

Испит спрематипо овом тексту.

Делове текста између маркера

и

прочитати информативно (из тог дела градива се неће постављати питања на испиту)

10. Специјални трансформатори

У претходним поглављима је било говора о трансформаторима који се карактеришу као *стандардни трансформатори*: по намени енергетски, по броју фаза трофазни и монофазни, по броју фазних намотаја двонамотајни и тронамотајни, и то галвански раздвојени (веза помоћу магнетног флукса), за простопериодичне напоне сталне учестаности (50Hz или 60Hz), са хлађењем активног дела уљем (изолационом течностју) или ваздухом.

Поред ових „стандардних трансформатора“, постоји читав низ *специјалних трансформатора*, као што су:

- 1) Трансформатори за претварање броја фаза (из 3 у 2, 6, 12)
- 2) Аутотрансформатори
- 3) Трансформатори за енергетске претвараче – са несинусоидалним напонима и струјама
- 4) Трансформатори са више извода (за „регулацију“ напона
- 5) Допунски (редни) трансформатори
- 6) Мерни трансформатори

У овом поглављу су дате основне карактеристике специјалних трансформатора, као неке додатне информације о тронамотајним и сувим трансформаторима, који су кратко споменути у претходним поглављима.

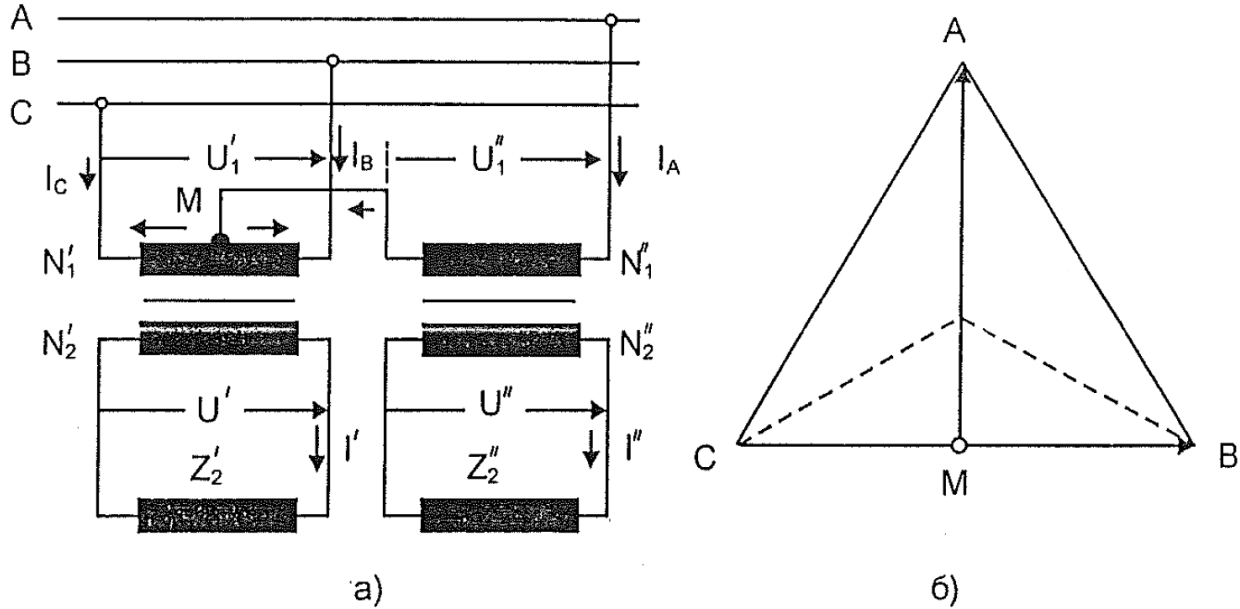
10.1. ПРЕТВАРАЧИ БРОЈА ФАЗА

У различитим инжењерским применама од интереса је добијање вишефазних напона и струја из трофазног система напона и струја (који се стандардно имају у електродистрибутивним мрежама). Од интереса може бити и обрнута трансформација - из вишефазних напона у трофазни. У овом поглављу се приказују решења којима се напони и струје из трофазног система помоћу трансформатора са намотајима и магнетском језгрима претварају у следеће системе:

- двофазни систем
- шестофазни систем
- дванаестофазни систем

1) Претварање трофазног у двофазни систем

Оно се може остварити помоћу два једнофазна трансформатора, од којих један има извод на средини примарног намотаја. Оваква спрега се назива *Скотова спрега*. На слици 10.1 а) је дата шема, а на слици 10.1 б) фазорски дијаграм ове спреге.



Слика 10.1

Напон на првом секундарном намотају (') је у фази са линијским примарним напонем U_{BC} , док је напон на другом секундарном намотају (") у фази са напонем између средишње тачке првог примарног намотаја (везаног између тачака В и С примара) и краја другог примарног намотаја (везаног на тачку А примара). Због тога су, као што се види на слици 10.1 б), намотаји на секундарним намотајима фазно померени за $\pi/2$. Из претходно наведеног, односно са слике 10.1 б), закључује се да преносни однос трансформатора треба да буде различит: да би напони U' и U'' били исти: однос преносних односа трансформатора n' / n'' треба да буде једнак

$$(U_{BC} / U_{MA})^{-1} = (U_{BC} / (U_{AC} \sin(60^\circ)))^{-1} = (\sin(60^\circ))^{-1} = 2 / \sqrt{3} \quad (10.1)$$

Дакле, да би се остварило да напон на оба секундара буде једнаке ефективне вредности, треба да буде

$$n' / n'' = (N_1' / N_2') / (N_1'' / N_2'') = 2 / \sqrt{3}. \quad (10.2)$$

Ако би се број навојака на секундару фиксирао, $N_2' = N_2''$, однос броја навојака на примару би морао да буде

$$N_1' / N_1'' = 2 / \sqrt{3}. \quad (10.3)$$

Са n ће се означити преносни однос

$$n = N_1' / N_2'; \quad (10.4)$$

Однос броја навојака на другом трансформатору N_1'' / N_2'' одређен је односом линијског мрежног напона и потребног напона на секундару трансформатора: U_n / U'' :

$$N_1'' / N_2'' = U_n / U'' \quad (10.5)$$

Из претходног произилази

$$n = N_1' / N_2' = 2 / \sqrt{3} (N_1'' / N_2'') = 2 / \sqrt{3} U_n / U'' \quad (10.6)$$

Сада ће се показати да су линијске струје, које протичу ка мрежи, за случај истог оптерећења на секундарима два трансформатора ($Z_2' = Z_2''$), једнаке и фазно померене за 120° .

Као што је показано, напони на секундарима трансформатора су у квадратури

$$\underline{U}'' = j \underline{U}' \quad (10.7)$$

Из (10.7) и једнакости импеданси на секундару ($Z_2' = Z_2''$), проистиче

$$\underline{I}'' = j \underline{I}' \quad (10.8)$$

Једнакост ампернавојака за први трансформатор даје

$$N_2' \underline{I}' = \frac{N_1'}{2} (\underline{I}_B - \underline{I}_C), \quad (10.9)$$

а за други

$$N_2'' \underline{I}'' = N_1'' \underline{I}_A \quad (10.10)$$

Из (10.10) следи

$$\underline{I}_A = \frac{N_2''}{N_1''} \underline{I}'' = \frac{N_2'}{N_1''} \underline{I}'' = \frac{N_2'}{N_1'} \frac{N_1'}{N_1''} \underline{I}'' = \frac{1}{n} \frac{2}{\sqrt{3}} \underline{I}'' \quad (10.11)$$

Полазећи од $I_A + I_B + I_C = 0$ и израза (10.9), може се добити да су вредности линијских струја у примару

$$\underline{I}_B = -j \underline{I}'' \frac{1}{n} \left(-\frac{j}{\sqrt{3}} + 1 \right) = \underline{I}_A \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \quad (10.12)$$

$$\underline{I}_C = j \underline{I}'' \frac{1}{n} \left(\frac{j}{\sqrt{3}} + 1 \right) = \underline{I}_A \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \quad (10.13)$$

односно да се оптерећење два монофазна пријемника прикључена на секундарне намотаје трансформатора на примар и напојну мрежу преноси као уравнотежено и симетрично оптерећење.

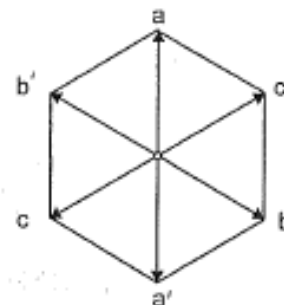
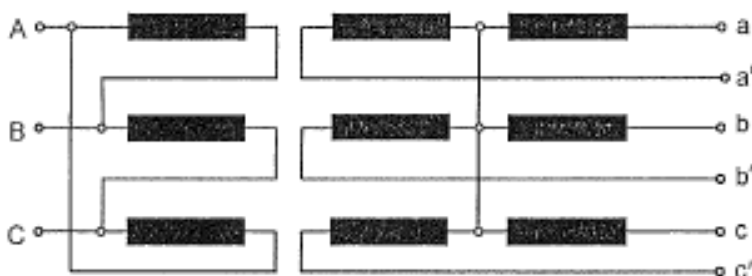
Карактеристична примена Скотове спреге је прикључење две монофазне индукционе пећи на трофазну мрежу [1].

Поред наведене примене напајања двофазног система из трофазне мреже, ова спрега може да се користи и обрнуто, за претварање двофазног система напона у квадратури у симетричан трофазни систем, а са мањом модификацијом и за претварање трофазног система у четворофазни.



2) Претварање трофазног система у шестофазни

Шема је приказана на слици 10.2, а фазорски дијаграм напона на слици 10.3. Шестофазни систем се формира помоћу две звезде везане у опозицију.

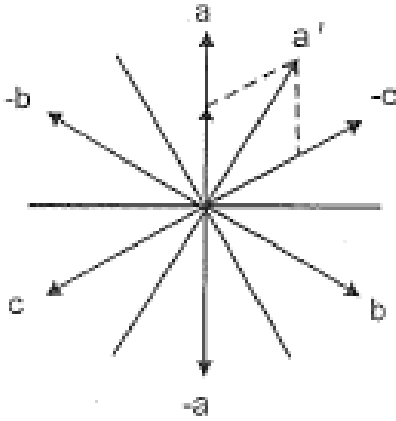


Слика 10.2

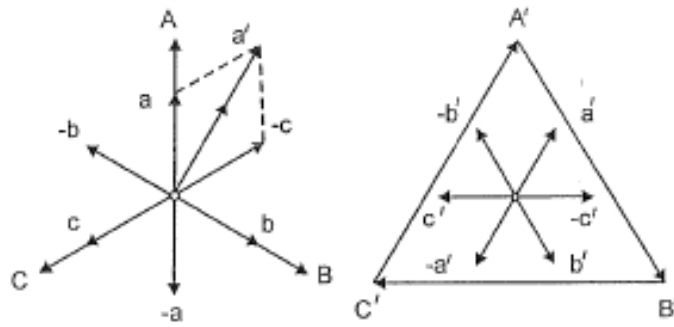
Слика 10.3

3) Претварање трофазног система у дванаестофазни

Ово претварање се може постићи на два начина. Оба начина се односе на формирање додатних шест фаза у односу на решење приказано за претварање трофазног система у шестофазни. Први начин је повезивањем полунамотаја две суседне фазе, како је то приказано на слици 10.4, узимајући при томе одговарајући број навојака. Други начин је спрезање два различита трансформатора, при чему је примар једног спрегнут у звезду, а примар другог у троугао (слика 10.5). Приказани фазори потврђују да је фазни напон код формираног симетричног 12-то фазног система фазно померен од претходног напона за $\pi/6$.



Слика 10.4



Слика 10.5

6-то фазни и 12-то фазни системи формирани на описани начин су једно од решења која се користе у енергетским статичким претварачима (исправљачима) када је потребно да валовитост једносмерног напона буде што мања.

10.2. ТРОНАМОТАЈНИ ТРАНСФОРМАТОРИ

До сада је углавном било речи о трансформаторима (монофазним или трофазним), са два намотаја по фази (примар и секундар, при чему се може догодити да, у случају да трансформатор повезује две активне мреже, намотаји примара и секундара промене улогу). Могуће је по фази постоји више од два намотаја. Ова могућност је помињана као решење са терцијарним намотајем спрегнутим у троугао, који омогућава формирање синусног флукса при магнећењу (одељак 7.2.3). Терцијер спрегнут у троугао такође омогућава затварање нулте компоненте струје, односно спречавање њеног протисања у мрежу. Овде ће фокус бити на трансформаторима код којих сва три намотаја по фази преносе значајну снагу. У зависности од смера преноса снаге, постоје трансформатори:

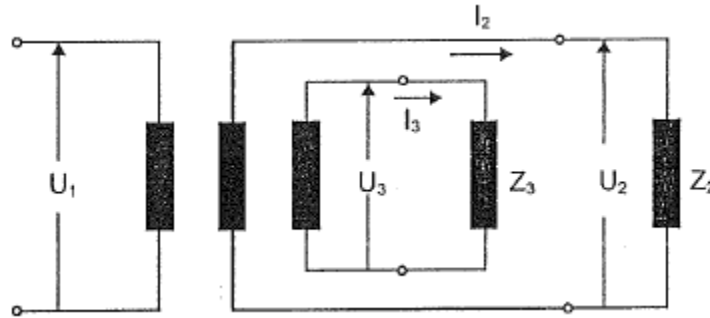
- са једним примаром и два секундара
- са два примара и једним секундаром

Овакви трансформатори се најчешће користе у разводним постројењима са три напонска нивоа (на пример 220kV, 110kV и 35kV) или у електранама, када се два генератора, најчешће истих напонских нивоа, повезују са преносном мрежом преко једног блок трансформатора. Типична ситуација је да трансформатор у постројењима има један примар (највишег напонског нивоа) и два секундара, а блок трансформатор у електрани два примара, нижег напонског нивоа, и један секундар, вишег напонског нивоа.

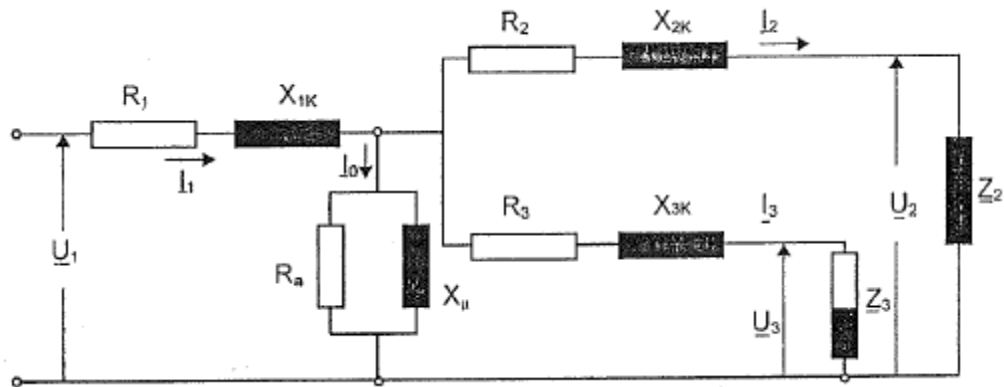
Оптерећење индивидуалних намотаја може бити произвољно, при чему важи да је збир улазних снага, са једне стране, и излазних снага и губитака у трансформатору, са друге стране, једнак. У зависности од намене трансформатора, конструкција може бити таква да су снаге свих намотаја

једнаке ($100 \% S_n$), или, што је веома чест случај, снаге неких намотаја могу бити мање (на пример $70 \% S_n$, или снага на сваком од два ниженапонска намотаја на које се прикључују генератори може бити једнака $50 \% S_n$, док је снага високонапонског намотаја $100 \% S_n$).

У циљу скраћења и поједностављења суштине заменске шеме тронамотајних трансформатора, посматраће се један трансформатор са два секундара (слика 10.6), за који је заменска шема приказана на слици 10.7, при чему је занемарена струја празног хода и узето да је однос трансформације између примара и сваког од два секундара $n = 1 : 1$.

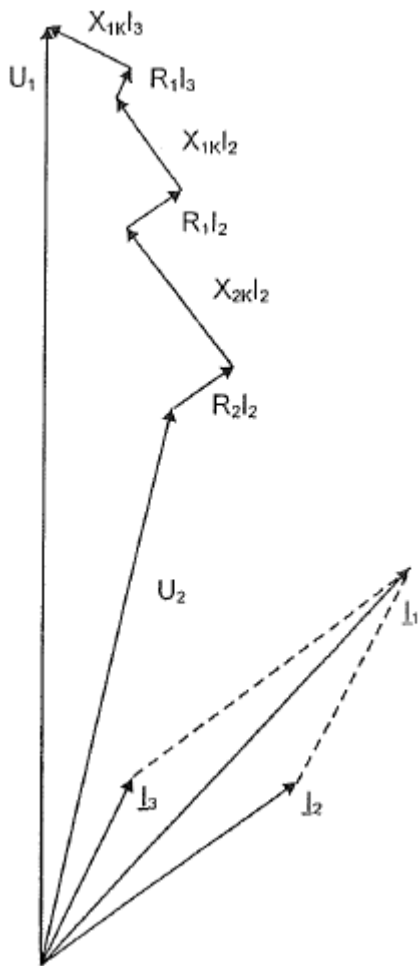


Слика 10.6



Слика 10.7

Фазорски дијаграм за напон \underline{U}_2 (сличан дијаграм важи и за напон \underline{U}_3) је приказан на слици 10.8.



Слика 10.8

Параметри $\{R_k, X_k\}$ могу се одредити рачунски или из мерења. У случају да се ови параметри одређују из мерења, оглед кратког споја се врши за све три могућности кратког споја, при чему је један намотај напајан (као примар), други кратко спојен (као секундар), а трећи отворен. Вредности импедансе кратког споја, исказане преко величина на шеми 10.7 приказане су у табели 10.1.

Прва два мерења дају импедансе кратког споја сведена на примар, а треће мерење на секундар, па се ова импеданса мора свести на примар:

$$Z'_{k23} = Z_{k23} \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (10.14)$$

Мерењима се добијају вредности $R_{k12}, R_{k13}, R_{k23}, X_{k12}, X_{k13}, X_{k23}$. Вредности отпорности и расипних реактанси по фазама се могу добити из измерених импеданси и њихове везе са вредностима по фазама која је приказана у табели 10.1. Решавањем система три једначине са три непознате долази се до $R_1, R_2, R_3, X_{k1}, X_{k2}, X_{k3}$. Детаљније ће се дати поступак за одређивање R_1, R_2 и R_3 .

Табела 10.1

Редни број	Побуђен намотај	Краткоспојени намотај	Импеданса кратког споја
(1)	1	2	$\underline{Z}_{k12} = R_{12} + jX_{12} = R_1 + R_2 + j(X_{1k} + X_{2k})$
(2)	1	3	$\underline{Z}_{k13} = R_{13} + jX_{13} = R_1 + R_3 + j(X_{1k} + X_{3k})$
(3)	2	3	$\underline{Z}_{k23} = R_{23} + jX_{23} = R_2 + R_3 + j(X_{2k} + X_{3k})$

Из (1) + (2) – (3):

$$2 R_1 + (R_2 + R_3) - (R_2 + R_3) = R_{12} + R_{13} - R'_{23} \quad (10.15)$$

Из (1) + (3) – (2):

$$2 R_2 + (R_1 + R_3) - (R_1 + R_3) = R_{12} + R'_{23} - R_{13} \quad (10.16)$$

Из (2) + (3) – (1):

$$2 R_3 + (R_1 + R_2) - (R_1 + R_2) = R_{13} + R'_{23} - R_{12} \quad (10.17)$$

Одатле је

$$R_1 = \frac{1}{2} (R_{12} + R_{13} - R'_{23}) \quad (10.18)$$

$$R_2 = \frac{1}{2} (R_{12} + R'_{23} - R_{13}) \quad (10.19)$$

$$R_3 = \frac{1}{2} (R_{13} + R'_{23} - R_{12}) \quad (10.20)$$

Идентичним поступком долази се до вредности реактанси расипања сваког од намотаја:

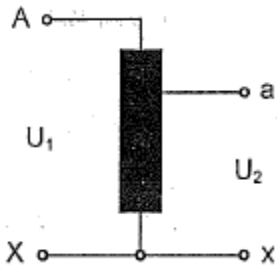
$$X_{1k} = \frac{1}{2} (X_{12} + X_{13} - X'_{23}) \quad (10.21)$$

$$X_{2k} = \frac{1}{2} (X_{12} + X'_{23} - X_{13}) \quad (10.22)$$

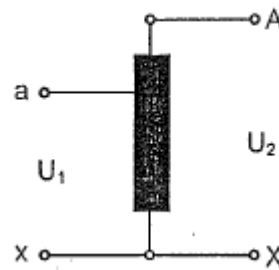
$$X_{3k} = \frac{1}{2} (X_{13} + X'_{23} - X_{12}) \quad (10.23)$$

10.3. АУТОТРАНСФОРМАТОРИ

Аутотрансформатори имају само један намотај, при чему је на крајеве намотаја везана вишенпонска страна, док је ниженапонска страна везана између једног од крајева намотаја и прикључка који је изведен на неком од навојака унутар намотаја. У зависности од тога где је прикључен примар, разликује се аутотрансформатор спуштач напона (тада је примар прикључен на крајеве намотаја – слика 10.10) и аутотрансформатор подизач напона (тада је примар прикључен између једног краја намотаја и извода са намотаја – слика 10.11).



Слика 10.10

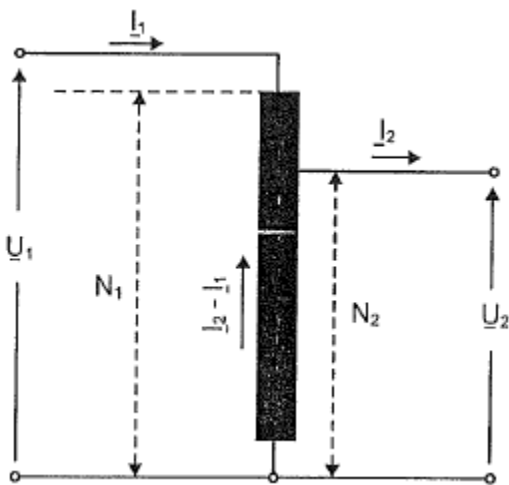


Слика 10.11

Као и код обичног трансформатора, константан флуks се успоставља кроз стуб магнетног кола, због чега је индукована електромоторна сила у сваком од навојака иста. Струја магнећења, исто као код обичног трансформатора, протиче кроз намотај примара. На основу чињенице да је индукована електромоторна у сваком од навојака иста, однос напона примара и секундар износи

$$n = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_{AX}}{N_{ax}} \quad (10.23)$$

Основна разлика аутотрансформатора у односу на обични трансформатор је што примар и секундар имају заједнички део намотаја, кроз који протиче струја чија је вредност једнака разлици струја примара и секундар (слика 10.12).



Слика 10.12

У циљу лакшег разумевања принципа рада и ефеката који се постижу коришћењем конструкције аутотрансформатора у односу на конструкцију обичног трансформатора, занемаримо грану магнећења. Односи снага, струја и напона на једном и другом мрежном прикључку (1 и 2) су исти као код обичног трансформатора:

$$\underline{U}_1 I_1 = \underline{U}_2 I_2 \quad (10.24)$$

$$\frac{U_1}{U_2} = n \quad (10.25)$$

$$\frac{I_2}{I_1} = n \quad (10.26)$$

За аутотрансформатор спуштач напона, примар садржи све навојке намотаја ($N_1 = N_{AX}$), а секундар навојке само до отцепа са намотаја ($N_2 = N_{ax}$). У том случају, из (10.26) и (10.23) долази се до

$$N_1 \underline{I}_1 - N_2 \underline{I}_2 = 0 \quad (10.27)$$

До исте везе се може доћи из равнотеже магнетопобудних сила које делују у делу намотаја кроз који протиче струја примара ($N_1 - N_2$ навојака) и делу намотаја кроз који протиче разлика струја примара и секундара (N_2 навојака):

$$(N_1 - N_2) \underline{I}_1 - N_2 (\underline{I}_1 - \underline{I}_2) = 0 \quad (10.28)$$

Код трансформатора се разликују две (привидне) снаге: једна је она која се преноси из мреже прикључене на примар, односно секундар – ова снага се назива преносна или пролазна снага ($S_P = U_1 I_1 = U_2 I_2$), и друга која одређује физичку величину трансформатора, а тиме и цену – ова снага се инсталирана или типска снага (S_T). Код обичног трансформатора, ове две снаге су једнаке, јер је снага која се преноси из мреже прикључене на примар једнака снази намотаја примара, док је снага која се преноси ка мрежи прикљученој на секундар једнака снази секундарног намотаја.

Типска снага аутотрансформатора се може одредити као збир снага заједничког дела намотаја и дела намотаја који припада само вишенaponsкој страни. При томе, снага сваког од ових делова је једнака производу напона и струје на њему. Део намотаја кроз који протиче само струја примара садржи $N_1 - N_2$ навојака, заједнички део намотаја садржи N_2 навојака и напон на овом заједничком делу намотаја износи U_2 , што значи да је напон на делу намотаја кроз који протиче струја примара $U_1 - U_2$. Одатле следи да је типска снага дела намотаја који припада само вишенaponsкој страни

$$S_{TP} = (U_1 - U_2) I_1 = U_1 (1 - 1/n) I_1 = S_P (1 - 1/n) \quad (10.29)$$

Типска снага дела заједничког дела намотаја износи

$$S_{TZ} = U_2 (I_2 - I_1) I_1 = U_2 I_2 (1 - 1/n) I_1 = S_P (1 - 1/n) \quad (10.30)$$

Слично као код обичног трансформатора, где је типска снага примарног намотаја била једнака типској снази секундарног намотаја, код аутотрансформатора су исте типске снаге на делу намотаја кроз који протиче струја примара и на делу заједничког дела намотаја ($S_{TP} = S_{TZ} = S_T$). Разлика у односу на обичан трансформатор што је типска снага S_T код аутотрансформатора мања од пролазне снаге S_P – износ смањења снаге S_T у односу на S_P , за који ће се увести ознака α , износи

$$\alpha = \frac{S_T}{S_P} = (1 - 1/n). \quad (10.31)$$

Вредност α је утолико мања уколико је однос напона примара и секундара n ближи јединици (када n тежи јединици, α тежи нули). Због тога се аутотрансформатори не праве када је потребан преносни однос n већи од 2; за $n = 2$, $\alpha = 1/2$). Кроз нумерички пример на рачунским вежбама ће се приказати колика је могућа уштеда у материјалу активног дела (бакру за израду намотаја и магнетних лимова за израду магнетног кола) када се уместо обичног трансформатора користи аутотрансформатор. Због уштеде материјала, за аутотрансформатор се користи и термин „трансформатор у штедном споју“ (*Spartrafo*).

Поред уштеде у материјалу за израду трансформатора, код аутотрансформатора за исту пролазну снагу биће мањи и губици (густина струје кроз проводнике и магнетна индукција у магнетном

колу ће бити сличне, а укупна запремина намотаја и магнетног кола код аутотрансформатора ће бити мање него код обичног трансформатора). Логична последица је да ће и степен искоришћења, рачунат у односу на пролазну снагу, бити већи код аутотрансформатора него код обичног трансформатора.

Уштеда материјала и смањење губитака су главна карактеристика аутотрансформатора, када се упореде са обичним трансформатором. Поред тога, постоје и друге разлике, које су од практичног интереса:

- губи се изолација између примарног и секундарног намотаја, који су код обичног трансформатора спрегнути путем магнетног поља, док код аутотрансформатора постоји и директна галванска веза
- постоји оштрији пренос пренапона који се преносе на нисконапонску у случају њихове појаве на високонапонској страни
- код аутотрансформатора су много мање реактансе расипања, што има две важне последице:
 - струје кратког споја су веће, самим тим већа су и механичка напрезања, због чега се мора ојачати механичка конструкција трансформатора
 - пад напона на трансформатору је мањи, што је погодно, поготову при старту великих асинхроних мотора

Аутотрансформатори се, чак и за врло велике снаге, израђују као трофазни, различитих спрега (пример спреге у звезду је дат на слици 10.13, а спреге у троугао на слици 10.14). За пример звезде са слике 10.13 потребан је и напон терцијера везан у троугао како би фазни напони били синусоидални.

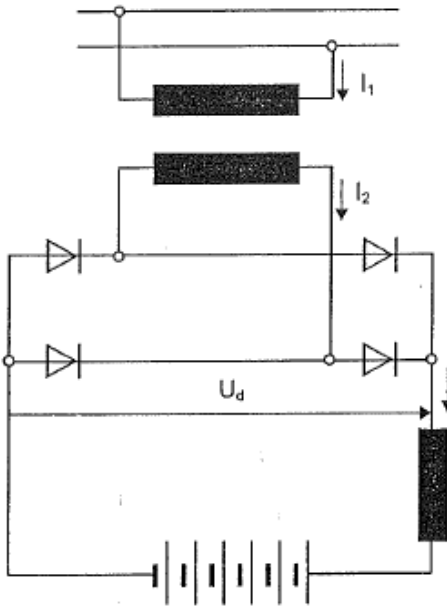
10.4. ТРАНСФОРМАТОРИ ЗА СТАТИЧКЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ПРЕТВАРАЧЕ

Заједничко за ову широку класу трансформатора је да се примењују у широком опсегу учестаности, па чак и када напони и струје нису простопериодичног облика. У неким случајевима се може десити да се појави и једносмерна компонента струје која доводи језгро у засићење.

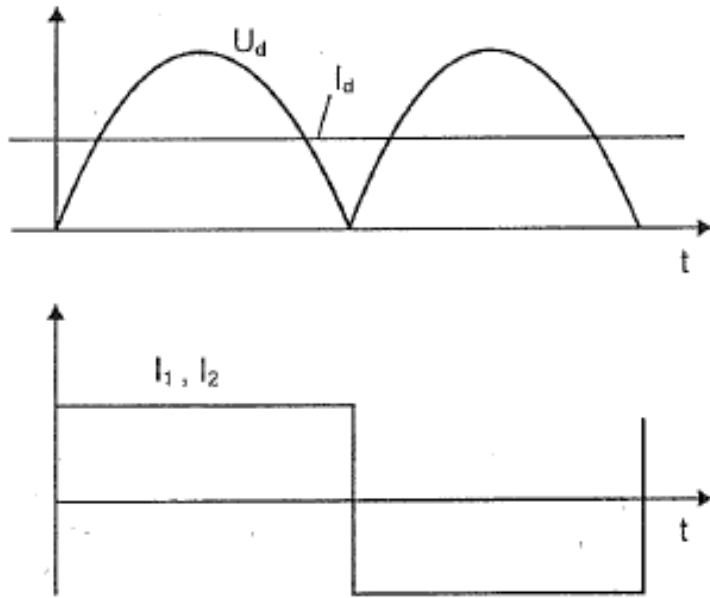
Конструкција и карактеристике трансформатора у уређајима са статичким енергетским претварачима (у уређајима енергетске електронике) је једна од области тренутног најинтензивнијег развоја у електроенергетици, поготову у области обновљивих извора енергије. Поред развоја нових технологија за полупроводничке материјале и компоненти израђеним од њих, веома је важно оптимизовати трансформатор, јер он значајно утиче на цену, габарит, тежину и степен искоришћења целокупног уређаја. У даљем тексту се приказују основне топологије полупроводничких претварача, како би се на елементарном примеру илустровали таласни облици струја и напона који се јављају на трансформаторима који се налазе у уређајима енергетске електронике.

Илустрација таласних облика који се разликује од простопериодичног ће се приказати за случај једнофазног исправљача и за случајеве инвертора (у две варијанте: струјни и напонски) који напајају оптерећење наизменичним напонам и струјом.

На слици 10.15 је приказан исправљач за пуњење акумулатора који у колу једносмерне струје има велику пригушницу ($L \rightarrow \infty$). Последица тога је да ће струја у једносмерном колу (I_d) имати приближно константну вредност, а у наизменичном делу, на улазу у исправљач, као и кроз секундар (I_2) и примар (I_1) облик четвртки. Напон у наизменичном делу има простопериодични облик, док је облик напона у једносмерном колу приказан на слици 10.6. На таласном облику напона на слици 10.6 није приказана комутација, на чије карактеристике значајно утиче реактанса расипања трансформатора.



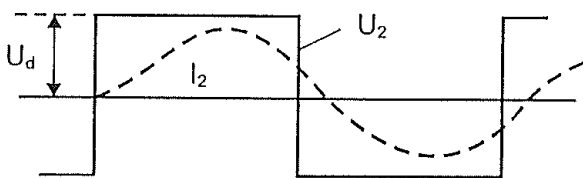
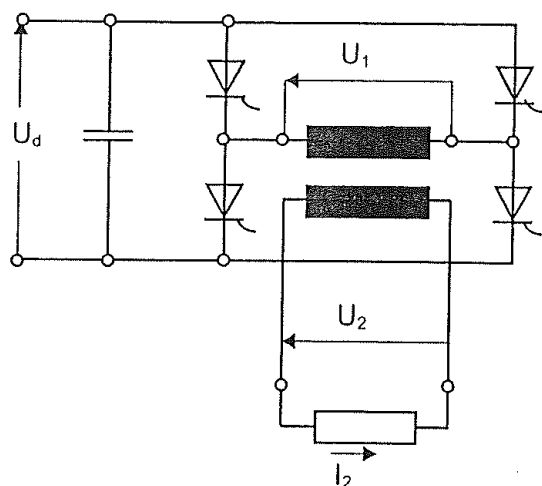
Слика 10.15



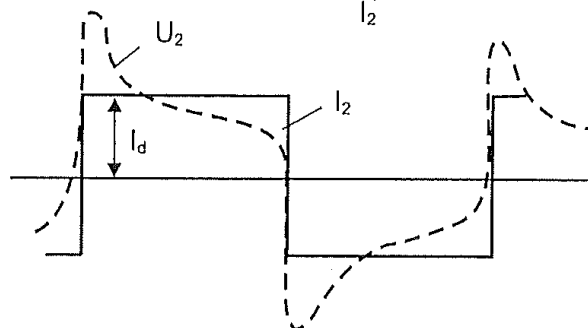
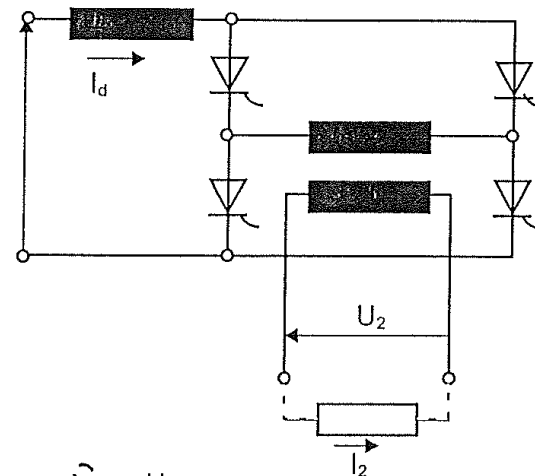
Слика 10.16

Виши хармоници струје трансформатора немају нарочито важан практични значај, осим што повећавају загревање намотаја и повећавају његову температуру у односу на ситуацију да је струја садржи само основни хармоник који преноси активну снагу. Ефективна вредност струје кроз трансформатор, приказана на слици 10.6, је $4 / \pi$ од основног хармоника струје.

На сликама 10.17 и 10.18 су дати таласни облици напона и струја за независне инверторе који раде у две ваијанте: напонски (слика 10.17) и струјни (слика 10,18). Код напонског инвертора наизменични напон има облик четвртки (U_2), а код струјног струја (I_2). Облик струје код напонског инвертора, као и облик напона код струјног инвертора, одређени њу типом оптерећења. Изобличење таласног облика напона има за последицу повећање губитака у гвожђу, као и још изобличенију струју магнећења него кад је напон простопериодичан.



Слика 10.17



Слика 10.18

Савремени инвертори су углавном базирани на ширинско импулсној модулацији, било да се ради о ситуацији: а) да је из инвертора потребно обезбедити простопериодичан напон или простопериодичну струју на импеданси пријемника, или б) да је управљањем инвертором потребно обезбедити инјектирање простопериодичне струје у мрежу на коју је прикључен излаз инвертора (случај какав се, на пример, има код инвертора којима се фотонапонски панели прикључују на мрежу - соларни инвертори). У оба случаја се управљање врши тако да се у кратком циклусу (реда величине 10 - 100 μ s) врши укључење и искључење транзистора, како би се струја одржала у задатим границама око референтне простопериодичне вредности. Последица је да се јављају високофреквентне струје и напони, који повећавају губитке, како оне у гвожђу, тако и оне у намотајима.

10.5. ТРАНСФОРМАТОРИ СА ИЗВОДИМА

У пракси се јавља потреба за подешавањем напона на секундару, што се може учинити променом преносног односа трансформатора, односно променом броја навојака једног намотаја. Примери оваквих ситуација су да пријемник електричне енергије захтева променљиви напон или да се мења напон у мрежи на коју је прикључен примар, па је потребно променити преносни однос трансформатора како би напон на секундару био близак номиналном.

10.5.1. ОБЛАСТ ПРИМЕНЕ

Најраспрострањенија примена трансформатора са изводима је у електроенергетским мрежама, како би се напон на месту напајања пријемника одржавао у дозвољеним границама. У великим електроенергетским мрежама се мења оптерећење, као и изворишне тачке електричне енергије

(термо електране, које углавном генеришу константну активну снагу, хидро електране, обновљиви извори електричне енергије (соларни генератори, ветро генератори), који су често дистрибуирани по електроенергетском систему и чије снага зависи од природних енергетских ресурса – сунца и ветра). Због падова напона на елементима мреже, напони у чвориштима мреже, укључујући и оне где је прикључена потрошња, се мењају, па се морају применити мере да се напон на месту потрошње одржи унутар дозвољених граница. Једно од класичних, једноставних и јефтених решења је да се мењају преносни односи трансформатора.

Као други карактеристичан случај где је потребно мењати напон променом преносног односа трансформатора су електролучне пећи, где је током технолошког поступка топљења и формурања легура потребно мењати напон напајања, како би се остварила потребна промена снаге загревања у широком границама.

10.5.2. МЕЊАЊЕ ИЗВОДА У БЕЗНАПОНСКОМ СТАЊУ И ПОД ОПТЕРЕЋЕЊЕМ

Изводи, а тиме и број навојака, преноси однос и напон на секундару се могу мењати у безнапонском стању или под оптерећењем, што је технички захтевније и скупље техничко решење, јер се струја не сме прекинути, нити се два суседна навојка смеју директно спојити (у том случају кроз њих би текла струја кратког споја – реализација промене извода под оптерећењем се пописује у следећем одељку 10.5.3.

Због тога се промена извода у безнапонском стању врши када је то могуће. То је случај, на пример, код поменутог случаја електролучних пећи, и то захваљујући великој термичкој инерцији шарже у пећи, која се неће охладити током неколико десетинама секунди, па и минута, што је довољно да се трансформатор искључи, извод промени у безнапонском стању и трансформатор поново укључи и настави са загревањем шарже новом вредношћу снаге загревања. Краткотрајна пауза у загревању нити угрожава технолошки процес (неће довести до стврдњавања шарже) нити практично утиче на продуктивност технолошког процеса.

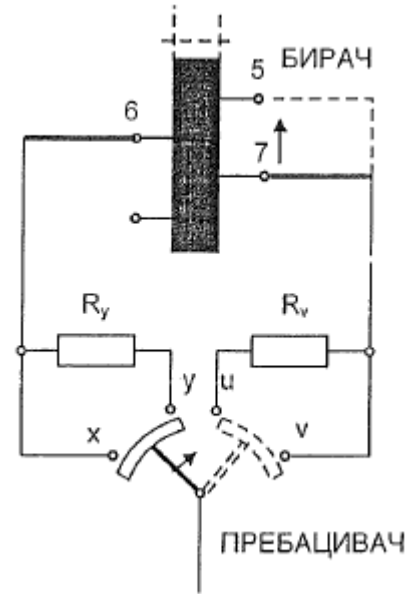
За разлику од овог примера, промена извода код трансформатора у електроенергетском систему се, осим у изузетним случајевима, врши под оптерећењем.

10.5.3. ТЕХНИКА МЕЊАЊА ИЗВОДА ПОД ОПТЕРЕЋЕЊЕМ

Током прелазног процеса промене извода, између два навојка или групе навојака који се укључују / искључују са остатка намотаја, умеће се отпорник или пригушница. Мана примене отпорника је што се на њему јављају губици енергије ($R I^2$), док је мана пригушнице да она подржава лук и отежава прекидање, јер ствара напон који је сразмеран брзини промене струје ($L di / dt$).

На слици 10.19 је приказана једна од техника пребацивања (некадашња компанија ASEA). Бирач извода је био у положају 7, сада је у положају 6 и треба га преbacити у положај 5 (то је крајње стање обележено испрекиданим линијама). Померање бирача се врши са два клизна контакта (са леве и десне стране), која се померају горе / доле. Редослед операција пребацивања са извода 6 на извод 5 је следећи:

- клизни контакт десног бирача, који је без оптерећења, се помера из 7 у 5
- ротациони пребачач се из положаја ху (његово почетно стање је било у х) се пребацује у уи; сада су оба извода 5 и 7 под напоном и међусобно повезана преко отпора $R_y + R_v$
- ротациони пребачач се из положаја уи пребацује у крајњи десни положај, тако да се веза са остатком намотаја прво остварује преко R_v , а затим директно



Слика 10.19

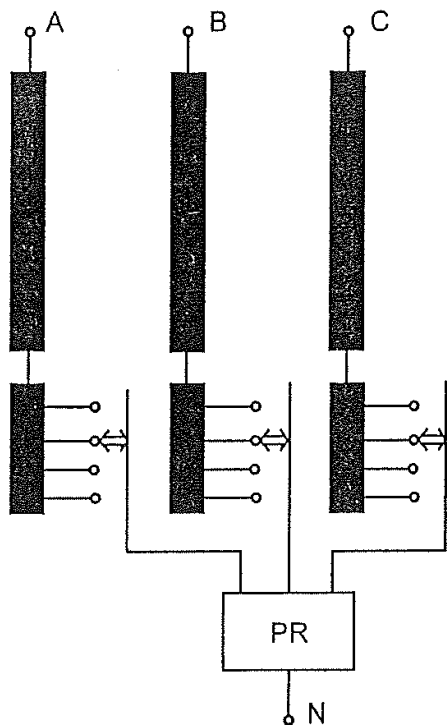
10.5.4. ПОЗИЦИЈА НАВОЈАКА ЗА РЕГУЛАЦИЈУ НАПОНА

Због мање струје коју је потребно "комутовати", навојци за промену преносног односа и подешавање напона се по правилу постављају у високонапонски намотај.

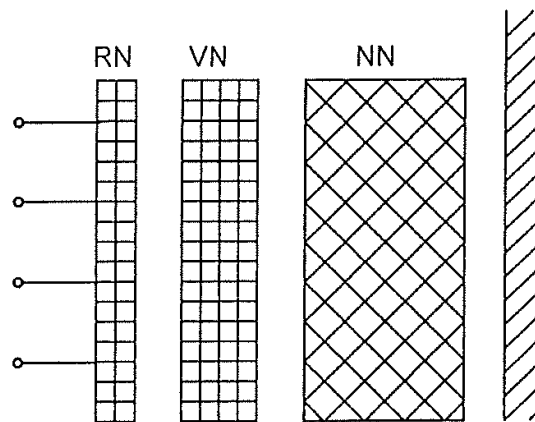
Следећа два критеријума која утичу на избор положаја регулационих навојака (навојака који се укључују / искључују да би се подесио напон) су: а) напонска напрезања, па самим тим и потреба изолација и б) утицај на расподелу магнетског поља, а тиме и на реактансу расипања и локалне додатне губитке.

Ако је спрега Y , најмања напонска напрезања се имају ако се регулациони навојци сместе у звездишту. Ово решење, са применом једног трофазног пребачача (PR) приказано је на слици 10.20. Поменимо и јасну чињеницу да је ефекат промене напона мањи ако се ови регулациони навојци сместе у звездиште аутотрансформатора јер се њиховим укључењем / искључењем мењају N_1 и N_2 .

Једно од често коришћених решења је да се регулациони навојци формирају у посебном цилиндру, који се распростире дуж читаве висине (у пракси се срећу и решења са два цилиндра, један за грубу и један за фину регулацију напона), како је то приказано на слици 10.21. Тиме се избегавају могуће појаве великих расутих вредности магнетног поља (пре свега велике радијалне компоненте поља, а тиме и великих локалних додатних губитака у намотају) ако се регулациони навојци поставе унутар намотаја, слично решењу на слици 10.20



Слика 10.20



Слика 10.21

10.5.5. ОПСЕГ РЕГУЛАЦИЈЕ

Оријентационо, опсег регулације за мање трансформаторе износи $\pm 5\%$, са корацима 2.5% (дакле -5% , -2.5% , 0 , 2.5% , 5%). За веће трансформаторе, опсег регулације је већи - оријентационо $\pm 15\%$, са корацима 1% , 1.5% или 2% .

НАПОМЕНА: Промена положаја регулационог извода утиче само на промену броја навојака примарног намотаја, тј. на промену преносног односа трансформатора, при чему је напон примара, наравно, увек једнак напону напајања. Примера ради, уколико је преносни однос дат као $10 \pm 2 \times 2.5\% / 0.4 \text{ kV}$, највећи напон секундара се има при минималном броју навојака на примару ($-2 \times 2.5\%$); тада је преносни однос трансформатора:

$$m_{\text{ново}} = \frac{10 \cdot (1 - 2 \times 0.025)}{0.4} = 23.75$$

па је, при номиналном напону напајања примара, напон празног хода секундара:

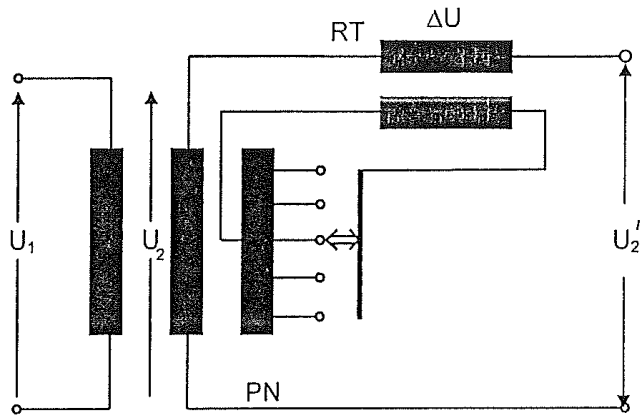
$$U_{02}^{\text{ново}} = \frac{U_1}{m_{\text{ново}}} = 0.421 \text{ kV}$$

За извод у неутралном положају напон празног хода секундара износи $U_{02} = 0.4 \text{ kV}$. Дакле, променом положаја регулационог отцеча мења се **напон празног хода секундара**.

10.6. ДОПУНСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ

Ови трансформатори се називају и редни трансформатори (*Booster Transformers*), по начину на који се везују у коло (слика 10.22). Сврха им је иста као трансформатора са изводима -

подешавање ("регулација") секундарног напона. Решење приказано на слици 10.22 смањује напонска напрезања у регулационом делу намотаја, а побољшана је и фоноћа регулације ($U_2' = U_2 + \Delta U$).



Слика 10.22

10.7. МЕРНИ ТРАНСФОРМАТОРИ

Мерни трансформатори се више изучавају у областима мерења, као и релејне заштите. Фокус у овом курсу су енергетски трансформатори, па ће се о мерним трансформаторима дати само основне информације.

10.7.1. НАПОНСКИ МЕРНИ ТРАНСФОРМАТОРИ

Сврха напонских мерних трансформатора је да што верније са што мањом грешком, пренесу амплитуду и фазу напона на примару на секундар, на који су повезани мерни инструменти или заштитни (релејни) уређаји. Из разматрања пада напона, извршених у поглављу 4., закључује се да су они мањи уколико су мањи отпор намотаја трансформатора и реактанса расипања трансформатора. Из тога следи да густина струје и расипање флуksа код напонских мерних трансформатора треба да буде што мање. Пад напона је мањи уколико је струја мања, односно уколико је оптерећење трансформатора мање. У вези са тим, а имајући у виду да је напонски мерни трансформатор оптерећен колима за мерење напона, који имају велику улазну импедансу, на вредност пада напона на примарном намотају утиче и вредност струје празног хода, због чега се за напонски мерни трансформатори не пројектују тако да магнетна индукција буде близу индукције засићења. Поред тог, користе се квалитетнији лимови, чиме се постиже да струја магнетне и активна компонента струје која је последица губитака у гвожђу, буду што мање.

Због наведене чињенице да струја секундара треба да буде мала како би напон био што тачније "преликан" са примара на секундар, треба напоменути да се на секундар прикључују волтметри или други уређаји за мерење напона, који имају велику улазну импедансу. Као карактеристика трансформатора се задаје његова максимална снага (количник квадрата номиналног напона на секундару и импедансе једног или више прикључених мерних уређаја), чиме се практично поставља ограничење и за струју, а тиме и гарантује да неће доћи до великог пада напона и да ће грешка "преликавања" напона остати у гарантованим границама (класи тачности).

10.7.2. СТРУЈНИ МЕРНИ ТРАНСФОРМАТОРИ

Сврха струјних мерних трансформатора је да што верније са што мањом грешком, пренесу амплитуду и фазу струје која протиче кроз примар на секундар, на који су повезани мерни инструменти или заштитни (релејни) уређаји. Основни постулат на коме се заснива рад струјних

мерних трансформатора је да су магнетобудне силе на примару и на секундару исте: $N_1 I_1 = N_2 I_2$, одакле се има $I_2 = (N_1 / N_2) I_1$. На основу познавања начина рада трансформатора, јасно је да струја магнетнећа представља главну сметњу за верно „пресликавање“ струје на примару, која се мери инструментима за мерење струје везаним на секундар.

Пошто се примар струјних мерних трансформатора везује редно у електроенергетску мрежу, његова улазна импеданса, гледано са примара, мора да буде мала. Другим речима, напон који струјни мерни трансформатор уноси у електроенергетску мрежу мора да буде мали. Због тога струјни мерни трансформатор ради у радној тачки блиској кратком споју - на секундар се прикључују амперметри или други уређаји за мерење струје, који имају малу улазну импедансу. Као карактеристика трансформатора се задаје његова максимална снага (производ квадрата номиналне струје на секундару и импедансе једног или више прикључених мерних уређаја). Тиме се гарантују мала вредност напона на примару, односно мали пад напона до кога у електроенергетској мрежи доводи прикључење струјног мерног трансформатора.

У погледу што вернијег преношења ефективне вредности и фазе струје на примару на секундар, битно је да струја магнетнећа буде што мања. То значи да се морају користити магнетни материјали високе пермеабилности и малих губитака, при чему се пројектовање врши тако да се радна тачка поставља на линеарном делу криве магнетнећа. Горе поменутом максималном импедансом повезаном на секундар, спречава се и повећање напона (самим тим и флукса и струје магнетнећа, и последичне грешке „у пресликавању“ струје примара на секундар), који се има при номиналној струји секундара. Класа струјног мерног трансформатора, карактерисана амплитудском и фазном грешком у преносу струје примара на секундар, мора остати у гарантованој вредности за све дефинисане дозвољене радне режиме трансформатора.

10.8. СУВИ ТРАНСФОРМАТОРИ

Мали трансформатори се по правилу израђују као суви, ваздухом хлађени, јер би било непрактично примењивати неки други (интензивнији) начин хлађења, иако би се на тај начин из постојећег магнетног кола и намотаја извукла већа снага трансформатора.

И за трансформаторе већих снага, напона и до 52 kV и снага 40 MVA, такође се користе ваздухом хлађени трансформатори. Код сувих трансформатора се користи изолација која може да достигне знатно више температуре; дозвољене температуре за поједине класе изолације су дате у табели у поглављу 5.

Предности сувих трансформатора су:

- применом одговарајућих материјала се могу начинити незапаљивим
- отпорни су на влагу
- не захтевају практично никакво одржавање
- не захтевају израду јаме за хаваријско изливање уља

Суви трансформатори могу бити без кућишта или са кућиштем. Код конструкције без кућишта постоје доступни делови под напоном. За такву конструкцију је карактеристично и да је већа вредност електромагнетског поља у околини трансформатора, као последица расутог флукса.

Литература

[1] <http://elektrotermija.etf.rs/Casovi5do7.ppt>