

Испит спремати по овом тексту.

Делове текста између маркера

и

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

7. ПАРАЛЕЛНИ РАД И КАРАКТЕРИСТИКЕ СПРЕГА ТРОФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРА

7. 1. ПАРАЛЕЛАН РАД

Паралелно везивање трансформатора може бити корисно у пракси из више разлога:

- 1) Повећање поузданости напајања - када дође до квара једног трансформатора, напајање пријемника се наставља са другог трансформатора ("редунданса"). Колики део пријемника ће се моћи напајати и колико дуго, зависи од снаге трансформатора који остаје у раду. Наравно, ако је снага трансформатора који остаје у раду већа или једнака потрошњи пријемника може се наставити трајно напајање свих пријемника.
- 2) Економичност, односно побољшање енергетске ефикасности на основу смањења губитака у експлоатацији - погледати одељак 4Б.4.
- 3) Раст потрошње електричне енергије пријемника који се напајају са трансформаторске станице може довести до тога да снага напојног трансформатора није довољна. Паралелно везивање другог трансформатора може бити економски погодније решење за овакву ситуацију него замена постојећег трансформатора трансформатором веће снаге.
- 4) Побољшање параметара квалитета електричне енергије, које се пре свега постиже на рачун смањења еквивалентне импедансе (уколико су два трансформатора повезана паралелно, еквивалентна импеданса је једнака импеданси паралелне везе импеданси кратког споја сваког од трансформатора). У извесним ситуацијама, паралелисањем трансформатора могу се побољшати параметри квалитета електричне енергије – смањити падови напона и хармонијска изобличења напона.

Технички критеријуми правилног рада два или више трансформатора у паралели су:

- 1) Да сатне карактеристике и веза трансформатора буду такви да не дође до реаговања заштите или чак хаварије,
- 2) Да нема непотребних губитака услед циркулационих струја,
- 3) Да они деле оптерећење сразмерно својим номиналним снагама.

Да би се остварили претходни захтеви, потребно је да трансформатори имају:

- 1) Сатни број и распоред фаза на секундару којим се остварује да су напони у повезаним крајевима на секундару сваког од трансформатора у фази
- 2) Исти преносни однос (номинални напони примара и секундара),
- 3) Релативни напон кратког споја.

Пре него што се уведе општа заменска шема паралелно везаних трансформатора, продискутоваће се заменска шема за један трансформатор.

Приступ А: Заменска шема се може цртати "по стубу", што је приступ у коме се прате флуксни обухвати, омски отпори и струја магнећења на једном стубу, тј. заменска шема се односи на физички стуб и намотаје на њему. Свођење импеданси са примара на секундар, и обрнуто, врши се преко односа трансформације (односа броја навојака на примару и секундару¹). Овакав приступ је приказан у одељку 3.3.

Приступ Б: Други приступ је да се заменска шема формира тако да су напони на страни примара и на страни секундара једнаки фазним напонима еквивалентне звезде. **Импеданса кратког споја се одређује из огледа кратког споја као количник фазног напона и линијске струје напајане (вишенAPONске) стране. Овај фазни напон је једнак линијском напону напајања подељеном са $\sqrt{3}$. Струја је једнака мереној (линијској) струји напајане стране. Отпорност кратког споја се одређује из једнакости измерене снаге губитака и троструког производа отпорности и мерене (линијске) струје напајане стране.**

Овај приступ „се везује“ за импедансе у заменској шеми одређене огледом кратког споја, односно импедансе које се „виде“ са мреже, и које се, у случају D спреге, разликују од „физичких импеданси“ по стубу.

Свођење импеданси се врши преко преносног односа трансформатора, одређеног као однос номиналног међуфазног напона вишенAPONске стране и номиналног међуфазног напона ниженапонске стране, или, што је исто, као однос еквивалентних фазних напона вишенAPONске и ниженапонске стране. Тако дефинисана заменска шема се односи на фазне напоне² и линијске струје. **Приступ "прати" сатне бројеве, односно у заменску шему се може увести и фазни померај фаза секундара у односу на фазе примара (a у односу на A , b у односу на B , c у односу на C), на начин објашњен у наставку текста.** Ова могућност се базира на чињеници да је сатни број дефинисан као фазни померај између одговарајућих еквивалентних фазних напона примара и секундара.

Сада ће бити показано да је код анализе паралелног рада погодно користити Приступ Б. На слици 7.1 приказана је принципска заменска шема (са изостављеном граном магнећења) два трофазна трансформатора који, по затварању прекидача на секундару, раде паралелно. У општем случају, преносни односи и сатни бројеви ова два трансформатора се међусобно разликују. Уводи се комплексни преносни однос:

$$\underline{m} = m \cdot e^{jk \cdot 30^\circ} \quad (7.1)$$

где је m скаларни преносни однос, а k сатни број трансформатора. Као што је већ речено, фазни напони назначени на слици су *еквивалентни фазни напони* \underline{U}_{afI} и \underline{U}_{afII} , тј. напони посматране фазе у односу на неутралну тачку (стварно звездиште у случају спреге звезда и сломљена звезда, фиктивно звездиште у случају спреге троугао). Са слике 7.1 је очигледно да ће се у случају да се сатни бројеви трансформатора разликују појавити струја кроз секундарне намотаје трансформатора чак и у случају да на секундар паралелно везаних трансформатора није

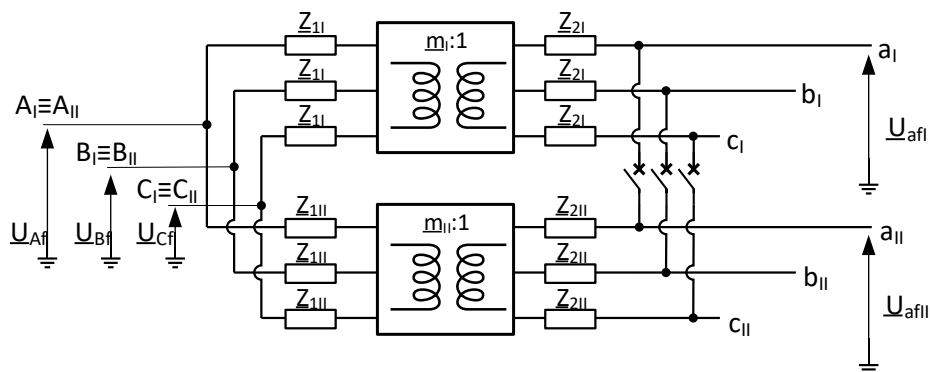
¹ Осим код спреге сломљена звезда

² Још једном се напомиње да према приступу Б појам „фазни напон“ представља напон између прикључка фазе и неутралне тачке (стварне (у случају Y) или фиктивне (у случају D)), тј. фазни напон еквивалентне звезде; у случају спреге Y, овај напон је једнак напону на намотају на стубу магнетног кола, тј. између почетка и краја намотаја; код спреге D, овај напон је $\sqrt{3}$ пута мањи од напона на намотају на стубу магнетног кола

прикључена импеданса. Ова циркулациона струја је непожељна, због чега је треба спречити, односно свести на најмању могућу меру. То се може учинити испуњењем услова

$$\underline{U}_{afI} = \underline{U}_{afII} \quad (7.2)$$

Наравно, исти услов треба да буде испуњен и за друге две фазе; имајући у виду појам сатног броја, нема потребе да се врши додатна анализа за друге две фазе. Када овај услов не би био испуњен, по затварању прекидача би се јавила струја кроз секундарне намотаје трансформатора, без обзира што нема оптерећења на нисконапонској страни. Ова струја би била једнака количнику комплексне разлике напона и збира импеданси кратког споја једног и другог трансформатора.



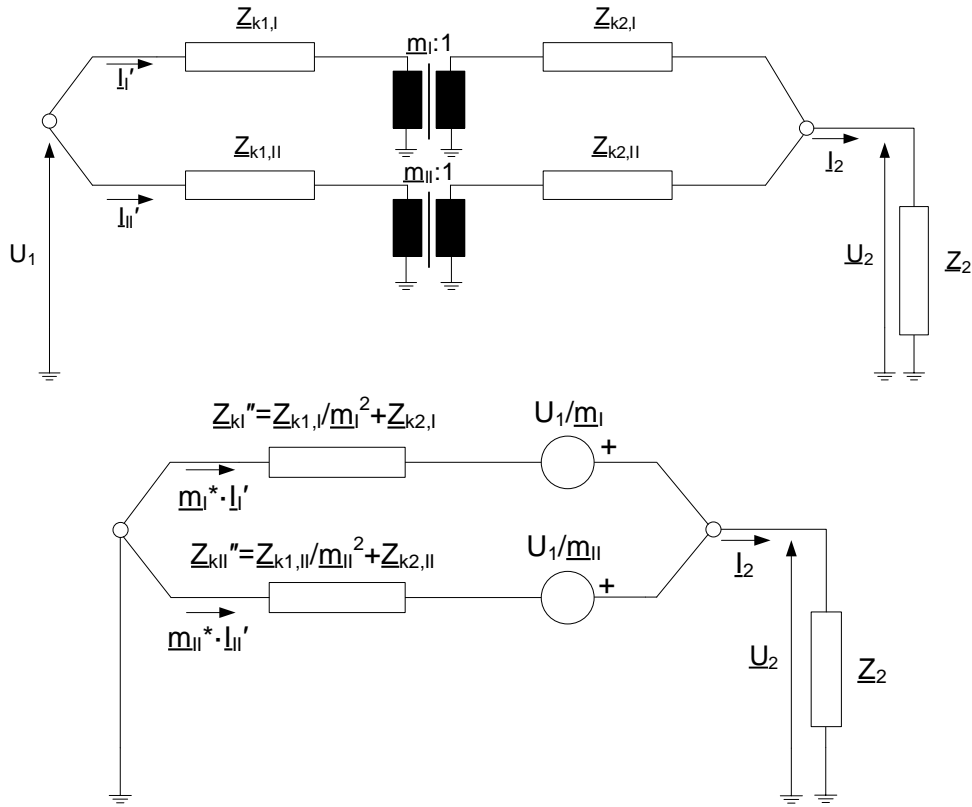
Слика 7.1 – Принципска шема два трофазна трансформатора који треба да раде паралелно

На основу слике 7.1 и претходног излагања јасно је да је услов који је потребно испунити како би два трофазна трансформатора радила паралелно да *еквивалентни фазни* напони празног хода секундара једног и другог трансформатора буду једнаки. Имајући у виду да је напон на примару трансформатора једнак, овај услов се своди на једнакост комплексних преносних односа:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{af0,I} &= \frac{\underline{U}_{Af}}{m_1} = \frac{\underline{U}_{Af}}{m_1 \cdot e^{jk_1 \cdot 30^\circ}} = \frac{\underline{U}_{Af}}{m_1} e^{-jk_1 \cdot 30^\circ} \\ \underline{U}_{af0,II} &= \frac{\underline{U}_{Af}}{m_{II}} = \frac{\underline{U}_{Af}}{m_{II} \cdot e^{jk_{II} \cdot 30^\circ}} = \frac{\underline{U}_{Af}}{m_{II}} e^{-jk_{II} \cdot 30^\circ} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \underline{U}_{af0,I} = \underline{U}_{af0,II} \Leftrightarrow \underline{m}_1 = \underline{m}_{II} \quad (7.3)$$

Дакле, неопходно је да комплексни преносни односи буду међусобно једнаки, тј. да оба трансформатора имају једнаке скаларне преносне односе и сатне бројеве.

На основу претходног разматрања, може се закључити да је за анализу паралелног рада погодније користити Приступ Б. Општа заменска шема прикладна за анализу паралелног рада два трофазна трансформатора која напајају оптерећење на ниском напону, при чему је занемарена грана магнетнења, приказана је на слици 7.2: горња шема садржи стварне еквивалентне фазне напоне и линијске струје на примару и на секундару, док су на доњој све вредности сведене на секундар. Ради једноставнијег записа, из индекса напона је изостављена ознака *f*, а из индекса струја ознака *lin*, али треба имати на уму да сви напони у еквивалентном колу представљају еквивалентне фазне вредности и да су све струје линијске.



Слика 7.2 - Заменска шема два паралелно везана оптерећена трансформатора: са идеалним трансформатором (горе) и сведено на секундар (доле)

У идеални трансформатор је укључен и сатни број, односно преносни односи \underline{m}_I и \underline{m}_{II} представљају комплексне бројеве. У шеми сведеној на секундар, напони примара су сведени на секундар користећи комплексни преносни однос³:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{1,I}'' &= \underline{U}_1 / \underline{m}_I = \underline{U}_1 / (m_I \cdot e^{j \cdot k_I \cdot 30^\circ}) = \frac{\underline{U}_1}{m_I} \cdot e^{-j \cdot k_I \cdot 30^\circ} \\ \underline{U}_{1,II}'' &= \underline{U}_1 / \underline{m}_{II} = \underline{U}_1 / (m_{II} \cdot e^{j \cdot k_{II} \cdot 30^\circ}) = \frac{\underline{U}_1}{m_{II}} \cdot e^{-j \cdot k_{II} \cdot 30^\circ} \end{aligned} \quad (7.4)$$

где су k_I и k_{II} сатни бројеви првог и другог трансформатора, респективно. Из услова одржавања комплексне снаге ($\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^*$) на примару и секундару проистиче да при свођењу струја треба користити *конјуговано комплексну вредност комплексног преносног односа*:

$$\begin{aligned} \underline{I}_I'' &= \underline{I}_I' \cdot \underline{m}_I^* = \underline{I}_I' \cdot (m_I \cdot e^{j \cdot k_I \cdot 30^\circ})^* = \underline{I}_I' \cdot m_I \cdot e^{-j \cdot k_I \cdot 30^\circ} \\ \underline{I}_{II}'' &= \underline{I}_{II}' \cdot \underline{m}_{II}^* = \underline{I}_{II}' \cdot (m_{II} \cdot e^{j \cdot k_{II} \cdot 30^\circ})^* = \underline{I}_{II}' \cdot m_{II} \cdot e^{-j \cdot k_{II} \cdot 30^\circ} \end{aligned} \quad (7.5)$$

³ Дати изрази и еквивалентно коло важе када су повезане истоимене фазе секундара (a_I - a_{II} , b_I - b_{II} , c_I - c_{II}) и примара (A_I - A_{II} , B_I - B_{II} , C_I - C_{II}). Трансформатори са различитим сатним бројевима могу радити паралелно без појаве струја изједначења ако се повежу разноимене фазе секундара (видети задатак 15 са часова рачунских вежби), али не уколико један трансформатор има парни, а други непарни сатни број (тада ће, без обзира на начин повезивања, постојати фазни померај од најмање 30°)

Као што је већ речено, код Приступа Б се користе вредности импеданси кратког споја које одговарају односу еквивалентних фазних напона и линијских струја. Сада ће се успоставити веза између ових импеданси и импеданси које се односе на *физичке фазне намотаје*, које се користе код Приступа А. Импедансе кратког споја у приступу А и у приступу Б су исте за случај спреге Y. То не важи у случају спреге троугао (D).

На слици 7.3 приказан је намотај трансформатора у спрези троугао (D) и еквивалентни намотај, који се користи у Приступу Б (Y). Еквивалентирање се мора извршити тако да се, посматрано са стране мреже, ништа не мења: потребно је да односи еквивалентних фазних напона и линијских струја буду исти у оба случаја. За импедансе намотаја у ова два случаја важи:

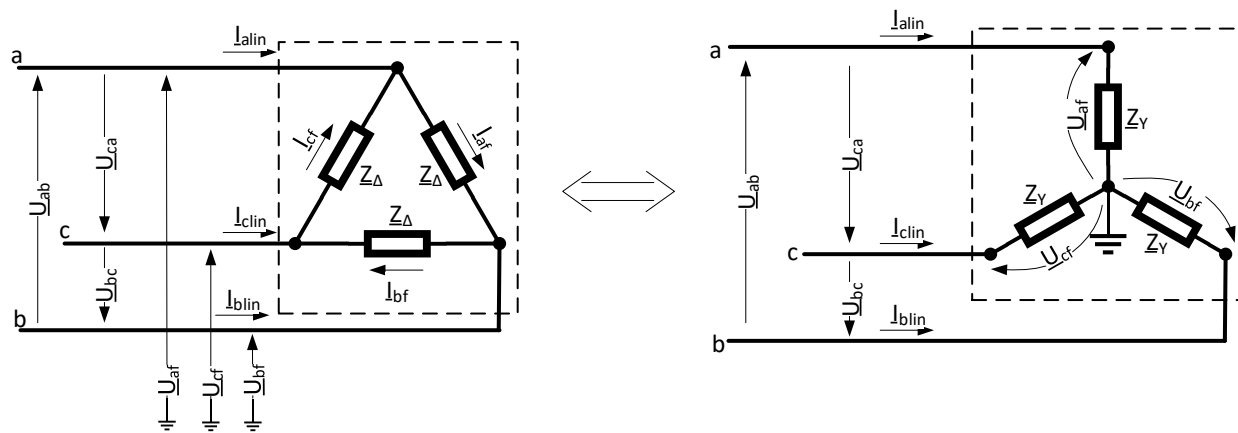
$$\underline{Z}_{\Delta} = \frac{U_{ab}}{I_{af}} = \frac{U_{lin}}{I_f} \cdot e^{j\varphi_k} \quad (7.6)$$

$$\underline{Z}_Y = \frac{U_{af}}{I_{alin}} = \frac{U_f}{I_{lin}} \cdot e^{j\varphi_k}$$

На основу везе између линијских и фазних вредности напона, као и линијских и фазних вредности струје, долази се до следеће везе између импеданси кратког споја које се користе у Приступу Б (Z_Y) и импеданси које се односе на физичке фазне намотаје по стубу (Z_{Δ}):

$$\left. \begin{aligned} U_f &= U_{lin} / \sqrt{3} \\ I_{lin} &= I_f \cdot \sqrt{3} \end{aligned} \right\} \Rightarrow Z_Y = \frac{U_f}{I_{lin}} \cdot e^{j\varphi_k} = \frac{U_{lin} / \sqrt{3}}{I_f \cdot \sqrt{3}} \cdot e^{j\varphi_k} = \frac{Z_{\Delta}}{3} \quad (7.7)$$

Добијени израз одговара еквивалентирању троугао-звезда добро познатом из основа електротехнике.



Слика 7.3 – Еквивалентирање спреге троугао еквивалентном звездом

Задатак: Два трансформатора са подацима⁴:

Трансформатор	I	II
Номинални напон примара	U_{1n}	U_{1n}
Номинални напон секундара	U_{02}^I	U_{02}^{II}
Номинална снага	S_{nI}	S_{nII}
Спрега	Dy5	Yd7
Физичка импеданса примара	$\underline{Z}_{k1,I}^{\Delta}$ ⁵	$\underline{Z}_{k1,II}$
Физичка импеданса секундара	$\underline{Z}_{k2,I}$	$\underline{Z}_{k2,II}^{\Delta}$

треба да раде паралелно. Међуфазни напон напајања примара је U_{1lin} . Нацртати еквивалентно коло, сведено на секундар, за анализу паралелног рада трансформатора.

Решење:

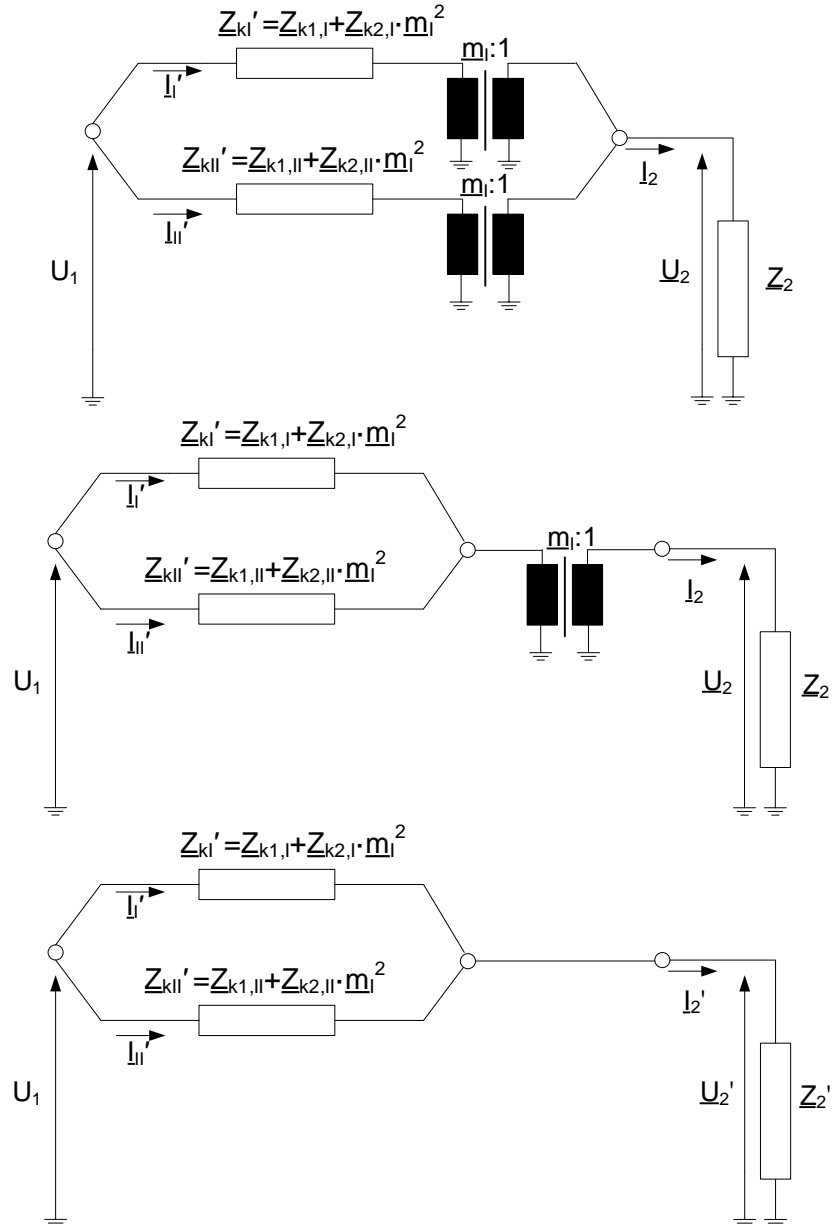
Општи облик еквивалентног кола, сведеног на секундар, за анализу паралелног рада приказан је на слици 7.2 (доле). Веза између величина у еквивалентном колу (лева страна израза (7.8)) и физичких импеданси (десна страна израза (7.8)), као и напона и преносних односа гласи:

$$\begin{aligned}
 U_1 &= U_{1n} / \sqrt{3} \\
 \underline{Z}_{k1,I} &= \underline{Z}_{k1,I}^{\Delta} / 3 \\
 \underline{Z}_{k2,I} &= \underline{Z}_{k2,I} \\
 \underline{Z}_{k1,II} &= \underline{Z}_{k1,II} \\
 \underline{Z}_{k2,II} &= \underline{Z}_{k2,II}^{\Delta} / 3 \\
 \underline{m}_1 &= \frac{U_{1f1}}{U_{2f1}} e^{j5 \cdot 30} = \frac{U_{1lin1}}{U_{2lin1}} e^{j5 \cdot 30} = \frac{U_{1n}}{U_{02}} e^{j5 \cdot 30} \\
 \underline{m}_1 &= \frac{U_{1n}}{U_{02}^I / \sqrt{3}} e^{j5 \cdot 30} \\
 \underline{m}_2 &= \frac{U_{1f2}}{U_{2f2}} e^{j7 \cdot 30} = \frac{U_{1lin2}}{U_{2lin2}} e^{j7 \cdot 30} = \frac{U_{1n}}{U_{02}} e^{j7 \cdot 30}
 \end{aligned} \tag{7.8}$$

⁴ Уколико није другачије речено, подразумева се да су сви напони дати у тексту задатка међуфазни и све струје линијске

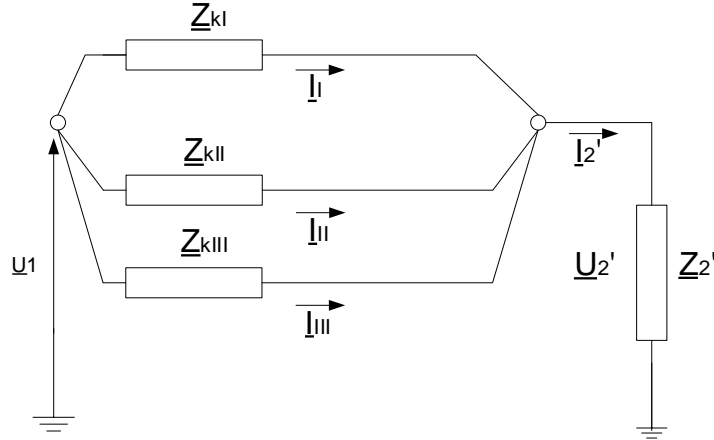
⁵ Експонентом Δ се означава да су импедансе дате за физички намотај (отпорност и реактанса расипања самог намотаја), те да их треба свести на спрегу звезда приликом конструисања шеме; импедансе намотаја у спреси Y већ имају одговарајуће вредности и не треба их мењати.

За "специјални случај" да трансформатори имају идентичне преносне односе, може се извршити следећа трансформација:



Слика 7.4 - Заменска шема два паралелно везана трансформатора истог преносног односа, сведена на напонски ниво примара, формирана полазећи од горње слике 7.2 ($Z_2' = Z_2 / m_1^2$)

Описани приступ се може применити за формирање заменске шеме произвољног броја паралелно везаних трансформатора. Заменска шема, сведена на примар, за три паралелно везана трансформатора, за "специјални случај" да су им идентични преносни односи, приказана је на слици 7.5 (Z_{kI} , Z_{kII} и Z_{kIII} представљају импедансе сведене на примар).



Слика 7.5 - Заменска шема три паралелно везана трансформатора истог преносног односа, сведена на напонски ниво примара

У даљем тексту се посматра општи случај да су различите називне снаге ($S_{nI} \neq S_{nII} \neq S_{nIII}$) и да су различите импедансе кратког споја ($Z_{kI} \neq Z_{kII} \neq Z_{kIII}$). Једноставности ради, како би се скратили математички изрази, без губитка суштине, сматраће се да су фазни углови све три импедансе кратког споја једнаке: $\varphi_{kI} = \varphi_{kII} = \varphi_{kIII}$. Ако се са Z_{ke} означи еквивалентна импеданса паралелно везане три импедансе кратког споја, може се написати:

$$\frac{1}{Z_{ke}} = \frac{1}{Z_{kI}} + \frac{1}{Z_{kII}} + \frac{1}{Z_{kIII}} \quad (7.9)$$

$$Z_{kI} I_I = Z_{kII} I_{II} = Z_{kIII} I_{III} = Z_{ke} I_2' \quad (7.10)$$

Пошто је напон на примару сва три трансформатора исти, расподела укупне снаге ($S = U_1 I_2' = |Z_{ke}| I_2'^2$) по појединачним трансформаторима (S_I , S_{II} и S_{III}) ће бити

$$S_I = U_1 I_I = U_1 \left| \frac{Z_{ke} I_2'}{Z_{kI}} \right| = U_1 I_2' \left| \frac{Z_{ke}}{Z_{kI}} \right| = S \left| \frac{Z_{ke}}{Z_{kI}} \right| \quad (7.11)$$

$$S_{II} = U_1 I_{II} = U_1 \left| \frac{Z_{ke} I_2'}{Z_{kII}} \right| = U_1 I_2' \left| \frac{Z_{ke}}{Z_{kII}} \right| = S \left| \frac{Z_{ke}}{Z_{kII}} \right| \quad (7.12)$$

$$S_{III} = U_1 I_{III} = U_1 \left| \frac{Z_{ke} I_2'}{Z_{kIII}} \right| = U_1 I_2' \left| \frac{Z_{ke}}{Z_{kIII}} \right| = S \left| \frac{Z_{ke}}{Z_{kIII}} \right| \quad (7.13)$$

Након што се свака од импеданси изрази преко релативног напона кратког споја израженог у процентима ($u_{k\%}$),

$$Z_k = \frac{U_1}{I_n} \frac{u_{k\%}}{100} \quad (7.14)$$

као и уважавањем наведене претпоставке да су фазни ставови напона кратког споја исти, долази се до следеће релације:

$$\frac{1}{Z_{ke}} = \frac{1}{Z_{kI}} + \frac{1}{Z_{kII}} + \frac{1}{Z_{kIII}} = \frac{100}{U_1} \left(\frac{I_{nI}}{u_{k\%I}} + \frac{I_{nII}}{u_{k\%II}} + \frac{I_{nIII}}{u_{k\%III}} \right) \quad (7.15)$$

$$\frac{1}{Z_{ke}} = \frac{1}{Z_{kI}} + \frac{1}{Z_{kII}} + \frac{1}{Z_{kIII}} = \frac{100}{U_1} \sum_{i=I}^{III} \frac{I_{ni}}{u_{k\%i}} \quad (7.16)$$

Уврштавањем (7.14) у (7.11) – (7.13) добија се

$$\frac{S_I}{S} = \frac{100 I_{nI}}{u_{kI\%} U_1} \frac{1}{100 \sum_{i=I}^{III} \left(\frac{I_{ni}}{u_{ki\%}} \right)} = \frac{S_{nI}}{u_{kI\%}} \frac{1}{\sum_{i=I}^{III} \left(\frac{S_{ni}}{u_{ki\%}} \right)} \quad (7.17)$$

$$\frac{S_{II}}{S} = \frac{100 I_{nII}}{u_{kII\%} U_1} \frac{1}{100 \sum_{i=I}^{III} \left(\frac{I_{ni}}{u_{ki\%}} \right)} = \frac{S_{nII}}{u_{kII\%}} \frac{1}{\sum_{i=I}^{III} \left(\frac{S_{ni}}{u_{ki\%}} \right)} \quad (7.18)$$

$$\frac{S_{III}}{S} = \frac{100 I_{nIII}}{u_{kIII\%} U_1} \frac{1}{100 \sum_{i=I}^{III} \left(\frac{I_{ni}}{u_{ki\%}} \right)} = \frac{S_{nIII}}{u_{kIII\%}} \frac{1}{\sum_{i=I}^{III} \left(\frac{S_{ni}}{u_{ki\%}} \right)} \quad (7.19)$$

У случају да су сви релативни напони кратког споја међу собом једнаки ($u_{kI} = u_{kII} = u_{kIII} = u_k$), има се ($i = I, II, III$)

$$\frac{S_i}{S} = \frac{S_{ni}}{u_{k\%}} \frac{1}{\frac{1}{u_{k\%}} \sum_{i=I}^{III} S_{ni}} = \frac{S_{ni}}{\sum_{i=I}^{III} S_{ni}} = \frac{S_{ni}}{S_{nuk}} \quad (7.20)$$

Дакле, да би трансформатори распоређивали снагу пропорционално својим номиналним снагама, потребно је да имају што сличније (исте) релативне напоне кратког споја. Оријентационо, вредности релативног напона кратког споја у пракси не треба да се разликују више од 10 % (овде су укључене и толеранције стварних у односу на пројектоване вредности напона кратког споја).

Шема приказана на слици 7.2 описује општи случај, па се решавањем скупа једначина које описују ову шему може одредити расподела оптерећења за било коју разлику у преносном односу и у релативном напону кратког споја трансформатора.

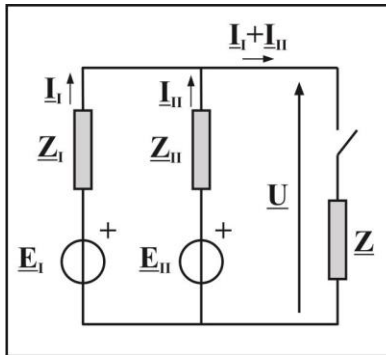
Пример (подаци из задатка 23 са вежби):

Два трансформатора у паралелном раду имају следеће податке:

ТРАНСФОРМАТОР	I	II
I_{2n} – номинална струја секундара	200 A	600 A
r_k – јединични омски отпор	0,02 r.j.	0,025 r.j.
X_k – јединична реактанса	0,05 r.j.	0,06 r.j.
U_{02} – напон празног хода секундара	245 V	240 V

Одредити заједнички напон, укупну струју и појединачне струје трансформатора ако прикључени потрошач има импедансу $Z = (0,25 + j0,1) \Omega$.

Заменска шема:



Задатак ће се решити коришћењем *Mathcad* програма:

Ulazni podaci:

$$I_{2n_I} := 200 \quad I_{2n_II} := 600$$

$$rK_I := 0.02 \quad rK_II := 0.025$$

$$xK_I := 0.05 \quad xK_II := 0.06$$

$$U_{02_I} := 245 \quad U_{02_II} := 240$$

$$Z_{opt} := 0.25 + i \cdot 0.1$$

Resenje:

$$ZK_I := (rK_I + i \cdot xK_I) \cdot \frac{U_{02_I}}{I_{2n_I}} = 0.025 + 0.061i$$

$$ZK_II := (rK_II + i \cdot xK_II) \cdot \frac{U_{02_II}}{I_{2n_II}} = 0.01 + 0.024i$$

$$E_I := U_{02_I} \quad E_{II} := U_{02_II}$$

$$I_I := 1 + 1 \cdot i \quad I_{II} := 1 + 1 \cdot i$$

Given

$$E_I - Z_{K_I} I_I = Z_{opt} (I_I + I_{II})$$

$$E_{II} - Z_{K_II} I_{II} = Z_{opt} (I_I + I_{II})$$

$$\text{Resenje} := \text{Find}(I_I, I_{II}) = \begin{pmatrix} 239.11 - 152.871i \\ 538.194 - 201.651i \end{pmatrix}$$

$$I_I := \text{Resenje}_0 = 239.11 - 152.871i \quad |I_I| = 283.802 \quad \arg(I_I) \cdot \frac{180}{\pi} = 45$$

$$I_{II} := \text{Resenje}_1 = 538.194 - 201.651i \quad |I_{II}| = 574.732 \quad \arg(I_{II}) \cdot \frac{180}{\pi} = -20.54$$

$$I_I + I_{II} = 777.305 - 354.523i \quad |I_I + I_{II}| = 854.335 \quad \arg(I_I + I_{II}) \cdot \frac{180}{\pi} = -24.517$$

$$U := Z_{opt} (I_I + I_{II}) = 229.778 - 10.9i \quad |U| = 230.037 \quad \arg(U) \cdot \frac{180}{\pi} = -2.716$$

Коментар: Наведеним *Mathcad* програмом се може доћи и до струја кроз секундарне намотаје трансформатора, напон и струју кроз оптерећење, а једноставним проширењем и до струја кроз примар оба трансформатора, као и струју ка мрежи, за произвољне спреге и односа трансформаторе два трансформатора.

7.2. КАРАКТЕРИСТИКЕ И ПРИМЕНА ПОЈЕДИНИХ СПРЕГА

У поглављу 3. је речено да је главна разлика између спрега то што се код спреге звезда (Y) могу користити и фазни (U_a, U_b, U_c) и линијски напони (U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}).

Поред ове разлике, спреге се карактеришу и другим практичним разликама:

- Понашање при несиметричним оптерећењима трансформатора – разматра се у поглављу 9
- Понашање при несиметричним кваровима (кратким спојевима и прекидима) – разматра се у поглављу 9
- Понашање при хармонијски изобличеним струјама, поготову хармоника струје чији је ред дељив са три (у случају симетрије по фазама важи да су хармоници струје чији је ред дељив са три исти у све три фазе трансформатора)
- Доступност неутралне тачке трансформатора, што утиче на могућност примене различитих система заштите од индиректног додира напона. До индиректног додира напона долази при кратком споју напојних водова са металним деловима опреме који у нормалном раду нису под напоном и који су уземљени. У највећем броју случајева, напајана (секундарна) страна је изведена као звезда, при чему је звездите уземљено, директно или преко отпорности или индуктивности. Уземљење секундара је битно за заштиту од индиректног додира напона опреме која се напаја са водова прикључених на секундар трансформатора, јер од њега зависи начин успостављања струја земљоспојних кварова. Од начина заштите и струје земљоспоја зависе напон индиректног додира и корака, као и вредности пренапона. Ово су кључни аспекти при пројектовању опреме у електроенергетским мрежама.

Једна од широко распрострањених спрега је троугао / уземљена звезда, и то у врло широком опсегу снага, како за снижење напона (у преносним и електродистрибутивним мрежама - Дун), тако и за повећање напона у електранама – од генератора ка преносној мрежи - dYN. Ова спрега има карактеристику да се у случају несиметрија струја на страни у, што је могућа појава у електродистрибутивним мрежама, оне не преносе на страну D. Насупрот овој спреси, спрега Yyn, која такође омогућава прикључак пријемника на фазни и линијски напон, има неповољна својства са становишта несиметрија. Опција која решава проблем несиметрија, али која захтева већу количину утрошеног материјала, представља примена спреге „сломљена звезда“ (z спреге).

Спрега Yzn је највећу примену нашла за напајање полупроводничких исправљача који се везују на секундар трансформатора, захваљујући ефекту редукције виших хармоника који протичу у мрежу (елиминишу се хармоници чији је ред дељив са 3), на коју је везан примар. Предност спреге Yzn у односу на Дун, која такође ефикасно спречава пролазак хармоника реда дељивог са 3, је што се у примару уопште не јављају ови хармоници струје (код спреге Дун трећи хармоник струје не пролази ка мрежи, али протиче кроз сва три намотаја примара). Наведени ефекат код спреге Yzn настаје због тога што по стубовима трансформатора нема генерисања магнетопобудне силе хармоника чији је ред дељив са три. Горе наведено важи за уобичајени случај у пракси да су струје хармоника реда дељивог са 3 исти у све три фазе.

7.2.1. ОСОБИНЕ ПОЈЕДИНИХ СПРЕГА ЗА НЕСИМЕТРИЧНЕ РАДНЕ РЕЖИМЕ И ЗА РАЗЛИЧИТЕ ХАРМОНИКЕ

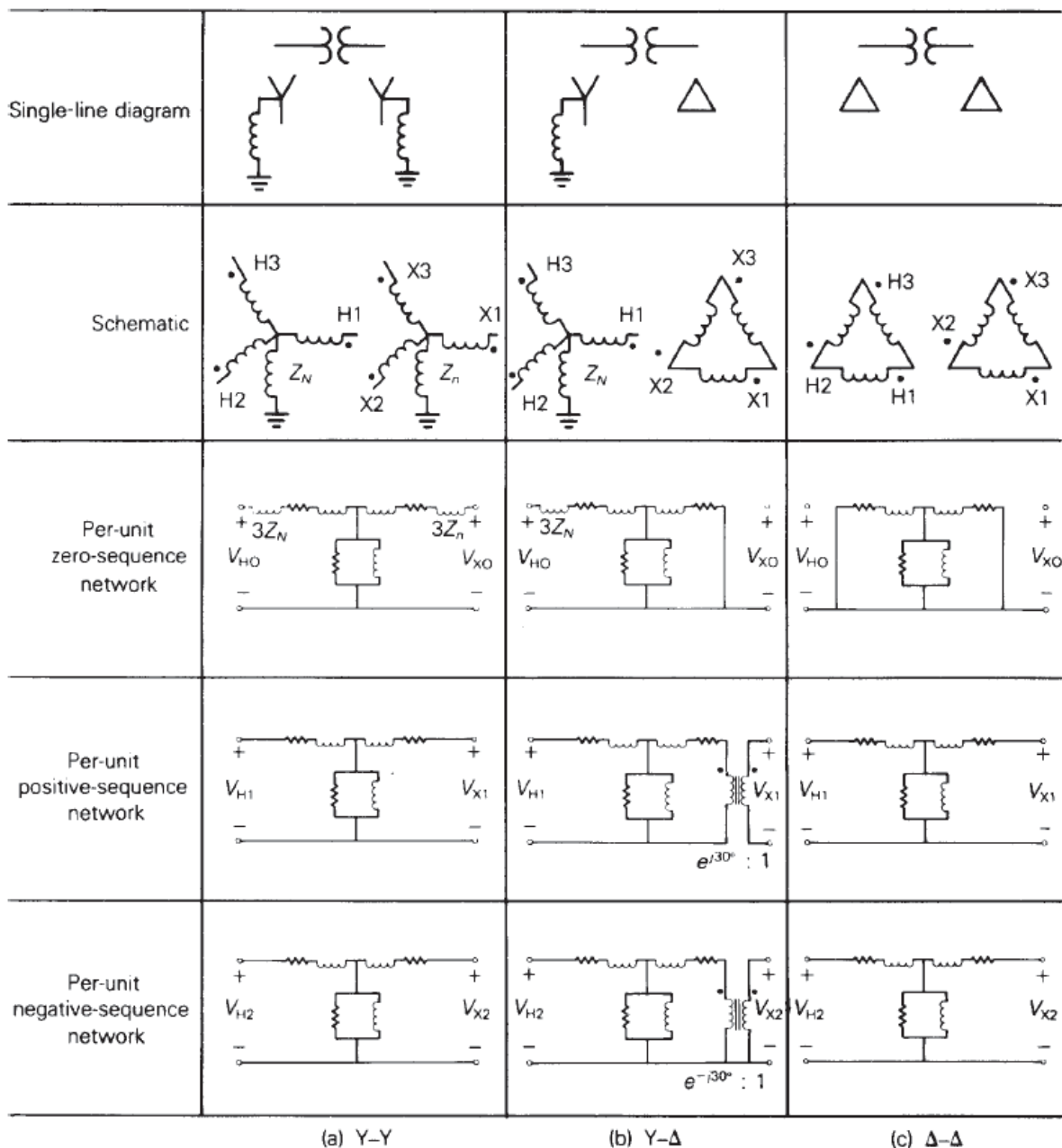
Трансформатор представља елемент електроенергетског система. У претходном делу излагања је разматрана заменска шема трансформатора, прво монофазног, а онда је уведен и сатни број који описује и фазни померај између фазе А високог напона и фазе а ниског напона, који зависи од спреге трофазног трансформатора. Увођење сатног броја је била практично једина промена у односу на заменску шему монофазног трансформатора.

Све до сада је важило за простопериодични симетрични режим рада. Под симетричним режимом рада се подразумева да су исте ефективне вредности напона по фазама и да су њихове вредности по фазама фазно померене за трећину периоде (120°). Исто важи и за струје. Сатни бројеви су дефинисани полазећи од директног система напона (напон у фази В касни за напоном у фази А, а напон у фази С касни за напоном фазе В).

Уколико се појави било каква несиметрија у трофазном систему, било за основни, било за више хармонике, појављују се нови технички аспекти, који у највећем броју случајева захтевају увођење додатне заменске шеме трансформатора. За анализу несиметричних режима се примењује теорија симетричних компоненти, која се детаљније објашњава у поглављу 9. Сваки елемент система се, за сваку од симетричних компоненти (директна, инверзна и нулта), приказује преко одговарајуће импедансе. За све компоненте електроенергетског система, осим за обртне машине, директна и инверзна импеданса су међусобно једнаке. За разлику од њих, нулта импеданса је у највећем броју случајева различита од директне / инверзне. Код трансформатора, нулта импеданса драстично зависи од типа спреге трансформатора. По теорији симетричних компоненти, разматрају се три система – директни (напон фазе В касни за напоном фазе А), инверзни (напон фазе В предњачи у односу на напон фазе А) и нулти (напони и струје у све три фазе су међусобно једнаки). Из овог основног постулата је јасно да могућност успостављања нулте компоненте струје зависи од спреге трансформатора (да ли је спрега троугао или звезда, при чему је у случају спреге у звезду од суштинског значаја да ли је уземљена неутрална тачка). На слици 7.6. (преузето из [1]) приказане су еквивалентне шеме у нултом, директном и инверзном систему за три различите спреге трофазног двонамотајног трансформатора. Слика 7.6. треба схватити као илустрацију модела трансформатора у директном, инверзном и нултом систему (нулте заменске шеме трансформатора за остале спреге су дате у поглављу 9). Трансформатор у нултом систему може да представља прекид електричне нулте заменске шеме електроенергетског система, са стране примара, са стране секундара или са обе стране, што ће бити приказано у поглављу 9. Несиметрични режими, посебно нулте заменске шеме трансформатора и за остале спреге, које нису приказане на слици 7.6., разматрају се детаљније у поглављу 9.

Слично заменским шемама за директни / инверзни систем и нулти систем, значајно се разликују заменске шеме за хармонике чији ред није дељив са три (она има исти облик као шема за директни / инверзни систем за основни хармоник) и за хармонике чији је ред дељив са три (она, у случају симетричних хармоника реда дељивога са три по фазама трофазног система, има исти облик као шема за нулти систем несиметричног система основног хармоника). Разлог за исти облик шеме за хармонике чији је ред дељив са три и за нулти систем за основни хармоник је што хармоници чији је ред дељив са три у све три фазе имају исти фазни став (објашњење је дато у следећем пасусу).

За симетричан директан систем, непарни хармоници реда $6k + 1$ (k је цео број) имају исто фазно кашњење између фаза као кашњење између фаза за основни хармоник: $((6k + 1) 120^\circ = (2k) 360^\circ + 120^\circ$ (напон $(6k + 1)$ -ог хармоника фазе В касни за 120° за напоном $(6k + 1)$ -ог хармоника фазе А), док непарни хармоници реда $(6k - 1)$ имају исто фазно кашњење између фаза као кашњење између фаза за основни хармоник, али супротног знака $((6k - 1) 120^\circ = (2k) 360^\circ - 120^\circ$ (напон $(6k - 1)$ -ог хармоника фазе В предњачи за 120° у односу на напон $(6k - 1)$ -ог хармоника фазе А). Трипли хармоници: $3k$ (k је цео број) имају исти фазни став у све три фазе $(3k) 120^\circ = k 360^\circ$.

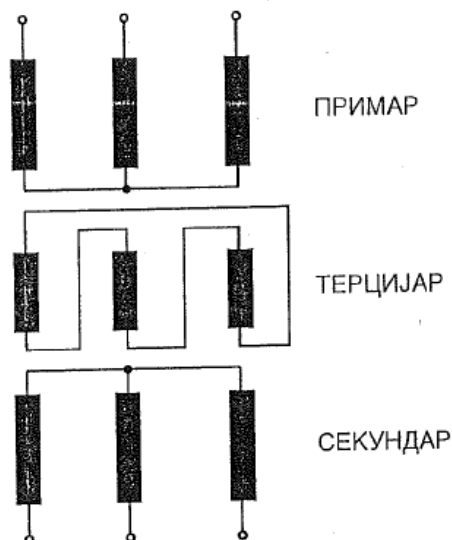


Слика 7.6. – Еквивалентне шеме трансформатора у нултом, директном и инверзном систему, за неке од спрега, при уземљеној неутралној тачки када је намотај спрегнут у звезду

У поглављу 3. је дискутована спрега Y_{zn} (слика 3.23). Већ је речено да се спрега примењује за напајање полупроводничких исправљача, због редукције виших хармоника који протичу у мрежу из које се исправљачи напајају. Ако су трипли хармоници струје које ствара исправљач прикључен на секундар исти у све три фазе секундара, трипли хармоници магнетопобудне силе (МПС) на сваком од стубова су једнаки нули (стуб a_1 – МПС у половини намотаја кроз који протиче струја кроз фазу а минус МПС у половини намотаја кроз који протиче струја кроз фазу b, стуб a_2 – МПС у половини намотаја кроз који протиче струја кроз фазу b минус МПС у половини намотаја кроз

који протиче струја кроз фазу с, стуб а3 – МПС у половини намотаја кроз који протиче струја кроз фазу с минус МПС у половини намотаја кроз који протиче струја кроз фазу а). У складу са претходно наведеним, реактанса на коју наилази струја триплх хармоника кроз страну z једнака је реактанси расипања на z страни трансформатора.

Поменуто је и да је опционо решење примени спреге Yzn примена спреге Dyn – за подразумевано симетрично оптерећење по фазама, трећи хармоници струје имају исту вредност у све три фазе. Уколико је спрега на примару троугао (D спрега), трећи хармоник струје који настаје као резултат нелинеарног оптерећења на секундару неће протичати у мрежу, већ ће се затворити у намотајима примара везаним у троугао. Исти ефекат спречавања продора трећег хармоника у мрежу може се постићи и додавањем терцијера (трећи намотај) спрегнутог у троугао (d спрега) (слика 7.7). Терцијерни намотај може бити потпуно без оптерећења; у том случају кроз њега би протицала само струја трећег хармоника. Исто важи и за случај да се у струји ка исправљачу појави нулта компонента струје – и ова нулта струја би се затворила у намотајима терцијера, односно не би протицала ка мрежи.

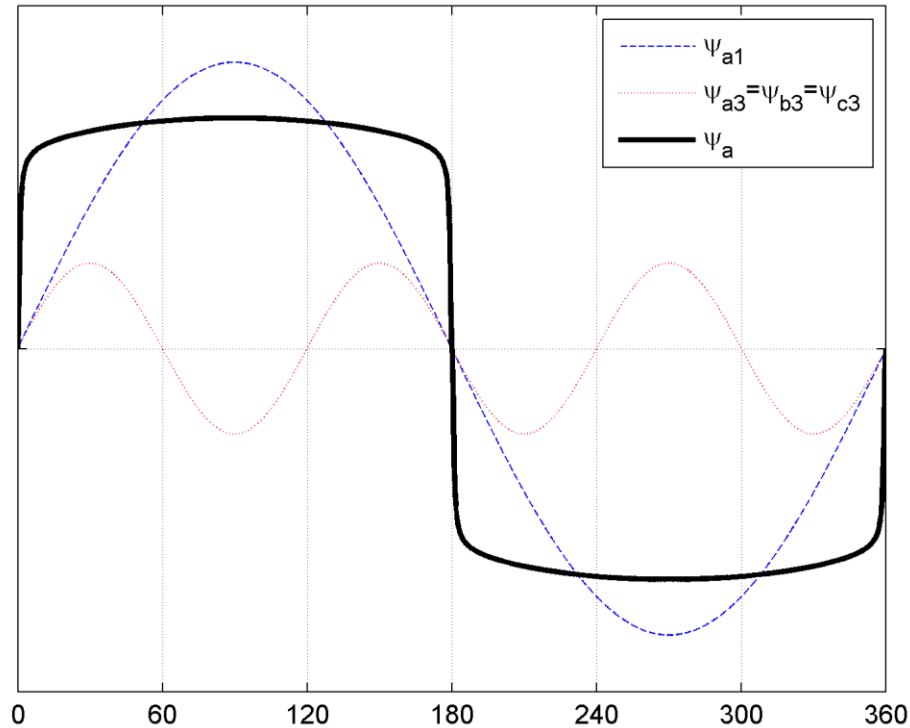


Слика 7.7. Елиминација триплх хармоника помоћу наменског намотаја терцијера

7.2.2. ТАЛАСНИ ОБЛИК СТРУЈЕ МАГНЕЋЕЊА И ПОТЕНЦИЈАЛНО ИЗОБЛИЧЕЊЕ НАПОНА КОД СПРЕГЕ Yy

У случају спреге Y на напајаној страни трансформатора, при чему звездиште није повезано на нулти проводник или уземљење, не могу се успоставити струје трећег хармоника (опет важи претпоставка да су вредности струје трећег хармоника исте у све три фазе). Посматрајмо случај да се на намотаје примара, између прикључка на сваку од фаза и земље доводе симетрични трофазни напони. Очекује се да би флуксевии по фази такође бити простопериодичан и симетрични. Са криве магнећења $B = f(H)$ долази се до закључка да магнетопобудна сила, односно струја магнећења, мора да садржи трећи хармоник како би се остварила простопериодична промена флукса (погледати поглавље 2.2.1). Претпоставимо, ради поједностављења разматрања, да би струја магнећења морала да садржи само основни и трећи хармоник. У случају спреге Y, међутим, трећи хармоник струје се не може затворити, из објашњених разлога. Замислимо да је у том случају струја трансформатора простопериодична. Зависност између струје и флукса је

дефинисана нелинеарном карактеристиком магнећења; ако је струја простопериодична, а магнетско коло у засићењу, таласни облик флукса мора бити изобличен, тј. мора садржати више хармонике. На слици 7.8. је приказана наведена ситуација. На слици су приказани флуксеве на стубу фазе А, и то основни хармоник, трећи хармоник (он је исти у све три фазе, односно на сва три стуба) и укупни флукс.

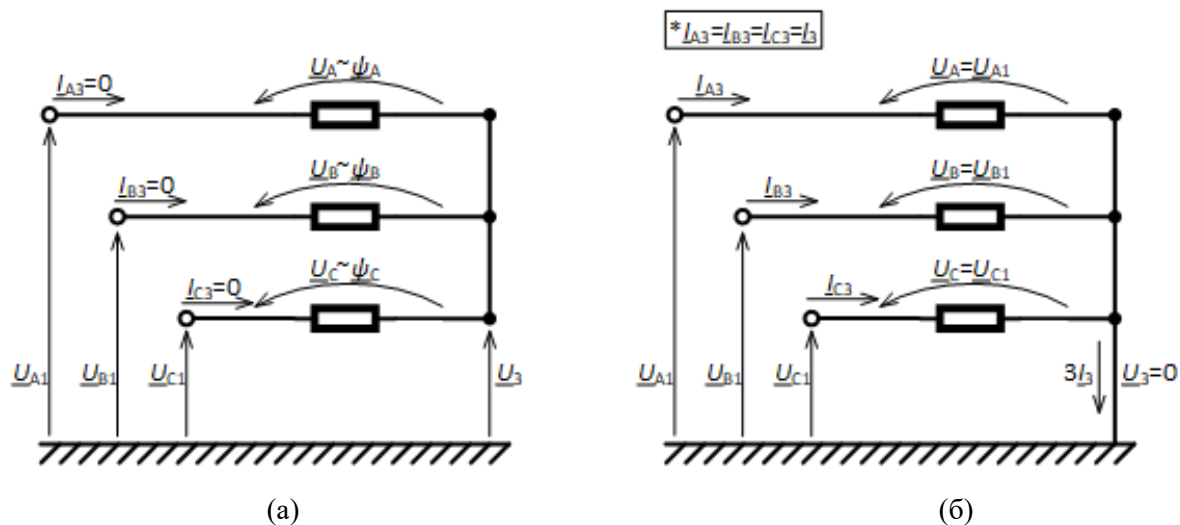


Слика 7.8 Таласни облик флукса на стубу фазе А (укупни, 1.-и и 3.-и хармоник флукса) за случај спреге Y на примару

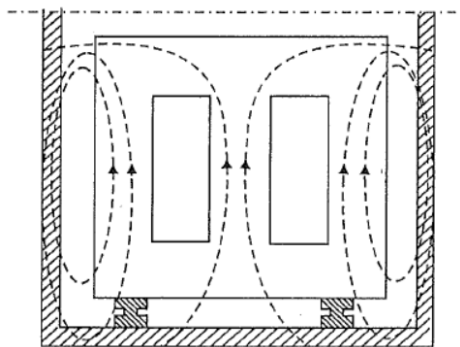
Поставља се питање како је могуће да су флуксеве изобличени, када је напон напајања између прикључка намотаја и земље простопериодичан; имајући у виду да је $\psi = \int u dt$, простопериодичан напон треба да резултује простопериодичним флуksom. Као што се може видети са слике 7.9 (а), напони између прикључка намотаја и земље јесу простопериодични, али у односу на „земљу“, тј. у односу нулти референтни потенцијал. Са друге стране, напон неутралне тачке трансформатора није фиксан, јер неутрална тачка није уземљена, тако да се може наћи на било ком потенцијалу. У случају када се јави засићење магнетског кола, долази до изобличења флуkseва, тако да напони **између крајева сваког од намотаја** постају изобличени, тј. садрже трећи хармоник. Фазни став трећег хармоника напона између крајева сваког од намотаја у свакој од фаза је исти јер су напони основног хармоника напона на крајевима трансформатора померени за 120° . С обзиром да је трећи хармоник напона прикљученог на мрежу и земље једнак нули, постојаће трећи хармоник напона између изоловане неутралне тачке трансформатора и земље, односно појављује се напон између неутралне тачке трансформатора и земље. Због претходно изложеног, спрега Y на примару није добро решење, па је ова спрега у неким земљама и забрањена.

Због једновремености и једнакости трећих хармоника флукса кроз стубове, њихов векторски збир, тј. збир њихових тренутних вредности, није једнак нули, тако да се резултујући флукс, једнак трострукој вредности флукса кроз један стуб, мора затварати ван магнетног кола, кроз ваздух,

челичне елементе суда и друге конструкционе делове трансформатора, стварајући додатне губитке (слика 7.10).



Слика 7.9 Струје и напони примара за случај спреге: (а) Y и (б) YN



Слика 7.10 Путања флукса трећег хармоника у језгру за спрегу неуземљена звезда

Код трансформатора на чијем је примару спрега уземљена звезда (YN) има се потпуно другачија ситуација, односно претходно описани проблем не постоји. Код спреге YN се могу успоставити струје трећег хармоника у намотајима (њихов збир се затвара кроз неутрални проводник – видети слику 7.9 (б)), односно може се успоставити струја магнећења, таласног облика дефинисаног кривом магнећења, потребна за формирање простопериодичних флуксава у стубовима трансформатора, који одговарају простопериодичном напону између крајева фазних намотаја (краја прикљученог на мрежу и звездешта).

Литература

[1] J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, Thomas J. Overbye: "POWER SYSTEM ANALYSIS AND DESIGN, Fifth Edition, Cengage Learning, 2011., ISBN-13: 978-1-111-42579-1 <http://s1.downloadmienphi.net/file/downloadfile6/192/1385298.pdf>