_{zr} = \sqrt{2} \underline{I}_x N_1 = \sqrt{2} \underline{I}_a N_2 / 3$ ter s tem rešitev za tok nekompenziranega sofaznega vzbujanja:

$$\underline{I}_x = \frac{1}{3} \frac{N_2}{N_1} \underline{I}_a = \frac{1}{3} \underline{I}'_a. \quad (98)$$

S pomočjo enačbe (98) dobimo iz bilance amper-ovojev posameznih stebrov rešitve za primarne tokove, izražene z bremenskimi tokovi na desni strani gornjih enačb. Presežni, tj. sofazni amper-ovoji Θ_{zr} , poženejo iz vsakega stebra enak fluks $\Phi_0 = \Phi_{zr} / 3$. Zaradi tega fluksa skozi stebre in njihova navitja (slika 70) se v navitjih inducira napetost $\underline{U}_d = -\underline{E}_d$, ki spremeni simetrični trifazni sistem v nesimetričnega (slika 71).

Zaradi nesimetrične napetosti se v praksi dovoli nesimetrična obremenitev ene faze $I \leq 0,1 I_N$. Napetost obremenjene faze U_a na sliki 71 pade, toda napetosti sosednjih faz narasteta, če se ne držimo te omejitve. Največja nesimetrična obremenitev je enofazni kratki stik in napetost te faze bo nič.

Ker nimajo svobodnega magnetnega sklepa, imajo trifazni jedrni transformatorji določene razlike glede na plaščne transformatorje ali "transformer bank" tako pri nesimetrični obremenitvi kot pri magnetilnih tokovih.

Iz gornjih izvajanj in iz kazalčnega diagrama na sliki 71 je očitno, da ne smemo vezave Yyn, tj.

brez ničelnega vodnika na primarni strani, obremeniti enofazno, čeprav ima transformator svobodne povratne magnetne sklepe (enako velja za vezavo transformer bank). Ta prepoved mora veljati zaradi: 1. znanega padca napetosti enofazno obremenjenega navitja "a" in še bolj zaradi 2. izrednega porasta napetosti v preostalih dveh fazah \underline{U}_b in \underline{U}_c , kot kaže kazalčni diagram (slika 71).

c) V vezavi trikot – zvezda z ničelnim vodnikom na sekundarni strani (Dyn) ni težav.

Nesimetrična obremenitev ne dela težav, ker tok I_A po eni liniji priteče v navitje faze A in se vrača po drugi liniji, tj. mimo navitij sosednjih dveh faz (slika 67b).

d) Pri vezavi zvezda brez ničelnega vodnika - terciar - zvezda z ničelnim vodnikom (YDyn) ni težav (slika 73b). To vezavo uporabljamo pri visokonapetostnih transformatorjih, ker je napetost faznega navitja proti masi za $\sqrt{3}$ manjša kot pri trikotni vezavi. Nesimetričnost popravimo s posebnim trikotnim navitjem, tj. tretjim navitjem, ki ga imenujemo terciarno navitje. Jarnski fluks inducira v tem navitju napetost \underline{E}_D na vsakem stebru in ta požene skozi kratkosklenjeno navitje sofazne tokove \underline{I}_D in s tem ustvari amper-ovoje, ki kompenzirajo amper-ovoje jarnskih fluksov in premik ničlišča je praktično zanemarljiv.

Za točko b) dobimo vrednost $\underline{\mathcal{Q}}_{zr} = \frac{1}{3} \sqrt{2} \underline{I}_a N_2 = \frac{1}{3} \sqrt{2} \underline{I}'_a N_1$.

Tok v terciarju mora tedaj biti takšen, da ustvari v stebru nasprotno amper-ovoje, da bo:

$$\sqrt{2} \underline{I}_D N_3 = -\underline{\mathcal{Q}}_{zr} = -\frac{1}{3} \sqrt{2} \underline{I}_a N_2 = -\frac{1}{3} \sqrt{2} \underline{I}'_a N_1.$$

Iz tega pogoja dobimo za $\underline{I}_D = -\underline{I}'_{aN} \approx -\underline{I}_{AN}$ število ovojev terciarnega navitja:

$$N_3 = N_1 / 3 \quad (99a)$$

ali za $\underline{I}_D = -\underline{I}_{aN}$

$$N_3 = N_2 / 3. \quad (99b)$$

Ustrezno enačbi (99a) ali (99b) se razen števila ovojev menja tudi presek terciarnega navitja. V terciarju se inducirajo sofazne napetosti:

$$\underline{E}_D = -\frac{1}{3} N_3 \frac{d\Phi_{zr}}{dt} \quad (100)$$

in vsota napetosti, kot je vidno na kazalčnem diagramu na sliki 72a, je:

$$\sum_{A,B,C} \underline{E}_D = 3\underline{E}_D. \quad (101)$$

Razen napetosti, ki so posledica raznih nesimetričnosti se v terciarju inducirajo tudi napetosti, ki so posledica glavnega fluksa:

$$\underline{E}_{Dg} = -\frac{1}{3} N_3 \frac{d\Phi_g}{dt}. \quad (102)$$



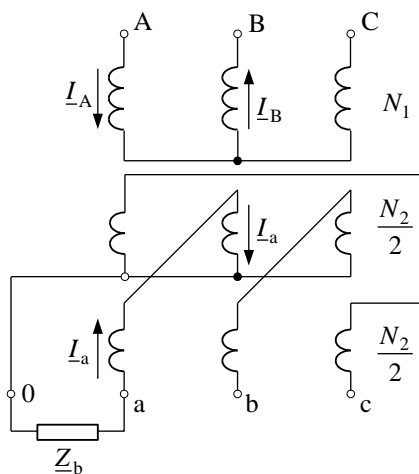
Slika 72 a) Sofazne in b) fazno premaknjene inducirane napetosti v terciarnem navitju
Zaradi faznega premika kazalcev induciranih napetosti v terciarnem navitju (slika 72b), ki so posledica glavnega fluksa, velja:

$$\sum_{A,B,C} \underline{E}_g = \underline{E}_{DgA} + \underline{E}_{DgB} + \underline{E}_{DgC} = 0. \quad (103)$$

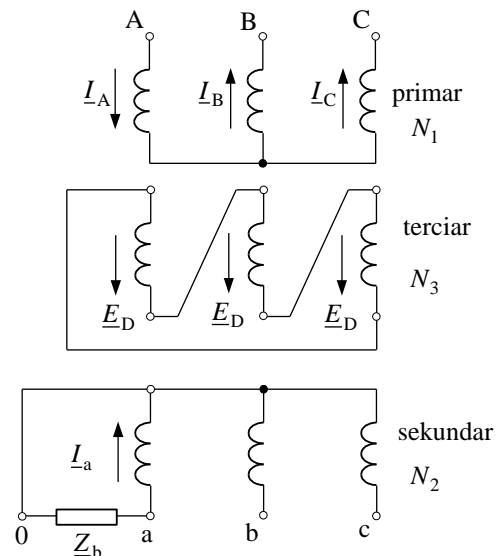
Za terciarno vezavo potrebujemo nekaj več bakra. Za normalna navitja potrebujemo maso bakra $m_{1Cu} + m_{2Cu} = (6/6)m_{Cu}$ in za terciar še $1/6$ celotne mase ali skupaj $7/6 \approx 1,166 m_{Cu}$. Dejansko porabimo nekaj manj bakra, ker je terciar nameščen tik ob stebru in zaradi nizkih napetosti ne potrebuje tako dobre izolacije proti masi (železu). Ta strošek za terciarno navitje je majhen v primerjavi s stroškom za izolacijo glavnih navitij za trikotno vezavo v primerjavi z zvezdno.

e) Pri vezavi zvezda brez ničelnega vodnika - cikcak z ničelnim vodnikom (Y/z) tudi ni težav.

Na sliki 73a je prikazana shema enofazne obremenitev sekundarnega navitja faze "a".



Slika 73a Enofazna obremenitev trifaznega transformatorja v "z" vezavi



Slika 73b Terciarno navitje

Glede na sliko 73a veljajo pogoji ravnotežja amper ovojev prvih dveh stebrov:

$$\underline{I}_A N_1 + \underline{I}_a \frac{N_2}{2} = 0, \quad (104a)$$

$$\underline{I}_B N_1 - \underline{I}_a \frac{N_2}{2} = 0. \quad (104b)$$

Vsota enačb (104a) in (104b) nam da rezultat: $\underline{I}_A N_1 + \underline{I}_B N_1 = 0$ oziroma $\underline{I}_A + \underline{I}_B = 0$. Sofaznih fluksov Φ_{zr} ni. Iz ovojne napetosti U_{ov} izračunamo za navadno zvezdno vezavo fazno napetost $U_{fy} = N_2 U_{ov}$ in za lomljeno zvezdo ali cikcak velja $U_{fz} = \sqrt{3} \frac{N_{2z}}{2} U_{ov}$.

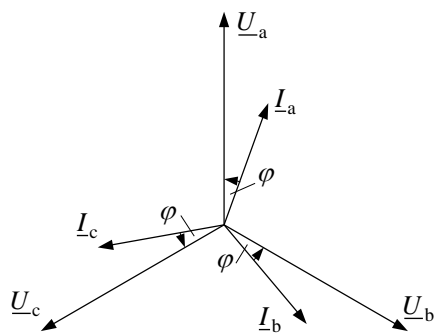
Iz teh dveh enačb dobimo za enako fazno napetost kot pri navitju navadne zvezde z N_{2y} ovoji, število ovojev za cikcak navitje: $N_{2z} = \frac{2}{\sqrt{3}} N_{2y} = 1,155 N_{2y}$.

Cikcak vezava je torej primerna za nesimetrično obremenitev. Njeno sekundarno navitje je za 15,5 % težje od navitja navadne zvezde. Transformatorji se gradijo v tej izvedbi do moči 160 kVA.

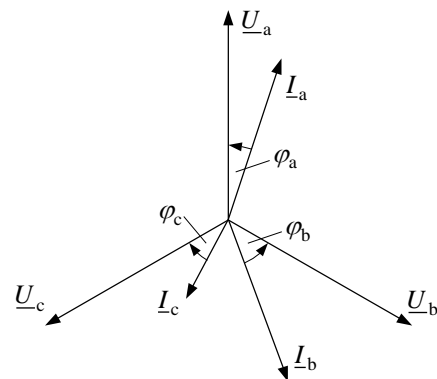
3.5 Nesimetrični trifazni sistem

3.5.1 Splošno o nesimetričnem trifaznem sistemu

Kadar so kazalci (fazorji) napetosti ali tokov vseh treh faz enaki po velikosti in med seboj premaknjeni za 120° , kot je to prikazano na sliki 74, govorimo o simetričnem sistemu.



Slika 74 Kazalčni diagram napetosti in tokov v simetričnem trifaznem sistemu



Slika 75 Kazalčni diagram napetosti in tokov v nesimetričnem trifaznem sistemu

Pri simetrični obremenitvi mora biti: $|\underline{I}_a| = |\underline{I}_b| = |\underline{I}_c|$ in $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi$ oziroma:

$$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0. \quad (105)$$

Simetrično obremenitev povzročijo simetrični trifazni potrošniki. V primeru enofaznih potrošnikov praktično ni mogoče, da bi bili ti enakomerno razdeljeni na posamezne faze in da imajo njihovi tokovi enak fazni premik glede na fazno napetost (slika 74). Vsota tokov po enačbi (105) ne bo več nič.

Ker s simetričnim sistemom lažje računamo, lahko razstavimo vsak nesimetrični trifazni sistem po metodi simetričnih komponent: na pozitivni simetrični trifazni sistem I_{ap}, I_{bp}, I_{cp} , na negativni simetrični trifazni sistem I_{an}, I_{bn}, I_{cn} in tri sofazne komponente I_{a0}, I_{b0}, I_{c0} (slika 76). Pozitivni sistem kazalcev ima zaporedje faz a-b-c v smeri vrtenja urnega kazalca in negativni v nasprotni smeri.

V primeru, ko nimamo ničelnega vodnika, nimamo sofaznih komponent tokov in za vsoto kazalcev tokov velja enačba (105). V primeru, da obstaja ničelni vodnik, bo vsota tokov enaka:

$$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 3\underline{I}_0 \text{ in je}$$

$$\underline{I}_0 = \frac{1}{3}(\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c). \quad (106)$$

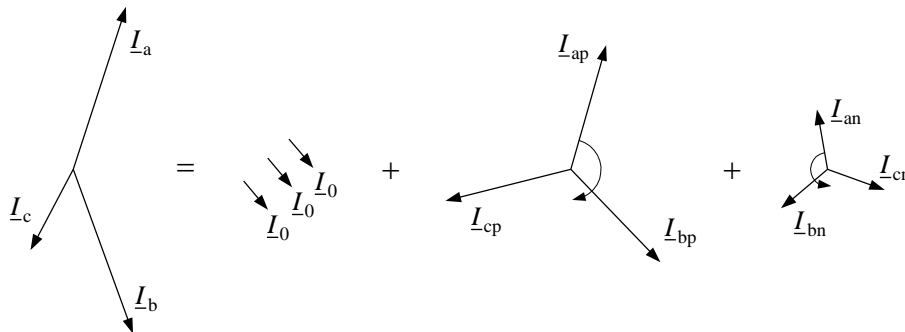
Posamezne kazalce (fazorje) tokov ali napetosti lahko opišemo z operatorjem premika:

$$a = e^{j2\pi/3} = -0,5 + j\sqrt{3}/2. \quad (107a)$$

Za kvadrat operatorja (a^2) je:

$$a^2 = e^{j4\pi/3} = -0,5 - j\sqrt{3}/2. \quad (107b)$$

Velja tudi, da je: $1 + a + a^2 = 0$, $a^3 = e^{j2\pi} = 1$, $a^4 = a$ in $a^5 = a^2$.



Slika 76 Razstavljanje tokov pri nesimetrični obremenitvi

Z operatorjema (107a in b) napišemo za posamezne kazalce simetričnih komponent: a) za pozitivni sistem kazalcev je $\underline{I}_{ap} = \underline{I}_{ap}$, $\underline{I}_{bp} = a^2 \underline{I}_{ap}$, $\underline{I}_{cp} = a \underline{I}_{ap}$; b) za negativni sistem $\underline{I}_{an} = \underline{I}_{an}$, $\underline{I}_{bn} = a \underline{I}_{an}$, $\underline{I}_{cn} = a^2 \underline{I}_{an}$.

Komponento pozitivnega sistema dobimo po enačbi:

$$\underline{I}_{ap} = \frac{1}{3}(\underline{I}_a + a \underline{I}_b + a^2 \underline{I}_c), \quad (108a)$$

medtem ko je komponenta negativnega sistema

$$\underline{I}_{an} = \frac{1}{3}(\underline{I}_a + a^2 \underline{I}_b + a \underline{I}_c). \quad (108b)$$

Vse predhodno opisane enačbe veljajo tudi za višje harmonske komponente, le da so količine različnih frekvenc manjše glede na osnovno harmonsko komponento.

3.5.2 Magnetilni tokovi

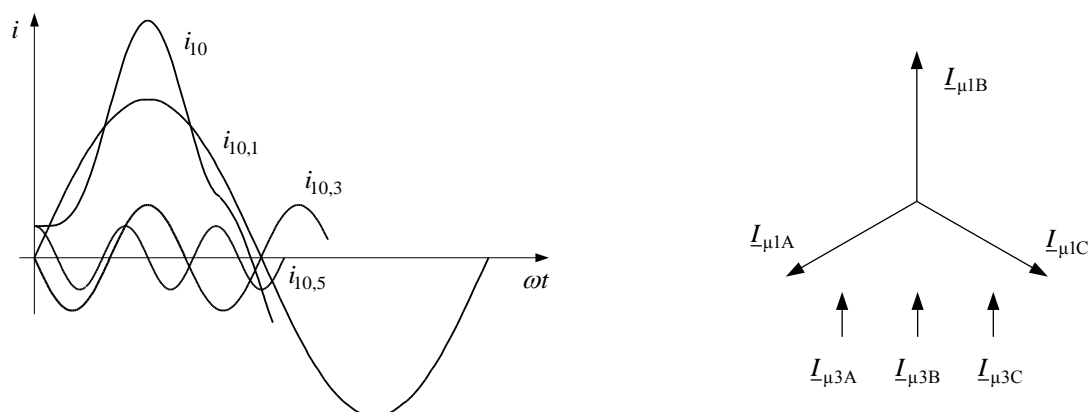
Trije enofazni transformatorji

a) Primarno navitje – zvezda z ničelnim vodnikom (YN)

Enofazni transformator, ki je na primarni strani priključen med fazo in ničelni vodnik, omogoča dovod in odvod magnetilnega toka I_{μ} . V primeru treh enofaznih transformatorjev, vezanih v zvezdo (angl. "transformer bank"), morajo ti obvezno imeti še ničelni vodnik, da teče skozi fazna navitja potrebni magnetilni tok. Težava nastane namreč zaradi tretje harmonske komponente magnetilnega toka (in vseh ostalih višjih deljivih s tri), ki je v vseh treh fazah sofazen (slika 77). Za osnovno harmonsko komponento toka velja:

$$\sum_{A,B,C} I_{\mu} = 0, \text{ za tretjo harmonsko komponento pa velja } \sum_{A,B,C} I_{\mu 3} = 3I_{\mu 3}$$

in ti se vračajo v izvor le po ničelnem vodniku; torej je $I_{0\text{vod}} = 3I_{\mu 3}$.



Slika 77 Magnetilni tokovi in kazalčni diagram za osnovno in tretjo harmonsko komponento

b) Primarno navitje - trikot (D)

V tej vezavi ni težav, ker lahko komponente $I_{\mu 3}$ pritekajo iz linije v navitje in se vračajo po drugi liniji v izvor mimo navitja sosednjih faz.

Trifazni jedrni transformator

Zaradi izrazite magnetne nesimetričnosti pri trifaznem jedrnem transformatorju sta potrebna magnetilna tokova v navitjih A in C enaka, manjši je v navitju B: $I_{\mu A} = I_{\mu C} > I_{\mu B}$.

a) Vezava YN

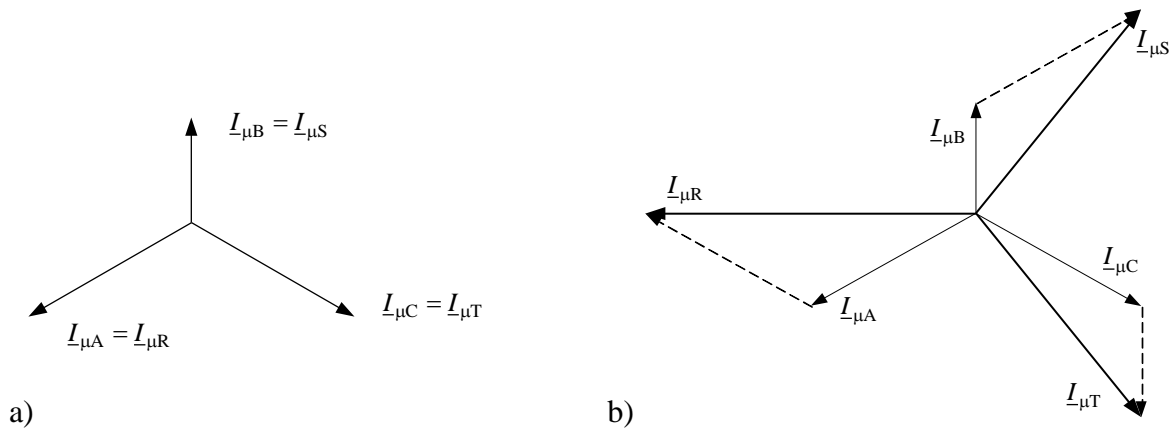
V zvezdni vezavi z ničelnim vodnikom (slika 78a) ni težav, ker lahko pritekajo v navitje posameznih faz različni tokovi ($I_{\mu R} = I_{\mu A}$, $I_{\mu S} = I_{\mu B}$, $I_{\mu T} = I_{\mu C}$), saj je vsota tokov lahko različna od nič.

b) Vezava D

Tudi v trikotni vezavi ni problemov, ker pritekata iz omrežja dva manjša tokova in tretji večji tok, kot je to prikazano za razliko faznih tokov ($I_{\mu R} = I_{\mu A} - I_{\mu C}$, $I_{\mu S} = I_{\mu B} - I_{\mu A}$, $I_{\mu T} = I_{\mu C} - I_{\mu B}$) na sliki 78b.

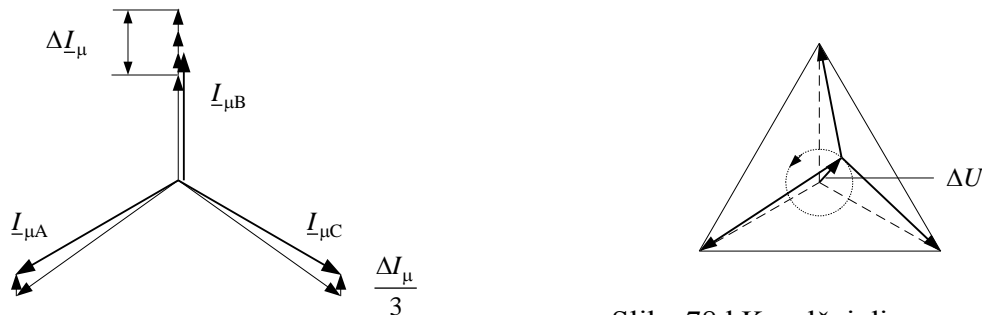
c) Vezava Y

Za trifazni jedrni transformator velja: $I_{\mu A} = I_{\mu C} > I_{\mu B}$. Vsota tokov po kazalčnem diagramu (slika 78c) bi bila enaka ΔI_{μ} in bi lahko tekla po ničelnem vodniku pri vezavi YN. Toda pri vezavi Y dobimo zahtevano vsoto nič le tako, da vsakemu faznemu toku primeroma a) prištejemo enako vrednost $\Delta I_{\mu} / 3$. Vse tri vrednosti so med seboj sofazne.



Slika 78 Kazalčna diagrama magnetilnih tokov za vezavi: a) YN in b) D

Pri vezavi Y nastanejo še težave s harmonskimi komponentami magnetilnega toka, npr. tretjo (slika 77), pa tudi z višjimi (deljivimi s številom 3), ki zaradi manjkajočega ničelnega vodnika ne morejo teči skozi navitja. Zato se pojavijo podobno kot pri nesimetrični obremenitvi sofazni fluksi, vendar trikratne frekvence Φ_{zr} . Ti povzročijo rotacijo in premik ničlišča. Slika 78d prikazuje kazalčni diagram napetosti za vezavo Y in premik ničlišča ΔU , kjer se kazalec ΔU vrti (rotira) s trojno frekvenco.



Slika 78c Kazalčni diagram tokov za vezavo Y

Slika 78d Kazalčni diagram napetosti za vezavo Y

d) Vezava Y s terciarnim navitjem

Jarmski fluks, ki je posledica sofaznih amper-ovojev oziroma tokov ΔI_{μ} zaradi nesimetričnega jedra in predvsem tretje harmonske komponente nasičenja, inducira v navitju terciarja (slika 73b) sofazno napetost E_D . Ta požene v navitjih tok I_D , ki s svojimi amper-ovoji kompenzira amper-ovoje jarmskih fluksov in premik ničlišča je praktično zanemarljiv.

Bilanca amper-ovojev za posamezno navitje terciarja je:

$$\sqrt{2}I_D N_3 = -\underline{\mathcal{Q}}_{zr} = -\frac{1}{3}\sqrt{2}\Delta I_{\mu} N_1 \quad (109)$$

in tok v terciarnem navitju $I_D = -\Delta I_{\mu}$, ker je $N_3 = N_1 / 3$ (enačba 99a) ali $N_3 = N_2 / 3$ (enačba 99b).

Terciarno navitje torej ne kompenzira samo sofaznih komponent vzbujanja, ki so posledica nesimetrične obremenitve, ampak tudi sofazne komponente zaradi nesimetričnega jedra trifaznega transformatorja in višje harmonske komponente (deljive s tri) zaradi nasičenja jedra.

3.6 Uporabnost vezij in vezalnih skupin transformatorjev

Obe osnovni vezji se razlikujeta v tem, da je v vezavi zvezda na navitje pritisnjena napetost $U / \sqrt{3}$ linijske napetosti, toda skozi navitja teče celoten linijski tok. V vezavi trikot je na navitju polna linijska (medfazna) napetost, toda skozi navitja teče le $I / \sqrt{3}$ linijskega toka. Glede izvedbe navitja je splošno stališče, da imamo v zvezdni vezavi manjše število ovojev in pri rastoči napetosti ugodneje izkoriščen prostor, ki ga potrebujemo za navitje, kot v trikotni vezavi. Trikotna vezava ima prednost pri velikih tokovih, ker je manjši presek vodnikov. Ne glede na predhodne ugotovitve potrebujemo zvezdo, če hočemo imeti ničelni vodnik za enofazne potrošnike.

Blok transformatorji, ki povezujejo sinhronske generatorje napetosti na sponkah 6 do 21 kV z visoko napetostnimi zbiralkami napetosti 110, 220 in 400 kV, so na visoko napetostni strani zaradi togega omrežja ali indirektno ozemljitve VN omrežja in visoke napetosti v zvezdni vezavi, na sekundarni strani so v trikotni vezavi. Generator in transformatorje namreč ne povezuje ničelni vodnik. Uporablja se vezava Yd, tj. Yd11 in zlasti Yd5.

Omrežni transformatorji, ki povezujejo prenosno in razdelilno omrežje, so v vezavi Yy; prednostno se uporablja Yy0.

Razdelilni transformatorji, ki povezujejo prenosno oziroma razdelilno omrežje s sistemom potrošnikov, uporablja se Yy0 ali Yd5.

Transformatorji krajevnega omrežja pod 1 kV; uporablja se Dyn5 ali Yzn5.

Transformatorji lastne rabe v elektrarnah, ki povezujejo zbiralnice lastne rabe (npr. 6 kV) in generatorske sponke 10,5 do 21 kV; uporablja se Dd, Yy in Yd.

Omrežni transformatorji mejnih moči – "transformer bank" z avtotransformatorji; uporablja se Yy.

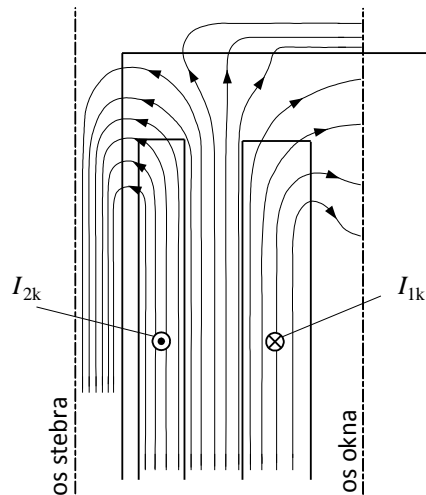
4 IZRAČUN IMPEDANCE TRANSFORMATORJA

V poglavju 2.3 smo obravnavali splošne enačbe za analitični izračun transformatorja. Za analitični izračun moramo poznati razsipane in magnetilno reaktanco ter ohmske upornosti za eno ali večfazne transformatorje. Pri tem ločimo med skupnim razsipanjem, če sta primarno in sekundarno navitje na istem stebru, ali ločenim razsipanjem, če sta primarno in sekundarno navitje na sosednjih stebrih.

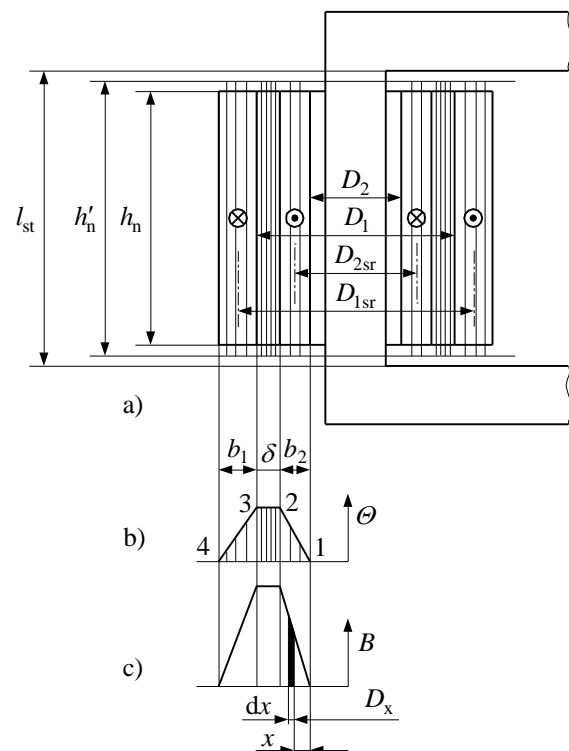
4.1 Izračun razsipane reaktance s skupnim razsipanjem

Za izračun razsipane reaktance moramo poznati sliko magnetnega polja transformatorja. Idealno sliko magnetnega polja transformatorja s cilindričnim navitjem v kratkem stiku prikazuje slika 79.

Pot magnetnih silnic na sliki 79 je komplicirana. Da olajšamo izračun razsipane reaktance, polje na sliki 79 nadomestimo s poljem na sliki 80. Na tej sliki je predpostavljeno, da je navitje z vseh strani obdano z železom in da silnice razsipanega magnetnega polja gredo skozi železo, ki ima neskončno permeabilnost. V tem primeru se celotna magnetna napetost porabi za pot po zraku. Takšna slika polja ne ustreza realnosti.



Slika 79 Razsipano polje transformatorja
v idealnem kratkem stiku



Slika 80 Poenostavljena slika razsipanega polja

Zato ne smemo računati razsipanja s celotno višino okna transformatorja (enako dolžini stebra l_{st}), ampak z višino navitja, korigirano s faktorjem korekcije k :

$$h'_n = \frac{h_n}{k}. \quad (110)$$

Po teoretskih raziskavah Rogowskega je faktor k za cilindrična navitja na sliki 80a enak:

$$k = 1 - \frac{1}{2\pi\kappa} (1 - e^{-2\pi\kappa}). \quad (111)$$

Za κ vzamemo pri cilindričnem navitju vrednost:

$$\kappa = \frac{h_n}{2b}. \quad (112)$$

V enačbi (112) je b skupna širina primarnega in sekundarnega navitja ter zračne reže med navitjema ($b = b_1 + b_2 + \delta$) in h_n višina obeh navitij. V primeru, ko sta navitji različno visoki, vzamemo srednjo višino.

Komplicirano enačbo (111) nadomestimo z bolj enostavno, če zanemarimo tretji člen enačbe za mejne pogoje, ko je $b/h_n < 2$ ter $\delta < b/2$ in velja poenostavljena enačba:

$$k = 1 - \frac{1}{2\pi\kappa} = 1 - \frac{b}{\pi h_n}. \quad (111a)$$

Vrednosti za k se gibljejo v mejah od 0,9 do 0,97. Pri večini cilindričnih navitij je višina navitja precej večja od njegove širine in pride $k \approx 1$. Tedaj računamo razsipano polje z dolžino silnic, ki je enaka višini navitja.

Za razsipano polje cilindričnega navitja velja, ob upoštevanju dejstva, da v železnem jedru in v prostoru med notranjim (sekundarnim) navitjem in jedrom ni polja, ker se obe vzbujanji kompenzirata po enačbi $I_{1k}N_1 = I_{2k}N_2$. Torej se vzbujanje od notranjega roba (sekundarnega) navitja (točka 1 na sliki 80b) povečuje z razdaljo x po premici do zunanjega roba (točka 2), v zračni reži je konstantno in od točke 3 do 4 linearno pada zaradi nasprotnega vzbujanja zunanjega (primarnega) navitja.

Maksimalno vrednost magnetne poljske jakosti, ki je enaka v celotni zračni reži " δ " med navitjema, izračunamo po znani enačbi $H_\delta = (I_{2k}N_2)/h'_n$. V zračni reži velja zaradi permeabilnosti μ_0 linearna odvisnost med poljsko jakostjo in gostoto magnetnega pretoka. Zato je po obliki slednja podobna vzbujalni krivulji (slika 80c). Vrednost gostote magnetnega pretoka v zračni reži je tako:

$$B_\delta = \mu_0 H_\delta = \mu_0 \frac{I_{2k}N_2}{h'_n}. \quad (113)$$

Za izračun razsipanega polja zaradi simetrije predpostavimo, da odpade enak del na obe navitji. Razsipano induktivnost sekundarnega navitja izračunamo iz magnetnega sklepa med razsipanim fluksom in ovoji sekundarnega navitja pri toku $I_{2k} = 1 \text{ A}$.

V notranjosti sekundarnega navitja se z razdaljo x od notranjega roba menja polje po enačbi:

$$B_x = \mu_0 \frac{I_{2k} N_2}{h'_n} \frac{x}{b_2} \quad (114)$$

in je fluks elementa skozi površino $dA_x = \pi D_x dx$ med dvema cilindroma z razmikom dx :

$$d\Phi_x = B_x dA_x = \mu_0 \frac{I_{2k} N_2}{h'_n} \frac{x}{b_2} \pi (D_2 + 2x) dx. \quad (115)$$

Ta fluks je sklenjen z naslednjim številom ovojev $N_x = N_2 x / b_2$ in ustvari magnetni sklep:

$$d\Psi_x = N_x d\Phi_x = \mu_0 I_{2k} \left(N_2 \frac{x}{b_2} \right)^2 \frac{\pi (D_2 + 2x)}{h'_n} dx. \quad (116)$$

Z integriranjem enačbe (116) dobimo magnetni sklep tega dela navitja:

$$\Psi_{b_2} = \int_0^{b_2} d\Psi_x = \mu_0 \frac{N_2^2}{h'_n} \pi \frac{b_2}{3} \left(D_2 + \frac{3}{2} b_2 \right) I_{2k}. \quad (117)$$

Nato je potrebno izračunati še magnetni sklep tistega dela sekundarnega navitja, ki se razvije v zračni reži širine $\delta/2$ med navitjema. Silnice tega fluksa so sklenjene z vsemi ovoji sekundarnega navitja. Skupni magnetni sklep tega fluksa je tako enak:

$$\begin{aligned} \Psi_{\delta 2} &= \int_{b_2}^{b_2 + \delta/2} B_\delta dA_x N_2 = \int_{b_2}^{b_2 + \delta/2} \mu_0 \frac{I_{2k} N_2}{h'_n} \pi (D_2 + 2b_2 + 2x) N_2 dx = \\ &= \mu_0 \frac{N_2^2}{h'_n} \pi \frac{\delta}{2} \left(D_2 + 2b_2 + \frac{\delta}{2} \right) I_{2k}. \end{aligned} \quad (118)$$

Skupno razsipanje sekundarnega fluksa pa je:

$$\Psi_{\sigma 2} = \Psi_{b_2} + \Psi_{\delta 2} = \mu_0 \frac{N_2^2}{h'_n} \pi \left(\frac{b_2}{3} (D_2 + \frac{3}{2} b_2) + \frac{\delta}{2} (D_2 + 2b_2 + \frac{\delta}{2}) \right) I_{2k}. \quad (119)$$

Enačbo (119) lahko poenostavimo, tako da ne naredimo velike napake, in računamo razsipanje s srednjim premerom navitja D_{2sr} :

$$\Psi_{\sigma 2} = \mu_0 N_2^2 \frac{\pi D_{2sr}}{h'_n} \left(\frac{b_2}{3} + \frac{\delta}{2} \right) I_{2k}. \quad (119a)$$

Sedaj izračunamo razsipano induktivnost sekundarnega navitja kot kvocient:

$$L_{\sigma 2} = \frac{\Psi_{\sigma 2}}{I_{2k}} = \mu_0 N_2^2 \frac{\pi D_{2sr}}{h'_n} \left(\frac{b_2}{3} + \frac{\delta}{2} \right). \quad (120a)$$

Na podoben način lahko izvedemo izračun razsipane induktivnosti tudi za primarno navitje:

$$L_{\sigma 1} = \mu_0 N_1^2 \frac{\pi D_{1sr}}{h'_n} \left(\frac{b_1}{3} + \frac{\delta}{2} \right). \quad (120b)$$

Skupno razsipano (kratkostično) induktivnost transformatorja, ob istočasnem reduciranju na primarno stran, izračunamo po enačbi:

$$L_{\sigma} = L_k = \mu_0 N_1^2 \frac{\pi}{h'_n} \left(D_{1sr} \left(\frac{b_1}{3} + \frac{\delta}{2} \right) + D_{2sr} \left(\frac{b_2}{3} + \frac{\delta}{2} \right) \right). \quad (121)$$

Namesto, da računamo s srednjim premerom posameznih navitij, lahko izvedemo izračun s srednjim premerom celotnega navitja D_{sr} in dobimo skupno razsipano induktivnost:

$$L_{\sigma} = \mu_0 N_1^2 \frac{\pi D_{sr}}{h'_n} \left(\delta + \frac{b_1 + b_2}{3} \right) \quad (121a)$$

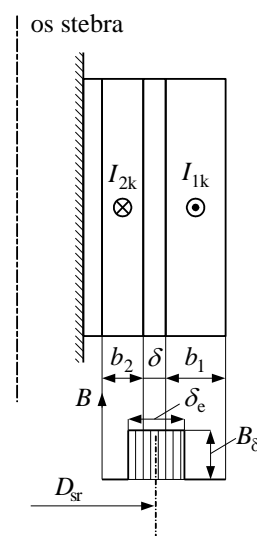
oziroma reaktanco kratkega stika v obliki:

$$X_{\sigma} = 7,9 f N_1^2 \frac{\pi D_{sr}}{h'_n} \delta_e 10^{-6}. \quad (122)$$

V enačbi (122) je δ_e ekvivalentna zračna reža, ki je enaka

$$\delta_e = \delta + \frac{b_1 + b_2}{3}. \quad (123)$$

Na sliki 80d vidimo, da predstavlja ekvivalentna zračna reža razdaljo, ki jo sestavljata dejanska zračna reža in del širine navitja 1 in 2. Površini trapeza razsipanega polja na sliki 80c in pravokotnika 80d sta enaki. δ_e je ekvivalentna zračna reža in podaja efektivno razdaljo med obema navitjema.



Slika 80d Razsipano polje konstantne vrednosti

V primeru, da želimo zmanjšati razsipanje, uporabimo razdeljeno (dvojno koncentrično) NN navitje, ki je skupaj z razsipanim poljem prikazano na sliki 81a. Glede na smeri tokov dobimo za razsipano polje dva trapeza nasprotnih smeri. Slika razsipanega polja je zaradi deljenega NN navitja drugačna kot pri normalnem trifaznem transformatorju na sliki 80c. Skupno reaktanco dobimo kot vsoto reaktanc posameznih trapezov. Posameznemu trapezu odgovarja na sliki 81a polovica primarnih in sekundarnih ovojev.

Slika 81b podaja razporeditev tuljav z razdeljenim VN navitjem in z vrisanim razsipanim poljem. VN navitje je deljeno tako, da je bližje stebri tuljava regulacijskih ovojev.

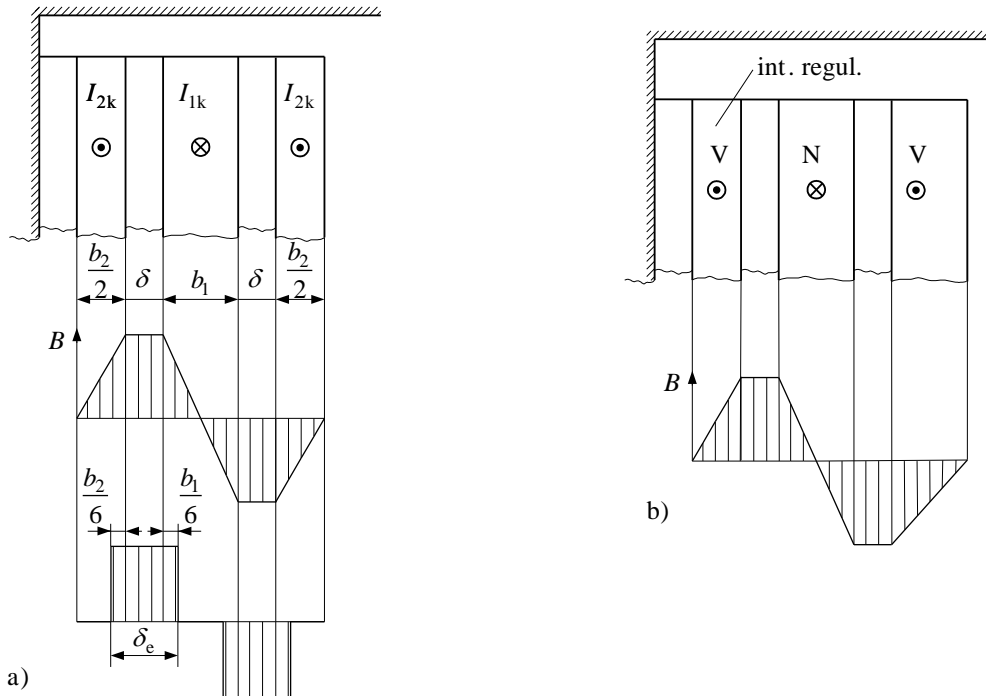
Glede na sliko 81a je ekvivalentna zračna reža, tj. ekvivalentna širina ene skupine razsipanja:

$$\delta_e = \delta + \frac{b_1/2 + b_2/2}{3} = \delta + \frac{b_1 + b_2}{6}. \quad (124)$$

Skupna razsipana reaktanca je enaka vsoti obeh skupin in je zato dvakrat večja, toda ker je kvadrat polovičnega števila ovojev posameznega navitja četrtnina prvotne vrednosti nedeljenega navitja, je skupna reaktanca za deljeno sekundarno navitje in ekvivalentno zračno režo po enačbi

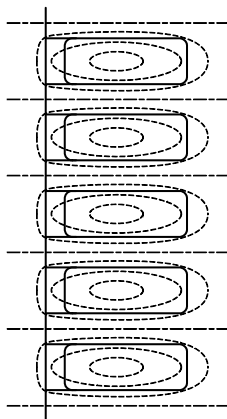
(124) enaka:

$$X_k = 3,95 f N_1^2 \frac{\pi D_{sr}}{h'_n} \delta_e 10^{-6}. \quad (125)$$

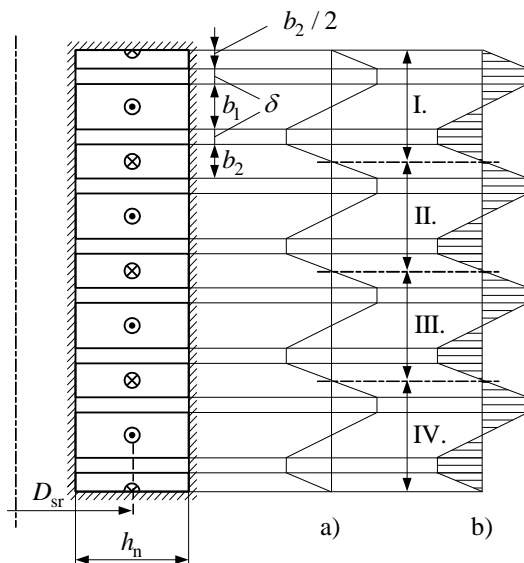


Slika 81 Dvojno koncentrično navitje, a) razdeljeno NN in b) razdeljeno VN navitje

V primeru ploščatega navitja (sliki 82 in 83) je navitje navadno deljeno na več posameznih tuljav. Tako je vedno posamezna sekundarna tuljava obdana z dvema primarnima tuljavama. Z mešanjem tuljav se vedno zmanjša skupno razsipanje in je to manjše, če je popolnejše mešanje.



Slika 82 Razsipano polje ploščatega navitja



Slika 83 Poenostavljena slika razsipanega polja ploščatega navitja

Za izračun razsipane upornosti ploščatega navitja bomo, namesto pravilne slike razsipanja na sliki 82 z nekaj tuljavami, upoštevali, da je navitje v celoti obdano z železom. Tako dobimo za ploščato navitje poenostavljeno sliko polja, kjer so silnice vzporedne črte (slika 83). Silnice so sedaj pravokotne na os stebra in gredo radialno skozi navitje. Samo navitje je deljeno na " n_σ " tuljav s številom ovojev N/n_σ in dobimo $2n_\sigma$ skupin (grup) razsipanja. Zadnja tuljava nizkonapetostnega navitja (pri jarmu) je pri tem razdeljena na dve polovični tuljavi (prva polovica zgoraj in druga spodaj).

Del slike 83, označen z a), predstavlja vzbujanje razsipanega polja in oznaka b) ustrežno gostoto magnetnega pretoka. Za ploščato navitje na sliki 83 velja za izračun (razsipane) reaktance kratkega stika enačba:

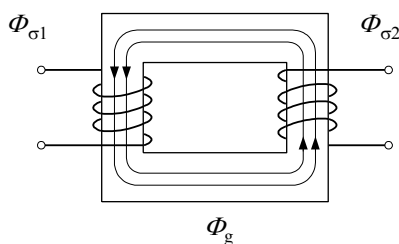
$$X_k = 3,95 f N_1^2 \frac{\pi D_{sr}}{n_\sigma h_n'} \left(\delta + \frac{b_1 + b_2}{6} \right). \quad (126)$$

Za izračun dolžine silnic je po raziskavah Rogowsky ugotovil, da veljajo tudi za ploščato navitje enačbe (110) in (111) s to razliko, da je treba za izračun κ vzeti vrednost:

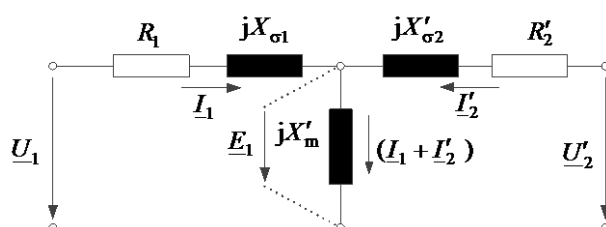
$$\kappa = \frac{h_n}{2\delta + b_1 + b_2}. \quad (112a)$$

4.2 Izračun razsipane reaktance za ločena navitja

Enofazni transformatorji normalnih izvedb – jedrni tip (slika 3a) – imajo na vsakem stebri obe navitji, tj. primarno in sekundarno (slika 7a). To smo omenili tudi v poglavju 2.2.1, ko smo za teoretično razlago zaradi preglednosti podali za sliko 12, ki ne odgovarja konstrukcijski izvedbi. Smo pa dejansko konstrukcijsko izvedbo navitij upoštevali pri določanju razsipanih polj v poglavju 2.3 pri analitični obravnavi, kjer smo v nadomestnem vezju na sliki 39 dobili člena $(X_1 - X'_{12})$ in $(X'_2 - X'_{21})$, katerih vsota približno ustreza skupni reaktanci razsipanja X_σ . V primeru, ko je primar na enem in sekundar na drugem stebri, kar ustreza sliki 84, ustvarja vsako navitje svoje razsipano polje. To je za izračun neprimerno težje kot v primeru skupnega razsipanja. Takšne so običajno konstrukcije varilnih transformatorjev, transformatorjev za indukcijske peči ... Za takšno konstrukcijo je popolnoma upravičeno nadomestno vezje na sliki 85.



Slika 84 Enofazni transformator z ločenimi razsipanimi polji



Slika 85 Nadomestno vezje transformatorja z ločenimi razsipanimi polji

Za razliko izračuna v poglavju 2.2.1 uvedemo med sklepi razsipanja in njihovimi tokovi faktor proporcionalnosti ločeno za posamezno induktivnost razsipanja in lahko pišemo enačbi magnetnih sklepov:

$$\underline{\Psi}_1 = L_{\sigma 1} \sqrt{2} I_1 + N_1 \underline{\Phi}_g, \quad (127a)$$

$$\underline{\Psi}_2 = L_{\sigma 2} \sqrt{2} I_2 + N_2 \underline{\Phi}_g. \quad (127b)$$

Za pogoj $I_1 + I_2 = 0$ dobimo $\underline{U}_\sigma = j\omega(\underline{\Psi}_1 - \underline{\Psi}_2) = j\omega(L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2})I_1 \sqrt{2}$, kjer je:

$$L'_{\sigma 2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 L_{\sigma 2} \text{ oziroma } X'_\sigma = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 X_{\sigma 2}.$$

Primerjava z enačbo (37) pokaže, da je v tem primeru

$$X_\sigma = X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2}. \quad (128)$$

Skupna reaktanca razsipanja je vsota primarne in na primarno stran reducirane reaktance razsipanja sekundarnega navitja. Prikaz z uvedbo posameznih reaktanc razsipanja torej na splošno ni mogoč pri realnih transformatorjih.

Opomba: Pri električnih rotacijskih strojih sta navitji v dveh z zračno režo ločenih magnetnih krogih, zato sta praviloma ločeni reaktanci razsipanja, npr. v utorih statorja in rotorja.

V poglavju 2.3 pri analitični obravnavi za linearno odvisnost v magnetnem krogu (slika 38) lahko uvedemo pojem magnetne upornosti R_m ali prevodnosti Λ_m :

$$R_m = \frac{1}{\Lambda_m} = \frac{\Theta}{\Phi} = \frac{\sum IN}{\Phi} \text{ ali } \Phi = \frac{\sum IN}{R_m}, \text{ zato je}$$

$$\Phi_g = \frac{(I_1 N_1 + I_2 N_2) \sqrt{2}}{R_m}. \quad (129)$$

Enačbo (129) vstavimo v enačbi (127a in b) in jo pomnožimo še z ω :

$$\omega \underline{\Psi}_1 = \omega L_{\sigma 1} \sqrt{2} I_1 + \omega N_1 \underline{\Phi}_g = X_{\sigma 1} \sqrt{2} I_1 + \omega N_1 \frac{(I_1 \sqrt{2} N_1 + I_2 \sqrt{2} N_2)}{R_m}.$$

S preureditvijo enačbe dobimo:

$$\omega \underline{\Psi}_1 = \left(X_{\sigma 1} + \omega \frac{N_1^2}{R_m} \right) \sqrt{2} I_1 + \omega \frac{(N_1 N_2)}{R_m} \sqrt{2} I_2 = X_{11} \sqrt{2} I_1 + X_{12} \sqrt{2} I_2 \quad (130a)$$

in podobno

$$\omega \underline{\Psi}_2 = \left(X_{\sigma 2} + \omega \frac{N_2^2}{R_m} \right) \sqrt{2} I_2 + \omega \frac{(N_2 N_1)}{R_m} \sqrt{2} I_1 = X_{22} \sqrt{2} I_2 + X_{21} \sqrt{2} I_1. \quad (130b)$$

S primerjavo reaktanc enačb (48) za induktivne člene nadomestnega vezja in z upoštevanjem enačb (54) in (56) za transformirane sekundarne veličine dobimo:

$$(X_1 - X'_{12}) = X_{\sigma 1}, \quad (131a)$$

$$(X'_2 - X'_{21}) = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 X_{\sigma 2} = X'_{\sigma 2}. \quad (131b)$$

V posebnem primeru ločenih razsipanaj ustrezajo induktivni vzdolžni členi nadomestnega vezja ločenim reaktancam razsipanaj (slika 85).

Opomba: Če primerjamo vezji na sliki 39 in 85, bi omenili še prečni člen, ki je smiselno povezan s Φ_g in ga označimo z X_m (magnetilna reaktanca).

Zveza med X_m in X'_{12} je podana z enačbo $(\underline{I}_1 + \underline{I}'_2)X'_{12} = (\underline{I}_1 + \underline{I}'_2)X_m$ in $X'_{12} = X_m = K_U X_{12}$.

4.3 Izračun induktivnega padca napetosti

Skupni induktivni padec napetosti transformatorja na razsipani reaktanci, transformiran na primarno navitje, izračunamo v odstotkih

$$u_{\sigma\%} = \frac{I_1 X_{\sigma}}{U_1} 100 \quad (132)$$

in tok primarnega navitja:

$$I_1 = \frac{S_d}{U_1}. \quad (133)$$

S_d je dejanska navidezna moč posameznega stebra in skupine razsipanaja:

$$S_d = \frac{S_N}{m_{st} n_{\sigma}}. \quad (134)$$

S_N je navidezna moč, m_{st} število stebrov in n_{σ} število skupin razsipanaja transformatorja.

Induktivni padec napetosti dobimo, če vstavimo v enačbo (132) enačbi (133) in (134):

$$u_{\sigma\%} = \frac{S_d X_{\sigma}}{U_1^2} 100 = \frac{S_d \omega L_{\sigma}}{U_1^2} 100 = \frac{S_d 2\pi f N_1^2 A_m}{U_1^2} 100 = \frac{S_d 2\pi f A_m}{U_{ov}^2} 100. \quad (135)$$

V enačbi (135) je U_{ov} pri transformatorjih dobro poznan izraz ovojne napetosti, A_m je magnetna prevodnost prostora razsipanega polja in jo izračunamo:

$$A_m = \mu_0 \frac{\delta_e \pi D_{sr}}{h'_n} = \mu_0 \frac{\delta_e O_{sr}}{h'_n}. \quad (136)$$

Za izračun ekvivalentne zračne reže spremenimo izraz (123) in na ta način upoštevamo razdelitev navitja (običajno nizkonapetostnega) na več skupin, med katerimi je izolacija:

$$\delta_e = \delta + \frac{\sum b_1 + \sum b_2}{3}. \quad (123a)$$

Z upoštevanjem enačbe (136), njeno manjšo preureditvijo in uvrstitvijo permeabilnosti zraka dobimo končno enačbo za izračun induktivnega padca napetosti v odstotkih:

$$u_{\sigma\%} = 39,5 \frac{S_d \delta_e O_{sr} k}{U_{ov}^2 h_n} 10^{-3}. \quad (137)$$

Pri gradnji in uporabi transformatorjev nas dejansko ne zanima razsipani padec napetosti, ampak kratkostična napetost $u_{k\%}$. Za njen izračun potrebujemo tudi ohmski padec napetosti.

4.4 Izračun ohmskega padca

Ohmska upornost navitja, izračunana za srednjo temperaturo navitja transformatorja v obratovanju ϑ ($^{\circ}\text{C}$), če je specifična ohmska upornost za baker pri temperaturi $\vartheta = 20$ $^{\circ}\text{C}$ enaka $\rho_{20} = 0,0175 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$, je:

$$\rho_{\vartheta} = 0,0175 \frac{235 + \vartheta}{235 + 20} = \frac{1}{57} \frac{235 + \vartheta}{235 + 20} \quad (138)$$

in za $\vartheta = 75$ $^{\circ}\text{C}$

$$\rho_{75} = 0,0175 \frac{235 + 75}{235 + 20} = 0,0213. \quad (138a)$$

Za aluminijasto žico je specifična upornost $\rho_{20} = 1/37 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ in pri poljubni temperaturi:

$$\rho_{\vartheta} = \frac{1}{37} \frac{245 + \vartheta}{245 + 20}. \quad (139)$$

Za zlitino aluminija (dodan silicij ≈ 12 %) je: $\rho_{20} \approx 1/18$.

Upornost faznega navitja, ki ima "a" paralelnih vej, znaša:

$$R = \frac{\rho_{\vartheta} l}{a^2 A_{Cu}}. \quad (140)$$

V enačbi (140) je l dolžina vodnikov vseh vej in A_{Cu} presek vodnikov.

Celotni ohmski fazni padec napetosti izračunamo po znani enačbi:

$$u_{r\%} = \frac{I_{1f}(R_1 + R'_2)}{U_f} 100. \quad (141)$$

Na primarno stran transformirana upornost sekundarnega navitja je:

$$R'_2 = R_2 K_U^2 = R_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2. \quad (142)$$

Napetostna prestava v enačbi (142) je prestava za fazne veličine v zvezdni (Yy) ali trikotni vezavi navitja (Dd) na primarni in sekundarni strani. Zanja velja ista enačba (14) kot za enofazne transformatorje. V primeru cikcak vezave na sekundarni strani (vezava Yz) izpeljemo napetostno prestavo iz števila ovojev in inducirane napetosti ovoja:

$$E_1 = N_1 E_{\text{ov}} \text{ in } E_2 = \sqrt{3} \frac{N_2}{2} E_{\text{ov}} \text{ ter dobimo:}$$

$$K_U = \frac{E_1}{E_2} = \frac{2N_1}{\sqrt{3}N_2}. \quad (14a)$$

4.5 Kratkostična napetost

Kratkostično napetost transformatorja izračunamo po Pitagori:

$$u_{k\%} = \sqrt{u_{r\%}^2 + u_{\sigma\%}^2}. \quad (143)$$

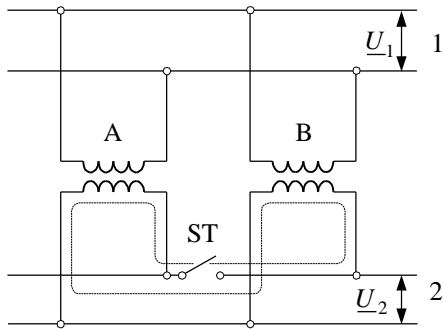
Kratkostična napetost je osnovni podatek transformatorja. Večja kot je, manjši je tok kratkega stika, ker je ta po enačbi (72) $I_k = f(1/u_k^*)$. Prevelika kratkostična napetost tudi ni ugodna zaradi prevelikega padca napetosti. Zelo pomembna je tudi pri paralelnem obratovanju, kjer mora biti enaka oziroma v mejah odstopanja $\pm 10\%$ od u_k . Pri velikosti transformatorjev moči ≈ 30 kVA je ohmski padec približno enak razsipanemu padcu napetosti. Pri večjih transformatorjih se ohmski padec zmanjšuje in od moči 8000 kVA naprej je praktično zanemarljiv.

Znano je, da so kratkostične napetosti za energetske transformatorje predpisane v odvisnosti od nazivne navidezne moči in podane na napisni tablici transformatorjev. Slika 115 v poglavju 8.2 prikazuje primer energetskega transformatorja z odcepi in podatke za kratkostično napetost posameznega odcepa.

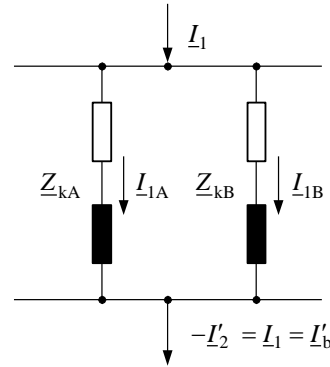
Na splošno je znano, da imajo manjši energetski transformatorji manjši predpisani padec za kratkostično napetost, ker lahko dalj časa obratujejo v kratkem stiku kot večji transformatorji. Tako imajo distribucijski transformatorji moči 50 do 630 kVA predpisan $u_k = 4\%$ (tabela XIV stran 135), moči večje od 630 kVA imajo predpisan $u_k = 6\%$.

5 PARALELNO OBRATOVANJE TRANSFORMATORJEV

Pod paralelnim obratovanjem razumemo delovanje dveh ali več transformatorjev, ki so paralelno priključeni tako na primarni kot na sekundarni strani na omrežje 1 oziroma na omrežje 2., To je razvidno iz stikalne sheme na sliki 86 in iz nadomestnega vezja na sliki 87 za primer dveh enofaznih transformatorjev A in B.



Slika 86 Stikalna shema paralelno delujočih transformatorjev



Slika 87 Nadomestno vezje paralelno delujočih transformatorjev

Stikalo ST smemo vključiti le v primeru, če paralelno delujoča transformatorja izpolnjujeta naslednje pogoje:

- 1) imeti morata enako nazivno prestavno razmerje $K_{UA} = K_{UB}$;
- 2) oba morata biti grajena za isto frekvenco $f_A = f_B = f$;
- 3) vezava mora zagotoviti sofaznost napetosti \underline{U}'_{2A} in \underline{U}'_{2B} (oziroma pri trifaznih transformatorjih morata imeti oba enako vezalno skupino);
- 4) ker želimo, da se transformirana skupna navidezna moč razdeli tako glede delovne kot jalove komponente v razmerju nazivnih moči na oba paralelno delujoča transformatorja, moramo zadostiti naslednjim pogojem.

Za $u_{\sigma A}^* = u_{\sigma B}^*$ in $u_{rA}^* = u_{rB}^*$ lahko izrazimo pogoja:

4a) $u_{kA}^* = u_{kB}^*$, torej imata oba transformatorja enaki kratkostični napetosti;

4b) $\begin{pmatrix} u_r^* \\ u_\sigma^* \end{pmatrix}_A = \begin{pmatrix} u_r^* \\ u_\sigma^* \end{pmatrix}_B$, torej $\varphi_{kA} = \varphi_{kB}$.

To je izvedljivo, če je izpolnjen še dodatni pogoj, da

5) nazivne navidezne moči ne smejo preseči razmerja $S_{AN} : S_{BN} \leq 3 : 1$.

Opomba: Za takšno razmerje je sprememba linearnih dimenzij po zakonu o geometrijski rasti

$$x = \sqrt[4]{S_{AN}/S_{BN}} = \sqrt[4]{3/1} \approx 1,31 \text{ in to zagotavlja dokajšnjo enakost } u_k.$$

Ogledali si bomo dva primera paralelnega obratovanja transformatorjev.

5.1 Paralelno obratovanje pri različnih kratkostičnih napetostih

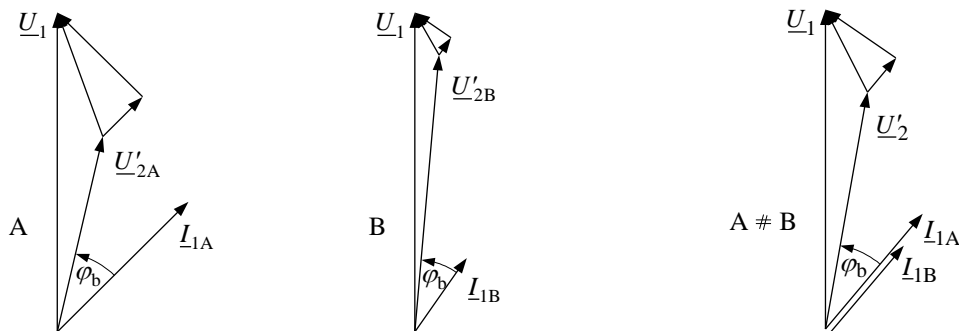
V tem primeru ni izpolnjen pogoj 4a), torej $u_{kA}^* \neq u_{kB}^*$, izpolnjen pa je pogoj 4b), tj. $\varphi_{kA} = \varphi_{kB}$. Zato sta si Kappova trikotnika podobna, toda nista enaka.

Iz enačbe (78) sledi za oba transformatorja pogoj:

$$\underline{U}_1 - \underline{U}'_{2A} = \underline{U}_1 - \underline{U}'_{2B}. \quad (144)$$

V kazalčnih diagramih na sliki 88a sta prikazana kazalčna diagrama transformatorjev pri njihovih nazivnih obremenitvah in kazalčni diagram po vzpostavitvi paralelnega obratovanja. Oba transformatorja skupno dobavljata moč potrošnikom na sekundarnem omrežju, torej je pri obeh enak kot bremena φ_b . Transformator B ima manjšo moč kot transformator A. Enako velja tudi za kratkostični napetosti. Napetosti \underline{U}'_{2A} in \underline{U}'_{2B} sta si različni.

Ko vključimo stikalo za paralelno obratovanje (slika 86), tok I_{1A} upada in tok I_{1B} narašča, dokler nista hipotenuzi obeh Kappovih trikotnikov enaki in je izpolnjena zahteva po enačbi (144). Večji transformator se je razbremenil, manjši transformator pa preobremenil. Ker se transformator z manjšo napetostjo u_k tokovno ne sme preobremeniti, je lahko obremenjen samo do nazivnega toka oziroma moči. Torej bo morala biti napetost \underline{U}'_{2A} enaka \underline{U}'_{2B} , to pomeni zmanjšanje hipotenuze Kappovega trikotnika pri A, tj. zmanjšanje padcev u_r in u_σ ter s tem zmanjšanje bremenskega toka na $I_{1A} < I_{1AN}$ oziroma moči $S_A < S_{AN}$. Transformirana moč bo le $S_A + S_{BN} < S_{AN} + S_{BN}$, torej manjša, kot je instalirana moč obeh transformatorjev.



Slika 88a Kazalčni diagrami za paralelno obratovanje za $u_{kA}^* \neq u_{kB}^*$

Iz nadomestnega vezja na sliki 87 sledi razdelitev tokov oziroma moči $\underline{I}_{1A} \underline{Z}_{kA} = \underline{I}_{1B} \underline{Z}_{kB}$ ali

$$\frac{\underline{I}_{1A}}{\underline{I}_{1B}} = \frac{\underline{Z}_{kB}}{\underline{Z}_{kA}} \quad (145)$$

in za razmerje prenosnih navideznih moči pri $U_1 = U_{1N}$, z $Z_k I_N = U_k = u_k^* U_N$, velja:

$$\frac{S_A}{S_B} = \frac{U_{1N} I_{1A}}{U_{1N} I_{1B}} = \frac{Z_{kB}}{Z_{kA}} = \left(\frac{U_{1N} I_{1AN}}{U_{1N} I_{1BN}} \right) \left(\frac{I_{1BN} Z_{kB}}{I_{1AN} Z_{kA}} \right) = \frac{S_{AN}}{S_{BN}} \frac{u_{kB}^*}{u_{kA}^*}. \quad (146a)$$

S pomočjo enačbe razmerja (146a) lahko dobimo razmerje:

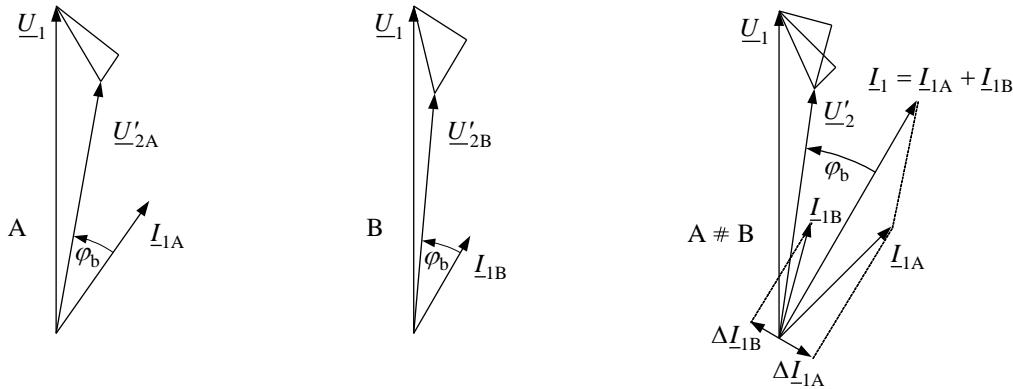
$$\frac{S_A/S_{AN}}{S_B/S_{BN}} = \frac{u_{kB}^*}{u_{kA}^*}. \quad (146b)$$

Iz teh osnovnih razmerij lahko izračunamo še razmerja S_A/S_{AN} in S_B/S_{BN} , če je transformirana moč enaka vsoti nazivnih moči $S_A + S_B = S_{AN} + S_{BN}$, kakor tudi izraze za razdelitve skupne moči $S_A/(S_A + S_B)$ in $S_B/(S_A + S_B)$.

5.2 Paralelno obratovanje pri različnih faznih kotih kratkostičnih napetosti

V tem primeru za paralelno obratovanje ni izpolnjen pogoj 4b), torej $(u_r/u_\sigma)_A \neq (u_r/u_\sigma)_B$, ampak je izpolnjen pogoj 4a), torej $u_{kA}^* = u_{kB}^*$. Kappova trikotnika si nista podobna, čeprav imata enaki hipotenuzi in bo tako izpolnjena zahteva iz enačbe (144), tj. $(\underline{U}_1 - \underline{U}'_{2A}) = (\underline{U}_1 - \underline{U}'_{2B})$ v absolutnih vrednostih, toda položaja skupnih padcev napetosti sta različna.

Ko vzpostavimo paralelno obratovanje, se morata tokova \underline{I}_{1A} in \underline{I}_{1B} tako spremeniti, da se hipotenuzi obeh Kappovih trikotnikov pokrijeta. Pri tem mora vsota tokov $\underline{I}_{1A} + \underline{I}_{1B}$ dati skupni tok $\underline{I}_1 = \underline{I}'_b$, ki ga poganja napetost \underline{U}'_2 skozi bremenske upornosti. Med sekundarno napetostjo \underline{U}'_2 in skupnim tokom \underline{I}'_b nastane fazni kot φ_b . Ustrezni kazalčni diagrami so na sliki 88b.



Slika 88b Kazalčni diagrami za paralelno obratovanje za $\varphi_{kA} \neq \varphi_{kB}$

Transformatorja sta dodatno obremenjena z izenačevalnima tokovoma $\Delta \underline{I}_{1A}$ in $\Delta \underline{I}_{1B}$, ki samo dodatno segrevata navitji in ne doprineseta koristne moči. Zaključujeta se preko zbiralk (črtkano na sliki 86).

Paralelno obratovanje trifaznih transformatorjev

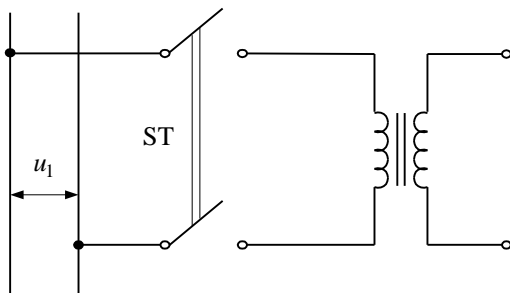
Tako mora, razen že opisanih pogojev za paralelno obratovanje enofaznih transformatorjev, biti pri trifaznih transformatorjih enaka tudi vezalna skupina.

6 PREHODNI POJAVI TRANSFORMATORJA

Transformator navadno obratuje dalj časa z neko konstantno močjo, napetostjo in tokom ali pa so spremembe tako počasne, da elektromagnetna polja svoje energije ne menjajo skokovito. Takšno vrsto obratovanja imenujemo stacionarno obratovanje transformatorja. Pri hitrih spremembah magnetnih in električnih polj se hitre spremembe njihovih energij odrazijo v nastanku kratkotrajnih tokovnih in napetostnih preobremenitev, tj. prehodnih pojavov. Ti sčasoma neperiodično preidejo v neko stacionarno stanje, seveda če je transformator te tokovne in napetostne udare vzdržal. V naslednjih izvajanjih si bomo ogledali fizikalni mehanizem delovanja prehodnih pojavov in nakazali poti, kako zgraditi ali zaščititi transformator, da bo te pojave preстал nepoškodovan.

6.1 Vklonni tok transformatorja

Transformatorju, ki ima sekundarno navitje v prostem teku oziroma bolje rečeno nima nobenega bremena na sekundarnih sponkah, $\underline{Z}_b = \infty$, z vklopom stikala ST priključimo primarno navitje na omrežje napetosti \underline{U}_1 , kot je prikazano na stikalni shemi na sliki 89. Transformator ima železno jedro, torej nelinearno magnetilno karakteristiko $\Phi = f(I_0)$.



Slika 89 Stikalna shema za vklop transformatorja

Pred vklopom je transformator brez magnetnega polja, čim pritisnemo na primarno navitje napetost omrežja \underline{u}_1 , se mora vzpostaviti napetostno ravnotežje $\underline{u}_1 + \underline{e}_1 = 0$. Ker je sekundarno navitje odprto, steče samo primarni tok \underline{i}_1 , ki s svojimi amper-ovoji $\underline{i}_1 N_1$ ustvari magnetno polje in to ustvari s primarnim navitjem magnetni sklep $\underline{\psi}_1$. Ta magnetni sklep si lahko zamislimo kot vsoto magnetnega sklepa razsipanega polja in magnetnega sklepa glavnega polja v železnem jedru transformatorja $\underline{\psi}_1 = \underline{\psi}_{\sigma 1} + \underline{\psi}_g$, torej lahko pišemo:

$$-\underline{e}_1 = \frac{d\underline{\psi}_1}{dt} = \frac{d\underline{\psi}_{\sigma 1}}{dt} + \frac{d\underline{\psi}_g}{dt} \text{ in iz } \underline{u}_1 = -\underline{e}_1 \text{ sledi:}$$

$$\underline{u}_1 = \frac{d\underline{\psi}_{\sigma 1}}{dt} + \frac{d\underline{\psi}_g}{dt}. \quad (147)$$

Enačba (147) velja, če predpostavimo $R_1 \rightarrow 0$.

Lahko tudi zapišemo: $\underline{\psi}_{\sigma 1} = i_1 L_{\sigma 1}$ in $\underline{\psi}_g = i_1 L_m$, pri čemer velja $L_m \gg L_{\sigma 1}$. Z upoštevanjem ohmske upornosti primarnega navitja R_1 dobimo časovni konstanti, ki sta odločilni za primerjavo časa, ki je potreben, da se razvije sklep $\underline{\psi}_{\sigma 1}$ oziroma $\underline{\psi}_g$:

$$T_{\sigma 1} = \frac{L_{\sigma 1}}{R_1} \ll T_g = \frac{L_m}{R_1}.$$

Razsipano polje se bo ustvarilo znatno hitreje kot glavno polje v jedru. To pomeni, da bo v neposrednih začetnih trenutkih potrebna velika vrednost $\underline{\psi}_{\sigma 1}$ in s tem velik tok i_1 , saj bo glavni delež (proti) inducirane napetosti po enačbi (148) dajal člen $d\underline{\psi}_{\sigma 1}/dt$. Drugače povedano, v začetnih trenutkih bo omejevala tok i_1 le reaktanca razsipanja primarnega navitja $X_{\sigma 1} = \omega L_{\sigma 1}$, ki je znatno manjša od reaktance glavnega polja $X_m = \omega L_m$. Ker pa s časom narašča fluks v jedru in s tem $\underline{\psi}_g$, se število sklepov $\underline{\psi}_1 = \underline{\psi}_{\sigma 1} + \underline{\psi}_g$ vse bolj ustvarja na račun deleža $\underline{\psi}_g$, za njegov nastanek je odločilen ϕ_g v železnem jedru, za to pa je potrebno manj amper-ovojev, torej manjši tok i_1 . Ta prehodni pojav preide v stacionarno stanje prostega teka in tok i_1 postane magnetilni tok i_{10} . Takrat je razsipanje zanemarljivo $\underline{\psi}_{\sigma 1} \rightarrow 0$ in je $\underline{\psi}_1 = \underline{\psi}_g$. Ta prehod poteka neperiodično, kot to prikazuje slika 90a (črtkana linija ovojnice vklopnega toka) za transformator nazivnih vrednosti: 4 kVA, 230 V, 50 Hz, $I_N = 17,4$ A.

Z upoštevanjem ohmske upornosti primarnega navitja R_1 se napetostna enačba glasi:

$$\underline{u}_1 = R_1 \dot{i}_1 + \frac{d\underline{\psi}_{\sigma 1}}{dt} + \frac{d\underline{\psi}_g}{dt}. \quad (147a)$$

Po tem opisu dejanskih fizikalnih dogajanj si bomo stvar poenostavili tako, da bomo zanemarili razsipano polje $\underline{\psi}_{\sigma 1} \rightarrow 0$ in tudi ohmsko upornost $R_1 \rightarrow 0$. Tako dobimo napetostno enačbo, v kateri nastopa samo ϕ_g oziroma $\underline{\psi}_g = N_1 \phi_g$:

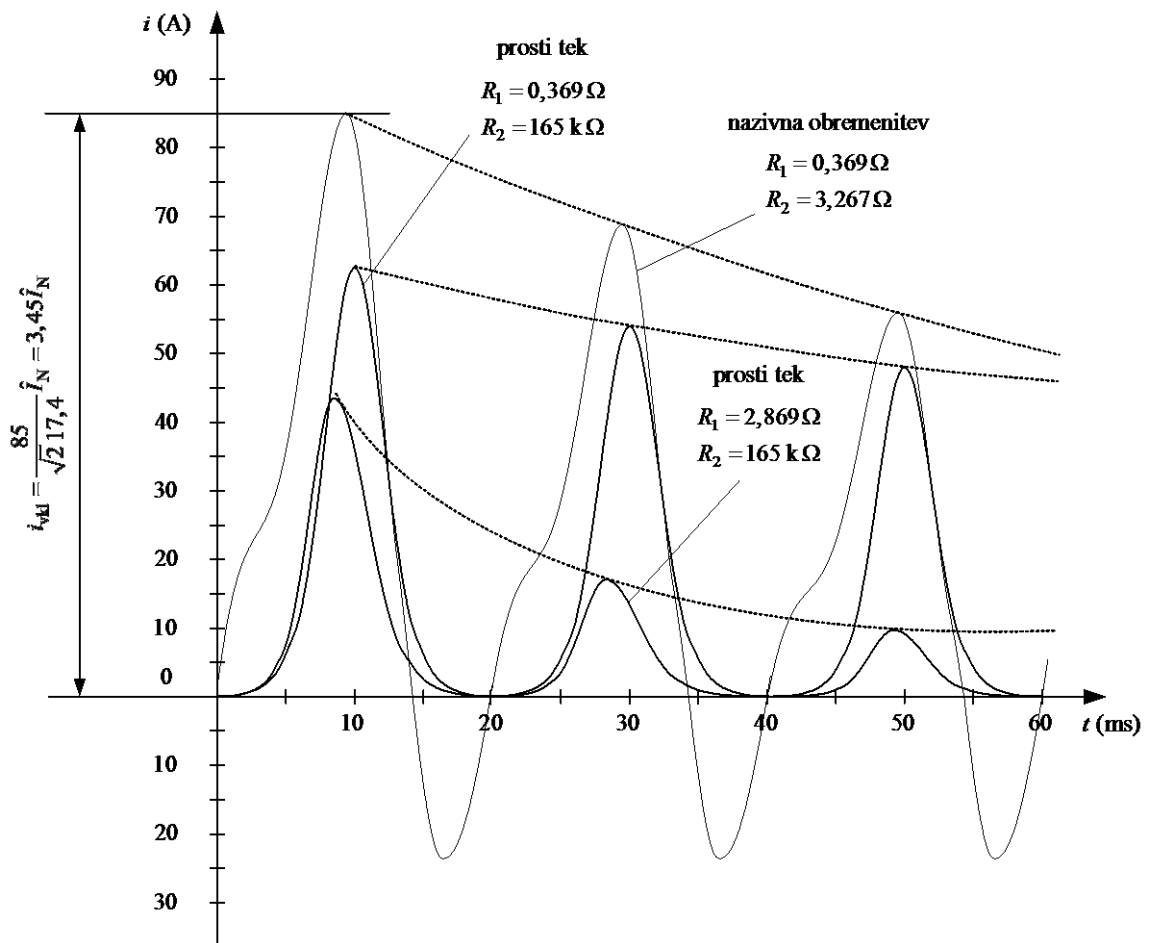
$$\underline{u}_1 = \frac{d\underline{\psi}_g}{dt} = N_1 \frac{d\phi_g}{dt}. \quad (148)$$

Pritisnjena napetost je sinusne oblike: $u_1 = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t + \alpha_u)$ in tudi fluks je enake oblike

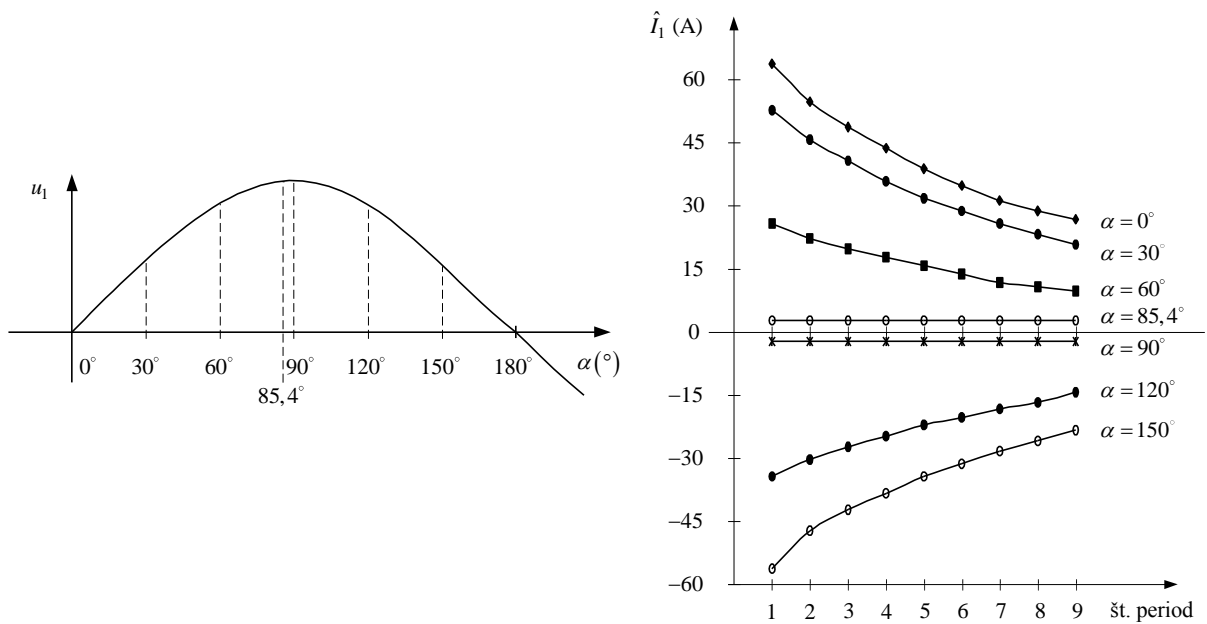
$$\phi_g = \hat{\Phi}_g \sin\left(\omega t + \alpha_u - \frac{\pi}{2}\right) = -\hat{\Phi}_g \cos(\omega t + \alpha_u) \text{ s faznim premikom } (\pi/2).$$

Tipična sta dva skrajna primera vklopa:

I. pri $u_1 = \hat{U}_1 = \sqrt{2}U$ in II. pri $u_1 = 0$, oba bomo ponazorili s pomočjo časovnih diagramov. Mogoči so vklopi pri poljubnem kotu $\alpha = \alpha_u = 0 \div 180^\circ$ in dobimo amplitude vklopnega toka, odvisne od kota α , kot kaže slika 90b.



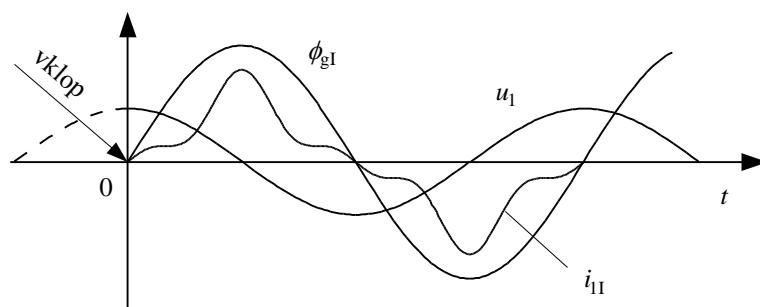
Slika 90a Časovni poteki vklopnega toka za razna obratovalna stanja ter različne R_1 in R_2 za transformator: $S_N = 4 \text{ kVA}$, $U_N = 230 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $I_N = 17,4 \text{ A}$



Slika 90b Amplitude vklopnega toka za različne vrednosti kota α pri vklopu napetosti u_1

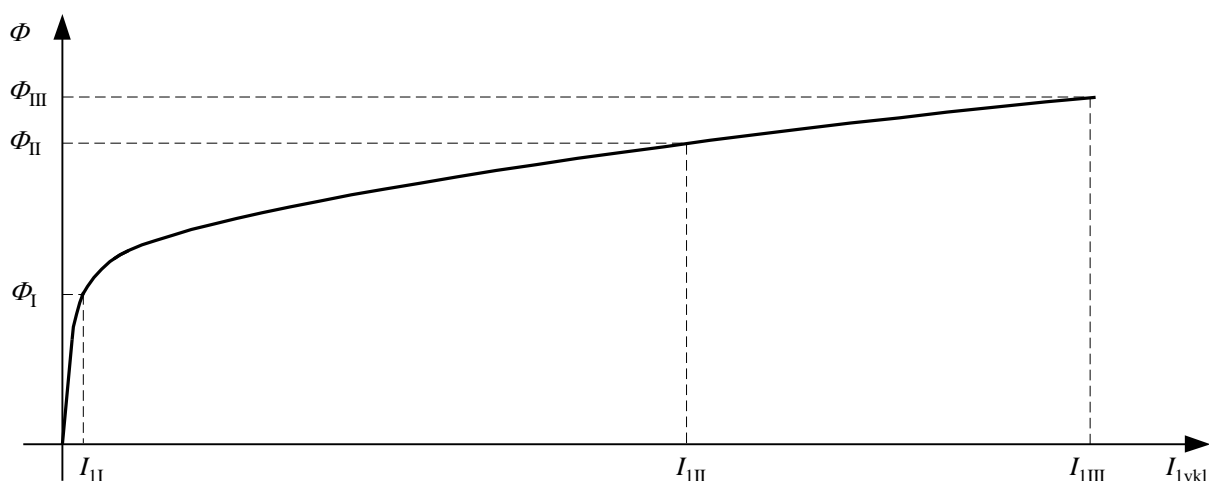
I. primer: vklop pri $u_1 = \hat{U}_1 = \sqrt{2}U$ (slika 91a)

V trenutku vklopa je glavni fluks $\phi_g = 0$ in vzbujaalni tok $i_1 = 0$. Torej tako fluks kot tok začneta rasti od vrednosti 0, to je popolnoma naravno. Fluks doseže amplitudo $\hat{\Phi}_{gI} = \hat{U}_1 / (\omega N_1)$ in je identičen s fluksom prostega teka, tok i_{1I} je tedaj enak magnetilnemu toku $i_{0\mu}$. Torej ni nobenih težav.



Slika 91a Vklonni tok transformatorja za I. primer

Na sliki 92 je prikazana magnetilna karakteristika transformatorja za različne primere $\Phi_g = f(I_1)$



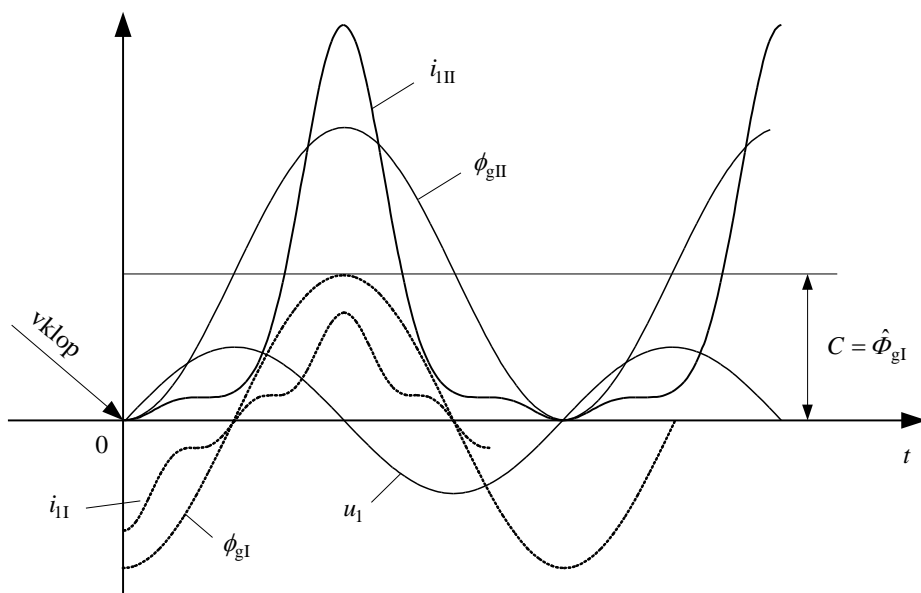
Slika 92 Magnetilna karakteristika transformatorja

II. primer: vklop pri $u_1 = 0$.

V trenutku vklopa bi morala imeti fluks in tok negativno amplitudno vrednost - črtkano ϕ_{gI} in i_{1I} (slika 91b) - toda pri vklopu (v neskončno kratkem času) ne moreta v trenutku spremeniti vrednosti od nič na maksimalno. Začneta lahko le z vrednostjo nič. Če funkcijo ϕ_{gI} dvignemo za konstanto C nad absciso t , dobimo dejansko vrednost fluksa ϕ_{gII} in pravilno inducirano napetost, saj je:

$$u_1 = N_1 \frac{d\phi_{gII}}{dt} = N_1 \frac{d(\phi_{gI} + C)}{dt} = N_1 \frac{d\phi_{gI}}{dt}. \quad (148a)$$

Amplituda fluksa je narasla na dvojno vrednost $\hat{\phi}_{gII} = 2\hat{\phi}_{gI}$, zaradi nelinearnosti magnetilne karakteristike železnega jedra pa poraste i_{III} mnogo bolj, tako da lahko preseže vrednost nazivnega toka in zaščita izklopi transformator, kljub temu da transformator na sekundarni strani ni obremenjen.



Slika 91b Vkllop transformatorja za II. primer ($u_1 = 0$)

Mogoč je še hujši III. primer: pri hitrih naknadnih vklopih, ko fluks ϕ_g v intervalu izklop - naknadni vklop še ni upadel na vrednost nič, temveč ima pri ponovnem vklopu neko vrednost ϕ_{rem} in ima ta enako smer kot naraščajoči fluks. Če vklopimo pri $u_1 = 0$, je amplituda fluksa $\phi_{gIII} = \phi_{gII} + \phi_{rem}$, torej je nasičenje jedra večje in vklopni tok $i_{III} > i_{II}$.

Da ne bi prihajalo do neljubih izklopov, je mogoča rešitev v tem, da zmanjšamo fluks ϕ_g . Zato je potrebno po enačbi (148) zmanjšati napetost na sponkah transformatorja $u_{1tr} < u_{1omr}$. To bi lahko najbolj enostavno rešili z vključitvijo nekega predupora R_{pred} pred primarno navitje, ki v času vklopa prevzame del napetosti omrežja. Glede na potek toka na sliki 91a in za dinamično magnetilno karakteristiko, tj. z upoštevanjem histerezne zanke, velja, da i_{vkl} , ki je v bistvu magnetilni tok, v spodnjem delu vsebuje zelo izrazito drugo harmonsko komponento. Normalni magnetilni tok oziroma tok prostega teka te posebnosti nima. Torej lahko uredimo neko zaščito tako, da ne bo izklopila, če ugotovi prisotnost močne druge harmonske komponente v vklopnem toku. Osciloskopski posnetki kažejo, da je pri gostoti magnetnega pretoka v jedru $\hat{B}_I = 1,4$ T razmerje vklopnih tokov v III. in I. primeru naslednje $i_{III} / i_{II} = i_{vkl} / i_{10} = 50 \div 80$ in pri višjih gostotah tudi $100 \div 120$. Če je v povprečju $I_{10} \approx 0,02 I_{IN}$, potem je:

$$i_{III} = i_{vkl_{max}} \approx (50 \div 120) \cdot 0,02 \hat{I}_{IN} = (1,0 \div 2,4) I_{IN} \sqrt{2} \approx (1,4 \div 3,4) I_{IN}. \quad (149)$$

Raziskave, izvršene na izvedenih konstrukcijah transformatorjev, z jedri iz hladno valjane orientirane in toplo valjane neorientirane pločevine, so dale v naslednji tabeli VII podane vrednosti za razmerje amplitud udarnega vklopnega toka in nazivnega toka $i_{\text{vklmax}} / \hat{I}_{1N}$ s povprečno toleranco $\pm 50\%$ v najugodnejšem primeru. Pri tem se je predpostavilo, da nastopi vklop pri $u_1 = 0$ in pri remanentnem fluksu po vrednosti enakem stacionarnemu fluksu, tj. $\hat{\Phi}_{\text{rem}} = \hat{\Phi}_{\text{gl}}$. Tam, kjer je relativni vklopni tok nizkonapetostne strani večji kot vklopni tok visokonapetostne strani, imamo opravka z enostavnimi cilindričnimi navitji. Kjer pa sta relativna tokova enaka, imamo opravka s ploščatimi navitji. Nizkonapetostno cilindrično navitje leži bližje stebri, ima manjši premer in s tem manjšo induktivnost in je zato relativni vklopni tok pri vklopu na nizkonapetostni strani večji.

Tabela VII Razmerja vklopnih tokov $i_{\text{vklmax}} / \hat{I}_{1N}$

Nazivna moč (kVA)	Orientirana pločevina		Neorientirana pločevina*	
	Visoka napetost	Nizka napetost	Visoka napetost	Nizka napetost
500	11,0	16	6,0	9,4
1000	8,4	14	4,8	7,0
5000	6,0	10	3,9	5,7
10000	5,0	10	3,2	3,2
50000	4,5	9	2,5	2,5
	geometrijsko manjši $\leftrightarrow X_{\sigma}, X_m$ manjša		geometrijsko večji $\leftrightarrow X_{\sigma}, X_m$ večja	

* Ta pločevina se dandanes ne uporablja več za gradnjo energetskih transformatorjev.

Iz tabele VII je očitno, da imajo veliki transformatorji zaradi velike induktivnosti manjše relativne vrednosti vklopnega toka. Vklopni tok upada po časovni konstanti $T_g = L_m / R_1$. Iste raziskave so za transformatorje frekvence 60 Hz pokazale, da udarne amplitude neperiodično padejo na polovično vrednost po določenem času, tj. številu period podanih v tabeli VIII.

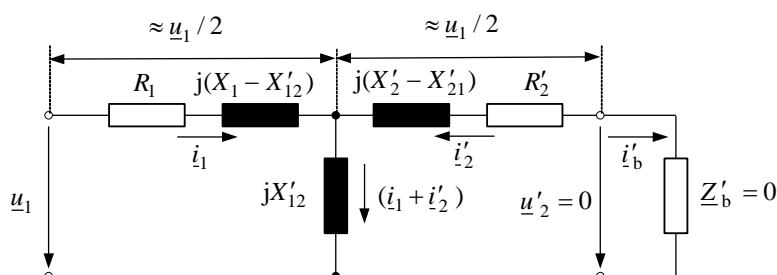
Tabela VIII Zmanjšanje amplitud vklopnega toka na polovico v času $t = 0,693T_g$

S_N (kVA)	periode
500 – 1000	8 – 10
1000 – 10000	10 – 60
10000 in več	60 – 360

6.2 Udarni kratkostični tok

Kratki stik se lahko pojavi pri katerikoli obremenitvi transformatorja $S \geq 0$. Trajni ali stacionarni kratkostični tok je mnogokratnik nazivnega toka ($I_k = I_N / u_k^*$). Udarni kratkostični tok pa je

lahko še večji. Njegova velikost je odvisna od vrednosti napetosti \underline{u}_1 v trenutku nastopa kratkega stika in s tem povezanimi spremembami posameznih magnetnih polj. Posledica tega so tudi spremembe tokov, ki s svojimi amper-ovoji ustvarjajo ta polja. Preden preidemo na sam pojav udarnega kratkostičnega toka, si bomo ogledali spremembe stanj dveh mejnih obremenitev, tj. nazivne obremenitve $P_N = S_N \cos \varphi_N$ in trifaznega trajnega kratkega stika pri nazivni napetosti $P_k = \sqrt{3}U_{1N}I_{1k} \cos \varphi_k$. Pri tem se bomo oprli na že povedano ter na sliko poenostavljenega nadomestnega vezja in na osnovno sliko vezja (slika 93).



Slika 93 Nadomestno vezje transformatorja v stacionarnem obratovanju

S predpostavko $(i_1 + i'_2) = i_0 < I_{1N} \ll I_{1k}$ lahko napišemo napetostno enačbo za \underline{u}_1 , najprej za prvo zanko vezja in nato za zunanjo zanko vezja:

$$\underline{u}_1 = R_1 i_1 + j(X_1 - X'_{12})i_1 + jX'_{12}(i_1 + i'_2) = R_1 i_1 + j(X_1 - X'_{12})i_1 - R'_2 i'_2 - j(X'_2 - X'_{21})i'_2 + \underline{u}'_2.$$

Z uvedbo magnetnih sklepov $\underline{\psi}_\sigma$ in $\underline{\psi}_g$ ter $i_1 = -i'_2$ je:

$$\underline{u}_1 = R_1 i_1 + j(X_1 - X'_{12})i_1 + jX'_{12}i_0 = (R_1 + R'_2)i_1 + j((X_1 - X'_{12}) + (X'_2 - X'_{21}))i_1 + \underline{u}'_2 \quad \text{ali}$$

$$\underline{u}_1 = R_1 i_1 + \frac{d\underline{\psi}_{\sigma 1}}{dt} + \frac{d\underline{\psi}_g}{dt} = R_1 i_1 + \frac{d\underline{\psi}_\sigma}{dt} + \underline{u}'_2.$$

V kratkem stiku ($\underline{Z}'_b = 0$) je $\underline{u}'_2 = \underline{u}'_2 = 0$ in dobimo s tokom i_{1k} :

$$\underline{u}_1 = R_1 i_{1k} + \frac{d\underline{\psi}_{\sigma 1k}}{dt} + \frac{d\underline{\psi}_{gk}}{dt} = R_1 i_{1k} + \frac{d\underline{\psi}_{\sigma k}}{dt}. \quad (150)$$

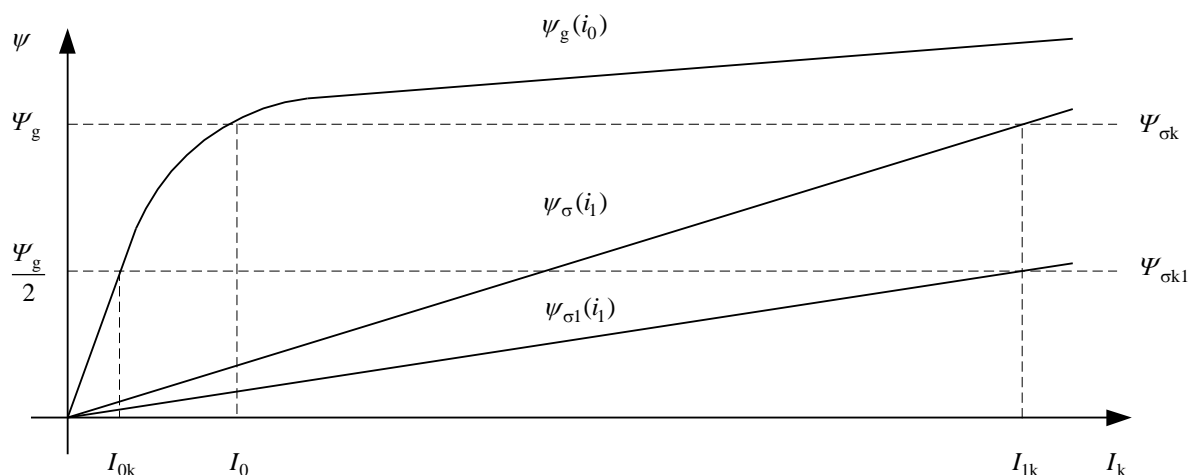
Če zanemarimo ohmske upornosti $R_1 = R_2 = 0$, je pri nazivni obremenitvi

$$\underline{u}_1 = \frac{d\underline{\psi}_{\sigma 1}}{dt} + \frac{d\underline{\psi}_g}{dt} = \frac{d\underline{\psi}_\sigma}{dt} + \underline{u}'_2 \quad \text{in v trajnem kratkem stiku:}$$

$$\underline{u}_1 = \frac{d\underline{\psi}_{\sigma 1k}}{dt} + \frac{d\underline{\psi}_{gk}}{dt} = \frac{d\underline{\psi}_{\sigma k}}{dt}. \quad (150a)$$

Zato je razdelitev napetosti na primarno in sekundarno navitje $u_1 \approx \frac{1}{2}u_1 + \frac{1}{2}u_1$ in $\hat{\Psi}_{\sigma 1k} = \frac{1}{2}\hat{\Psi}_{\sigma k} = \hat{\Psi}_{gk} \approx \frac{1}{2}\hat{\Psi}_g$, torej je $\hat{\Psi}_{\sigma k} \approx \hat{\Psi}_g$.

Za magnetne sklepe in tokove velja soodvisnost: $\psi_{\sigma 1}(i_1)$ in $\psi_g(i_0)$; to je lepo razvidno iz podane magnetilne karakteristike na sliki 94. Za ustvaritev sklepa $\psi_g = N\phi_g$ velja za železno jedro nelinearna odvisnost, za ustvaritev sklepa $\psi_\sigma = N\phi_\sigma$ pa linearna odvisnost, ker predstavlja največjo magnetno upornost razsipanega polja pot skozi zrak.



Slika 94 Magnetilna karakteristika glavnega in razsipanih magnetnih sklepov

V trajnem kratkem stiku transformatorja (za $R = 0$) mora razsipano magnetno polje porasti v razmerju polne napetosti U_1 proti induktivnim padcem napetosti pri normalni obremenitvi.

Npr.: pri $u_k^* = 0,04$ je $\frac{\hat{\psi}_{\sigma k}}{\hat{\psi}_\sigma} = \frac{U_{1N}}{U_k} = \frac{1}{u_k^*} = \frac{1}{0,04} = 25$ -krat in potrebni amper-ovoji so enaki

$$I_{1k}N_1 = 25I_{1N}N_1, \text{ torej } I_{1k} = 25 \frac{I_{1N}N_1}{N_1} = 25I_{1N}.$$

Ustrezni kazalčni in časovni diagrami ter slike polj za ta dva mejna primera so podani na sliki 95. Slike 95a, c in e veljajo za nazivno obremenitev in ustrezne desne slike 95b, d in f za trajni kratki stik. Pri prehodu iz nazivne obremenitve v stanje trajnega kratkega stika je energija glavnega polja v jedru upadla, energija razsipanega polja okoli navitij pa je narasla. V vmesnem času je potekal prehodni pojav kratkega stika.

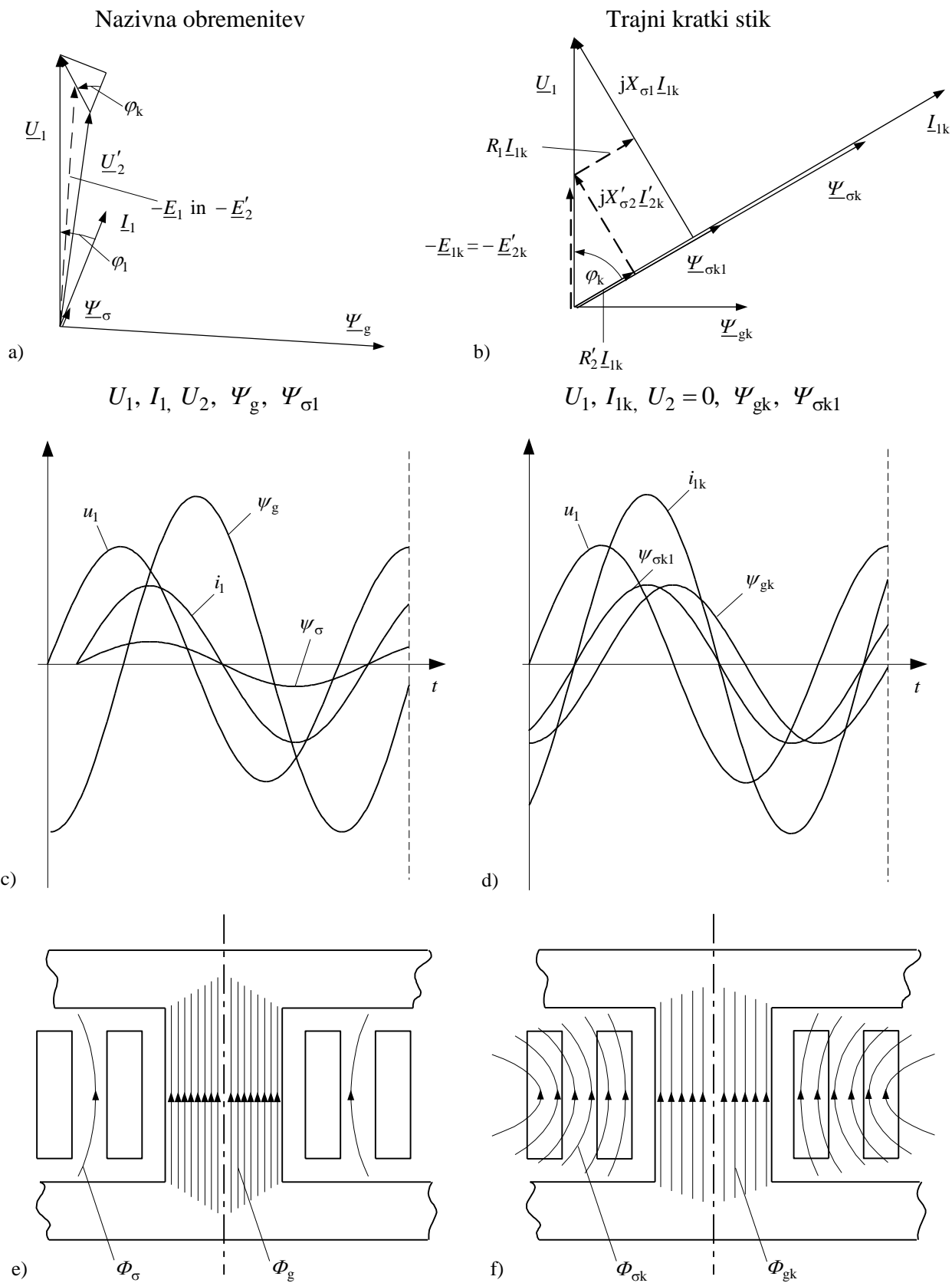
Udarni kratkostični tok je najvišja amplituda toka po nastopu kratkega stika. Obravnavali bomo dva kratkostična primera:

I. nastop KS pri $u_1 = \hat{U}_1 = \sqrt{2}U_1$ in

II. nastop KS pri $u_1 = 0$.

Pri prvih obravnavah zanemarimo $R_1 = R_2 = 0$; kasneje bomo upoštevali njuno prisotnost, saj zmanjšata amplitudo.

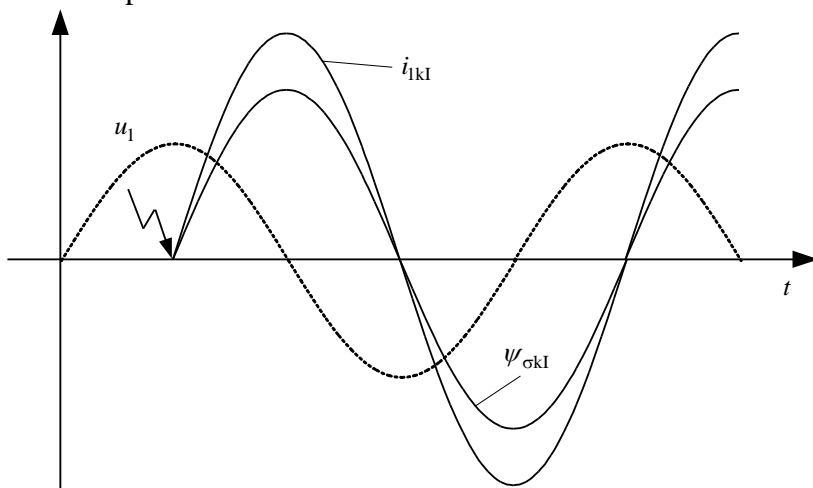
Torej je $R = 0$ in $\underline{Z}_k = jX_\sigma$ ter $i_{1k} = \frac{u_1}{jX_\sigma}$ za $u_1 = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t + \alpha)$.



Slika 95 Prikaz razmer pri obremenitvi in v kratkem stiku

I. primer: KS pri $u_1 = \hat{U}_1 = \sqrt{2}U_1$, ki nastane iz prostega teka.

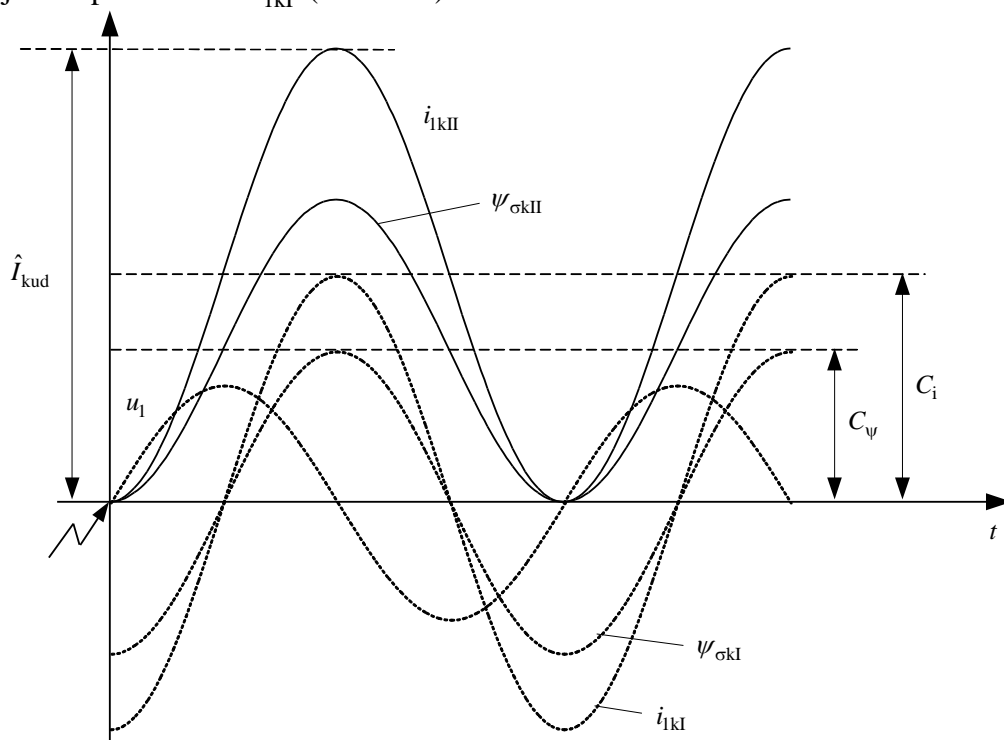
V I. primeru začenja i_{1k} čisto naravno naraščati od začetne vrednosti 0, torej je to trajni tok kratkega stika $i_{1kI} = i_{1k}$. Slika 96a prikazuje magnetni sklep razsipanega polja in tok kratkega stika za I. primer.



Slika 96a Časovni potek toka in magnetnega sklepa v kratkem stiku za I. primer

II. primer: KS pri $u_1 = 0$, ki nastane iz prostega teka

Kratkostični tok bi moral v trenutku nastopa kratkega stika imeti negativno amplitudo - začetni mora z vrednostjo 0 - torej se funkcija i_{1kI} dvigne za konstanto $C_i = \hat{I}_{1k}$ in tok i_{1kII} doseže dvojno amplitudo toka i_{1kI} (slika 96b).



Slika 96b Časovni potek toka in magnetnega sklepa v kratkem stiku za II. primer

Amplituda tega toka je udarni kratkostični tok:

$$\hat{I}_{\text{kud}} = 2\sqrt{2}I_k \quad (151)$$

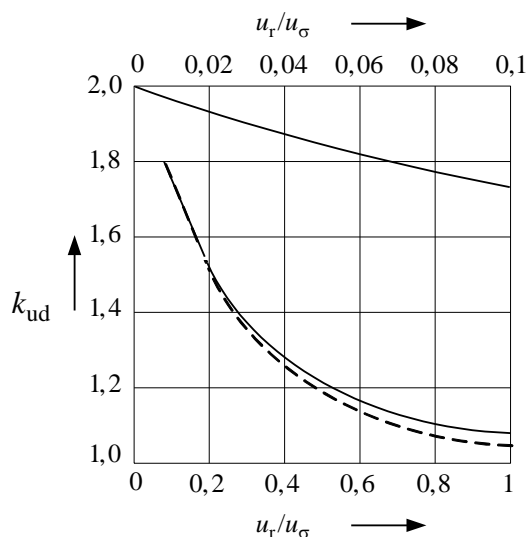
Z upoštevanjem prisotnosti ohmskih upornosti $R_1 + R_2' = R$ v kratkosklenjenih navitjih postane

$$\underline{Z}_k = R + jX_\sigma \text{ ter } \underline{i}_k = \frac{\underline{u}_1}{R + jX_\sigma}$$

in amplituda udarnega kratkostičnega toka bo torej odvisna od razmerja R / X_σ oziroma u_r / u_σ , to pišemo kot :

$$\hat{I}_{\text{kud}} = k_{\text{ud}} \sqrt{2} I_k \quad (152)$$

Na sliki 97 je podan diagram $k_{\text{ud}} = f(u_r / u_\sigma)$ - udarni faktor. Črtkana krivulja za spodnje merilo predstavlja zmanjšanje udarnega faktorja v praksi od teoretičnih vrednosti.



Slika 97 Faktor k_{ud} za izračun udarnega toka

Sam potek kratkostičnega toka od časa nastopa kratkega stika do stacionarnega kratkostičnega toka, v zvezi z že omenjenimi fizikalnimi pojavi, se da matematično prikazati z rešitvijo diferencialne enačbe kratkega stika (iz prostega teka v kratki stik):

$$u_1 = Ri_1 + L_\sigma \frac{di_1}{dt} \quad (153)$$

oziroma

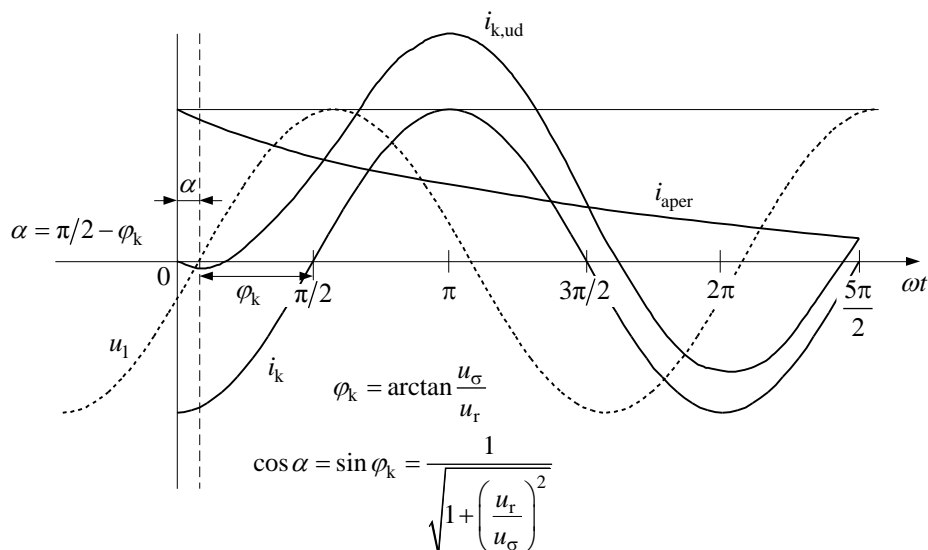
$$u_1 - Ri_1 - L_\sigma \frac{di_1}{dt} = 0. \quad (153a)$$

Za rešitev diferencialne enačbe (154a) v trenutku nastanka kratkega stika pri faznem premiku napetosti za kot α dobimo:

$$i_1 = \frac{\sqrt{2}U_1}{\sqrt{R^2 + X_\sigma^2}} \left(\sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - \sin(\alpha - \varphi_k) e^{-t(R/L_\sigma)} \right) = i_\approx + i_{\text{aper}} \quad (154)$$

Ta računski neperiodično padajoči enosmerni tok (angl. indeks »aper«) je pravzaprav (podobno kot na sliki 96b za konstanto C_i dvignjena pomožna abscisa) neperiodično padajoča pomožna abscisa s superponiranim izmeničnim tokom trajnega kratkega stika (slika 98).

Če nastopi kratki stik pri trenutni vrednosti napetosti $u_1 = \hat{U}_1 = \sqrt{2}U_1$ – I. primer slika 96a, tedaj ne nastopi neperiodična komponenta.



Slika 98 Časovni potek toka kratkega stika, narisana za razmerje $u_\sigma / u_r = 5$

Neperiodični člen $-\frac{\sqrt{2}U_1}{\sqrt{R^2 + X_\sigma^2}} \sin(\alpha - \varphi_k) e^{-t/T} = C_i e^{-t/T}$ pade od začetne vrednosti 1 na vrednost 0,01 v času $t = 4,6T$, pri tem je časovna konstanta navitij v kratkem stiku $T = T_\sigma = L_\sigma / R$. Tedaj je doseženo stanje trajnega toka kratkega stika $I_k = \frac{U_1}{Z_k}$, ki je čisti izmenični tok.

Tako traja prehodni pojav kratkega stika pri ($f = 50$ Hz):

- malih transformatorjih: $R / X_\sigma = 0,5 \div 0,33$ in $T = 0,006 \div 0,0095$ s povprečno vrednostjo $t = 4,6T = 4,6 \cdot 0,0078 = 0,036$ (s) ali 3,6 polperiod;
- velikih transformatorjih $R / X_\sigma \leq 0,1$ in $T \geq 0,032$ s povprečno vrednostjo $t = 4,6T = 4,6 \cdot 0,032 = 0,147$ s ali 14,7 polperiod.

Zaradi nenadnega nastopa je udarni kratkostični tok s svojo veliko amplitudno vrednostjo nevaren za dinamične obremenitve navitja.

Oglejmo si njegovo vrednost na primeru transformatorja s kratkostično (relativno) napetostjo $u_k^* = 0,04$, katere ohmska in induktivna komponenta sta si v razmerju $u_r / u_\sigma = 1 / 3,87 = 0,258$, temu ustreza po sliki 97 faktor $\kappa = 1,4$:

$$\hat{I}_{kud} = k_{ud} \sqrt{2} I_k = k_{ud} \sqrt{2} \frac{1}{u_k^*} I_N = 1,4 \sqrt{2} \frac{1}{0,04} I_N \approx 50 I_N.$$

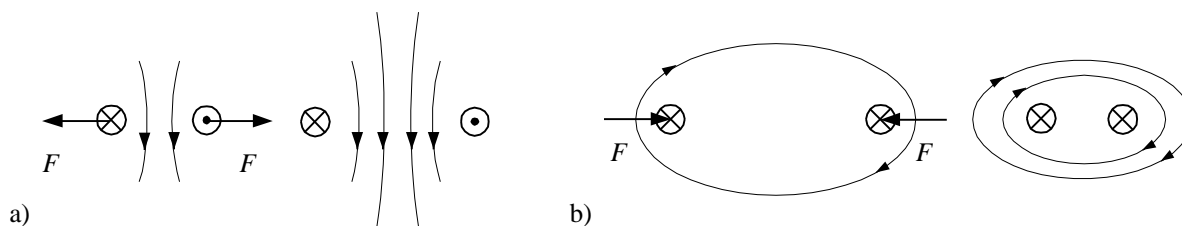
V naslednji tabeli so podane tipične relativne vrednosti $\hat{I}_{\text{kud}} / I_N$ v odvisnosti od nazivnih moči.

Tabela IX Razmerje udarnih kratkostičnih tokov

Nazivna moč S_N (kVA)	Kratkostična napetost u_k (%)	Udarni faktor k_{ud}	$\hat{I}_{\text{kud}} / I_N$
100	4,0	1,16	41,0
1000	6,0	1,5	35,3
10000	10,0	1,8	25,4
100000	12,5	1,9	21,5

6.2.1 Kratkostične sile

V poenostavljeni predstavi si lahko zamislimo navitja kot tokovodnike, med katerimi deluje Lorentzova sila. Pri nasprotni smeri tokov se tokovodniki odbijajo, da bi med njimi nastal čim večji magnetni pretok, tj. čim večja magnetna energija; v nasprotnem primeru, pri enaki smeri tokov, se tokovodniki privlačijo, da bi se okoli njih ustvaril čim večji magnetni pretok (slika 99).



Slika 99 Sile na tokovodnike a) za različne in b) za iste smeri tokov

Na shemi enostavnega cilindričnega navitja in diagrama gostote razsipanega polja $B_{\sigma k}$ bomo pojasnili delovanje sil med navitji (slika 100).

1) Največja sila, ki deluje na navitji, je tista, ki hoče povečati zračno režo razsipanja δ – ustreza primeru a) na sliki 99 in se imenuje normalna sila F_n , ker deluje pravokotno na glavno smer razsipanega fluksa:

$$F_n = \hat{I}_{\text{kud}} N \frac{\hat{B}_{\sigma k}}{2} O_{\text{sr}}. \quad (155)$$

O_{sr} je srednji obseg navitja.

$B_{\sigma k}$ je gostota magnetnega polja razsipanja pri udarnem kratkem stiku:

$$\hat{B}_{\sigma k} = \mu_0 \frac{\hat{I}_{\text{kud}} N}{h_n} k \quad (156)$$

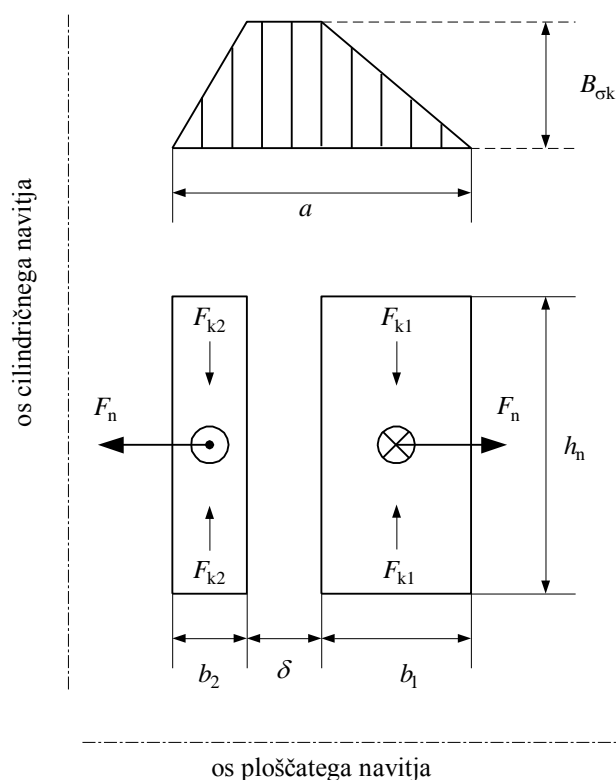
in dobimo praktičen izraz za normalno silo

$$F_n = \mu_0 \frac{(\hat{I}_{\text{kud}} N)^2}{2h_n} k O_{\text{sr}}, \quad (157)$$

kjer je k faktor Rogovskega ($k \leq 1$). Faktor Rogovskega upošteva dejanske razmere razsipanega polja v primerjavi z računsko poenostavitvijo in je bil podan v poglavju o izračunu razsipane reaktance.

Normalne sile obremenjujejo notranje navitje (N_2) na tlak, zunanje navitje (N_1) pa na nateg.

2) Sila, ki hoče tokovodnike posameznega navitja čim bolj zblížiti med seboj - primer b) slika 100 - se imenuje krčna (kontrakcijska) sila F_k in ta sila hoče zmanjšati višino h_n .



Slika 100 Razsipano polje in sile

Ta sila deluje pravokotno na smer normalne sile, njen absolutni iznos je sicer znatno manjši, kot je absolutni iznos normalne sile, povzroča pa upoštevanja vredne specifične pritiske. Za konstrukcijsko izvedbo navitij je zanimiva vsota teh sil, ki je podana z izrazom:

$$F_{k12} = F_{k1} + F_{k2} = \frac{\delta_e}{h_n} F_n \left(2 - \frac{1}{k} \right). \quad (158)$$

δ_e je ekvivalentna zračna reža.

Za cilindrično navitje na sliki 100 je po teoriji ta:

$$\delta_e = \delta + \frac{b_1 + b_2}{3}. \quad (159)$$

Pri navadnih cilindričnih navitjih je npr.: $(\delta_e / h_n) \approx 0,05$ in $k \approx 1$ sila $F_{k12} \approx 0,05F_n$.

Za ploščata navitja velja podobna oblika razsipanega polja in sil, če na sliki 100 vrišemo os ploščatega navitja pravokotno na os cilindričnega navitja.

3) V primeru različno visokih navitij ($h_{n1} \neq h_{n2}$) nastane, razen predhodno omenjenih sil, še strižna sila, ker v višjem navitju ne nastopi na celotni višini normalna sila nasprotnega navitja. Na mestu kjer se konča nižje navitje nastane v višjem navitju strižna sila. Zato mora biti $h_{n1} \approx h_{n2}$.

Konstrukcija transformatorja mora biti izvedena tako, da delovanje teh sil ne poškoduje navitij in njihove izolacije.

6.2.2 Energijska bilanca v kratkem stiku

Približni prikaz energijske bilance, tj. bilance moči, udarnega kratkega stika enofaznega transformatorja dobimo s pomočjo diferencialne napetostne enačbe:

$$u = Ri_k + \frac{d(L_\sigma i_k)}{dt} = Ri_k + L_\sigma \frac{di_k}{dt} + i_k \frac{dL_\sigma}{dt}. \quad (160)$$

Po množenju enačbe (160) s tokom je v kratkem stiku dovedena moč enaka:

$$P_{\text{kud}} = u i_k = Ri_k^2 + i_k L_\sigma \frac{di_k}{dt} + i_k^2 \frac{dL_\sigma}{dt} = Ri_k^2 + L_\sigma \frac{d(i_k / 2)^2}{dt} + \frac{i_k^2}{2} \frac{dL_\sigma}{dt} + \frac{i_k^2}{2} \frac{dL_\sigma}{dt}. \quad (161)$$

(1) (2) (3) (4)

Členi v enačbi (161) predstavljajo:

- (1) joulska toplota navitja v kratkem stiku,
- (2) povečanje energije razsipanega polja pri $L_\sigma = \text{konst.}$,
- (3) mehansko delo - raztezanje navitja,
- (4) povečanje energije razsipanega polja - povečanje zračne reže razsipanja δ .

7 PRENAPETOSTI

7.1 Splošno o prenapetostih

Prenapetost v transformatorju pomeni zvišanje napetosti iznad najvišje obratovalne napetosti, ki je določena s stopnjo izolacije navitij po IEC [11] in [12].

Tabela X Dovoljene obratovalne napetosti

Stopnja izolacije Si	3,6	7,2	12	24	38	72	123	245	420
Najvišja obratovalna napetost (kV)	3,6	7,2	12	24	38	72	123	245	420

S prenapetostjo poimenujemo po navadi kratkotrajne pojave vseh vrst, ki imajo značilnost posameznih kratkih impulzov s periodičnim ali neperiodičnim značajem, katerih velikost in časovni porast lahko poškodujejo izolacijo.

Koordinacija izolacije ima namen selekcijske zaščite, tako da se prenapetost, ki vdre v električno omrežje, izprazni na tistih delih omrežja, kjer bo po vsej verjetnosti povzročila najmanj škode. Ustrezno stopnjevanje izolacije med omrežjem daljnovodov in transformatorjem imenujemo zunanjo koordinacijo. Notranja koordinacija zajema posamične naprave sistema – transformatorje, stikala in drugo opremo, ki jo moramo s stališča izolacijske tehnike obravnavati kot samostojne enote. To pomeni pravilno izbiro izolacijskih trdnosti za posamične dele strojev in naprav.

7.2 Vzroki in vrste prenapetosti

7.2.1 Pojavi obratovalnih procesov

Komutacijski procesi:

vklop, izklop, hitra sprememba obremenitve, ki sprožijo hitre spremembe elektromagnetne energije sistema. V splošnem so te prenapetosti $(2 \div 5)U_{fN}$.

Primer: izklop prosto tekočega transformatorja povzroči vrsto povratnih vžigov na oddaljujočih razpirajočih se kontaktih stikal. Prenapetosti dosežejo vrednosti $4,5U_{fN}$, izjemoma $7U_{fN}$.

Procesi poškodbenega značaja:

kratki stiki in izklopi zaradi zemeljskih stikov. V splošnem so prenapetosti $(7 \div 8)U_{fN}$.

Primeri: - prekinjani zemeljski stik; praksa kaže, da ta prenapetost ne preseže vrednosti $3U_{fN}$;

- pri izklopu kratkega stika nastane med kontakti stikala prenapetost, ki doseže dvojno amplitudo obratovalne napetosti $2\sqrt{2}U$.

Vsi ti procesi ne smejo povzročiti preboja izolacije, torej mora biti naprava tem višje izolirana, čim višja je obratovalna napetost.

7.2.2 Pojavi atmosferskega značaja

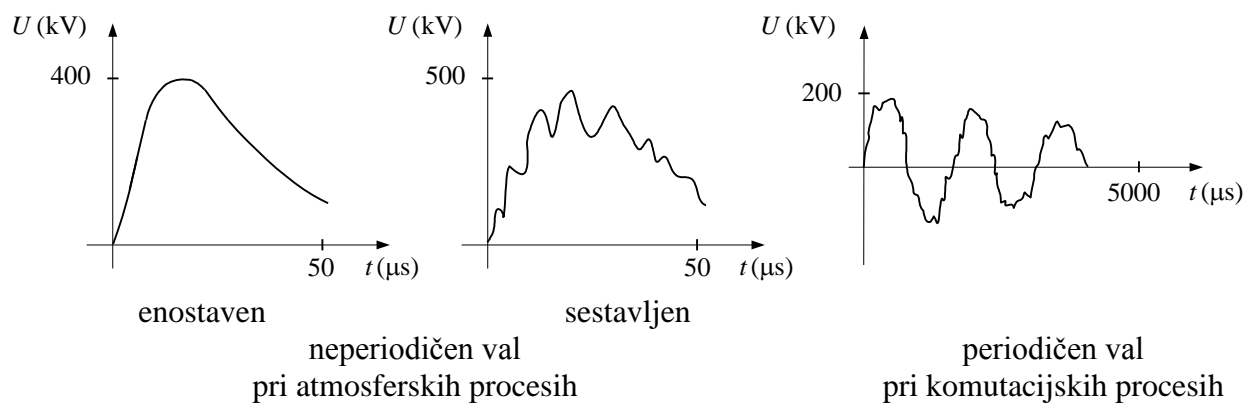
Direkten udar strele v vod, pojavi elektromagnetne indukcije v vodih pri razelektrenju oblakov in elektrostatične indukcije nabitih oblakov, naelektrenje vodnikov daljnovoda z vetrom, ob sodelovanju delcev prahu, snega in podobno, povratni preskok z jambora na vod.

Primeri: - direktni udar strele v vod: porast prenapetosti 100 do 1500 kV/ μ s (!)

- elektromagnetna in elektrostatična indukcija napetosti pri udaru strele v bližini voda 300 do 500 kV.

V splošnem so tovrstne prenapetosti $(7 \div 12)U_{fN}$. Nenevarne so tiste prenapetosti, ki dosegajo 0 do 2,5-kratno vrednost linijske obratovalne napetosti. Zelo nevarne so prenapetosti, ki presegajo 3,5-kratno vrednost linijske obratovalne napetosti.

Oblike različnih prenapetostnih valov prikazuje slika 101.



Slika 101 Različne oblike prenapetosti

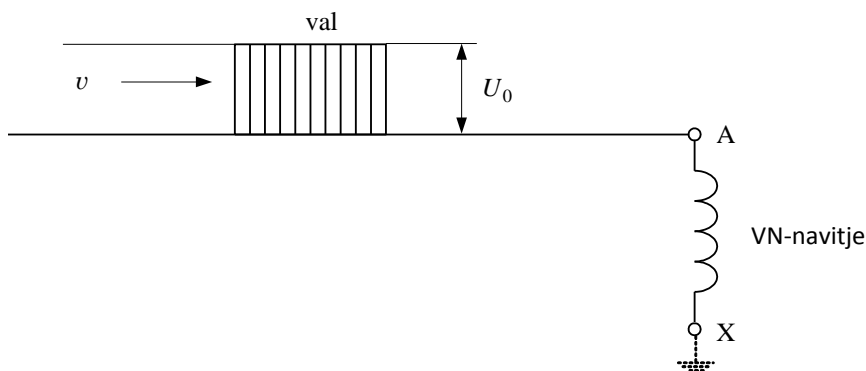
Prenapetosti, ki dosežejo sponke transformatorja, se lahko omejijo z različnimi vrstami zaščite (npr. katodni odvodniki ali iskriča). Neprimerno nevarnejše so prenapetosti, ki se pojavijo v notranjosti transformatorja pri porazdelitvi vala, tj. električnega naboja, vzdolž navitja. Pri tem so lahko napetosti med posameznimi tuljavicami ali celo med posameznimi ovoji mnogokrat višje od normalnih napetosti med njimi pri normalnem stacionarnem obratovanju transformatorja. Preizkusi kažejo, da so vedno najbolj pogosto poškodovani ovojji, ki so bližji priključnim sponkam transformatorja. Toda na splošno lahko nastopijo prenapetosti in zaradi njih preboji izolacije v poljubni točki navitja.

Procesi porazdelitve prenapetostnega vala v transformatorju so navadno komplicirani in se v polnem obsegu ne dajo izraziti z matematično analizo. Zato se poslužujemo vrste enostavnejših predpostavk, katere omogočajo redukcijo pojava na relativno enostavno razlago, ki pojasnjuje njegov karakter.

7.3 Obravnavanje pojava prenapetosti v transformatorju

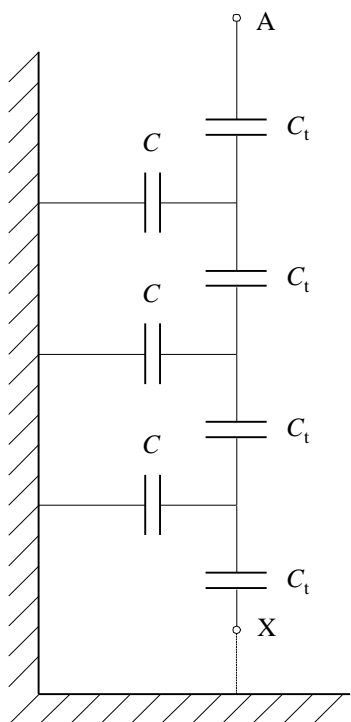
7.3.1 Nadomestno vezje transformatorja pri prenapetostih

Ogledali si bomo enostavnejši primer prenapetosti v transformatorju, ki ima samo eno navitje visoke napetosti, v katerega vdre prenapetostni val s strani linijske sponke A, pri čemer je druga sponka X lahko izolirana glede na zemljo ali pa ozemljena (slika 102).



Slika 102 Prenapetostni val

Pri stacionarnem režimu obratovanja teče tok praktično samo skozi navitje transformatorja in srečuje na svoji poti ohmske in induktivne upornosti.



Slika 103 Kapacitivnosti

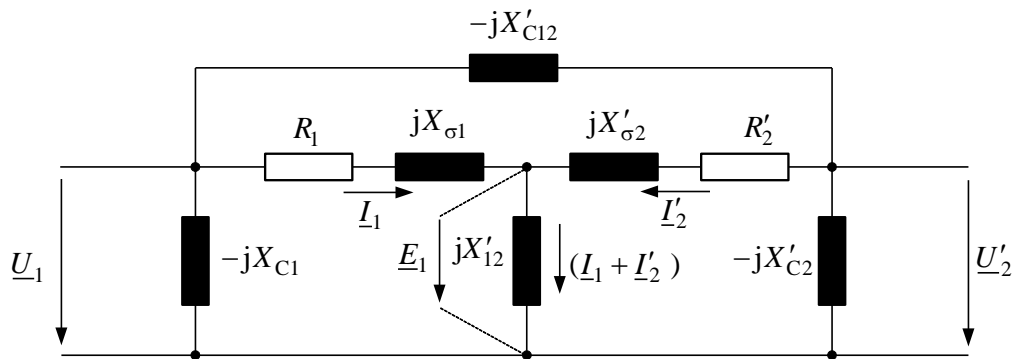
Toda pri prenapetostih se slika korenito spremeni. Zaradi dejstva, da se odvijajo procesi, ki so povezani s prenapetostmi, z izredno hitrostjo, jih transformator občuti kot nihanje zelo visokih frekvenc. V tem primeru postanejo induktivne upornosti znatno večje, kapacitivne upornosti pa znatno manjše. Kapacitivnosti obstajajo med mnogimi fizičnimi deli transformatorjev. Glavni elementi kapacitivnosti so med ovoji navitja, plastmi navitja, jedrom in ovoji navitja, med ovoji in ohišjem – ali kovinskim plaščem in med priključki in zunanjimi dovodi. Posledica tega je, da bo pri prenapetostih tok tekkel (naboj se bo razporedil) samo po kapacitivnih upornostih, pri čemer pridejo do izraza kapacitivnosti navitja, npr. tuljavic C_t , in kapacitivnosti proti zemlji C . Za ta primer je podano nadomestno vezje na sliki 103. Kapacitivnosti tuljavic so vezane v serijo in je torej kapacitivnost navitja $C_n = (1/n)C_t$ (n je število tuljavic). Kapacitivnosti z zemljo so vezane paralelno in je tedaj kapacitivnost navitja proti zemlji $C_z = nC$.

Kapacitivnosti C_n in C_z lahko nadomestimo z ekvivalentno ali vhodno kapacitivnostjo:

$$C_{vh} = \sqrt{C_n C_z}. \quad (162)$$

Kapacitivni elementi so na splošno porazdeljeni v volumnu transformatorja, toda vpliv vezave porazdeljenih kapacitivnosti lahko obravnavamo v obliki nadomestnih kapacitivnosti in jih lahko kombiniramo z običajnim nadomestnim vezjem. Vpliv kapacitivnosti ni pomemben samo pri višjih frekvencah, ampak tudi pri impulznem napajanju, čeprav moramo upoštevati gradient napetosti med ovoji, značilen za medovojne kapacitivnosti pri oblikovanju izolacijskega sistema za visoke napetosti, že pri omrežni frekvenci.

Nadomestno vezje, ki vsebuje tudi tri nadomestne kapacitivnosti (reaktance), je navadno uporabljeno za opis porazdelitve kapacitivnosti transformatorja (slika 104). Kapacitivnosti oziroma reaktance na sliki 104 pomenijo: $C_1 = C_{vh}$ vhodna kapacitivnost (enačba 162), C_2 izhodna kapacitivnost in C_{12} medsebojna kapacitivnost.



Slika 104 Ekvivalentno nadomestno vezje transformatorja za višje frekvence

Takšno vezje je primerno za modeliranje transformatorjev pri frekvencah, pri katerih so pomembne porazdeljene kapacitivnosti. Obstajajo metode za meritev teh kapacitivnosti oziroma njihovih reaktanc X_{C1} , X_{C2} in X_{C12} . Analitično reševanje takšnega vezja je dolgotrajno. Zato uporabljamo danes računalnik.

Pri nadaljnji obravnavi bomo izhajali iz predpostavke, da udari na transformator neskončno dolg val s pravokotnim čelom (slika 105).

Vzdolž voda se val premika s hitrostjo:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}, \quad (163)$$

kjer sta L_1 in C_1 induktivnost in kapacitivnost voda.

Pri zračnih vodih je hitrost " v " skoraj enaka svetlobni hitrosti. Pri tem je ena od glavnih karakterističnih veličin voda valovna upornost:

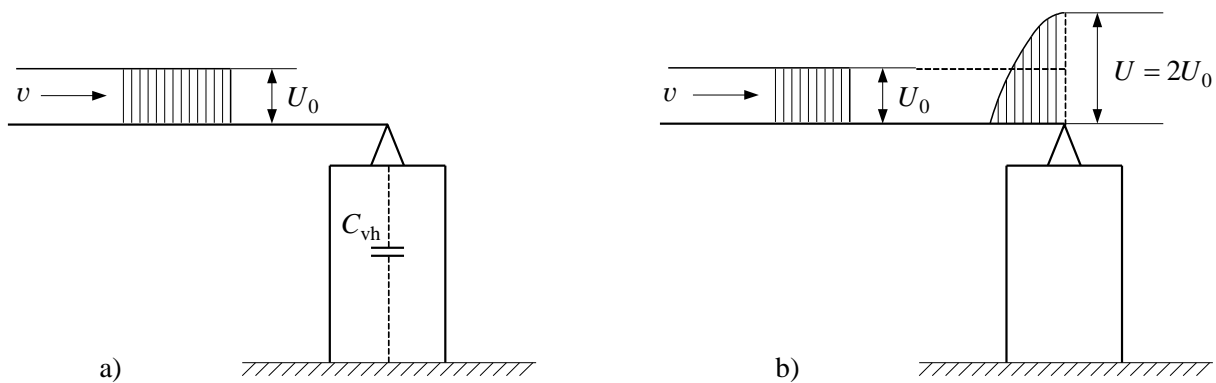
$$Z_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad (164)$$

in je:

pri zračnih vodih: $Z_1 \approx 350 \div 450 (\Omega)$,

pri kabelskih vodih: $Z_1 \approx 50 (\Omega)$.

Valovna upornost transformatorja pa je nekaj krat večja od valovne upornosti zračnega voda, pri čemer se menja v odvisnosti od karakterja ali frekvence nihanja.



Slika 105 Odboj napetostnega vala

Ko pride udarni val do navitja transformatorja, se zgodita dva pojavi. Pri prehodu napetostnega vala z veje z manjšo valovno upornostjo na vejo z večjo valovno upornostjo - v danem primeru iz voda (zračni ali kabelski) v transformator - se napetost na sponkah transformatorja poveča in v skrajni meri se lahko podvoji (slika 105b). Čas, v katerem se napetost U_0 na vhodni sponki transformatorja poveča na vrednost $U = 2U_0$, je zelo kratek - velikostnega reda $0,1 \mu s$.

Istočasno ta isti odbojni val v tem času, tj. praktično trenutno, požene tokove skozi kapacitivnosti navitja in napetost se vzdolž navitja do ničelne točke porazdeli, odvisno od kapacitivnosti. Kapacitivna veja transformatorja se nabije z električnim nabojem in dobimo diagram začetne porazdelitve napetosti vzdolž navitja. Ta diagram se lahko zelo razlikuje od diagrama porazdelitve napetosti pri stacionarnem obratovanju. V kolikor predstavlja navitje v nadaljevanju procesa kombinirano medsebojno delovanje kapacitivnosti in induktivnosti, je prehod od začetnega stanja k ravnotežnemu stanju izvršen z nihajnim procesom, ki se postopoma duši zaradi ohmskih upornosti navitij in vodljivosti izolacije.

7.3.2 Začetna in končna porazdelitev napetosti vzdolž navitja

Porazdelitev napetosti si bomo pojasnili na primeru ozemljene in neozemljene sponke X. Pri tem igra vlogo razmerje kapacitivnosti do zemlje proti kapacitivnosti navitja samega, to je podano s faktorjem:

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_z}{C_n}} = 5 \div 15.$$

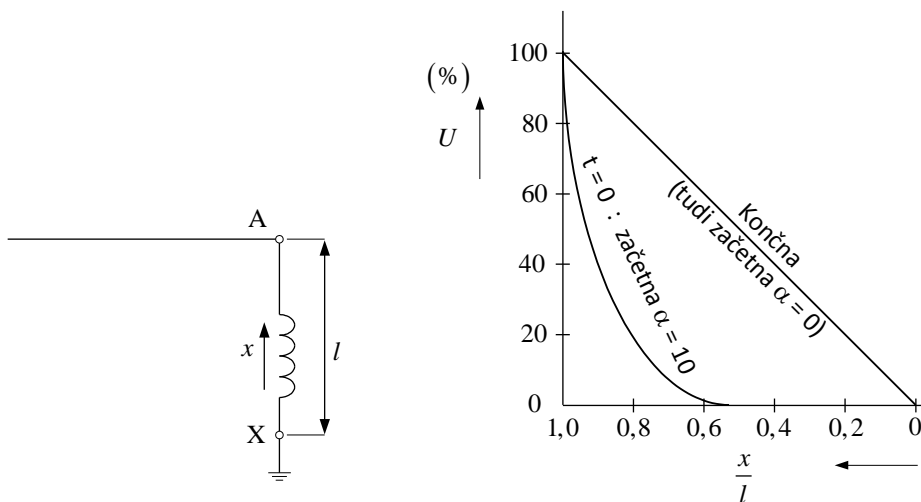
Začetna porazdelitev napetosti vzdolž navitja v odvisnosti od razdalje x pri ozemljeni sponki X za sliko 106a je dana z enačbo:

$$U = U_0 \frac{\sinh(\alpha(1 - x/l))}{\sinh \alpha} \quad (165a)$$

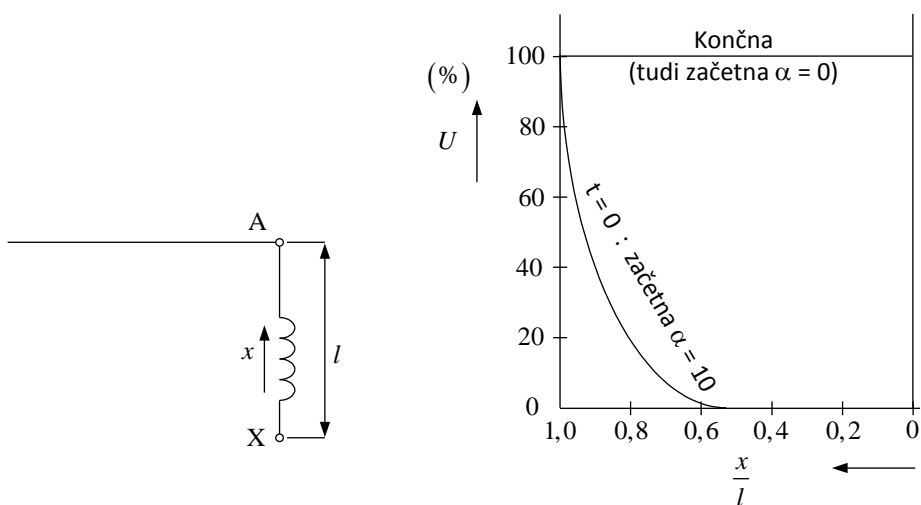
in za sliko 106b z enačbo:

$$U = U_0 \frac{\cosh(\alpha(1 - x/l))}{\cosh \alpha}. \quad (165b)$$

Na slikah 106a in 106b pomeni l skupno dolžino navitja in U_0 napetost na vhodni sponki transformatorja (slika 105).



Slika 106a Ozemljeno navitje



Slika 106b Neozemljeno navitje

Za izračun električne trdnosti navitja je odločilen porast napetosti med dvema sosednjima elementoma (ovojeva, tuljavicama) $\partial U / \partial x$ (gradient napetosti). Iz krivulj na sliki 106a in b je razvidno, da je v prvem trenutku ($t=0$) največji gradient napetosti na začetku navitja - na njegovih prvih ovojih pri $x=l$. V začetnem trenutku bi bili elementi navitja, ki so bližji sponki, pod napetostjo, ki je približno 10 do 15-krat večja kot pri enakomerni porazdelitvi napetosti. To zahteva uporabo ustreznih mer, ki bodo zaščitile izolacijo navitja pred prebojem.

Začetnemu trenutku sledi prehodni pojav in po daljšem vmesnem času se napetostni val porazdeli enakomerno vzdolž navitja.

7.3.3 Prenapetostna zaščita transformatorja

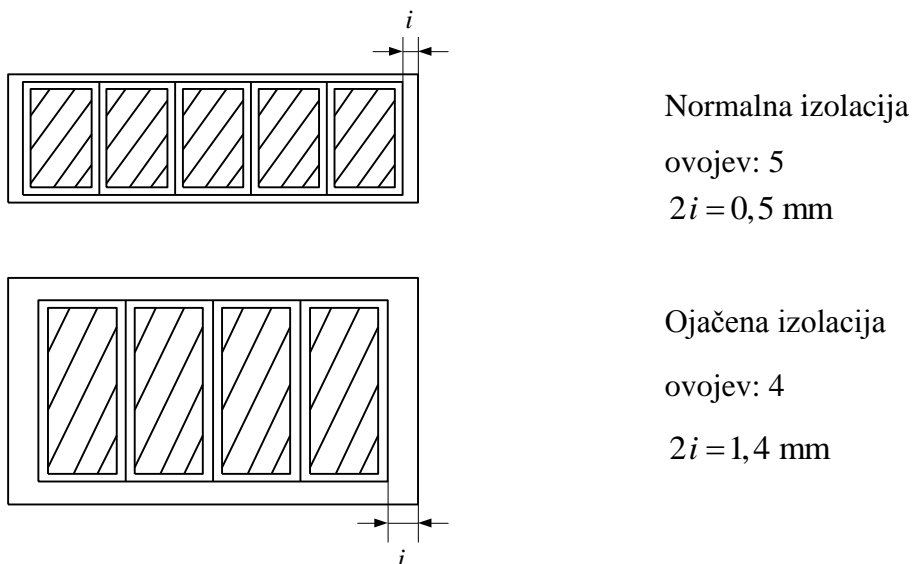
Zaščita je lahko dvojna - zunanja in notranja.

Notranjo zaščito transformatorja pred prenapetostmi zagotavljata dva konstrukcijska prijema:

1. neizbežna ojačitev izolacije vhodnih in končnih tuljav, kjer se pojavljajo največji gradienti napetosti,
2. kapacitivna zaščita transformatorja.

Oljni transformatorji z napetostmi do 38 kV imajo prenapetostno zaščito samo z izvedbo ojačene izolacije končnih tuljav visokonapetostnega navitja.

Kot primer si oglejmo transformatorske tuljavnice 38 kV transformatorja na slika 107.



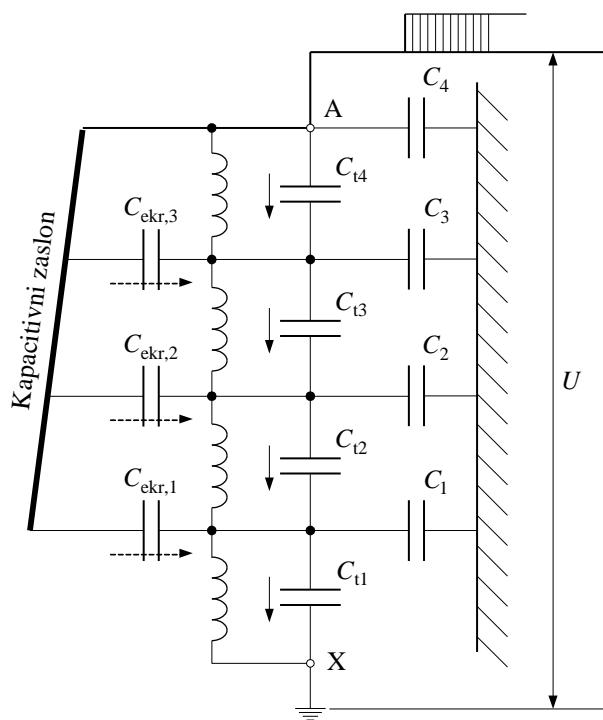
Slika 107 Primer normalne in ojačene izolacije

Pri ojačeni izolaciji debeline d_i ima tuljava manjšo kapacitivnost ($C_n = \varepsilon A_i / d_i$) in večjo induktivnost zaradi debelejšje izolacije med posameznimi ovoji kot normalna tuljava, s tem so se njene karakteristike spremenile. Pri ojačeni izolaciji je odvajanje toplote slabše, zato mora biti v

tem primeru gostota toka J (A/mm^2) v vodnikih $20 \div 30$ % manjša oziroma presek vodnika za enak odstotek večji kot pri normalno izoliranih tuljavah. Število tuljav z ojačeno izolacijo predstavlja $5 \div 7$ % skupnega števila tuljav navitja.

Pri transformatorjih za $U \geq 110$ kV uporabimo poleg zaščite končnih tuljav z ojačeno izolacijo še kapacitivno zaščito, ki je izvedena tako, da bi se prenapetostni udari že v začetku porazdelili vzdolž navitja, kot je to pri končni porazdelitvi, tj. dovolj enakomerno. V tako zaščitenem navitju ne morejo nastopiti močni nihajni procesi in se ne pojavijo prekomerni gradienti napetosti med deli navitja. Transformator, ki je opremljen s takšno vrsto zaščite, imenujemo neresonančni transformator.

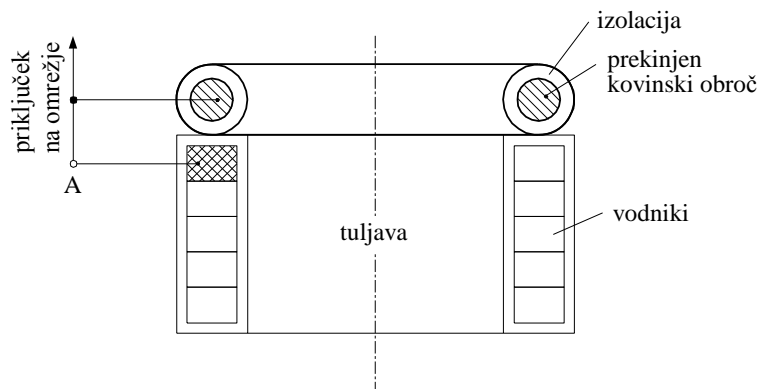
Ideja kapacitivne zaščite je naslednja. Če bi lahko izdelali navitje tako, da bi bila njegova kapacitivnost proti zemlji $C_z = 0$ (ker ta povzroča neenakomerno porazdelitev vzdolž navitja), bi bil faktor: $\alpha = \sqrt{C_z / C_n} = 0$ in kot je očitno iz diagramov na slikah 106a in 106b, bi imeli enakomerno začetno porazdelitev napetosti vzdolž navitja. Fizikalno je nemogoče odpraviti kapacitivnost navitja proti zemlji, mogoče pa je kompenzirati tokove, ki preko teh kapacitivnosti tečejo k zemlji, s tokovi, ki pritekajo iz kapacitivnega zaslona ali ekrana (slika 108a).



Visokonapetostno cilindrično navitje, zgrajeno iz diskastih tuljav, je obdano s kapacitivnim zaslonom, ki je izoliran in galvanjsko vezan z vhodno sponko navitja. Aksialna višina vzdolž oboda navitja je tako stopnjevana, da dobimo kapacitivno nadomestno vezje na sliki 108a, tj. nadomestno vezje neresonančnega transformatorja.

Slika 108a Kapacitivni zaslon

Kapacitivna zaščita (prekinjen obroč na sliki 108b) poveča zmanjšano kapacitivnost vhodnih tuljav z debelejšo izolacijo.



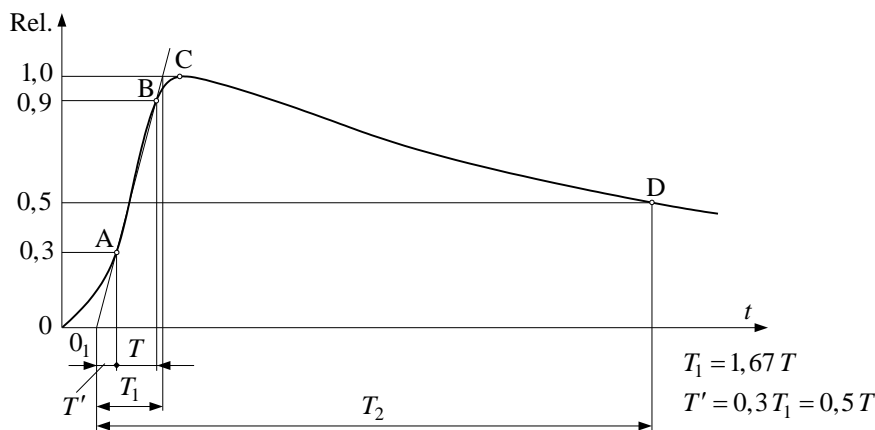
Slika 108b Kapacitivni obroč

7.3.4 Visokonapetostni preskus transformatorja

Transformator je potrebno testirati z dvema prenapetostnima preskusoma.

1. Na zdržno napetost atmosferskega udara z udarnim valom oblike 1,2/50 μs .

Udarne napetost (val) kot funkcija časa je podana na sliki 109 po IEC 60060 ($T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ in $T_2 = 50 \mu\text{s}$)



Slika 109 Udarne val

To udarno napetost mora transformator vzdržati brez preskoka ali preboja izolacije.

2. Na kratkotrajno zdržno napetost industrijske frekvence (enominutni preskus) - efektivne vrednosti.

To napetost mora vzdržati izolacija proti zemlji v času ene minute.

Standardne in najvišje obratovalne napetosti po IEC [11] ter testne napetosti [12] so prikazane v tabeli XI.

V tabeli preskusnih zdržnih napetosti vidimo stolpce "polna" in "zmanjšana" stopnja izolacije. To pomeni preskus pri večjem ali manjšem riziku, da transformator že pri preskusu ne prebije. Isti

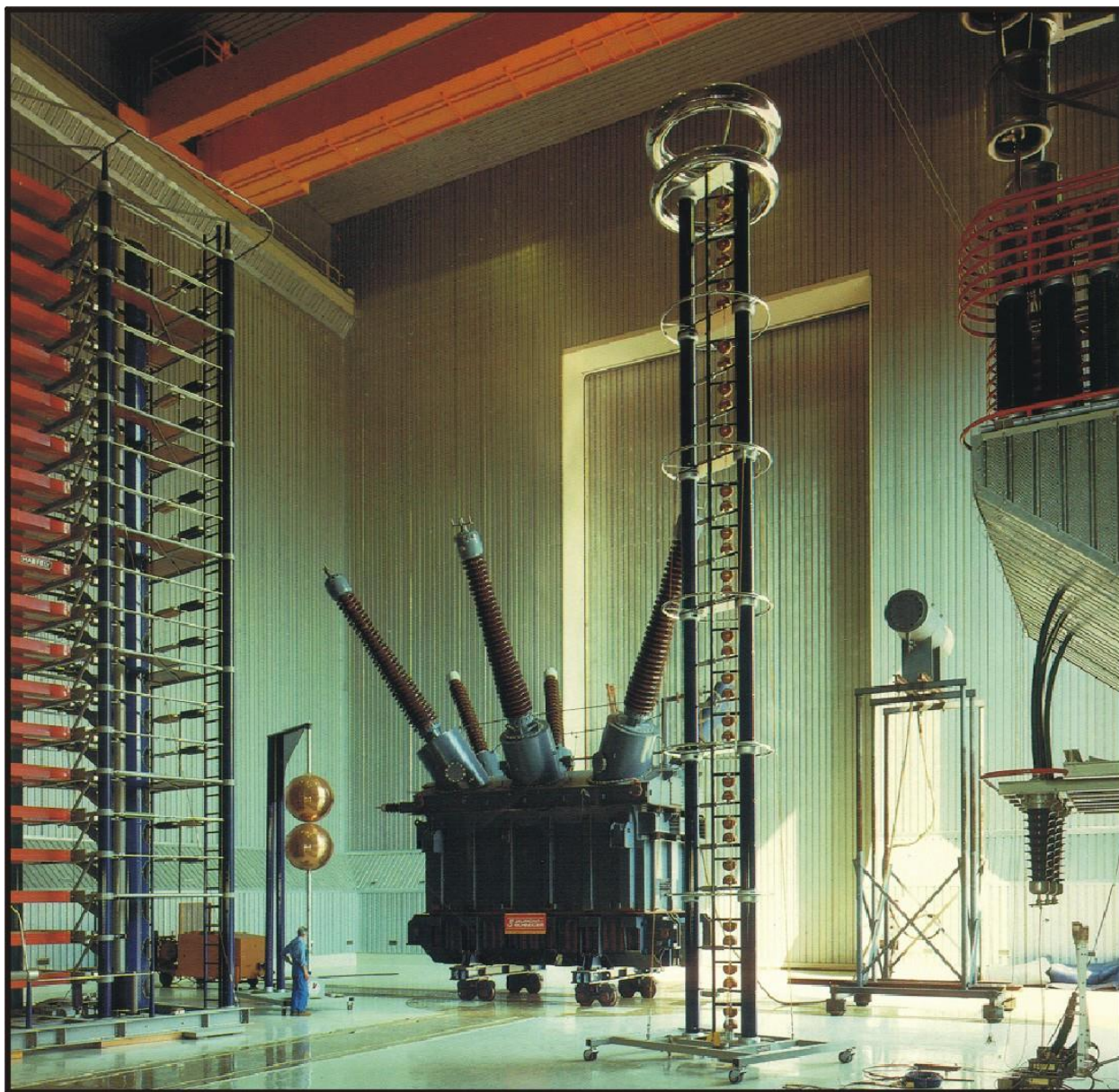
transformator, preskušan z zmanjšano stopnjo izolacije, je seveda nekaj cenejši. Od pojavov v omrežju in v atmosferi je odvisno, za kaj se odločimo - glede na predvideno mesto (lokacijo) postavitve transformatorja in njegovo vlogo v sistemu.

Tabela XI Zdržne napetosti

Stopnja izolacije	Najvišja obrat. napetost omrežja kV	Zdržna napetost industrijske frekvence eno minutni preskus kV				Zdržna udarna napetost polnega vala 1,2/50 μ s kV	
		za navitja		za skozičike		za navitja in skozičike	
		stopnja izolacije				stopnja izolacije	
		polna	zmanj.	polna	zmanj.	polna	zmanj.
1	2	3	4	5	6	7	8
Si 3,6	3,6	16	–	21	–	45	–
Si 7,2	7,2	22	–	27	–	60	–
Si 12	12	28	–	35	–	75	–
Si 24	24	50	–	55	–	125	–
Si 38	38	70	–	75	–	170	–
Si 72,5	72,5	148	–	140	–	325	–
Si 123	123	230	–	230	–	550	–
Si 123 s*	123	–	185	–	185	–	450
Si 245 s	245	–	395	–	395	–	900

s* pomeni zmanjšano stopnjo preskusne napetosti.

Na sliki 110 je fotografija visokonapetostnega laboratorija. Na levi strani je impulzni generator za generacijo atmosferskega udarnega vala. V ozadju je transformator za napetost industrijske frekvence, efektivne vrednosti napetosti 1.000.000 V.



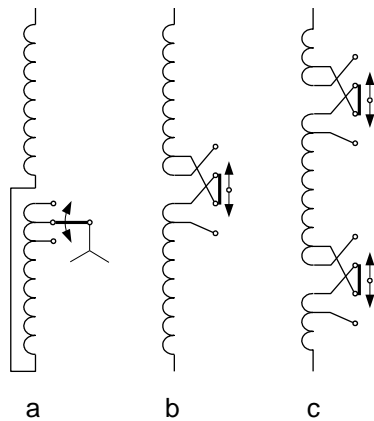
Slika 110 Visokonapetostni laboratorij

8 STOPENJSKO NASTAVLJANJE PRESTAVE

Transformator s togo prestavo ima le v redkih primerih obratovalnih zahtev konstantno napetost.

8.1 Transformatorsko navitje z odcepi

Pogosto zadošča že nekaj ovojev (2,5 do 5 %), ki jih dodamo ali odvezamemo VN navitju. To delamo tako, da v breznapetostnem stanju spreminjamo število ovojev v nekaj stopnjah. Takšna nastavitev velja za neko pričakovano srednjo vrednost napetosti. Na sliki 111 je cilindrično navitje za nastavljanje prestave za cca $\pm 4\%$.



Slika 111 Cilindrično navitje za nastavljanje prestave:

- a) nastavljanje v zvezdišču,
- b) nastavljanje v sredini,
- c) dvakratno nastavljanje v sredini.

8.2 Regulacijska transformatorska stikala

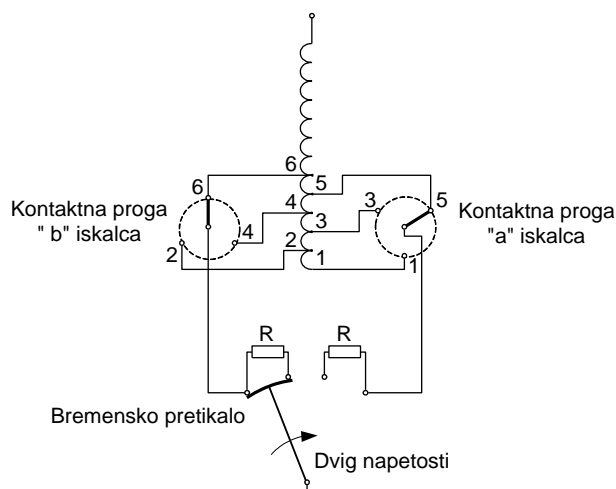
Predhodno opisani način ne zadošča v omrežju, kjer se pojavljajo stalno spreminjajoči tokovno odvisni padci napetosti, ki jih napetostna regulacija sinhronskega generatorja ne zmore več odpraviti.

Tem zahtevam ustreza nastavljanje odceпов pod obremenitvijo, povečanje nastavljalnega področja in povečanje števila stopenj. Področje nastavitve je do 22 % z velikostjo stopenj $1,5 \div 2\%$.

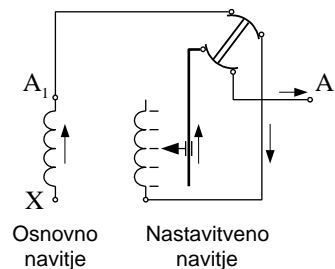
Transformatorji srednjih in velikih moči imajo večinoma že vgrajeno regulacijsko transformatorsko stikalo. To je sestavljeno iz iskalca, prediskalca in bremenskega odcepnega preklopnika. Ti deli so s pogoni mehansko povezani med seboj. Iskalec pripravi nastavitev želenega odcepa, prediskalec se zasuče na določen odcep stopenjskega navitja in bremenski odcepni preklopnik preklopi na naslednji odcep. Iskalci in prediskalci ne prekinjajo tokokroga in tako je njihovo delovanje brez pojava električnega loka. Bremenski odcepni preklopnik deluje pod obremenitvijo, tj. prekinja tok navitja. Pri tem ne sme priti do kratkega stika sosednjih koncev navitja in tudi ne do prekinitve toka. Med preklopom sta navadno oba menjajoča se priključka premoščena z ohmskim uporom – slika 112.

Meje prestavnega razmerja so podane z enačbo: $K_{U_{\min}} = \frac{U_{10} - \Delta U_1}{U_{20} + \Delta U_2}$ in $K_{U_{\max}} = \frac{U_{10}}{U_{20}}$.

Na sliki 113 je prikazana izvedba z ločenim nastavitvenim navitjem. Razlog je v tem, da je glavno navitje celovito in ni nevarnih strižnih sil na mestih z odcepi.

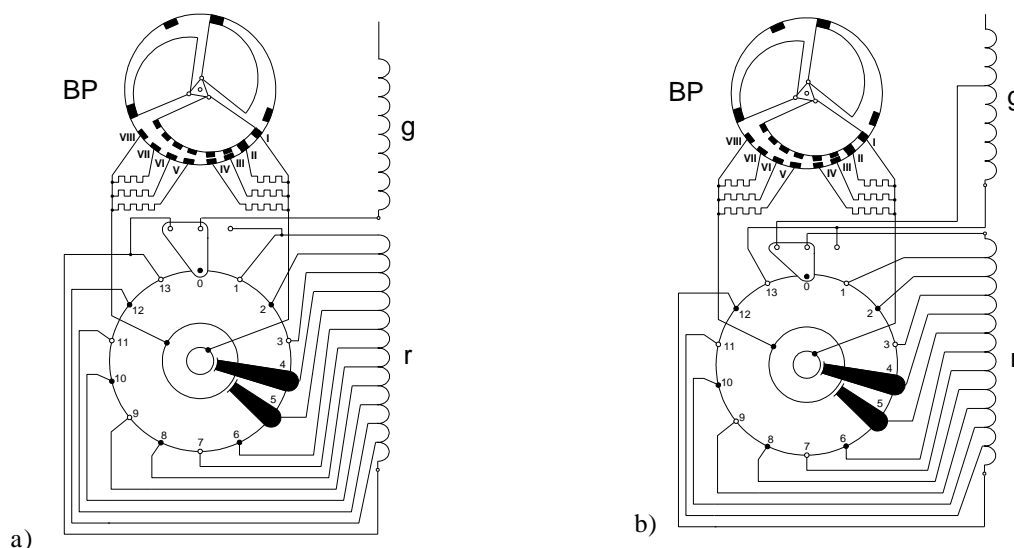


Slika 112 Prikluček bremenskega odcepnega preklopnika na dvojni iskalca



Slika 113 Ločeno nastavitveno navitje

Vgrajen bremenski odcepni preklopnik je prikazan na sliki 11 v uvodu. Na sliki 114 je podan načrt znanega stopenjskega stikala po sistemu dr. Jansen. Na sliki je prikazano navitje ("g" – glavni del navitja in "r" regulacijski del navitja) ene faze s kontakti in premostitvenimi upori bremenskega odcepnega preklopnika (BP) z zvezdiščem v obliki trikrake zvezde (3 faze). Premični kontakti bremenskega preklopnika so ekscentrično nameščeni okoli pogonske gredi BP. Premostitveni upori so povezani z nepomičnimi kontakti posameznih odceпов regulacijskega dela navitja. Za razliko od slike 114a je na sliki b odcep tudi na glavnem delu navitja za različno osnovno napetost. Preklopnik omogoča preklon tudi v primeru kratkega stika.



Slika 114 Shema bremenskega odcepnega preklopnika v vezavi:

a) premikanja in b) izbiranja

Na sliki 115 je podana vsebina transformatorske napisne tablice za primer energetskega transformatorja z bremenskim odcepnim preklopnikom za nastavljanje napetosti. Razen nazivne napetosti sta navedeni še najvišja in najnižja napetost. Najvišja napetost je označena s številom "1", najnižja napetost s številom zadnjega položaja (tj. "21"). Razen za nazivno napetost sta podani tudi napetosti kratkega stika za oba skrajna odcepa. Podani so tudi ustrezni tokovi primarne strani ter nazivni tok sekundarne strani.

Naziv in znak proizvajalca					
Tip	<input type="text"/>	Nr.	<input type="text"/>	Leto	<input type="text"/>
	<input type="text" value="16 000"/>	kVA	Si <input type="text" value="123/38"/>	Vrsta	<input type="text" value="ET"/>
Frekvenca	<input type="text" value="50"/>	Hz	Vezava	<input type="text" value="Yy0"/>	R. izol. <input type="text"/>
Položaj	Volti		Amperi		u_k %
<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="126 500"/>	<input type="text"/>	<input type="text" value="73,0"/>	<input type="text"/>	<input type="text" value="11,5"/>
<input type="text" value="11"/>	<input type="text" value="110 000"/>	<input type="text" value="31 500"/>	<input type="text" value="84,0"/>	<input type="text" value="293,2"/>	<input type="text" value="10,9"/>
<input type="text" value="21"/>	<input type="text" value="93 500"/>	<input type="text"/>	<input type="text" value="98,8"/>	<input type="text"/>	<input type="text" value="10,6"/>
I_{kN}	<input type="text"/>	$\times I_N$	t_k <input type="text" value="5,5"/>	s Pom. nav.	<input type="text" value="6 300"/>
Hlajenje	<input type="text" value="N"/>	Olje	<input type="text" value="20"/>	t	Skupaj <input type="text" value="70"/>
					t

Slika 115 Napisna tablica transformatorja

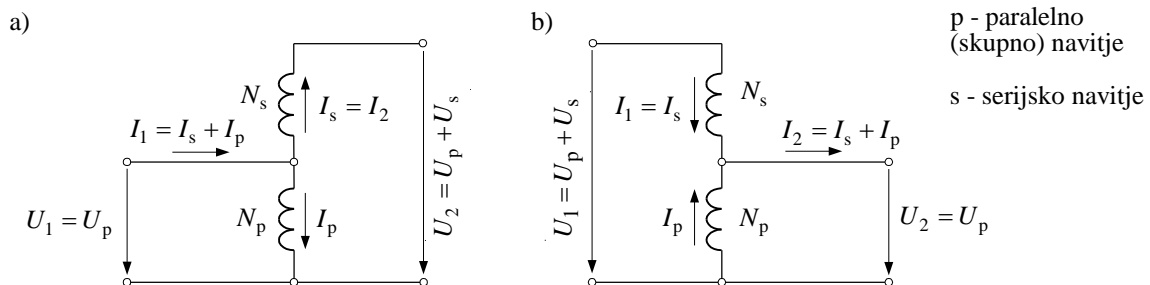
9 POSEBNE IZVEDBE TRANSFORMATORJEV

9.1 Avtotransformator ali varčni transformator

Gradijo se v enofazni in trifazni vezavi. V primeru, da dve galvanjsko ločeni navitji normalnega transformatorja povežemo tako, da je eno navitje skupno obema napetostnima stranema, nastane avtotransformator. Njegovo skupno navitje je obremenjeno le z razliko tokov. To skupno navitje imenujemo paralelno navitje, medtem ko imenujemo navitje, skozi katero teče polni tok ene ali druge napetostne strani, serijsko navitje. Prihranek glede na normalni transformator z dvema ločenima navitjema je tem večji, čim bolj se prestavno razmerje bliža vrednosti 1. Prihranek je v masi železa in materialu vodnikov, dalje v manjših izgubah ter spremembi napetosti in toka prostega teka.

Razen prednosti ima tudi določene pomanjkljivosti. Zaradi galvanjske povezave vhodne in izhodne strani je avtotransformator v popolnoma neozemljenih omrežjih v primeru zemeljskega stika jedra uporaben, če imata tokokroga, ki ju povezuje, enako izolacijo proti zemlji. Njegova vloga v polno izoliranih visoko napetostnih omrežjih je torej omejena na izravnavo napetostnih padcev. Pri tem se vhodna in izhodna napetost razlikujeta za manj kot 25 %. Avtotransformator se uporablja v trifazni izvedbi tudi kot zagonski transformator pri večjih asinhronskih motorjih.

Na sliki 116 je narisana shema a) za primer $U_1 < U_2$ in b) $U_1 > U_2$.



Slika 116 Avtotransformator

Za idealni enofazni avtotransformator (vezava a) velja: $I_s N_s - I_p N_p = 0 \rightarrow$

$$\rightarrow I_s = \frac{N_p}{N_s} I_p \quad \text{in} \quad \frac{U_s}{U_p} = \frac{U_2 - U_1}{U_1} = \frac{N_s}{N_p}.$$

Lastna ali tipska moč transformatorja, tj. moč, za katero je transformator grajen, je:

$$S_t = U_p I_p = U_s I_s = (U_2 - U_1) I_2 \quad (166a)$$

ali za vezavo b)

$$S_t = (U_1 - U_2) I_1. \quad (166b)$$

$$\text{Nazivna ali prehodna moč: } S_{\text{preh}} = U_1 I_1 = U_2 I_2. \quad (167)$$

$$\text{Iz enačbe za tipsko moč velja: } S_t = U_2 I_2 \left(1 - \frac{U_1}{U_2}\right) = S_{\text{preh}} \left(1 - \frac{U_1}{U_2}\right). \quad (168a)$$

$$\text{Obratno bi veljalo za vezavo b): } S_t = U_1 I_1 \left(1 - \frac{U_2}{U_1}\right) = S_{\text{preh}} \left(1 - \frac{U_2}{U_1}\right). \quad (168b)$$

Velja, da je $S_t < S_{\text{preh}}$.

Zakon o geometrijski rasti lahko uporabimo tudi, če primerjamo normalni transformator z avtotransformatorjem in je nazivna moč prvega enaka nazivni prehodni moči drugega $S_N = S_{N_{\text{preh}}}$. Linearne dimenzije so po zakonu o geometrijski rasti v razmerju $x = \sqrt[4]{S_t / S_N}$, mase in izgube pa v razmerju x^3 .

Pri uporabi avtotransformatorja se zmanjšajo mase v razmerju napetosti ali serijskih (N_s) in celotnih ($N_s + N_p$) ovojev (z $x \leq 1$ in $U_2 \leq U_1$):

$$m_{\text{avt}} \approx m_{\text{nor}} \sqrt[4]{\left(1 - \frac{U_2}{U_1}\right)^3} = m_{\text{nor}} \sqrt[4]{\left(\frac{N_s}{N_s + N_p}\right)^3} = m_{\text{nor}} x^3$$

in izgube v razmerju

$$P_{\text{iavt}} \approx P_{\text{inor}} \sqrt[4]{\left(1 - \frac{U_2}{U_1}\right)^3} = P_{\text{inor}} x^3.$$

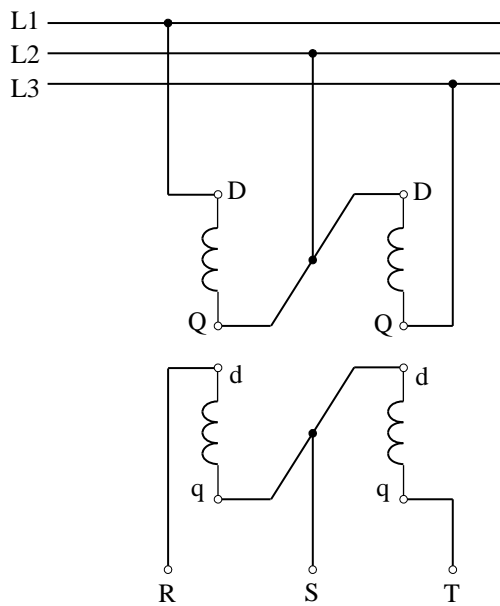
Faktor zmanjšanja mase in izgub $x^3 = \sqrt[4]{\left(1 - \frac{U_2}{U_1}\right)^3}$ je za različne vrednosti razmerja U_2 / U_1 podan v tabeli XII.

Tabela XII Vpliv spremembe dimenzij na moč avtotransformatorja

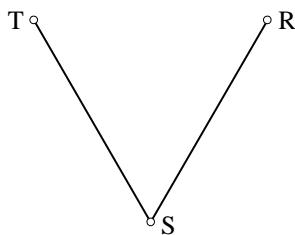
U_2 / U_1	1	0,8	0,7	0,5	0,3
x^3	0	0,299	0,405	0,595	0,821

9.2 Vezava V dveh enofaznih transformatorjev

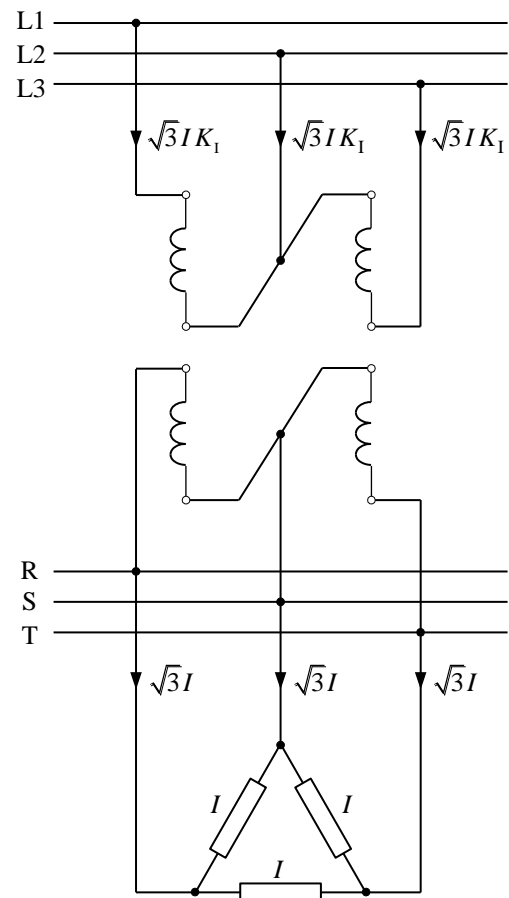
V primeru, da vežemo dva enofazna transformatorja na trifazno omrežje, dobimo na sekundarnem navitju vse tri napetosti R-S-T (slika 117). Tako je trifazna transformacija mogoča tudi z dvema enofaznima transformatorjema. Takšna vezava se imenuje vezava V, ker ima slika kazalcev napetosti R-S in S-T glede na sliko 118 obliko črke "V". Pri obremenitvi vseh treh faz morajo navitja L1-L2 in L2-L3 na primarni in sekundarni strani prevzeti obremenitev (tretje) manjkajoče faze L3-L1 na takšen način, da tok faze L3-L1 prehaja skozi navitji faz L1-L2 in L2-L3.



Slika 117 Vezava V dveh transformatorjev



Slika 118 Kazalci napetosti v vezavi V



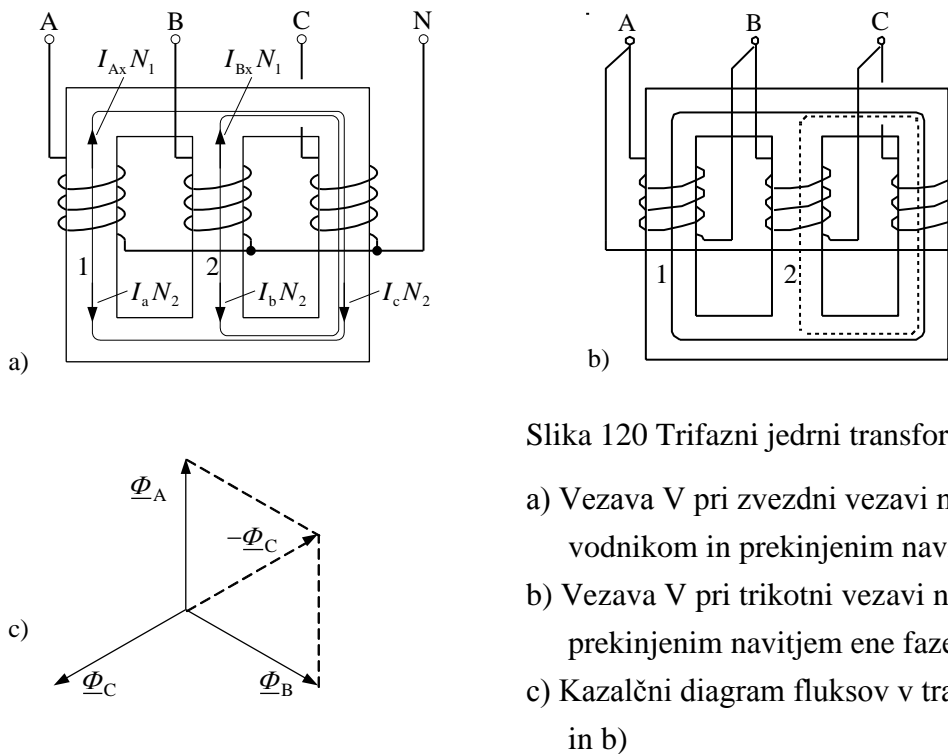
Slika 119 Simetrična obremenitev dveh transformatorjev v vezavi V

V primeru simetrične trifazne obremenitve (slika 119) mora biti obremenitev faz R, S in T za $\sqrt{3}$ večja kot v primeru obremenitve samo dveh faz R-S in S-T. Za trifazno simetrično obremenitev je navidezna moč $S = 3UI$ in vsaka faza je dimenzionirana za navidezno moč $S_f = UI\sqrt{3}$. Razmerje tipske moči transformatorja v vezavi V in močjo bremena je:

$$\frac{S_V}{S_b} = \frac{2UI\sqrt{3}}{3UI} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,155.$$

Tipaska moč transformatorja v vezavi V mora biti za 15,5 % večja od moči na sekundarnih sponkah, tj. od moči bremena (potrošnika).

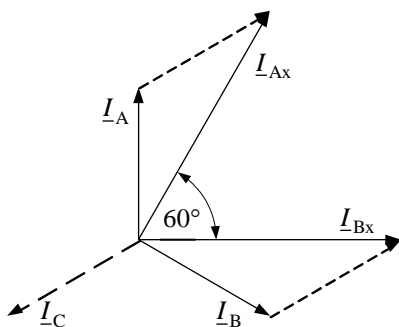
Vezavo V dobimo tudi pri trifaznem jedrnem transformatorju z zvezdno vezavo in ničelnim vodnikom ali trikotno vezavo. V obeh primerih dobimo vezavo V glede na sliki 120a ali 120b, če se prekine stik ene faze.



Slika 120 Trifazni jedrni transformator v vezavi V

- a) Vezava V pri zvezdni vezavi navitja z ničelnim vodnikom in prekinjenim navitjem ene faze
- b) Vezava V pri trikotni vezavi navitja in prekinjenim navitjem ene faze
- c) Kazalčni diagram fluksov v transformatorju za a) in b)

Glede na sliko 120c velja, da fluksa dveh neprekinjenih faz (ki tvorita vezavo V na primarni strani) dasta v tretjem stebru jedrnega transformatorja fluks, ki je enak fluksu, ki bi ustvarili amper-ovoji prekinjene faze. Fluksa Φ_A in Φ_B sta v tretjem stebru s prekinjeno fazo nasprotno usmerjena. Zato njuna vsota z negativnim predznakom daje fluks Φ_C , kot je to prikazano na sliki 120c. S tem je ustvarjena možnost, da je trifazni jedrni transformator v navedenem primeru lahko priključen v vezavo (stik) V in da se na sekundarni strani nič ne spremeni. Moč, ki jo sekundarna stran daje potrošniku, morata dve navitji primarja vzeti iz omrežja. V tem primeru morata preostali dve navitji ustvariti potrebne amper-ovoje, ki jih zahtevajo sekundarna navitja. Na sliki 121 je prikazan kazalčni diagram tokov v primeru simetrične sekundarne obremenitve.



Slika 121 Kazalčni diagram tokov v vezavi V trifaznega jedrnega transformatorja

Amper-ovoji posameznih tuljav sekundarja morajo biti kompenzirani, tako da se v posameznih stebrih pojavijo le magnetni fluksi tokov magnetenja. Torej mora biti vsota amper-ovojev obremenitve nič. V primeru, da ta vsota v enem stebru ne bi bila nič, se morajo v preostalih dveh stebrih pojaviti proti amper-ovoji, ki jih izničijo. To pomeni, da dve navitji primarja ne potegneta

iz omrežja le tokov I_A in I_B , ki bi kompenzirala amper-ovoje $I_a N_2$ in $I_b N_2$, ampak tudi tok $-I_c$ v navitju A in $-I_c$ v navitju B. Tako s tem povečanim tokom \underline{I}_{Ax} in \underline{I}_{Bx} navitji A in B ustvarita amper-ovoje, ki so nasprotni amper-ovojem zaradi toka I_c v navitju tretje faze sekundarja. Analitična rešitev teh problemov je zelo enostavna. Vsota vseh vzbujanj (v zaprtem magnetnem krogu) mora biti enaka vsoti vseh padcev magnetnih napetosti. V našem primeru mora biti magnetna napetost enaka nič, ker amper-ovoji toka obremenitve ne smejo ustvariti nikakršnega fluksa.

Postavimo dve enačbi glede na sliko 120a ali 120b za vsoto amper-ovojev v zanki 1 in zanki 2. Glede na smeri amper-ovojev v primarju in sekundarju in če zanemarimo magnetilne tokove, lahko napišemo enačbe za vzbujanje v obeh zankah:

$$\underline{I}_{Ax} N_1 + \underline{I}_c N_2 - \underline{I}_a N_2 = 0, \quad (169a)$$

$$\underline{I}_{Bx} N_1 + \underline{I}_c N_2 - \underline{I}_b N_2 = 0. \quad (169b)$$

V enačbah (169a in 169b) je $\underline{I}_c N_2$ preostanek (nekompenziranih ali sofaznih) amper-ovojev, ki jih morata kompenzirati navitji preostalih dveh faz v primeru prekinitve ene faze.

Enačbo (169a) delimo nato z ovoji N_1 in vrednost za primarni tok faze A je:

$$\underline{I}_{Ax} = \frac{\underline{I}_a N_2 - \underline{I}_c N_2}{N_1} = \underline{I}'_a - \underline{I}'_c = \underline{I}_A - \underline{I}_C = \sqrt{3} \underline{I}_A. \quad (170a)$$

Podobno rešitev dobimo iz enačbe (169b) za tok v drugi fazi:

$$\underline{I}_{Bx} = \frac{\underline{I}_b N_2 - \underline{I}_c N_2}{N_1} = \underline{I}'_b - \underline{I}'_c = \underline{I}_B - \underline{I}_C = \sqrt{3} \underline{I}_B. \quad (170b)$$

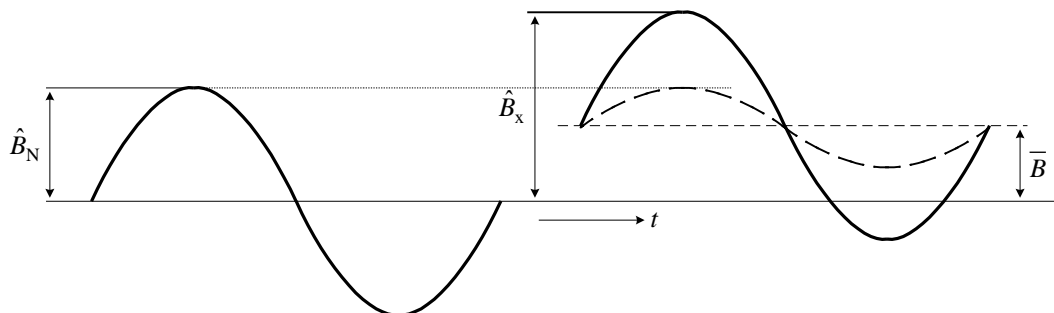
Vidimo, da bi se v primeru prekinitve ene faze pri nazivni simetrični obremenitvi na sekundarni strani povečal bremenski tok ostalih dveh faz na primarni strani za $\sqrt{3}$, kot je to prikazano v kazalčnem diagramu na sliki 121. Zato je potrebno v primeru vezave V, tj. pri okvari ene faze, zmanjšati obremenitev za $\sqrt{3}$.

Enak primer je tudi za tri enofazne transformatorje, vezane v trikot. Ta primer je še enostavnejši, ker je mogoče transformator tiste faze, ki je v okvari, enostavno odklopiti in preostala dva transformatorja lahko obratujeta z 58 % moči.

9.3 Usmerniški transformator

Usmerniški transformatorji povezujejo izvor električne energije z usmernikom tako, da je sekundarna napetost transformatorja za neko usmerniško vezje ustrezna želeni usmerjeni napetosti, tj. enosmerni napetosti na sponkah usmernika. Če so na usmerniški transformator na primarni strani pritisnjene sinusne napetosti, so na sekundarni strani ravno tako sinusne napetosti. To pa na splošno ne velja za sekundarne tokove in od tod ne velja več splošno pravilo, da je

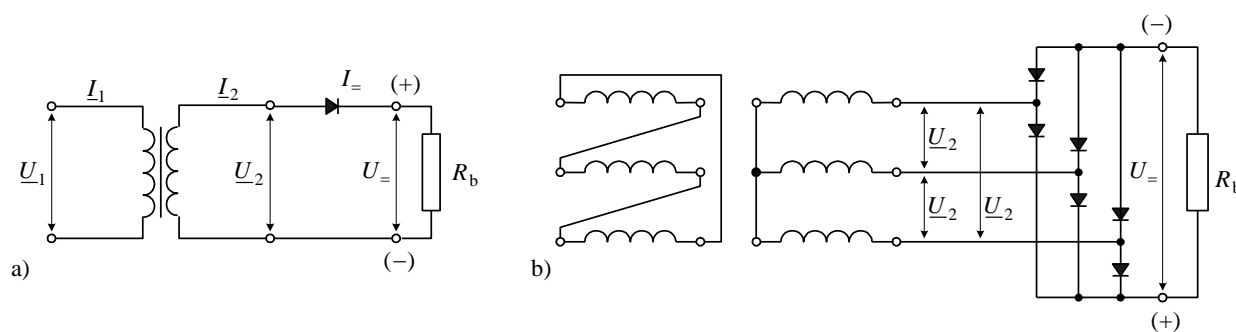
tokovno prestavno razmerje recipročna vrednost napetostnega prestavnega razmerja. Pri tako imenovanih enohodnih usmerniških vezjih nastopi še predmagnetenje železnega jedra transformatorja, kot kaže slika 122.



Slika 122 Enosmerno predmagnetenje jedra

Zaradi izgub in magnetilnih tokov ne moremo dopustiti $\hat{B}_x > \hat{B}_N$, temveč mora biti v glavnem $\hat{B}_x \approx \hat{B}_N$, kar pomeni, da mora imeti tak transformator večji presek železnega jedra $A_{Feu} = A_{Fe} \hat{B}_N / (\hat{B}_N - \bar{B})$, saj potrebujemo v obeh primerih enak fluks $\Phi_{g\approx}$, da bo napetost $U_2 = 4,44 f N_2 \hat{\Phi}_g$.

Iz tega kratkega izvajanja sledi, da transformatorji za napajanje usmernika moči $P_{\pm} = U_{\pm} I_{\pm}$ ne bodo enakih dimenzij kot navadni transformatorji. Dimenzije so odvisne od tipske moči usmerniškega transformatorja, ta pa od usmerniškega vezja. Za enohodno enofazno vezje (slika 123a) bo tipska moč $P_t = \pi P_{\pm}$ in za dvohodno trifazno vezje (slika 123b) $P_t = (\pi/3) P_{\pm} = 1,047 P_{\pm}$. V zadnjem primeru je tipska moč le približno 5 % večja kot enosmerna moč. Še manjša razlika je pri dvohodnem šest ali dvanajst faznem vezju. Pri slednjem je tipska moč transformatorja praktično enaka enosmerni moči.



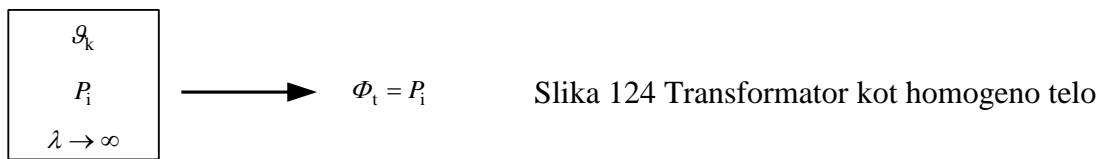
Slika 123 a) Enohodno enofazno vezje, b) dvohodno trifazno vezje

10 SEGREVANJE IN OHLAJEVANJE TRANSFORMATORJA

10.1 Segrevanje transformatorja

Toplotna moč, ki se sprošča v transformatorju, se delno akumulira v njem, delno se odvaja preko površine v okolico. Akumulirana toplota dviga temperaturo transformatorja, odvajanje toplote s hladilnim sredstvom pa njegovo temperaturo znižuje.

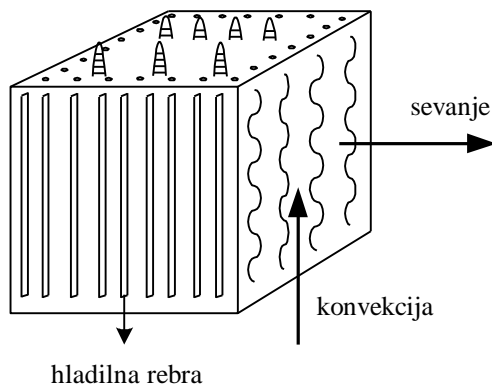
Transformatorji so nehomogena telesa, vendar jih za analizo toplotnih razmer jemljemo kot homogena telesa, v katerih je izvor toplote. Samega prevajanja v notranjosti ne upoštevamo, če predpostavimo, da je notranja specifična toplotna prevodnost železnega jedra in navitja skupaj z oljem zelo velika ($\lambda \rightarrow \infty$, slika 124).



Vzemimo, da je transformator homogeno telo s specifično toploto c in maso m , ki proizvaja izgube s toplotno močjo P_1 . Transformator oddaja toploto v okolico s konvekcijo, sevanjem in prevodnostjo. Zanemarimo prevodnost in združimo prvi dve obliki v skupni koeficient α na hladilni površini transformatorja A (m^2) v skupni toplotni prevodnost.

$$A_t = \alpha_s A_s + \alpha_k A = \alpha A. \quad (171)$$

Sevalna površina telesa A_s je navadno manjša od celotne (konvekcijske) površine telesa A . Ta primer nastopi, če ima transformator hladilna rebra za povečanje površin hlajenja (slika 125).



Slika 125 Odvajanje toplote v okolico

V diferencialu časa dt se sprosti v transformatorju toplotna energija, katere del se akumulira (temperatura se dvigne za $\Delta \mathcal{G}$ - prvi člen enačbe 172), del pa odteče v okolico preko zunanjih površin (stene kotla – drugi člen enačbe 172). Vsak trenutek velja enakost vseh treh energij:

$$P_1 dt = mc d(\Delta \mathcal{G}) + A_t \Delta \mathcal{G} dt. \quad (172)$$

To diferencialno enačbo rešimo po običajnem postopku z ločitvijo spremenljivke in dobimo

$$dt = \frac{\frac{mc}{\Lambda_t}}{\frac{P_i}{\Lambda_t} - \Delta\mathcal{G}} d(\Delta\mathcal{G}), \text{ integriramo obe strani za splošno rešitev:}$$

$$t = -\frac{mc}{\Lambda_t} \ln\left(\frac{P_i}{\Lambda_t} - \Delta\mathcal{G}\right) + K. \quad (173)$$

V enačbi (173) postavimo začetni pogoj, da ima v času $t=0$ transformator nadtemperaturo $\Delta\mathcal{G} = \Delta\mathcal{G}_0$ in dobimo konstanto K . To vstavimo nazaj v enačbo (173) in splošna rešitev enačbe je čas:

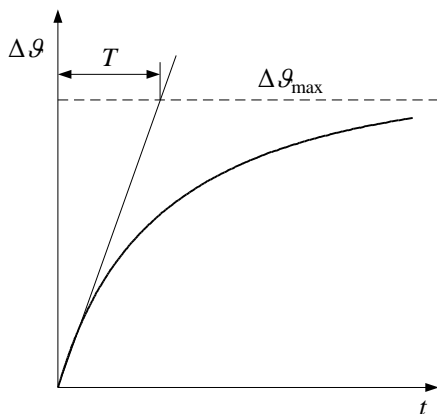
$$t = \frac{mc}{\Lambda_t} \ln\left(\frac{P_i / \Lambda_t - \Delta\mathcal{G}_0}{P_i / \Lambda_t - \Delta\mathcal{G}}\right). \quad (173a)$$

Izračunana nadtemperatura transformatorja (homogenega telesa) $\Delta\mathcal{G}$ bo:

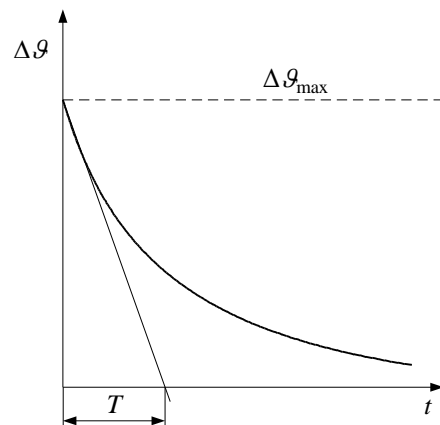
$$\Delta\mathcal{G} = \left(\frac{P_i}{\Lambda_t} - \Delta\mathcal{G}_0\right)(1 - e^{-t/T}) + \Delta\mathcal{G}_0. \quad (174)$$

Enačba segrevanja velja za konstantne izgube in konstantne pogoje hlajenja in upošteva tudi začetno nadtemperaturo $\Delta\mathcal{G}_0$. Transformator se segreje do največje nadtemperature $\Delta\mathcal{G}_{\max} = P_i / \Lambda_t$, ko je proizvedena toplota enaka oddani in se je nič več ne akumulira. Naraščanje temperature je dano s časovno konstanto pojava segrevanja $T = mc / \Lambda_t$, tj. s tangento na krivuljo segrevanja. Krivulja segrevanja (slika 126) dobi enostavnejšo obliko za nadtemperaturo $\Delta\mathcal{G}_0 = 0$, tj. za primer, ko se začne hladni transformator segrevati pri temperaturi okolice. Tako ima krivulja segrevanja homogenega telesa (slika 126) sedaj končno obliko:

$$\Delta\mathcal{G} = \Delta\mathcal{G}_{\max} (1 - e^{-t/T}). \quad (174a)$$



Slika 126 Krivulja segrevanja homogenega telesa



Slika 127 Krivulja ohlajevanja homogenega telesa

Za adiabatno segrevanje velja v začetku sprememba temperature:

$$\left(\frac{d\vartheta}{dt}\right)_{t=0} = \frac{\Delta\vartheta_{\max}}{T} = \frac{P_i}{mc}. \quad (175)$$

Enačba (175) predstavlja enačbo tangente na krivuljo segrevanja.

10.2 Ohlajevanje transformatorja

Ohlajevanje segretega transformatorja se začne, ko odklopimo transformatorju izvor energije in pustimo, da se transformator od začetne nadtemperature $\Delta\vartheta_0 = \Delta\vartheta_{\max}$ ohladi na temperaturo okolice pri $P_i = 0$. V tem primeru dobimo za ohlajevanje enačbo:

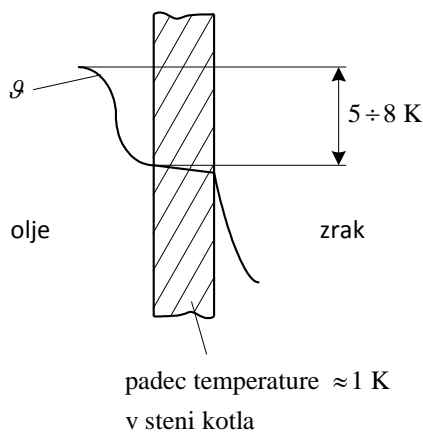
$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{\max} e^{-\frac{t}{T}}. \quad (176)$$

Potek krivulje ohlajevanja vidimo na sliki 127.

Za krivuljo ohlajevanja velja, da ima transformator enako časovno konstanto T kot pri segrevanju le takrat, če je naravno hlajen, sicer se mu menja koeficient konvekcije α_k in s tem časovna konstanta ohlajevanja.

10.3 Dimenzioniranje hladilnih površin

Nastale izgube, tj. toplotni tok transformatorja, ki se razvije v notranjosti, v aktivnih delih transformatorja, se preko hladilnega medija - običajno olja in sten kotla prevaja na površino. Tik ob notranji steni kotla nastane med oljem in steno kotla padec temperature, kot to prikazuje slika 128.



Slika 128 Padec temperature
ob steni kotla

S sten kotla se odvaja toplota s sevanjem in konvekcijo v okolico. Toplotni tok je enak vsoti $\Phi_t = \Phi_{ts} + \Phi_{tk}$. Za odvajanje toplote s sten kotla velja enačba:

$$P_i = \Phi_t = \left(\alpha_k + \alpha_s \frac{A_s}{A}\right) \Delta\vartheta A. \quad (177)$$

A_s je površina sevanja in A razvita površina stene kotla. Za gladki kotel je $\frac{A_s}{A} = 1$ in za narebreni kotel $\frac{A_s}{A} = 0,1 \div 0,3$.

Za temperaturo okolice $\vartheta_{ok} = 20 \div 100$ °C velja približna enačba za sevalni koeficient:

$$\alpha_s = 2,65 \sqrt[4]{\Delta\vartheta}. \quad (178)$$

Koeficient 2,65 v enačbi je odvisen od vrste materiala in barve stene kotla (tj. sive barve).

Za konvekcijski koeficient velja:

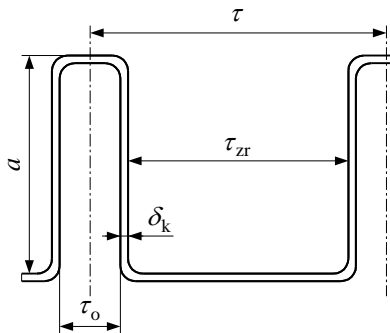
$$\alpha_k = 2,5 \sqrt[4]{\Delta\vartheta} \sqrt[4]{\frac{293}{\vartheta_{ok}}} \sqrt{\frac{p}{760}}. \quad (179)$$

Za določene pogoje, tj. povprečno temperaturo okolice $\vartheta_{ok} = 20$ °C oziroma $\vartheta_{ok} = 273 + 20 = 293$ K, barometriški tlak $p = 760$ Torrov ali $p = 1013,25$ milibarov in nadtemperaturo zunanjih sten kotla $\Delta\vartheta = 45$ K sta $\alpha_{kzr} = 6,48$ in $\alpha_s = 6,7$. Tako dobimo enačbo za dopustno gostoto toplotnega toka na enoto hladilne površine:

$$\left(\frac{P_i}{A}\right)_{dop} = 292\eta + 302\frac{A_s}{A} \quad (\text{W} / \text{m}^2). \quad (180)$$

A_s / A je razmerje med prosto sevajočo površino in razvito površino kotla, tj. s hladilnimi rebri.

Hladilna rebra na zunanji površini kotla prikazuje slika 129.



Slika 129 Prikaz hladilnih reber

Sevalna površina je običajno manjša od konvekcijske, posebej še, če so hladilna rebra gosta. Tedaj moramo upoštevati efektivno površino odvajanja toplote v obliki izkoristka. Izkoristek hladilnih reber (tabela XIII) je odvisen od razdalje med hladilnimi rebri τ_{zr} (zraka), pri τ_o (olja) je $13 \div 15$ mm.

Tabela XIII Izkoristek hladilnih reber

τ_{zr} (mm)	90 ÷ 45	35	20	15
η	1	0,88	0,64	0,5

Podobno kot za zrak veljajo v praksi empirične enačbe za koeficient konvekcije tudi za olje v notranjosti transformatorja. Za vertikalne površine v olju ima takšna enačba obliko:

$$\alpha_{ko} = 38 \sqrt[4]{\Delta \vartheta} \sqrt{\frac{\vartheta_{sr}}{50}}. \quad (181)$$

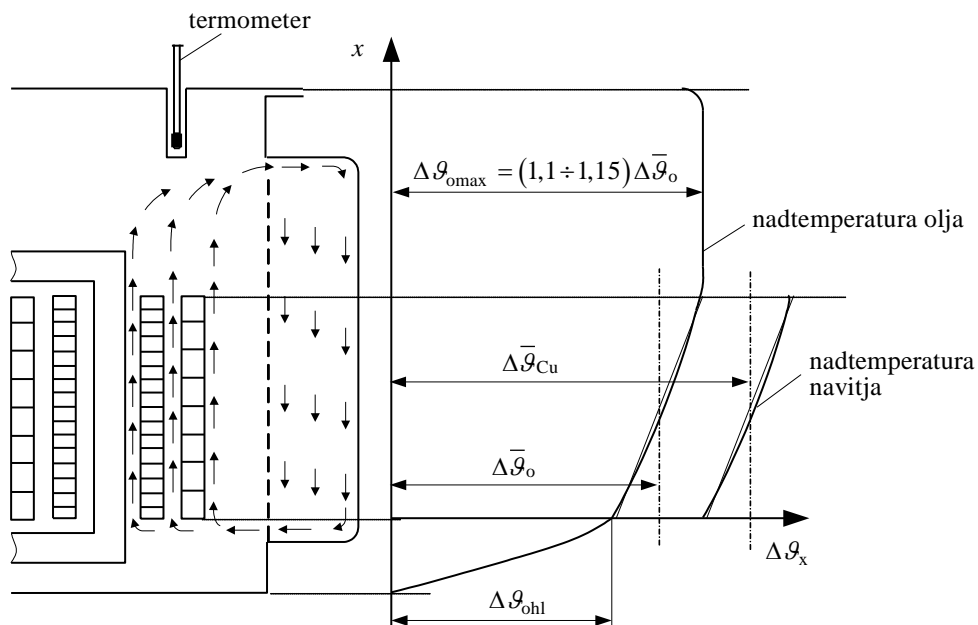
Za srednjo temperaturo navitja v olju $\vartheta_{sr} = 20 + 65 = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ bo tako:

$$\alpha_{ko} \approx 50 \sqrt[4]{\Delta \vartheta}. \quad (181a)$$

10.4 Toplotno nadomestno vezje

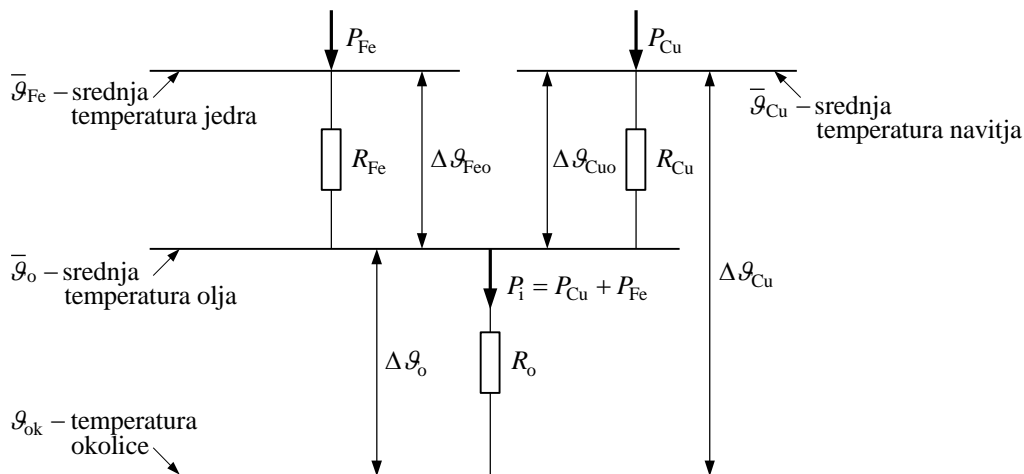
V transformatorju se med obratovanjem razvijajo izgube, ki predstavljajo pretvarjanje električne energije v toploto. Ta toplota potuje iz izvorov, tj. železa in navitja, proti zunanji površini transformatorja in nato v okolico. Najvišja temperatura je torej v izvoru in pada proti zunanosti. Najvišja dopustna temperatura (nadtemperatura) je povezana z dovoljenim segrevanjem izolacijskega materiala predvsem transformatorskega olja in ne sme preseči predpisanih vrednosti za posamezne izolacijske materiale. Samo razporeditev temperatur, tj. temperaturno polje, prikazuje slika 130.

Olje v transformatorju se dviguje skozi navitje in ob paketu, hladi se v hladilnih rebrih in na stenah kotla in spušča na dno kotla. Na dnu kotla je temperatura praktično enaka okoliški. Vertikalno, tj. vzdolž navitja, raste temperatura skoraj linearno. Na vrhu navitja je praktično konstantna, razen pod pokrovom, ker se olje pod njim hladi.



Slika 130 Nadtemperatura olja in navitja

Podobno kot v elektrotehniki je tudi v toploti mogoče računati z nadomestnimi vezji. V toplotnem nadomestnem vezju je napetost zamenjana z razliko temperatur, električni tok pa s toplotnim tokom (izgubami), ki teče preko nadomestnih toplotnih upornosti. Pri konvekciji na površini prehod toplote sicer ni eksakten, vendar dobimo kljub temu zadovoljive rezultate. Slika 131 prikazuje toplotno nadomestno vezje transformatorja za termično stacionarno stanje.



Slika 131 Toplotno nadomestno vezje transformatorja

Količina toplote, ki prehaja s toplejšega na hladnejše telo, je določena z razliko temperature in toplotno upornostjo. Toplotne upornosti na sliki 131 so naslednje: R_{Fe} - železno jedro, R_{Cu} - navitje in R_o - olje. Razlika temperature med navitjem in oljem je praktično konstantna in na katerem koli mestu navitja se bo toplota enolično odvajala po celotni površini navitja. Ta odvod je praktično enak, kot če bi imeli celotno navitje segreto na srednjo temperaturo $\bar{\theta}_{Cu}$ in olje na srednjo temperaturo $\bar{\theta}_o$. Podobno velja za železno jedro. Zato so v toplotni shemi vnesene srednje temperature navitja, jedra in olja.

11 PODATKI RAZDELILNIH ENERGETSKIH TRANSFORMATORJEV

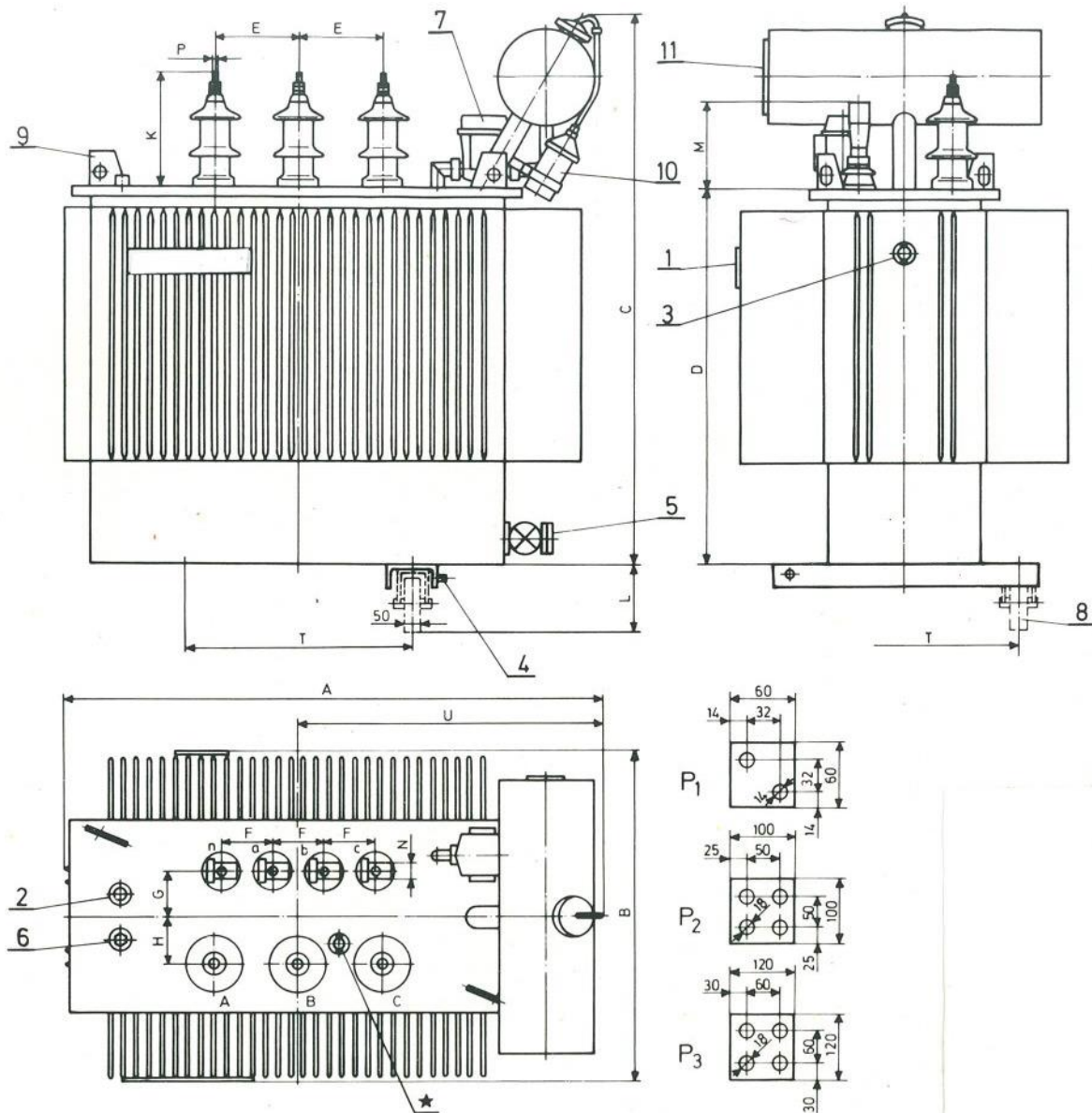
Na sliki 132 so prikazane merske skice (standardnih) razdelilnih energetskih transformatorjev. Tehnični podatki so podani v tabeli XIV in ustrezne dimenzije v tabeli XV. V tabeli XIV sta podani vezalni skupini Yzn5 in Dyn5, ki ustrezata prednostnim podatkom v tabeli VI.

Tabela XIV Tehnični podatki razdelilnih energetskih transformatorjev

Nazivna moč	Napetost		Obseg regulacije višje napetosti	Vezava	Izgube		u_k	ΔU	η
	višja	nižja			za S_N in $\cos \varphi = 0,8$				
kVA	kV	V	%		W	W	%	%	
50	10	400	$\pm 2,5;$ ± 5	Yzn5	190	1050	4	3,73	96,99
	20								
	10 – 20								
100	10				320	1750		3,58	97,47
	20								
	10 – 20								
160	10			460	2350	3,43		97,85	
	20								
	10 – 20								
250	10			650	3250	3,34		98,08	
	20								
	10 – 20								
400	10	930	4600	3,25	98,30				
	20								
	10 – 20								
630	10	1300	6500	3,17	98,48				
	20								
	10 – 20								
1000	10	1750	13500	4,67	98,13				
	20								
	10 – 20								
1600	10	2500	19800	4,5	98,28				
	20								
	10 – 20								
							6		

Tabela XV Dimenzije razdelilnih energetskih transformatorjev

Moč kVA	A	B	C	D	E	F	G	H	K	L	M	N	T	U	Masa kg
50	975	500	1040	630	200	100	85	85	310	130	120	M12	420	550	365
	1150	520	1090	690	265		100		380					700	390
	1150	520	1290	790	265		100		380					700	415
100	1125	550	1140	715	200	100	100	100	310	130	120	M12	520	625	560
	1200	600	1270	760	265		110		380					735	585
	1200	600	1370	860	265		110		380					735	615
160	1120	610	1210	780	200	100	100	100	310	130	155	M20	520	620	720
	1210	650	1340	820	265		110		380					685	845
	1210	650	1440	920	265		110		380					685	880
250	1290	680	1320	840	200	120	120	100	310	130	155	M20	520	735	930
	1240	750	1350	890	300		140		380					670	1005
	1240	750	1450	990	300		140		380					670	1040
400	1350	850	1420	960	210	120	125	130	310	130	155	M20	620	815	1320
	1415	850	1430	980	300		150		380					780	1465
	1415	850	1530	1080	300		150		380					780	1515
630	1590	895	1550	1075	200	140	125	130	310	180	240	P1	620	780	1865
	1600	930	1600	1090	300		150		380					800	1945
	1600	930	1700	1190	300		150		380					800	1995
1000	2010	1320	1745	1195	300	220	145	130	310	180	320	P2	800	1020	2680
	1850	1300	1780	1220	300		160		380					980	2885
	1850	1300	1880	1320	300		160		380					980	2950
1600	1900	1430	1850	1320	350	220	170	130	310	180	350	P3	800	1000	3975
	1910	1480	2020	1380	350		190		380					1020	4575
	1910	1480	2120	1480	350		190		380					1020	4655



Slika 132 Merske skice razdelilnega energetskega transformatorja

* Pri transformatorjih moči 1000 KVA ali več je ročica preklopnika na pokrovu transformatorja.

Številke na skicah (slika 132) pomenijo:

- | | |
|--------------------------------|--------------------------|
| 1 – napisna ploščica | 7 – plinski rele |
| 2 – žep za termometer | 8 – kolesa za vožnjo |
| 3 – pogon preklopnika | 9 – kljuka za dvigovanje |
| 4 – priključek za ozemljitev | 10 – sušilnik zraka |
| 5 – izpust olja | 11 – kazalec nivoja olja |
| 6 – odprtina za nalivanje olja | |

12 IZRAČUN MALEGA TRIFAZNEGA TRANSFORMATORJA

12.1 Izpeljava enačbe za presek stebra železnega jedra

Izhajamo iz enačbe za navidezno moč S (VA ali kVA) trifaznega jedrnega transformatorja za število faz in število stebrov $m=3$. Za izvajanje navidezne moči zanemarimo padec napetosti in predpostavimo, da je $E \approx U = \hat{E} / \sqrt{2}$ pri $e = \sqrt{2} E \cos(\omega t)$. S temi predpostavkami dobimo:

$$\begin{aligned} S &= m U I = m \frac{\hat{E}}{\sqrt{2}} I = m \frac{1}{\sqrt{2}} \omega N \hat{\Phi}_g I = m \frac{1}{\sqrt{2}} 2\pi f N \hat{\Phi}_g I = m 4,44 f N \hat{\Phi}_g I \\ &= m 4,44 f N \hat{\Phi}_g I \frac{\hat{\Phi}_g}{\hat{\Phi}_g} = m 4,44 f \frac{N I}{\hat{\Phi}_g} \hat{\Phi}_g^2 \text{ in od tod izpeljemo: } \hat{\Phi}_g^2 = \frac{1}{4,44} \frac{\hat{\Phi}_g}{N I} \frac{S}{m f}. \end{aligned}$$

Enačbo za glavni fluks delimo z \hat{B}^2 ter dobimo razmerje:

$$\left(\frac{\hat{\Phi}_g}{\hat{B}} \right)^2 = \frac{1}{4,44 \hat{B}^2} \frac{\hat{\Phi}_g}{N I} \frac{S}{m f}, \text{ ki predstavlja presek jedra } A_{\text{Fe}} = \frac{\hat{\Phi}_g}{\hat{B}}.$$

$$\frac{\hat{\Phi}_g}{\hat{B}} = \frac{1}{\sqrt{4,44} \hat{B}} \sqrt{\frac{\hat{\Phi}_g}{N I}} \sqrt{\frac{S}{m f}} \text{ in iz tega razmerja dobimo praktičen izraz za izračun preseka}$$

$$A_{\text{Fe}} = C \sqrt{\frac{S}{m f}} \quad (\text{m}^2) \quad (182)$$

za S (VA), če je koeficient C enak

$$C = \frac{1}{\sqrt{4,44} \hat{B}} \sqrt{\frac{\hat{\Phi}_g}{N I}} \quad (\text{J}^{-1/2} \cdot \text{m}^2). \quad (183)$$

C je tipičen koeficient za določene konstrukcijske izvedbe in odvisen od moči transformatorjev, kvalitete pločevine in vrste hlajenja. Za zelo male zračno hlajene transformatorje je $C > 7,0 \cdot 10^{-4} \text{ J}^{-1/2} \cdot \text{m}^2$, odvisno od debeline pločevine (običajno 0,5 mm) in njene kvalitete. Za male in srednje energetske transformatorje je za hladno valjano orientirano transformatorsko pločevino: $C = (3,2 \div 4,8) \cdot 10^{-4} \text{ J}^{-1/2} \cdot \text{m}^2$ ter za velike energetske transformatorje približno $C \approx 6,4 \cdot 10^{-4} \text{ J}^{-1/2} \cdot \text{m}^2$.

Polnilni faktor železa je odvisen od vrste izolacije na pločevini, npr. lak ali oksid, in od same debeline pločevin pri enaki debelini izolacije. Na splošno je polnilni faktor $k_{\text{Fe}} < 1$ in ima vrednosti $0,9 \div 0,97$. Za presek jedra z izolacijo velja enačba:

$$A_{\text{Feiz}} = \frac{A_{\text{Fe}}}{k_{\text{Fe}}}. \quad (184)$$

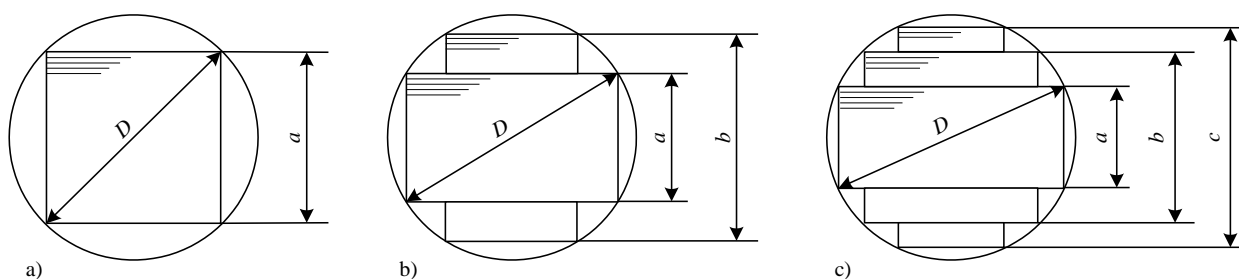
Polnilni faktor stebra je enak razmerju med dejanskim presekom vključno z izolacijo in presekom stebri očrtanega kroga:

$$k_{st} = \frac{4A_{Feiz}}{D^2\pi}. \quad (185)$$

Iz enačb (184) in (185) dobimo za ploščino lika v konturi $A_{Fe} = \frac{D^2\pi}{4} k_{st} k_{Fe}$ in iz te enačbe premer stebri očrtanega kroga, ki je ena od osnovnih veličin jedra:

$$D = \sqrt{\frac{4A_{Fe}}{\pi k_{st} k_{Fe}}}. \quad (186)$$

Na sliki 133 so prikazani trije različni preseki jedra z očrtanim krogom in ustreznim polnilnim faktorjem stebra z a) eno, b) dvema in c) tremi stopnicami.



$$a = 0,7071 D$$

$$k_{st} = 0,6366$$

$$a = 0,5257 D$$

$$b = 0,8507 D$$

$$k_{st} = 0,7869$$

$$a = 0,4240 D$$

$$b = 0,7071 D$$

$$c = 0,9066 D$$

$$k_{st} = 0,8510$$

Slika 133 Oblike preseka stebra, stebri očrtan krog in polnilni faktor stebra

Za jedrni tip transformatorja velja, da je presek jarma enak preseku stebra $A_{Fej} = A_{Fe}$.

12.2 Izračun aktivnega dela – železno jedro

Podatki za izračun:

nazivna navidezna moč: $S_N = 650 \text{ VA}$

višja napetost (VN): $U_1 = 400 \text{ V}$

nižja napetost (NN): $U_2 = 300 \text{ V}$

vezalna skupina: Yy0

nazivna frekvenca: $f = 50 \text{ Hz}$

kratkostična napetost: $u_k = 4,0 \%$

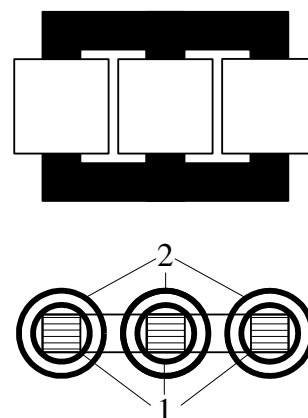
izvedba transformatorja: suhi, odprte izvedbe

Izbor jedra

Izberemo jedrni tip transformatorja, ki je prikazan na sliki 134. Okoli stebra je najprej nameščeno VN navitje, označeno s št. 1, in zunaj NN navitje s št. 2. Običajno je za visoke napetosti najprej nameščeno NN navitje in nato VN navitje.

Izbor materiala

Uporabimo orientirano hladno valjano pločevino debeline 0,5 mm.



Slika 134 Trifazni jedrni tip

Presek jedra

Izračunamo ga po enačbi (182). Za izračun moramo izbrati koeficient » C « (glej enačbo 183). Za koeficient C ocenimo izhodiščno vrednost za male trifazne transformatorje:

$$C > 7,0 \cdot 10^{-4} \text{ J}^{-1/2} \text{ m}^2.$$

Presek stebra Fe jedra za izbrani $C = 7,2 \cdot 10^{-4} \text{ J}^{-1/2} \text{ m}^2$ in za število stebrov (enako številu faz) $m = 3$ izračunamo:

$$A_{\text{Fe}} = C \sqrt{\frac{S_{\text{N}}}{mf}} = 7,2 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{650}{3 \cdot 50}} = 14,99 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 15 \text{ cm}^2.$$

Presek stebra je večji za polnilni faktor železa zaradi lakirane pločevine ($k_{\text{Fe}} \approx 0,96$) in je:

$$A_{\text{st}} = \frac{A_{\text{Fe}}}{k_{\text{Fe}}} = \frac{15}{0,96} = 15,625 \text{ cm}^2.$$

Ta presek stebra razdelimo po DIN 41302 na širino stebra $b = c = 3 \text{ cm} = 30 \text{ mm}$, tj. enako za vse tri stebre (slika 135), in debelino stebra h .

Debelina stebra je:

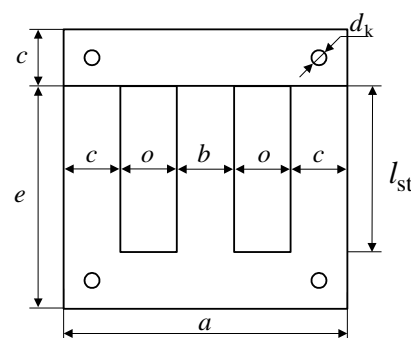
$$h = \frac{A_{\text{st}}}{b} = \frac{15,625}{3} = 5,208 \text{ cm} = 52 \text{ mm}.$$

Število lamel debeline $d = 0,5 \text{ mm}$ je:

$$n_1 = \frac{h}{d} = \frac{52}{0,5} = 104 \text{ lamele}.$$

Korigirani presek jedra:

$$A_{\text{Fe}} = k_{\text{Fe}} b h = 0,96 \cdot 30 \cdot 52 = 1498 \text{ mm}^2 \approx 15 \text{ cm}^2.$$



Slika 135 Dimenzije jedra

Kriterij za določitev višine okna ($x = l_{\text{st}}$) in širine okna ($y = o$) je izbrano razmerje x/y . To razmerje je običajno $x/y \approx 3/1$.

Za VN navitje (višja napetost), tj. medfazna napetost $U_1 = 400 \text{ V}$, vzamemo jedrno izvedbo jedra: $x = 3,0$ in dobimo izhodiščno vrednost

$$y = 1/3 x = 1/3 \cdot 3 = 1,0.$$

a) Širina okna je:

$$o = yb = 1 \cdot 30 = 30 \text{ mm}.$$

b) Dolžina stebra – višina okna je:

$$l_{st} = xb = 3 \cdot 30 = 90 \text{ mm}.$$

c) Višina lamele oblike M je:

$$e = l_{st} + c = 90 + 30 = 120 \text{ mm}.$$

d) Širina lamele je:

$$a = 2 \times (c + o) + b = 2 \cdot (30 + 30) + 30 = 150 \text{ mm}.$$

Višina navitja je odvisna od dimenzij tuljavnika. Dimenzije tuljavnika so odvisne od širine stebra $b = c$, dolžine stebra l_{st} ter debelina paketa h . Debelina sten tuljavnika je za male transformatorje $d_t = 2 \text{ mm}$ po širini oziroma $d_{tv} = 1,5 \text{ mm}$ po višini. Upoštevamo še zračnost med tuljavnikom in jarmom jedra $\delta_{zr} = 1,0 \text{ mm}$ po višini. Višina navitja je tako:

$$h_n = l_{st} - 2 \times d_{tv} - \delta_{zr} = 90 - 2 \cdot 1,5 - 1,0 = 86 \text{ mm}.$$

Gostoto magnetnega pretoka v stebri (jedru) izberemo: $\hat{B} = 1,56 \text{ T}$

in izračunamo magnetni pretok (fluks) v stebri

$$\hat{\Phi} = \hat{B} A_{Fe} = 1,56 \cdot 15 \cdot 10^{-4} = 23,4 \cdot 10^{-4} \text{ Vs} = 2,34 \cdot 10^{-3} \text{ Vs} = 2,34 \text{ mVs}.$$

Presek jarma

Presek jarma je enak preseku stebra:

$$A_j = A_{Fe} \text{ ter } \hat{\Phi}_j = \hat{\Phi} \rightarrow \hat{B}_j = \hat{B}.$$

12.3 Navitje

Za jedrno izvedbo jedra se uporabljajo cilindrična navitja. Normalno je NN navitje bližje stebri. Lahko pa je tudi obratno, ker so to nizke napetosti in je VN navitje (z več ovoji) najprej navito na tuljavnik in nato NN navitje z manj ovoji.

Ovojna napetost U_{ov} je dodatni kriterij za izbor števila ovojev oziroma kontrolo pravilne izbire $\hat{\Phi}$ oziroma \hat{B} . Ovojna napetost za male transformatorje je orientacijsko: $U_{ov} \approx 0,5 \div 0,8 \text{ V}$.

Naš transformator ima ovojno napetost:

$$U_{ov} = 4,44 \cdot f \cdot 1 \cdot \hat{\Phi} = 4,44 \cdot 50 \cdot 2,34 \cdot 10^{-3} = 0,5195 \text{ V}.$$

Število ovojjev

VN – primarno navitje v vezavi Y:

$$N_1 = \frac{U_1}{\sqrt{3} U_{ov}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 0,5195} = 444,5 \approx 445 \text{ ov.}$$

NN – sekundarno navitje v vezavi y:

$$N_2 = \frac{U_2}{\sqrt{3} U_{ov}} = \frac{300}{\sqrt{3} \cdot 0,5195} = 333,4 \approx 333 \text{ ov.}$$

Napetostna prestava med primarno in sekundarno stranjo transformatorja je:

$$K_U = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2} = \frac{400}{300} = 1,333.$$

Zaradi padcev napetosti moramo korigirati prestavo oziroma število ovojjev. Če predpostavimo, da je $u_k = 4,0\%$, je faktor korekcije $k_N \approx 1 + u_k / 2 = 1,02$. Tako je korigirano število ovojjev:

$$N_2 = k_N \frac{U_2}{\sqrt{3} \cdot U_{ov}} = 1,02 \frac{300}{\sqrt{3} \cdot 0,5195} = 340,1 \approx 340 \text{ ov.}$$

in dejanska prestava $K_U = \frac{N_1}{N_2} = \frac{445}{340} = 1,309$.

Preseki vodnikov in konstrukcija navitij

Najprej določimo presek in premer vodnika (žice) iz dopustne gostote toka. Za male transformatorje za izhodiščni izračun dopustne gostote toka, ki je odvisna od debeline navitja $J_1 = J_2 = J = 2,5 \div 3,5 \text{ A/mm}^2$, izberemo $J = 3,0 \text{ A/mm}^2$.

VN (primarno) navitje

Izračunamo nazivni tok v primarnem navitju:

$$I_1 = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_1} = \frac{650}{\sqrt{3} \cdot 400} = 0,938 \text{ A}$$

in potrební presek

$$A_{Cu1} = \frac{I_1}{J} = \frac{0,938}{3,0} = 0,313 \text{ mm}^2 \text{ ter premer } d'_{Cu1} = 0,631 \text{ mm.}$$

Iz tabele XVI lahko vzamemo žico standardnega premera $d_{Cu1} = 0,63 \text{ mm}$ oziroma 2 krat lakirano žico L2 maksimalnega premera $d_{1max} = 0,706 \text{ mm}$, ki ima presek:

$$A_{Cu1} = d_{Cu1}^2 \pi / 4 = 0,63^2 \cdot \pi / 4 = 0,3117 \text{ mm}^2.$$

Dejanska gostota toka je:

$$J_1 = \frac{I_1}{A_{Cu1}} = \frac{0,938}{0,3117} = 3,01 \text{ A / mm}^2.$$

Glede na dopustno višino tuljavnika $h_{ndop} = 86 \text{ mm}$ razporedimo število vodnikov primarnega navitja po višini:

$$m_1 = \frac{h_{ndop}}{d_{Cu1max}} = \frac{86}{0,706} = 121,8 \rightarrow 120 \text{ vod.}$$

in izračunamo število leg po širini

$$n_1 = \frac{N_1}{m_1} = \frac{445}{120} = 3,7 \rightarrow 4 \text{ lege.}$$

Število vodnikov v posameznih legah je:

$$N_1 = 3 \times 120 + 1 \times 85 = 445 \text{ vod.}$$

Debelina primarnega navitja je:

$$b_1 = n_1 \times d_{1max} = 4 \cdot 0,706 = 2,82 \text{ mm.}$$

NN (sekundarno) navitje

Izračunamo tok v sekundarnem navitju:

$$I_2 = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_2} = \frac{650}{\sqrt{3} \cdot 300} = 1,25 \text{ A}$$

in potrebni presek

$$A_{Cu2} = \frac{I_2}{J} = \frac{1,25}{3,0} = 0,417 \text{ mm}^2 \text{ ter premer žice } d'_{Cu2} = 0,728 \text{ mm.}$$

Iz tabele lahko vzamemo žico standardnega premera $d_{Cu2} = 0,71 \text{ mm}$ oziroma 2 krat lakirano žico L2 maksimalnega premera $d_{2max} = 0,79 \text{ mm}$, ki ima presek:

$$A_{Cu2} = d_{Cu2}^2 \pi / 4 = 0,71^2 \cdot \pi / 4 = 0,3959 \text{ mm}^2.$$

Tako je sedaj dejanska gostota toka:

$$J_2 = \frac{I_2}{A_{Cu2}} = \frac{1,25}{0,3959} = 3,16 \text{ A / mm}^2.$$

Glede na dopustno višino tuljavnika $h_{ndop} = 86 \text{ mm}$ razporedimo število vodnikov sekundarnega navitja po višini:

$$m_2 = \frac{h_{ndop}}{d_{2max}} = \frac{86}{0,79} = 108,9 \rightarrow 107 \text{ vod.}$$

in izračunamo število leg po širini

$$n_2 = \frac{N_2}{m_2} = \frac{340}{108} = 3,15 \rightarrow 4 \text{ lege.}$$

Število vodnikov v posameznih legah je:

$$N_2 = 3 \times 107 + 1 \times 19 = 340 \text{ vod.}$$

Debelina sekundarnega navitja je:

$$b_2 = n_2 \times d_{2\max} = 4 \cdot 0,79 = 3,16 \text{ mm.}$$

Skupna debelina navitja je:

$$b_n = b_1 + b_2 = 2,82 + 3,16 = 5,98 \approx 6,0 \text{ mm.}$$

Polnilni faktor navitja v oknu transformatorja

Presek okna transformatorja:

$$A_o = l_{st} o = 90 \cdot 30 = 2700 \text{ mm}^2 = 27 \text{ cm}^2.$$

Skupni presek žice:

$$A_{Cu} = 2 \times (N_1 A_{Cu1} + N_2 A_{Cu2}) = 2 \times (445 \cdot 0,3117 + 340 \cdot 0,3959) = 546,6 \text{ mm}^2 = 5,47 \text{ cm}^2.$$

Polnilni faktor v oknu je:

$$k_{Cu} = \frac{A_{Cu}}{A_o} = \frac{5,47}{27} = 0,203.$$

12.4 Upornosti navitij, padci napetosti in kratkostična napetost

Ohmski padec napetosti

Za ohmski padec napetosti oziroma ohmske upornosti, računane za hladno stanje $\vartheta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ oziroma srednjo temperaturo navitij $\vartheta = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ pri obremenitvi za navitje iz bakra, velja:

$$\rho_{\vartheta} = \frac{\rho_{20}(235 + \vartheta)}{235 + 20} \left(\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right), \quad \rho_{75} = 0,0175 \frac{235 + 75}{235 + 20} = 0,0213 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}.$$

Upornost VN navitja (primar) pri $20 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$R_{1,20} = N_1 \frac{\rho_{20} l_1}{A_{Cu1}} = 445 \frac{0,0175 \cdot 191 \cdot 10^{-3}}{0,3117} = 4,772 \approx 4,77 \Omega.$$

Za srednjo dolžino primarnega ovoja velja enačba:

$$l_1 \approx 2 \times (b + d_{tj1} + 2d_t + h + 2d_t) + 4 \frac{b_1 \pi}{2} = 2 \times (b + h + d_{tj1} + 4d_t + b_1 \frac{\pi}{2}),$$

$$l_1 \approx 2 \cdot (30 + 52 + 1,0 + 4 \cdot 2,0 + 2,82 \cdot \frac{\pi}{2}) = 190,9 \text{ mm} \approx 0,191 \text{ m},$$

kjer je upoštevana debelina tuljavnika $d_t = 2 \text{ mm}$ in zrak med tuljavnikom in stebrom $d_{tj1} \approx 1 \text{ mm}$ v smeri širine stebra b . Zračno režo v smeri debeline stebra h lahko zanemarimo.

Upornost NN navitja (sekundar) pri 20° C :

$$R_{2,20} = N_2 \frac{\rho_{20} l_2}{A_{\text{Cu}2}} = 340 \frac{0,0175 \cdot 223 \cdot 10^{-3}}{0,3959} = 3,351 \approx 3,35 \Omega.$$

Za srednjo dolžino sekundarnega ovoja velja enačba:

$$\begin{aligned} l_2 &\approx 2 \times (b + d_{tj1} + 2d_t + 2b_1 + 2\delta + h + 2d_t + 2b_1 + 2\delta) + 4 \frac{b_2 \pi}{2} = \\ &= 2 \times (b + h + d_{tj1} + 4d_t + 4b_1 + 4\delta + b_2 \frac{\pi}{2}), \end{aligned}$$

$$l_2 \approx 2 \cdot (30 + 52 + 1,0 + 4 \cdot 2,0 + 4 \cdot 2,82 + 4 \cdot 1,0 + 3,16 \cdot \frac{\pi}{2}) = 222,5 \text{ mm} \approx 0,223 \text{ m}.$$

Zračna reža med navitjema δ (slika 136) je:

$$\delta = \frac{o}{2} - (d_t + 0,5d_{tj1} + b_n + \frac{\delta_o}{2}) = 15 - (2 + 0,5 + 6,0 + 5,5) = 1,0 \text{ mm},$$

če je δ_o izbrana zračna reža v oknu med sosednjimi fazami $\delta_o \approx 11 \text{ mm}$. Ta podatek je odvisen od zunanje dimenzije tuljavnika.

Masa navitij:

$$M_{\text{Cu}1} = 3N_1 A_{\text{Cu}1} l_1 \rho_{\text{Cu}} = 3 \cdot 445 \cdot 0,3117 \cdot 10^{-6} \cdot 0,191 \cdot 8,9 \cdot 10^3 = 0,707 \text{ kg},$$

$$M_{\text{Cu}2} = 3N_2 A_{\text{Cu}2} l_2 \rho_{\text{Cu}} = 3 \cdot 340 \cdot 0,3959 \cdot 10^{-6} \cdot 0,223 \cdot 8,9 \cdot 10^3 = 0,801 \text{ kg},$$

kjer je gostota bakra $\rho_{\text{Cu}} = 8,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.

Na primar reducirana fazna vrednost upornosti:

$$R'_{2,20} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_{2,20} = \left(\frac{445}{340} \right)^2 3,35 = 5,74 \Omega.$$

Skupna fazna upornost $R = R_{1,20} + R'_{2,20} = 10,51 \Omega$ in skupni ohmski padeč napetosti:

$$U_r = I_1 R = 0,938 \cdot 10,51 = 9,86 \text{ V},$$

$$u_{r\%} = \frac{U_r \sqrt{3}}{U_1} 100 = \frac{9,86 \sqrt{3}}{400} 100 = 4,27 \%.$$

Induktivni padec napetosti

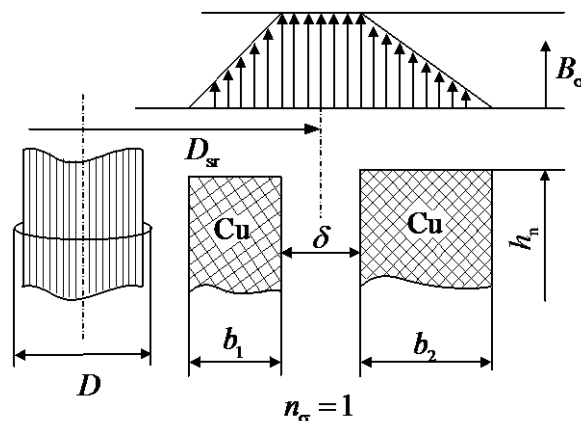
Tu ne bomo računali padec napetosti po enačbi $U_{\sigma} = I_1 X_{\sigma}$, temveč bomo iz posebej izvedene enačbe (158) dobili že kar odstotno vrednost u_{σ} (%):

$$u_{\sigma\%} = 0,0395 \frac{S_d}{U_{ov}^2} \frac{\delta_e O_{sr}}{h_{nsr}} \frac{f}{50} (\%).$$

S_d je moč, ki odpade na skupino razsipanja na enem stebru:

$$S_d = \frac{S_N}{n_{\sigma}} = \frac{650}{3} = 216,7 \text{ VA}.$$

V našem primeru je število stebrov $m_{st} = 3$ in število skupin razsipanja $n_{\sigma} = 1$ (slika 136).



Slika 136 Skupno razsipano polje navitja

Računska zračna reža med VN in NN navitjem (enačba 123a):

$$\delta_e = \delta + \frac{\Sigma b_1 + \Sigma b_2}{3},$$

$\Sigma b_1 = b_1 = 2,82 \text{ mm}$, $\Sigma b_2 = b_2 = 3,16 \text{ mm}$ in ekvivalentna zračna reža

$$\delta_e = 1,0 + \frac{2,82 + 3,16}{3} = 1,0 + 1,993 \approx 2,99 \text{ mm}.$$

Srednji obseg je: $O_{sr} = D_{sr} \pi$ (slika 136). Ker jedro ni kvadratne ali stopničaste izvedbe (slika 133), ni mogoče vzeti srednjega premera jedru očrtanega kroga, ampak je srednja dolžina enaka:

$$O_{sr} = l_{sr} \approx \frac{l_1 + l_2}{2} = \frac{191 + 223}{2} = 207 \text{ mm}.$$

Za srednjo višino navitja $h_{nsr} = h_{ndop} = 86 \text{ mm}$ izračunamo:

$$u_{\sigma\%} = 0,0395 \frac{216,7}{0,5195^2} \frac{2,99 \cdot 10^{-3} \cdot 207 \cdot 10^{-3}}{86 \cdot 10^{-3}} \frac{50}{50} = 0,228 \text{ \%}.$$

Kratkostična napetost

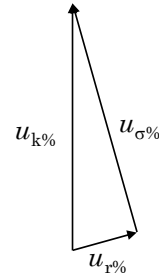
Izračunamo jo glede na sliko (137) po Pitagori:

$$u_{k\%} = \sqrt{u_{r\%}^2 + u_{\sigma\%}^2} = \sqrt{4,27^2 + 0,228^2} \approx 4,28 \text{ \%}$$

Toleranca za dovoljeno odstopanje je:

$$u_{k\%} \pm 10 (\%) = 4,0 \pm 0,4 = 3,6 \div 4,4 \%$$

Kratkostično napetost spreminjamo z zračno režo med navitjema oziroma s presekom navitja, ker prevladuje ohmski padeč napetosti.



Slika 137 Kappov trikotnik

12.5 Izgube

a) Izgube v navitju

Za navitje iz bakra velja za izgube enačba (83a):

$$P_{Cu} = 1,97 \frac{235 + \vartheta}{255} J^2 M_{Cu} \text{ (W)}.$$

Za načrtovani navitji sta gostoti toka: $J_1 = 3,01 \text{ A/mm}^2$ in $J_2 = 3,16 \text{ A/mm}^2$ ter $\vartheta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$P_{Cu1} = 1,97 \frac{255}{255} 3,01^2 \cdot 0,707 = \dots = 12,6 \text{ W},$$

$$P_{Cu2} = 1,97 \frac{255}{255} 3,16^2 \cdot 0,801 \dots = 15,7 \text{ W},$$

skupne izgube $P_{Cu} = 28,3 \text{ W}$.

b) Izgube v železnem jedru

Za jedro iz hladno valjane orientirane pločevine za gostoto magnetnega pretoka $\hat{B} = 1,5 \text{ T}$ in $f = 50 \text{ Hz}$ so specifične izgube v vzdolžni smeri: $p_{Fe} = 3,65 \text{ W/kg}$ (velja za debelino pločevine 0,5 mm) v tabeli XVII.

Izgube pri predpostavljenem $\hat{B} = 1,56 \text{ T}$ izračunamo: $P_{Fe} \approx P_0 = k_{teh} p_{Fe} \left(\frac{\hat{B}}{1,5} \right)^2 M_{Fe} \text{ (W)}$ za

tehnološki faktor razreza pločevine $k_{teh} = 1,10 \div 1,20$.

Masa železnega jedra za primer, ko je presek jarmov enak preseku stebrov: $A_j = A_{Fe}$.

Volumen jedra

$$V_{Fe} = A_{Fe} \times (2 \times a + 3 \times l_{st}),$$

kjer je širina lamele $a = 150 \text{ mm} = 0,15 \text{ m}$ in dolžina stebrov $l_{st} = 90 \text{ mm} = 0,09 \text{ m}$, izračunamo

$$V_{Fe} = 15 \cdot 10^{-4} \cdot (2 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,09) = 8,55 \cdot 10^{-4} \approx 0,855 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3.$$

Masa železa je:

$$M_{\text{Fe}} = \rho_{\text{Fe}} V = 7,6 \cdot 10^3 \cdot 0,855 \cdot 10^{-3} \approx 6,5 \text{ kg},$$

kjer je gostota železa $\rho_{\text{Fe}} = 7,6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.

Izgube v železu so:

$$P_{\text{Fe}} = 1,20 \cdot 3,65 \cdot \left(\frac{1,56}{1,5} \right)^2 6,5 \approx 30,8 \text{ W}.$$

Pri izračunu izgub v železu nismo upoštevali povečanja v prečni smeri magnetenja.

12.6 Magnetilni tok

Srednja dolžina poti magnetnega polja v jedru (slika 135 in 138):

$$l_{\text{FeII}} = l_{\text{st}} + c = e = 0,12 \text{ m},$$

$$l_{\text{FeI}} = l_{\text{FeIII}} = l_{\text{FeII}} + l_j = 0,12 + 0,12 = 0,24 \text{ m},$$

kjer je srednja dolžina jarmov

$$l_j = 2 \left(\frac{a}{2} - \frac{c}{2} \right) = a - c = 150 - 30 = 120 \text{ mm} = 0,12 \text{ m}.$$

Iz tabele XVII za magnetilno krivuljo izberemo gostoto magnetnega pretoka $\hat{B} = 1,552 \text{ T}$, ki je najbližje predpostavljeni vrednosti $\hat{B} = 1,56 \text{ T}$ in odčitamo magnetno poljsko jakost v efektivnih amper-ovojih na enoto dolžine v vzdolžni smeri magnetenja: $H_{\text{ef}} = 554,4 \text{ A/m}$.

V izračunu smo zanemarili povečane amper-ovoje v prečni smeri magnetenja v spodnjem vodoravnem delu E lista jedra (slika 135 in 138) za dolžino poti magnetenja: $l_{\text{jp}} = l_j / 2 = 120 / 2 = 60 \text{ mm} = 0,06 \text{ m}$. V I-listu je magnetenje vzdolžno, ker je I-list izsek okna iz E-lista transformatorja zaradi enake širine okna in I-lista ($o = c = 30 \text{ mm}$).

Za preračun na izbrano gostoto magnetnega pretoka $\hat{B} = 1,56 \text{ T}$ uporabimo linearno interpolacijo

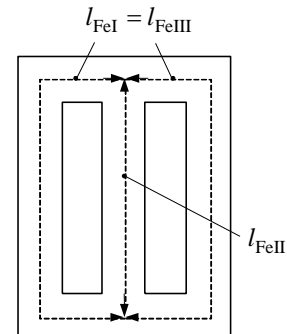
$$H_{\text{efv}} = 554,4 \cdot (1,56 / 1,552) = 557,3 \text{ A/m}$$

in s tem izračunamo potrebne amper-ovoje za prvo in tretjo fazo:

$$\Theta_{\text{I,III}} = l_{\text{FeI}} H_{\text{efv}} = 0,24 \cdot 557,3 = 133,8 \text{ A-ov}.$$

Za drugo fazo pa dobimo:

$$\Theta_{\text{II}} = l_{\text{FeII}} H_{\text{efv}} = 0,12 \cdot 557,3 = 66,9 \text{ A-ov}.$$



Slika 138 Integracijske poti magnetnega pretoka

Zaradi zračne reže δ_j v jedru med M in I listom (slika 135), ki jo ocenimo na 2 stotinki mm, dodamo:

$$\hat{\Theta}_\delta = \frac{\hat{B}}{\mu_0} \delta_j = \frac{1,56}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,02 \cdot 10^{-3} = 24,8 \text{ A-ov. oziroma ustrezno efektivna vrednost}$$

$$\Theta_\delta = \hat{\Theta}_\delta / \sqrt{2} = 24,8 / \sqrt{2} = 17,5 \text{ A-ov.}$$

Skupni amper-ovoji so tako:

$$\Theta_{\text{Is}} = \Theta_{\text{III}s} = \Theta_\delta + \Theta_{\text{I}} = 17,5 + 133,8 = 151,3 \text{ A-ov. oziroma}$$

$$\Theta_{\text{IIs}} = \Theta_\delta + \Theta_{\text{II}} = 17,5 + 66,9 = 84,4 \text{ A-ov.}$$

Ustrezni magnetilni tok v primarnem navitju za prvo in tretjo fazo:

$$I_{0\text{I}\mu} = \frac{\Theta_{\text{Is}}}{N_1} = \frac{151,3}{445} = 0,34 \text{ A} \equiv 36,2 \% \text{ od } I_1 \text{ oziroma za drugo fazo}$$

$$I_{0\text{II}\mu} = \frac{\Theta_{\text{IIs}}}{N_1} = \frac{84,4}{445} \approx 0,19 \text{ A} \equiv 20,2 \% \text{ od } I_1.$$

Zaradi vezave Y na primarni strani je srednja vrednost magnetilnega toka:

$$I_{0\mu} \approx \frac{2I_{0\text{I}\mu} + I_{0\text{II}\mu}}{3} = \frac{2 \cdot 0,34 + 0,19}{3} \approx 0,29 \text{ A.}$$

Tok prostega teka $I_0 \approx I_{0\mu}$. (Vatno komponento I_w zanemarimo.)

Za boljši pregled izračunanih navijalnih podatkov te prikažemo v preglednici.

Preglednica za izvedbo navitij trifaznega transformatorja moči 650 VA, Y400/y300 V

	Število ovojev	Premer žice d_{Cu} (mm)	Premer izol. žice d_{max} (mm)	Razporeditev ovojev po širini in višini $n \times m$	Upornost R_{20} (Ω)	Masa M_{Cu} (kg)
Primar	445	0,63	0,706	$3 \times 120 + 1 \times 85$	4,77	0,707
Sekundar	340	0,71	0,790	$3 \times 107 + 1 \times 19$	3,35	0,801

12.7 Dodatek za standardne premere okroglih žic in magnetilno krivuljo

V tabeli XVI so podani standardni premeri okroglih bakrenih žic po IEC 182-1-2 od premera 0,28 do 2,8 mm.

Magnetilna krivulja $H = f(B)$ pločevine z oznako M400-50A, debeline 0,5 mm za jedro transformatorja v vzdolžni in prečni smeri, je podana v tabeli XVII. Vrednost za H je podana v efektivnih vrednostih (RMS). Podana je tudi μ_r – relativna permeabilnost ter specifične izgube pri 1,3 in 1,5 T v vzdolžni in prečni smeri magnetenja.

Tabela XVI Standardni premeri okroglih žic po IEC 182-1-2

Premer "d" (mm)	Toleranca "d" (± mm)	Upornost pri 20° C (Ω/m)	Stopnja izol. L 1	Premer d_1 maks. (mm)	Stopnja izol. L 2	Premer d_1 maks. (mm)	Presek (mm ²)
			Debelina laka min. (mm)		Debelina laka min. (mm)		
0,280	0,004	0,2842	0,017	0,315	0,035	0,334	0,06158
0,315	0,004	0,2246	0,018	0,352	0,035	0,371	0,07793
0,355	0,004	0,1768	0,020	0,395	0,040	0,414	0,09898
0,400	0,005	0,1393	0,020	0,442	0,040	0,462	0,1257
0,450	0,005	0,1100	0,022	0,495	0,045	0,516	0,1590
0,475*	0,005	0,09876	0,022	0,5225	0,045	0,545	0,1772
0,50	0,005	0,08913	0,023	0,548	0,050	0,569	0,1963
0,53*	0,005	0,07932	0,024	0,576	0,050	0,600	0,2206
0,56	0,006	0,07105	0,024	0,611	0,050	0,632	0,2463
0,60*	0,006	0,06098	0,025	0,649	0,050	0,674	0,2827
0,63	0,006	0,05531	0,025	0,684	0,055	0,706	0,3117
0,67*	0,007	0,04964	0,028	0,722	0,055	0,753	0,3526
0,71	0,007	0,04420	0,030	0,767	0,055	0,790	0,3959
0,75	0,008	0,03961	0,030	0,809	0,055	0,832	0,4418
0,80	0,008	0,03430	0,030	0,861	0,060	0,885	0,5026
0,85	0,009	0,03084	0,030	0,913	0,060	0,937	0,5674
0,90	0,009	0,02710	0,030	0,965	0,060	0,990	0,6362
0,95	0,010	0,02432	0,030	1,017	0,060	1,041	0,7088
1,00	0,010	0,02195	0,030	1,068	0,060	1,093	0,7854
1,06	0,011	0,01953	0,030	1,130	0,065	1,153	0,8825
1,12	0,011	0,01750	0,030	1,192	0,065	1,217	0,9852
1,18	0,012	0,01576	0,030	1,254	0,065	1,279	1,094
1,25	0,013	0,01405	0,030	1,325	0,065	1,351	1,227
1,32	0,013	0,01259	0,030	1,397	0,065	1,423	1,368
1,40	0,014	0,01120	0,035	1,479	0,065	1,506	1,539
1,50	0,015	0,009757	0,035	1,581	0,065	1,608	1,767
1,60	0,016	0,008575	0,035	1,683	0,065	1,711	2,011
1,70	0,017	0,007596	0,040	1,785	0,070	1,813	2,270
1,80	0,018	0,006755	0,040	1,888	0,070	1,916	2,545
1,90	0,019	0,006081	0,040	1,990	0,075	2,018	2,835
2,00	0,020	0,005488	0,040	2,092	0,075	2,120	3,142
2,12	0,021	0,004884	0,040	2,214	0,075	2,243	3,530
2,24	0,022	0,004375	0,040	2,366	0,075	2,366	3,941
2,36	0,024	0,003941	0,040	2,459	0,075	2,488	4,374
2,50	0,025	0,003565	0,040	2,601	0,075	2,631	4,908
2,65	0,027	0,003173	0,040	2,754	0,075	2,784	5,515
2,80	0,028	0,002842	0,040	2,907	0,075	2,938	6,157

* Premer ne ustreza IEC 182-1-2

Tabela XVII Magnetilna krivulja $H = f(B)$ za pločevino M400-50A

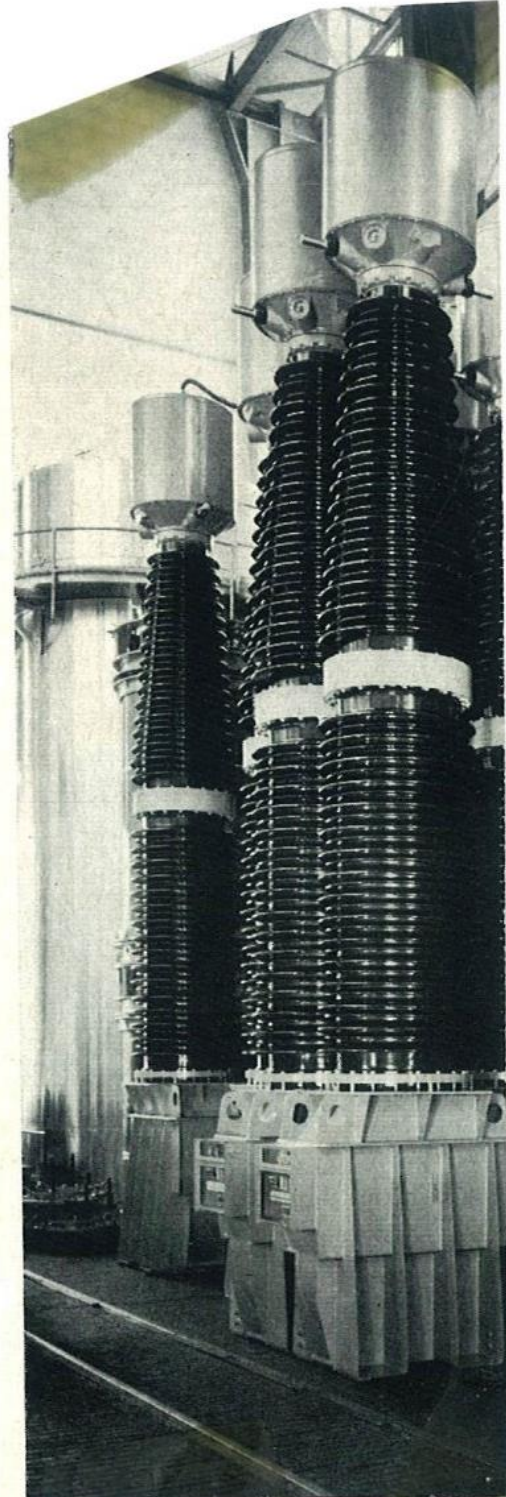
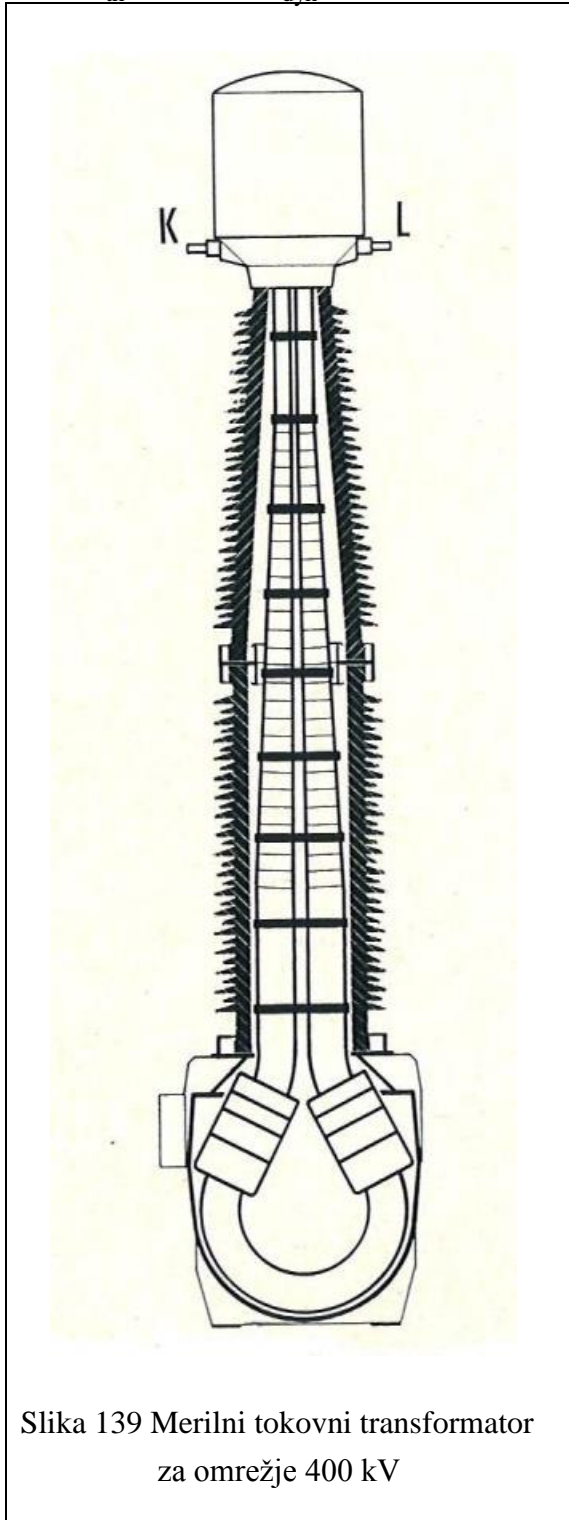
Točke	Vzdolžno magnetenje			Prečno magnetenje		
	\hat{B} (T)	H (A/m)	μ_r	\hat{B} (T)	H (A/m)	μ_r
1	0,975	102,0	6846	0,975	156,5	4462
2	1,000	106,4	6731	1,000	162,8	4399
3	1,025	111,1	6608	1,025	168,7	4352
4	1,050	116,3	6466	1,050	175,4	4288
5	1,075	121,8	6321	1,075	182,4	4221
6	1,100	127,7	6169	1,100	190,0	4146
7	1,125	134,1	6008	1,125	198,1	4067
8	1,150	141,0	5842	1,150	206,9	3981
9	1,175	148,5	5667	1,175	216,5	3887
10	1,200	156,6	5488	1,201	226,8	3793
11	1,226	165,5	5306	1,226	238,2	3686
12	1,251	175,3	5111	1,251	250,8	3572
13	1,2755	186,0	4911	1,276	264,8	3451
14	1,300	198,0	4702	1,300	280,6	3318
15	1,326	211,5	4490	1,326	298,7	3179
16	1,351	226,7	4269	1,351	319,6	3028
17	1,376	244,2	4036	1,376	344,3	2862
18	1,400	264,5	3791	1,401	373,9	2684
19	1,426	289,0	3534	1,426	410,3	2489
20	1,451	319,0	3258	1,451	456,4	2277
21	1,476	356,6	2965	1,476	514,1	2056
22	1,5015	406,1	2648	1,502	589,6	1824
23	1,526	469,2	2329	1,527	687,5	1591
24	1,552	554,4	2005	1,552	814,5	1365
25	1,577	666,3	1696	1,578	977,8	1156
26	1,602	811,8	1413	1,604	1181	973
27	1,628	998,0	1168	1,630	1432	815
28	1,654	1228	965	1,655	1730	685
29	1,680	1508	798	1,682	2087	577
30	1,706	1831	667	1,709	2494	491
31	1,733	2220	559	1,735	2954	420
32	1,760	2659	474	1,762	3472	364
33	1,813	3708	350	1,788	4013	319
34	1,840	4318	305	1,816	4676	278
35	1,866	5003	267	1,843	5368	246

Izgube v železu: a) vzdolžno $P_{1,3} = 2,73$ (W / kg) in $P_{1,5} = 3,65$ (W / kg)

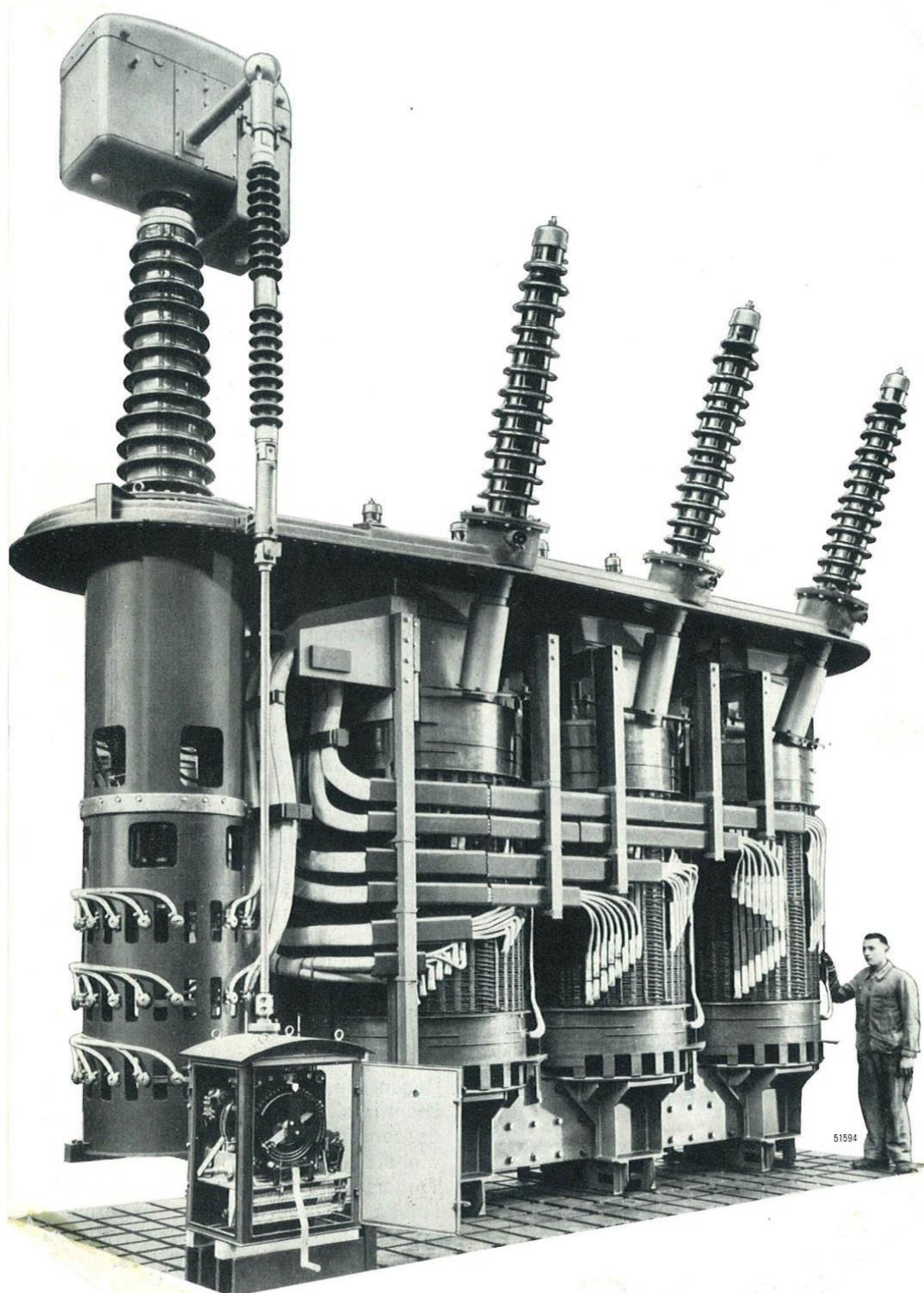
b) prečno $P_{1,3} = 3,01$ (W / kg) in $P_{1,5} = 4,01$ (W / kg)

13 SLIKE VELIKIH ENERGETSKIH TRANSFORMATORJEV

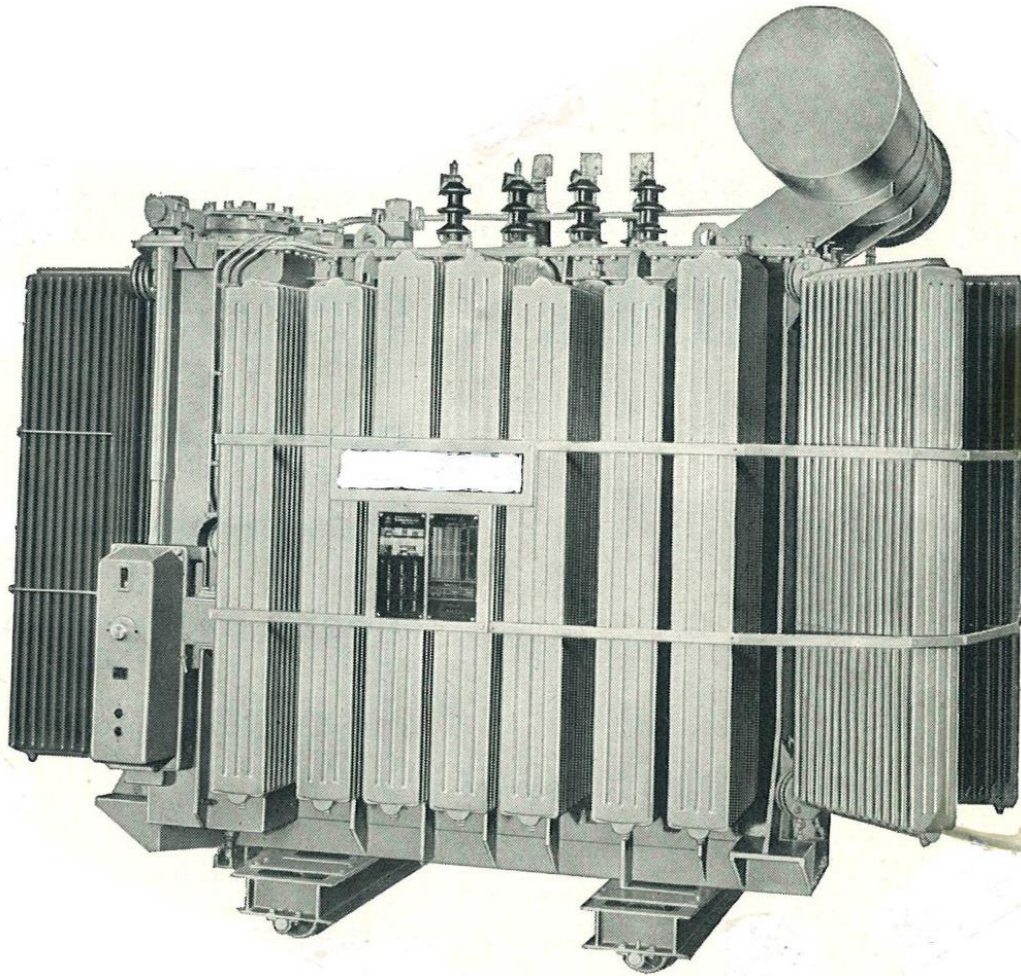
Na sliki 139 je prikazan merilni tokovni transformator za omrežje 400 kV. Podatki tokovnega transformatorja so: 2500/5 A, 35 VA, razred točnosti 1 %, kotni pogrešek $\xi = 70' - 178'$. Mejni tokovi: $I_{th} = 50 \text{ kA}$, $I_{dyn} = 125 \text{ kA}$. Teža je 4 t in višina 7 m.



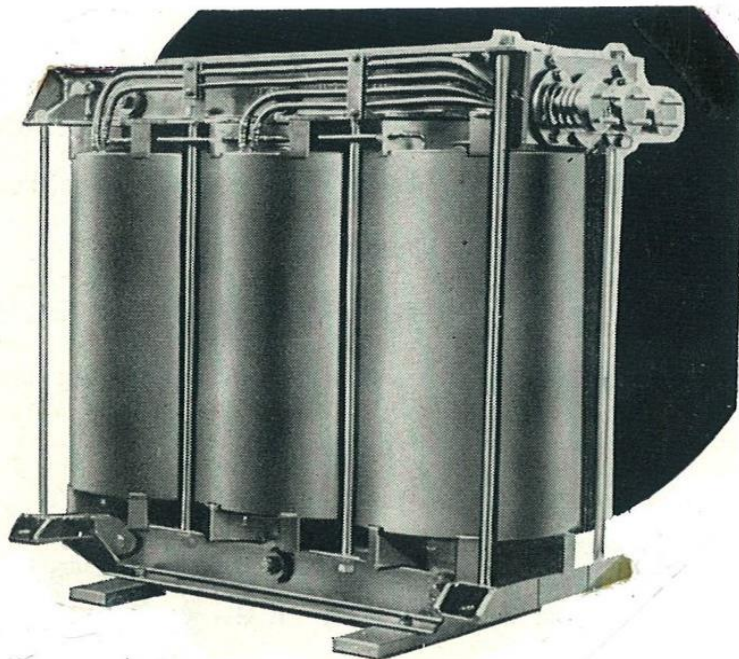
Na sliki 140 je prikazan trifazni oljni regulacijski transformator, dvignjen iz oljnega kotla, s podatki: 30 MVA, 114400+16×1950 /47000 /11100 V; 50 Hz. Bremenski odcepni preklopnik je montiran zgoraj na izolatorju, stopenjski zbiralec je izveden kot cilindrično stikalo (levo) in motorni pogon regulacijskega stikala (levo spodaj).



Slika 140 Trifazni oljni regulacijski transformator



Slika 141 Trifazni oljno hlajeni transformator, moči do 16 MVA



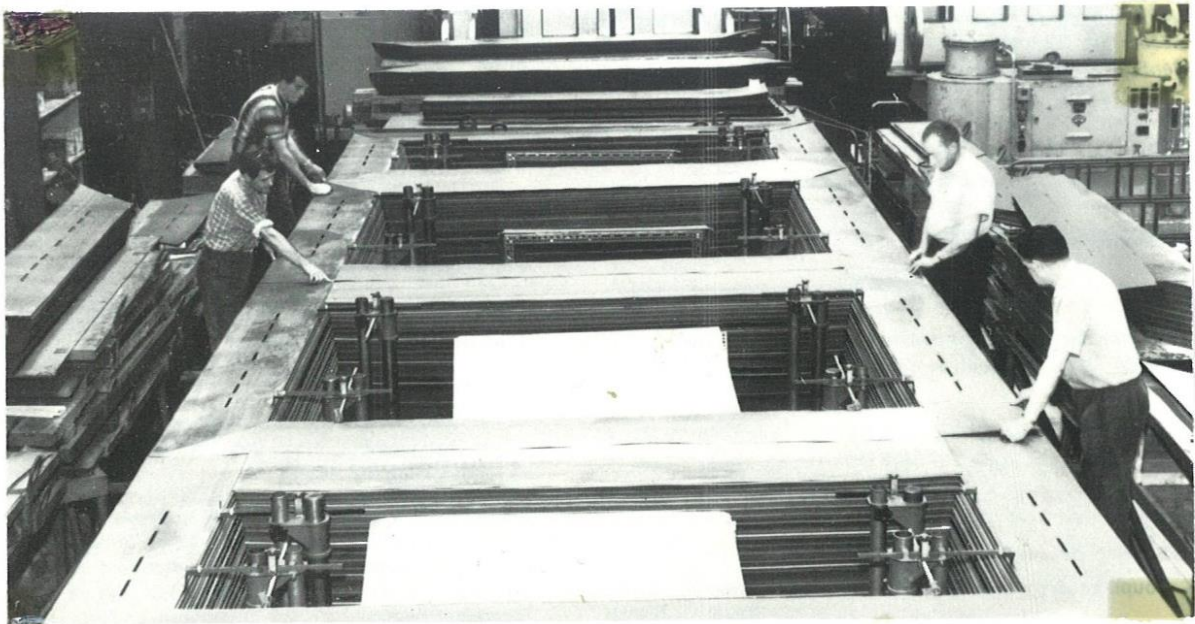
Slika 142 Trifazni suhi transformator moči do 2 MVA, napetosti 20 kV, z navitjem zalitim z umetno smolo

Na slikah 143a-e je prikazana proizvodnja trifaznega pet stebrnega oljnega transformatorja z deljenim visokonapetostnim navitjem francoske proizvodnje za termoelektrarno Le Havre. V poglavju 4 oziroma 4.1 je prikazana razdelitev navitja, z vrisanim diagramom gostote magnetnega pretoka razsipanega polja. Opisan je tudi izračun razsipanih reaktanc za različne porazdelitve navitij okoli stebra jedra transformatorja.

Osnovni podatki transformatorja so naslednji: nazivna moč 660 MVA, napetost 20/405 kV, tok 19700/970 A, regulacija v breznapetostnem stanju $\pm 3,5\%$, vezava navitij Dy, skupna masa 438 t, masa olja 70 t, masa kotla 72 t, masa aktivnega dela 260 t, masa železnega jedra 152 t, masa bakra 65 t. Garancije proizvajalca: izgube v železu 370 kW, izgube v bakru 1690 kW. Preskusne napetosti: nizka napetost 50 kV, visoka napetost v zvezdišču 325 kV, z inducirano napetostjo visoko napetostno navitje (na sponki faze) 630 kV in z udarnim valom (na sponki faze) 1425 kV.

Glavne dimenzije transformatorja so: dolžina 12,3 m, širina 5,65 m, višina s skozišiki 10,0 m.

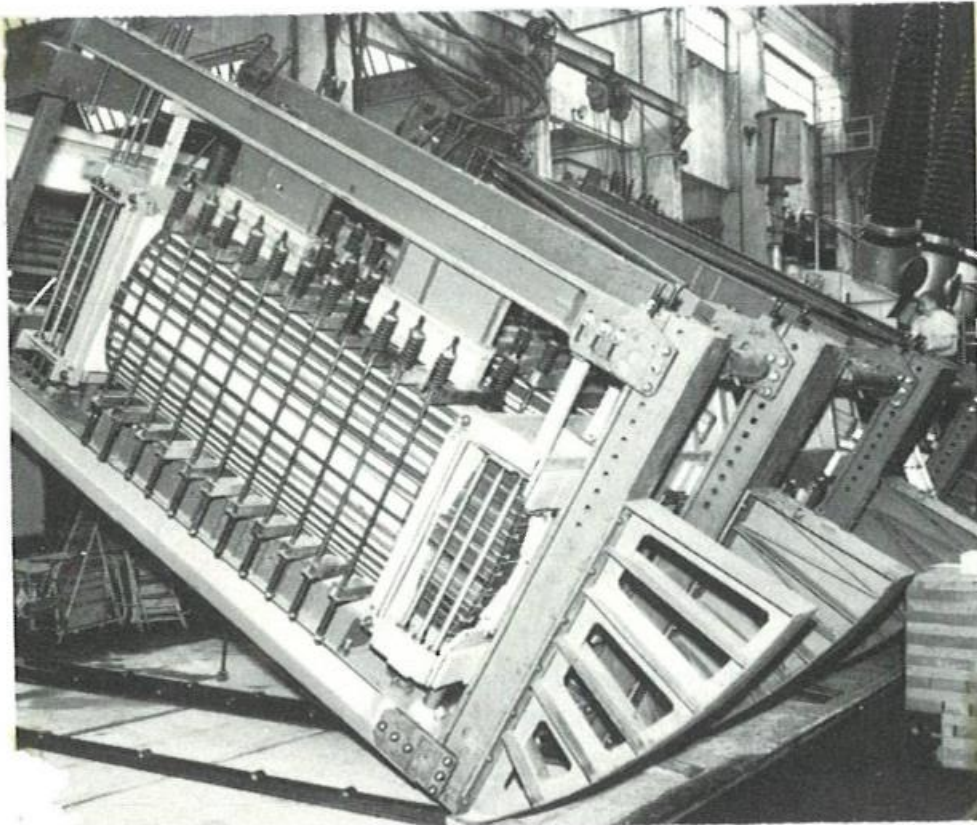
Na sliki 143a se vidi zlaganje pločevine trifaznega petstebrnega transformatorskega jedra za stik lamel stebra z jarmom pod kotom 45° , kot je prikazan na sliki 5b.



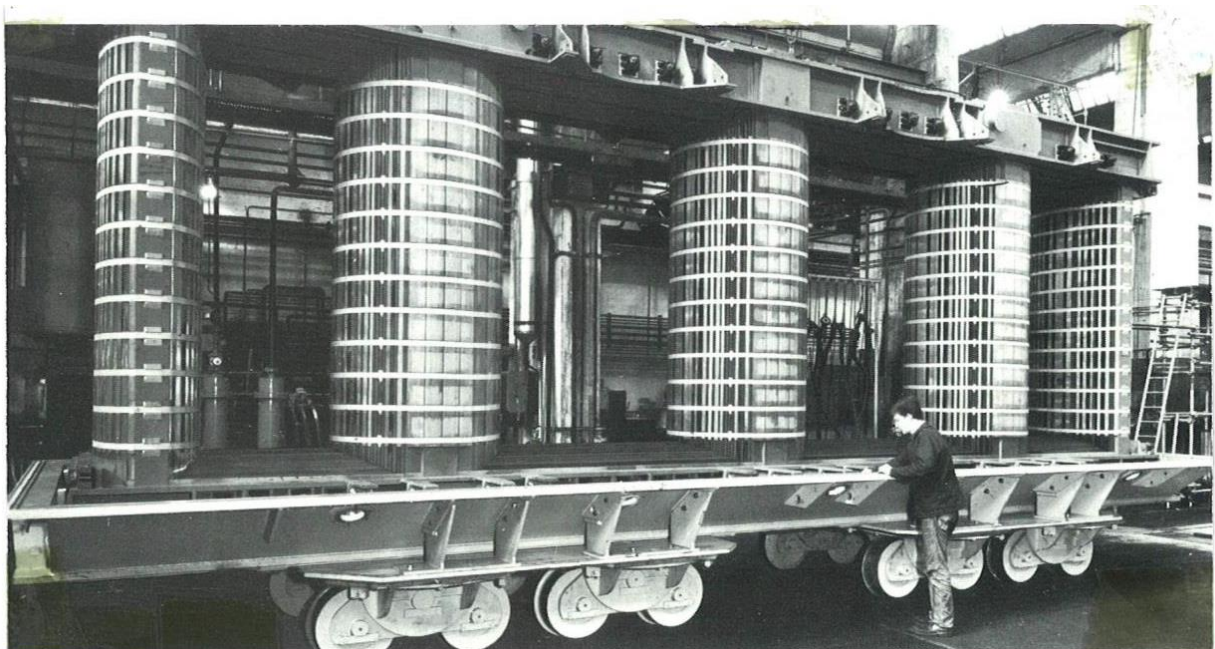
Slika 143a Zlaganje jedra

Na sliki 143b je prikazano dviganje zloženega jedra s posebno orodno napravo v vertikalni položaj in na sliki 143c je to gotovo jedro že na podvozju za transport transformatorja.

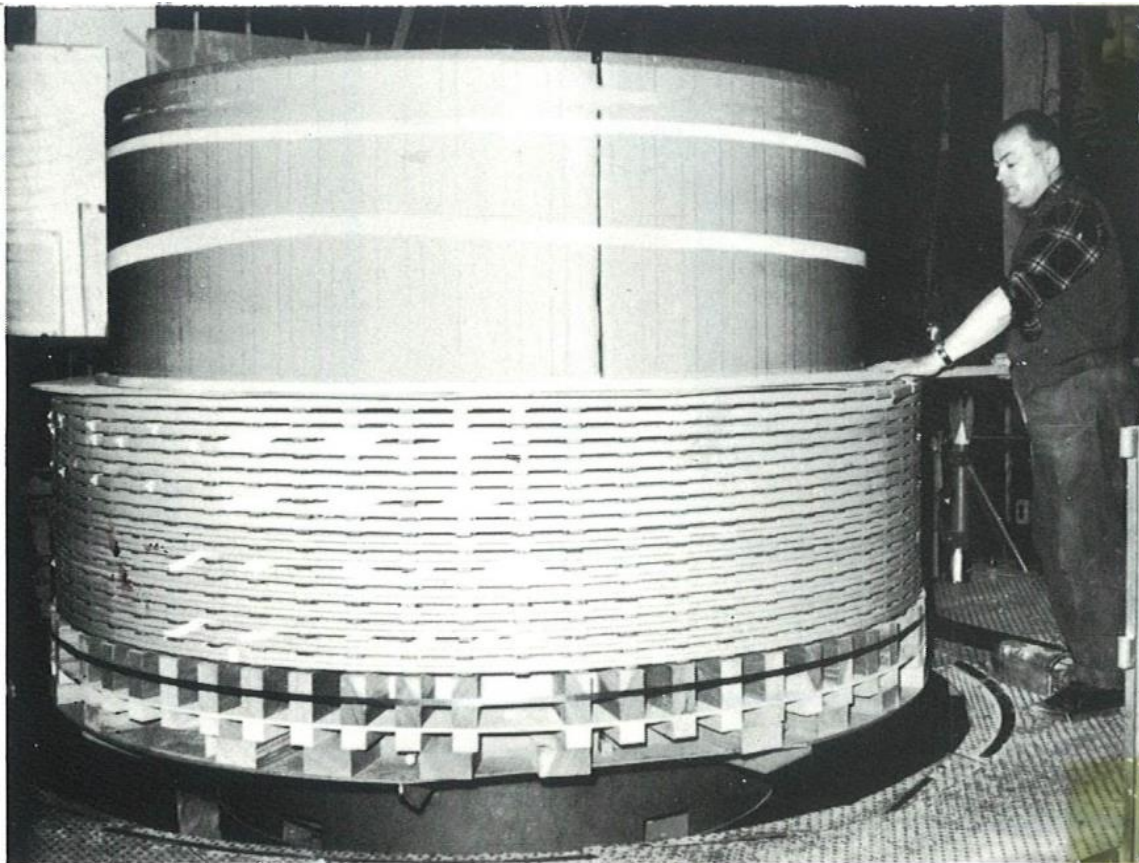
Na sliki 143d se vidi izdelava zunanjega visoko napetostnega navitja in na sliki 143e je prikazana končna montaža transformatorja.



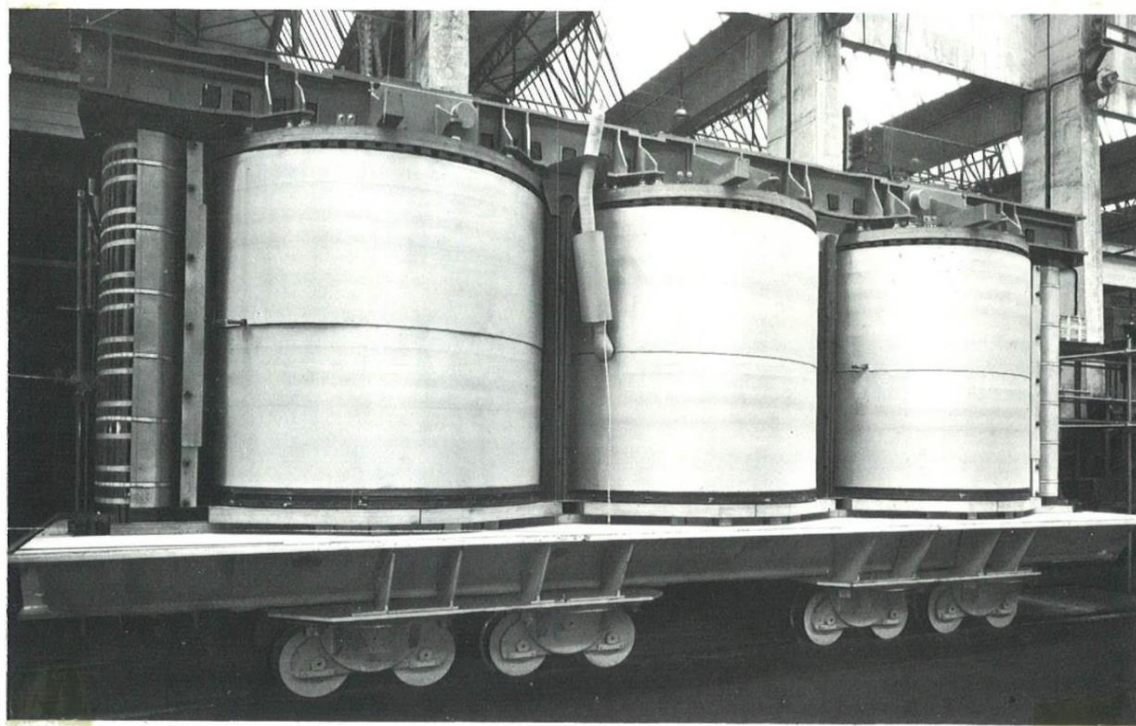
Slika 143b Dviganje jedra s posebno orodno napravo



Slika 143c Gotovo jedro na podvozju, stebri oviti s pasovi iz steklenih vlaken s polimerizirano umetno smolo



Slika 143d Izdelava zunanjega visoko napetostnega navitja



Slika 143e Montaža transformatorja; razločno vidni središnji izvod 400 kV, eden od njih na srednjem stebru s priključkom na skozijsnik 400 kV

14 LITERATURA

G. Müller, Elektrische Maschinen, VEB Verlag Technik, Berlin 1970

D. Zavadlav, Električni stroji I, Transformator, Univerza v Mariboru, TF-ERI, zapiski predavanj, Maribor 1980

A. Dolenc, Transformatori, Sveučilište u Zagrebu, Pečateno v Univerzitetската pečatnica Skopje, Zagreb 1961

J. Ritonja, B. Slemnik, I. Zagradišnik, Izbrana poglavja iz transformatorjev, Univerza v Mariboru, Tiskarna tehniških fakultet, skripta, 2. izdaja, Maribor 2017

I. Zagradišnik, Električni in elektromehanski pretvorniki, FERI, Univerza v Mariboru, Tiskarna tehniških fakultet, zapiski predavanj, Maribor, ponatis 2019

R. Küchler, Die Transformatoren, Grundlagen für ihre Berechnung und Konstruktion, Springer-Verlag Berlin/Heidelberg/New York, 1966

G. Gotter, Erwärmung und Kühlung elektrischer Maschinen, Springer-Verlag Berlin /Göttingen / Heidelberg 1954

Končar, Trofazni transformatori (od 50 do 1600 kVA za napone do 24 kV), katalog, Zagreb 1982

IEC Standard, Letter symbols to be used in electrical technology, Part 4: Symbols to be used for rotating electrical machines, Publication 27 – 4, © IEC 1985, Genève, Suisse

IEC Handbook, Letter symbols, © IEC 1983, Genève, Suisse

IEC 60050 (421), Mednarodni elektrotehniški slovar, Poglavje 421, Močnostni transformatorji in dušilke, Slovenski standard, 1998

IEC Standard, 60038, IEC standard voltages, © IEC 2009, Genève, Suisse

IEC Standard, 60060, High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements, © IEC 2010, Genève, Suisse

IEC Standard, 60060, High-voltage test techniques – Part 2: Measuring systems, © IEC 2010, Genève, Suisse

IEC Standard, 60060, High-voltage test techniques – Part 3: Definitions and requirements for one-site testing, © IEC 2006, Genève, Suisse

IEC Standard, 60076, Power transformers – Part 1 – 24, © IEC 2011, Genève, Suisse

IEC Standard, 60076, Power transformers – Part 3: Insulations levels, dielectric tests and external clearances in air, © IEC 2000-03, Genève, Suisse

15 SEZNAM SIMBOLOV IN OZNAK

- a (m) dimenzija str. 46; $a = e^{j2\pi/3}$ operator faznega premika str. 70; a število paralelnih vej str. 82
- A (m²) površina ali presek str. 8
- b (m) dimenzija str. 46
- B ($T = V \cdot s / m^2 = N / (A \cdot m)$) gostota magnetnega pretoka str. 7
- c (m) dimenzija str. 46; c (Ws / (kg · K)) = (J / (kg · K)) specifična toplota str. 122
- C konstanta str. 90; C ($F = A \cdot s / V$) kapacitivnost str. 104; C (J^{-1/2} · m²) koeficient str. 131
- d operator odvajanja str. 3; d (mm) debelina str. 7; d trikotna vezava navitja str. 57
- D trikotna vezava navitja str. 12; D (m) premer str. 74
- e (V) trenutna vrednost inducirane napetosti str. 2; $e = 2,71828$ Eulerjevo število str. 16
- e (%) pogrešek prestave str. 56; e (mm) dimenzija str. 133
- E (V) efektivna vrednost inducirane napetosti str. 8
- f (Hz = s⁻¹) frekvenca str. 7; f faktor str. 37; f (V · A / kg) dobit str. 46
- F (N) magnetna sila str. 99
- h (m) višina str. 74
- H (A / m) magnetna poljska jakost str. 7
- i (A) trenutna vrednost toka str. 2; i^* relativna vrednost toka str. 41; i (mm) debelina izolacije str. 108
- I (A) efektivna vrednost toka str. 16
- $j = e^{j\pi/2}$ fazni premik v kompleksni ravnini str. 16
- J (A / m²) gostota toka str. 46
- k konstanta str. 5; k faktor str. 75
- K prestava (napetostna, tokovna) str. 5; K (s) integracijska konstanta str. 123
- l (m) dolžina str. 21
- L ($H = V \cdot s / A$) induktivnost str. 11
- m število faz navitja izmeničnega stroja str. 1; m (kg) masa str. 47
- n število str. 6; n nevtralni vodnik str. 57
- N število ovojev str. 2
- o (m) širina okna transformatorja str. 133
- O (m) obseg str. 99
- p (W) trenutna vrednost delovne moči ali moč izgub str. 5; p (Torr = 133,3 Pa) ali (bar) tlak str. 125
- P (W) delovna moč ali moč izgub str. 20
- r relativna ohmska upornost str. 41
- R (Ω) ohmska upornost str. 3; R (K / W) toplotna upornost str. 127
- S (V · A) navidezna moč str. 81
- t (s) čas str. 3

- T (s) časovna konstanta str. 88
 u (V) trenutna vrednost napetosti str. 2; u^* relativna vrednost napetosti str. 41
 U (V) efektivna vrednost napetosti str. 16
 v (m/s) hitrost str. 104
 V (m³) volumen str. 39; V vezava dveh enofaznih transformatorjev str. 117
 x (m) koordinata str. 5; x eksponent str. 7; x faktor spremembe vrednosti str. 46
 X (Ω) induktivna upornost str. 19
 y zvezdna vezava trifaznega navitja str. 12; y razmerje str. 50
 Y zvezdna vezava trifaznega navitja str. 57
 Z cikcak vezava trifaznega navitja str. 57
 Z (Ω) impedanca (kompleksna upornost) str. 4; Z cikcak vezava trifaznega navitja str. 57
 α ($^\circ$) kot str. 88; α faktor str. 107; α (W/(m² · K)) koeficient toplotne prestopnosti str. 122
 γ (S · m/mm²) specifična električna prevodnost str. 14
 δ (m) zračna reža str. 8; δ (mm) debelina str. 125
 Δ matematični znak za razliko str. 12
 ε (A · s/(V · m)) absolutna dielektričnost izolacije str. 108
 η izkoristek str. 50
 ϑ ($^\circ\text{C}$) temperatura str. 47
 θ (A) trenutna vrednost magnetne napetosti (vzbujanja) str. 3
 Θ (A) magnetna napetost (vzbujanje) str. 16; Θ (K) absolutna temperatura str. 47
 κ razmerje str. 75
 λ specifična toplotna prevodnost (W/(m · K)) str. 122
 Λ (H) magnetna prevodnost str. 10; Λ (W/K) toplotna prevodnost str. 122
 μ (V · s/(A · m)) absolutna permeabilnost str. 4
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (V · s/(A · m)) permeabilnost praznega prostora str. 22
 ξ ($^\circ$ ali min) pogrešek kota str. 55; ξ faktor razmerja izgub str. 52
 $\pi = 3,1415926$ Ludolfovo število str. 16
 ρ ($\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$) specifična električna upornost str. 10; ρ_{mCu} (kg/m³) gostota bakra str. 49
 σ faktor razsipanja polja str. 2
 Σ matematični operator vsote str. 10
 τ (m) razdalja str. 125
 ϕ (Wb = V · s) trenutna vrednost magnetnega pretoka - fluksa str. 2; Φ (Wb = V · s) fluks str. 16
 Φ_{tA} (W/m²) toplotni tok na enoto površine str. 47; Φ_{t} (W) toplotni tok str. 122
 φ (rad.) fazni kot ali kot premika str. 16
 ψ (Wb = V · s) trenutna vrednost magnetnega sklepa str. 2; Ψ (Wb = V · s) magnetni sklep str. 16
 ω (rad./s) električna kotna frekvenca (krožna hitrost) str. 16



Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko