

Испит спремати по овом тексту.

Делове текста између маркера

и

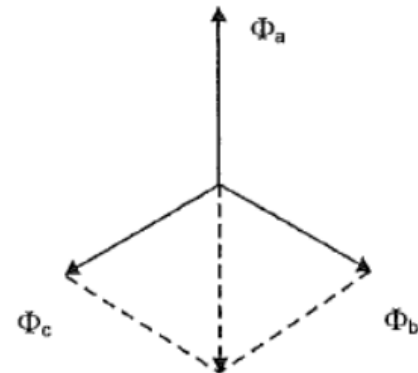
прочитати информативно (из тог дела градива се неће постављати питања на испиту)

7. ТРОФАЗНИ ТРАНСФОРМАТОРИ – СПРЕГЕ И ПАРАЛЕЛНИ РАД

7.1. ТРОФАЗНИ ТРАНСФОРМАТОРИ

У одељку 3.4. је дискутована заменска шема за трофазни трансформатор, полазећи од модела намотаја примара и секундара на сваком од стубова. Модел по стубу је идентичан моделу за основни случај монофазног трансформатора. Прикључци на два краја једног и другог намотаја се повезују са прикључцима на мрежу / оптерећење. Овакав модел је практично идентичан са оним који би се имао када би се имала три монофазна трансформатора, која се прикључују на трофазне напоне / оптерећење на једној и на другој напонској страни трансформатора.

Примена конструкције трофазног трансформатора у трофазним системима, уместо да се користе три монофазна трансформатора, представља економично решење. Може се рећи да се основа ниже цене трофазног трансформатора заснива на чињеници да је векторски збир магнетних флуксева по фазама једнак нули ($\underline{\Phi}_a + \underline{\Phi}_b + \underline{\Phi}_c = 0$, слика 7.1), што је генерална одлика свих електричних величина у уравнотеженим трофазним системима. "Поништавање флуksа" (векторски збир флуксева по фазама једнак нули) илустровано је у поглављу 2 (слика 2.3), због чега може да се „скрати“ магнетно коло само до тачке сустицања три фазе, односно не мора да се формира затворена контура магнетног кола за сваку фазу, што је случај када би се спрегнула три монофазна трансформатора.

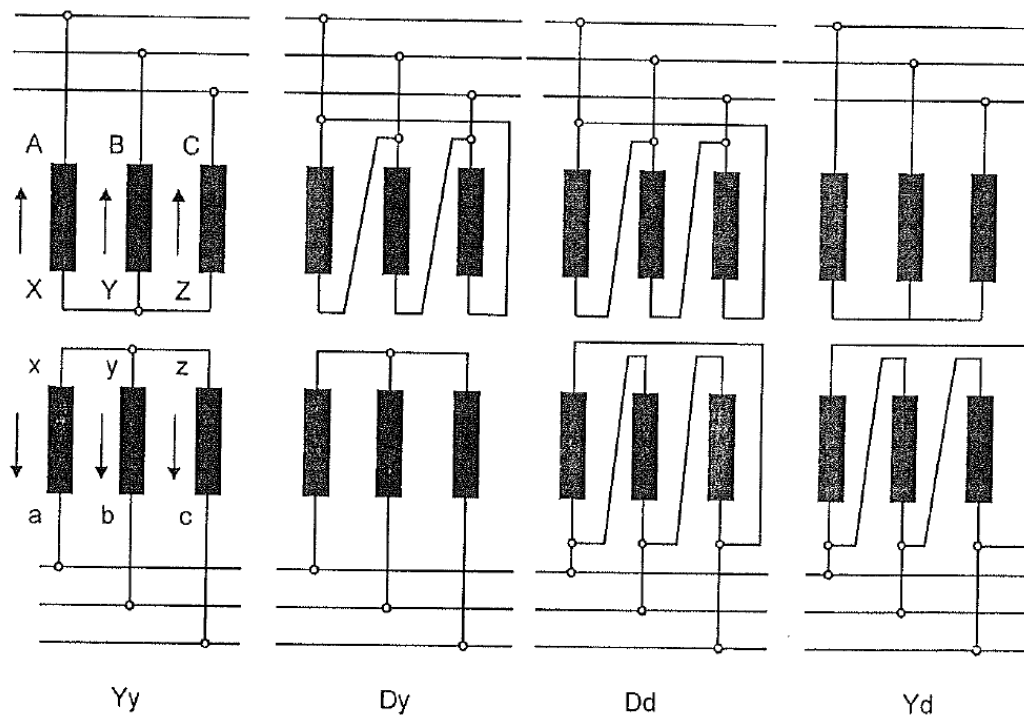


Слика 7.1

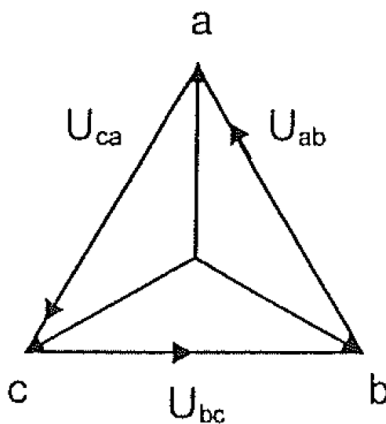
Као што ће се видети, ситуација није увек тако једноставна, јер се у пракси јављају и несиметрични радни режими, када је $\underline{\Phi}_a + \underline{\Phi}_b + \underline{\Phi}_c \neq 0$, због чега се конструкција трофазног трансформатора са три стуба у једној равни мора неће понашати као три монофазна трансформатора.

7.2. СПРЕЗАЊЕ ТРОФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРА

Три намотаја једне и друге напонске стране трансформатора се, као и намотаји обртних машина, или импедансе било ког електричног оптерећења, могу везати у звезду (ознака Y) / троугао (ознака D). Избор спреге на примару и на секундару се може вршити потпуно независно, односно не постоји међусобна условљеност. Спрега вишег напона се означава великим словом, а нижег напона малим словом. Примера ради, на слици 7.2 приказане су све спреге / комбинације горе поменутих спрега Yy , Dy , Dd , Yd .



Слика 7.2



Слика 7.3

7.2.1. ПРИМЕНА ПОЈЕДИНИХ СПРЕГА

Главна разлика између спрега је 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}). Када је изведен прикључак за звездите (неутралну тачку), ознаци спреге се додаје и слово N , односно n .

Пред ове разлике, спреге се карактеришу и другим разликама битним за праксу, као што су:

- 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 постојању хармонијски изобличених струја, поготову хармоника струје чији је ред дељив са три (у случају симетрије по фазама важи да су трећи хармоници струје у све три фазе трансформатора исти)
- Доступност неутралне тачке трансформатора, што утиче на могућност примене различитих система заштите од индиректног додира напона при кратком споју напојних водова са деловима који у нормалном раду нису под напоном. У највећем броју случајева, напајана (секундарна) страна је изведена као звезда, при чему је звездите уземљено, директно или преко отпорности или индуктивности.

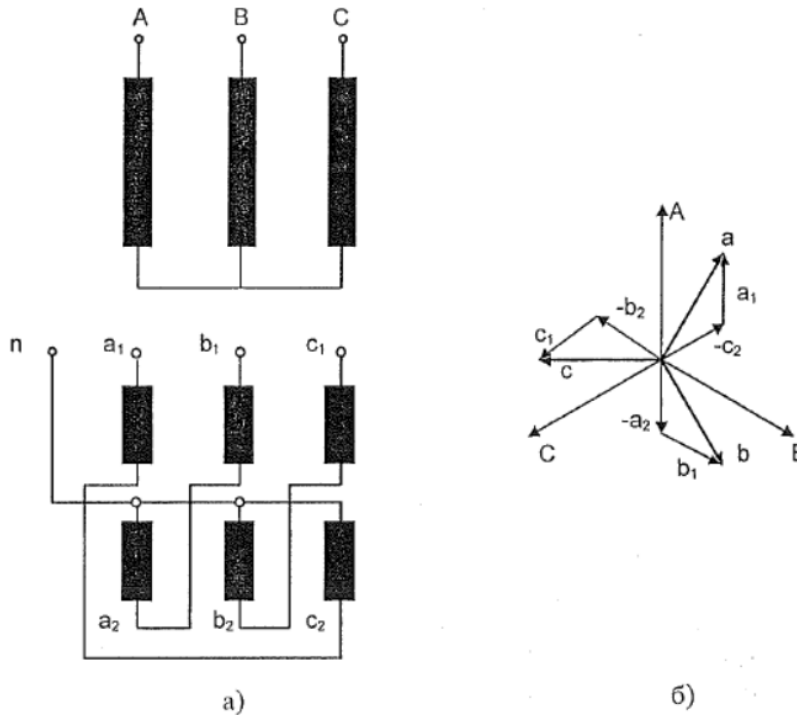
Једна од широко распрострањених спрега је троугао / уземљена звезда, и то у врло широком опсегу снага, како за снижење напона (у преносним и електродистрибутивним мрежама - Dyn), тако и за повећање напона у електранама – од генератора ка преносној мрежи - dYN . Ова спрега има карактеристику да се у случају несиметрија струја, што је могућа појава у електродистрибутивним мрежама, не јављају велике несиметрије напона. Насупрот овој спрези, спрега Y_{un} , 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). Опис z спреге је дат у наставку текста.

За спрегу Y_d би се могло рећи да је карактеристична за напајање трофазних пријемника, што је случај који се среће у индустријским постројењима, за разлику од електродистрибутивне мреже из које се напаја широка стамбена и комерцијална потрошња.

Спрега Y_{zn} је приказана на слици 7.4 а), а њен фазорски дијаграм на слици 7.4 б): напон фазе a (између прикључка $a1$ и n) је једнак

$$\underline{U}_a = \underline{U}_{a1} - \underline{U}_{c2} \quad (7.1)$$

$$U_a = 2 U_{a1} \cos 30^\circ = 1.732 U_{a1} \quad (7.2)$$



Слика 7.4

Да је спрега на секундару била звезда (тада би делови намотаја на истом стубу (a_1 и a_2 , b_1 и b_2 , c_1 и c_2) били везани на ред), напон би био

$$U_a = 2 U_{a1} \quad (7.3)$$

Другим речима, за остварење исте вредности напона, у случају примене спреге Y_{zn} потребно је намотати $2 / 1.732 = 1.15$ пута више навојака него што би било потребно у случају спреге Y_{yn} . Спрега Y_{zn} 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 Y_{zn} у односу на Дуп, која такође ефикасно спречава пролазак хармоника реда дељивог са 3, је што се у примару уопште не јављају ови хармоници струје (код спреге Дуп трећи хармоник струје кроз сва три намотаја примара је исти и нема протицања ових хармоника ка мрежи).

7.2.2. ФАЗНИ СТАВОВИ ИЗМЕЂУ СЕКУНДАРНИХ И ПРИМАРНИХ НАПОНА И ГРУПЕ СПРЕГА

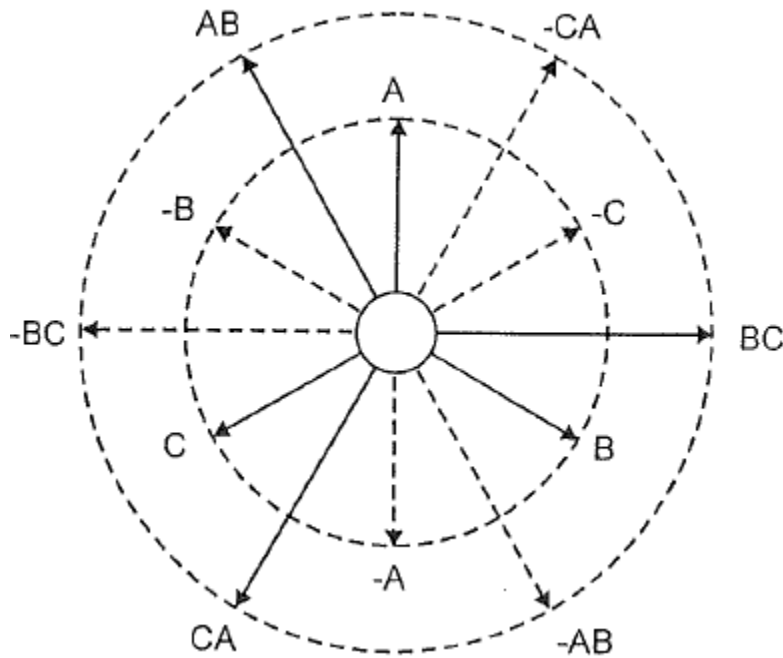
У тексту који следи ће се користити ознаке које важе за случај да је напон примара виши од напона секундара.

Са слике 7.4 б) се види да фазни напон фазе a на секундару (\underline{U}_a) фазно заостаје за 30° у односу на фазни напон фазе A на примару (\underline{U}_A). Исто фазно заостајање важи и за фазне напоне на фазама B и C , као и за све линијске напоне (AB / ab , BC / bc , CA / ca).

У зависности од типа спреге (слика 7.2), разликују се помераји између истих фазора напона (фазних A / a , B / b , C / c или линијских AB / ab , BC / bc , CA / ca) на примару и на секундару. Ови фазни помераји се могу одредити полазећи од електромоторних сила у намотајима примара и

секундара који се налазе на истом стубу. Ове електромоторне силе су у фази, при чему је њихово усмерење означено хомологим крајевима. Пре него што се илуструје принцип сабирања фазора електромоторних сила којим се долази до помераја фазора напона на примару и секундару, уведемо појам сатног броја. Једноставним анализама се показује да су фазни помераји између истих фазора напона (фазних или линијских) на примару и на секундару једнаки целобројном умношку 30° ($n \cdot 30^\circ$; $n = 0, 1, \dots, 11$). Због постојања ових фиксних еквидистантних 12 положаја, као и сличности обележавања фазора казаљкама сата, уобичајена је пракса да се фазно заостајање изражава у сатима – на пример, заостајање од 60° се исказује као сатни број од 2 сата, а предњачење од 30° као сатни број од 11 сати.

Даља илустрација сатног принципа је дата за фазне и линијске напоне на примару трансформатора. За сада, посматрајмо трансформатор са спрегом звезда (Y) на примару. На слици 7.5 су приказани сви фазни и линијски напони на примару, при чему се подразумева да је систем напона директан (напон у фази В касни за напонам у фази А, а напон у фази С касни за напонам у фази В). Фазор фазног напона фазе А се, по конвенцији, ставља у положај 12 сати.



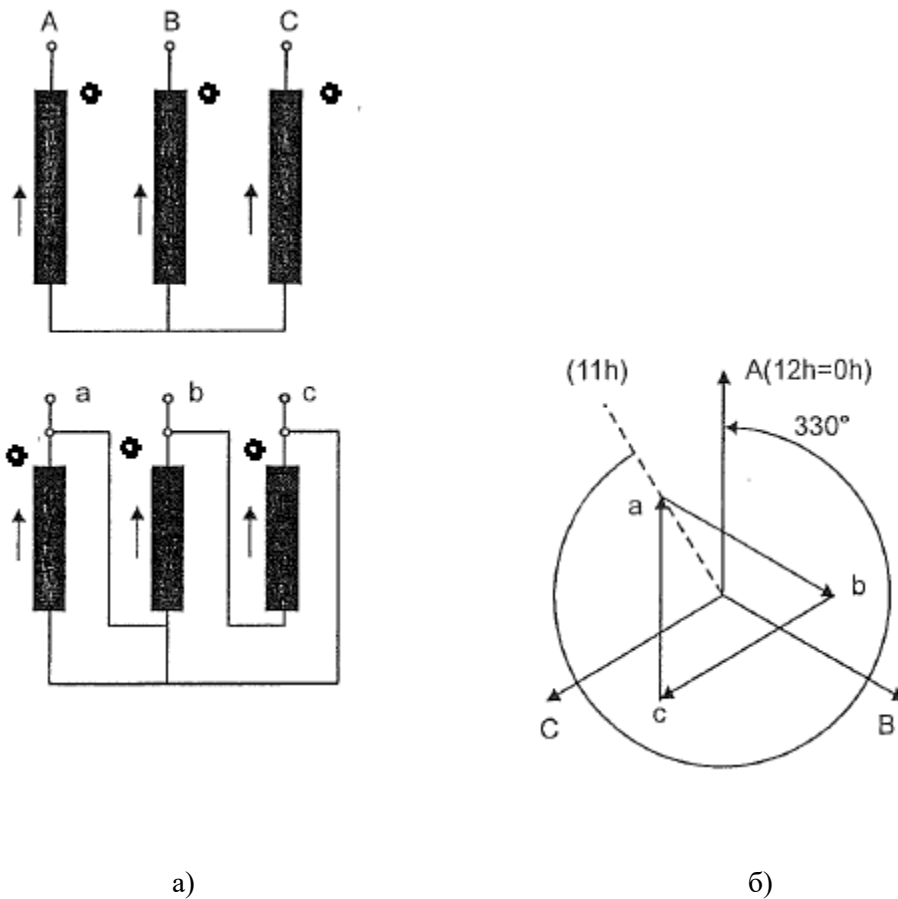
Слика 7.5

Слика 7.5 важи и за случај спреге троугао (D), када се „фазни напони“, као фиктивни фазни напони који нису физички доступни, формирају помоћу тежишних линија, тако да фазори фазних напона полазе из тежишта (које одговара фиктивној неутралној тачки) и завршавају у одговарајућим теменима троугла (видети слику 7.3).

Сатни број другог намотаја (секундара) одређује се положајем фазног напона фазе а (опет без обзира да ли он постоји физички (спрега у) или не (спрега d)). Сатни број линијских напона је исти као сатни број (еквивалентних) фазних напона.

На примеру спреге Yd11 ће се илустровати принцип одређивања сатног броја. Као што је речено, полази се од електромоторних сила по стубовима, уважавајући конвенцију о хомологим крајевима

(слика 7.6). Имајући у виду да су електромоторне силе приближно једнаке фазним напонима на примару (U_A, U_B, U_C) и линијским напонима на секундару (u_{ab}, u_{bc}, u_{ca}), једноставно се долази до фазорских дијаграма приказаних на слици 7.6 б). Користећи претходно објашњени принцип формирања (еквивалентних) фазних напона на секундару, спрегнутом у троугао (d), могу се нацртати и (еквивалентни) фазни напони на секундару (u_a, u_b, u_c). Сатни број се одређује на основу фазног помераја (еквивалентног) фазног напона на секундару u_a у односу на фазни напон на примару U_A . Фазно кашњење износи 330° , што значи да је сатни број 11. Једноставно се може проверити и претходно наведена чињеница да је фазно заостајање одговарајућих линијских напона такође 330° (примера ради, једноставно је посматрати $U_{CA} = U_A - U_C$ и u_{ca}).



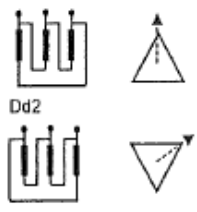
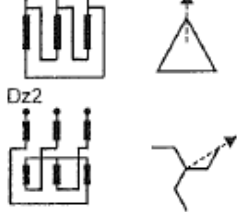
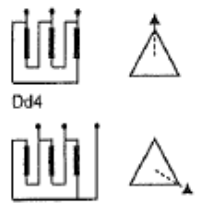
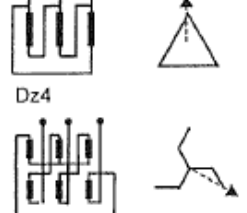
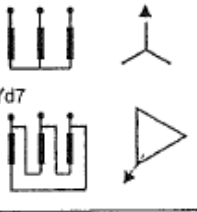
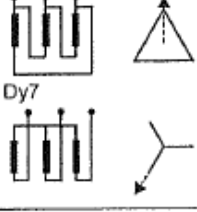
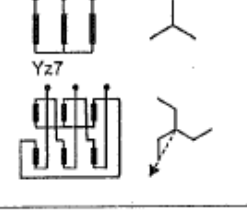
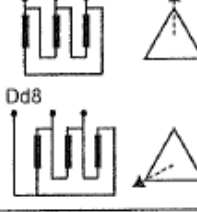
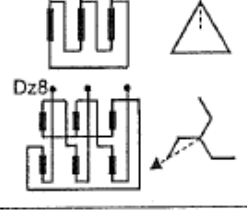
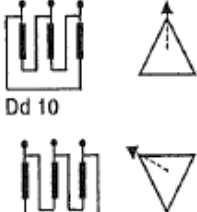
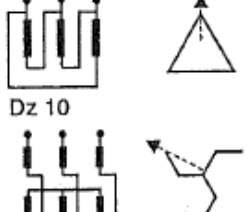
Слика 7.6

Стандарди SRPS EN из серије 60076, која се односи на енергетске трансформаторе, дају уобичајене спреге (табела 7.1.) и допунске спреге (табела 7.2.) трофазних трансформатора.

Табела 7.1. – Уобичајене сјређе пѳрофазних пѳрансформатора

0	<p>Yy0</p>	<p>Dd0</p>	<p>Dz0</p>
1	<p>Yd1</p>	<p>Dy1</p>	<p>Yz</p>
5	<p>Yd5</p>	<p>Dy5</p>	<p>Yz5</p>
6	<p>Yy6</p>	<p>Dd6</p>	<p>Dz6</p>
11	<p>Yd11</p>	<p>Dy11</p>	<p>Yz11</p>

Табела 7.2. – Дотунске спреге трофазних трансформатора

2		 <p>Dd2</p>	 <p>Dz2</p>
4		 <p>Dd4</p>	 <p>Dz4</p>
7	 <p>Yd7</p>	 <p>Dy7</p>	 <p>Yz7</p>
8		 <p>Dd8</p>	 <p>Dz8</p>
10		 <p>Dd 10</p>	 <p>Dz 10</p>

7.2.3. ОСОБИНЕ ПОЈЕДИНИХ СПРЕГА ЗА НЕСИМЕТРИЧНЕ РАДНЕ РЕЖИМЕ

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 фаза А високог напона и фазе а ниског напона, а који зависи од спреге трофазног трансформатора. Увођење сатног броја је била практично једина промена у односу на заменску шему монофазног трансформатора, при чему су се отпори и флуksни обухвати посматрали за намотаје постављене на један (исти) стуб магнетног кола.

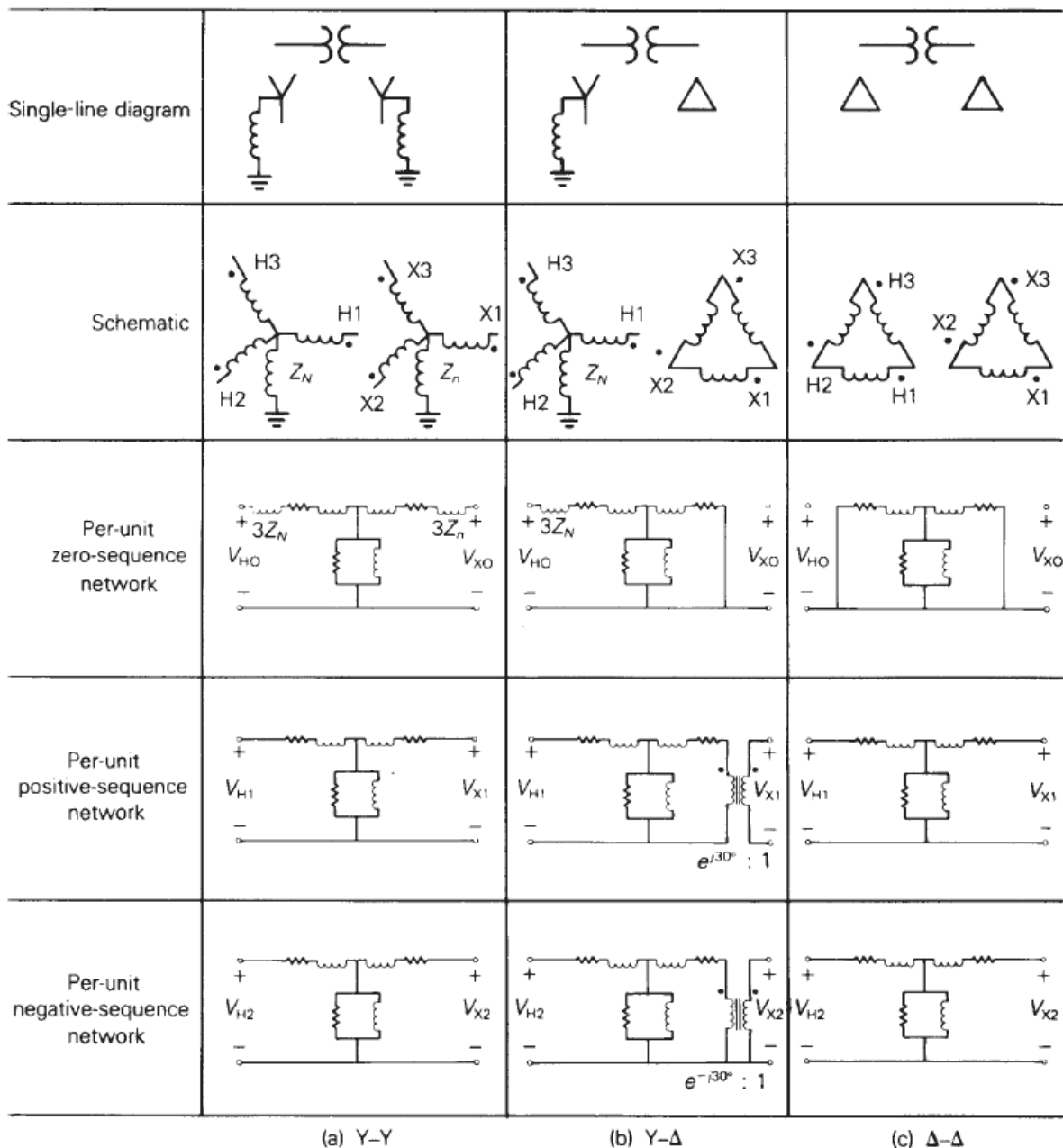
Све до сада је важило за простопериодичан симетричан режим рада. Под симетричним режимом рада се подразумева да су исте ефективне вредности напона и струје по фазама и да су њихове вредности по фазама фазно померене за трећину периоде (120°). Сатни бројеви су дефинисани

полазећи од директаног система напона (напон у фази В касни за напоном у фази А, а напон у фази С касни за напоном у фази В).

Уколико се појави било каква несиметрија у трофазном систему, било за основни, било за више хармонике, појављују се нови технички аспекти, који захтевају додатну анализу и који се морају уважити при формирању 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 готово увек 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 се у случају спреге у звезду од суштинског значаја да ли је уземљена неутрална тачка). На слици 7.7. (преузето из [1]) приказане су еквивалентне шеме у нултом, директном и инверзном систему за три различите спреге трофазног двонамотајног трансформатора. Сliku 7.7. треба схватити као илустрацију модела трансформатора у директном, инверзном и нултом систему, при чему треба истаћи да трансформатор у нултом систему може да представља прекид електричне нулте заменске шеме електроенергетског система, са стране примара, са стране секундара или са обе стране. Несиметрични режими, посебно нулте заменске шеме трансформатора и за остале спреге, које нису приказане на слици 7.7., разматрају се детаљније у поглављу 9.

Слично заменским шемама за директни / инверзни систем и нулти систем, значајно се разликују заменске шеме за хармоније 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 има исти облик као шема за нулти систем за основни хармоник). Разлог за исти облик шеме за хармонике чији је ред дељив са три и за нулти систем за основни хармоник је што вредности величина хармоника чији је ред дељив са три у све три фазе имају исти фазни став (објашњење је дато у следећем пасусу).

Ако је систем за основни хармоник директан, непарни хармоници реда $6k + 1$ (k је цео број) имају исти фазни став као 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 исти фазни став као 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 ($3k 120^\circ = k 360^\circ$).

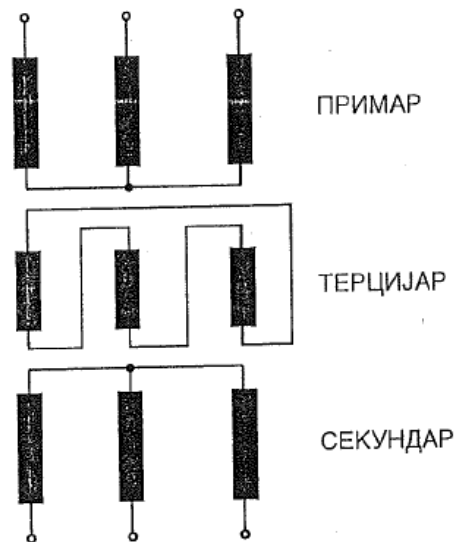


Слика 7.7. – Еквивалентне шеме трансформатора у нултом, директном и инверзном систему, за неке од спрега, при уземљеној неутралној тачки када је намотај спрегнут у звезду

У претходном делу поглавља дискутована је спрега Y_{zn} (слика 7.4). 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 $a1$ – МПС у половини намотаја кроз који протиче струја кроз фазу a минус МПС у половини намотаја кроз који протиче струја кроз фазу b , стуб $a2$ – 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).

Поменуто је и да је опционо решење примени спреге Y_{zn} примена спреге D_{yn} – 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 протицати у мрежу, већ ће се затворити у намотајима примара везаним у троугао. Исти ефекат спречавања продора трећег хармоника у мрежу се може постићи и додавањем терцијера (трећи намотај) спрегнутог у троугао (d спрега) (слика 7.13). 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.

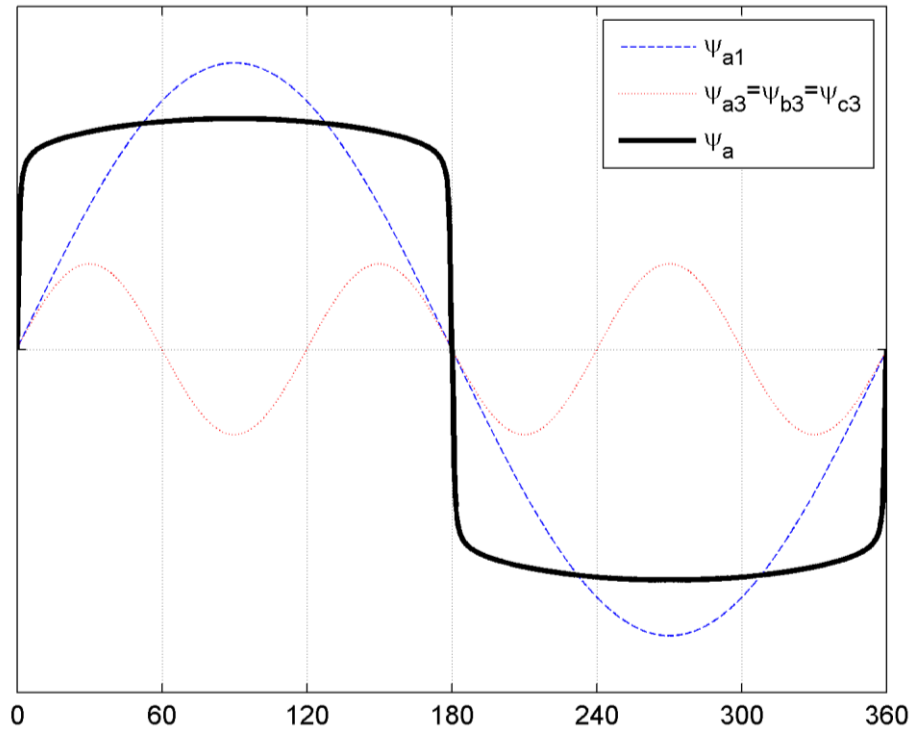


Слика 7.13. Елиминација триплих хармоника помоћу наменског намотаја терцијера

7.2.4. ТАЛАСНИ ОБЛИК СТРУЈЕ МАГНЕЋЕЊА И ПОТЕНЦИЈАЛНО ИЗОБЛИЧЕЊЕ НАПОНА КОД СПРЕГЕ Y_{y}

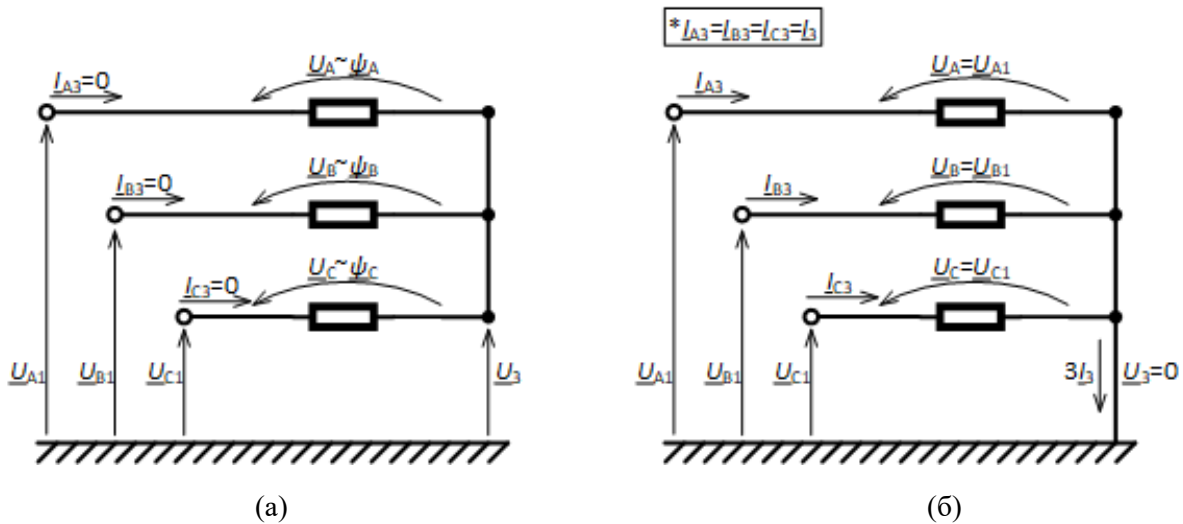
У случају спреге Y на напајаној страни трансформатора, при чему звездиште није повезано на нулти проводник или уземљење, не могу се успоставити струје трећег хармоника (опет важи претпоставка да су вредности струје трећег хармоника исте у све три фазе). За случај да се на намотај примара прикључи простопериодични напон, очекује се да ће флуks по фази такође бити простопериодичан. Са криве магнећења $B = f(H)$ се долази до закључка да магнетопобудна сила, односно струја магнећења, мора да садржи трећи хармоник како би се остварила простопериодична промена флуksа (погледати поглавље 2.2.1). Претпоставимо, ради поједностављења излагања, 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 флуksа је дефинисана нелинеарном карактеристиком магнећења; ако је струја простопериодична, а магнетско коло у засићењу, таласни облик флуksа мора бити

изобличен, тј. мора садржати више хармонике. На слици 7.8. је приказана наведена ситуација. На слици су приказани флуксеви 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.

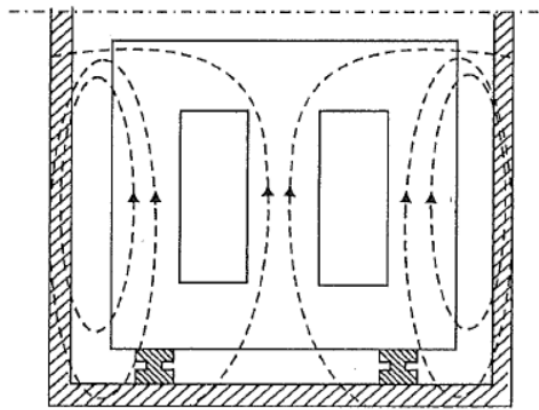


Слика 7.8 Таласни облик флукса на стубу фазе А (укупни, 1.-и и 3.-и хармоник флукса) за случај спреге Y на примару

Поставља се питање како је могуће да су флуксеви изобличени, када је напон напајања простопериодичан; имајући у виду да је $\psi = \int u dt$, простопериодичан напон треба да резултује простопериодичним флуксом. Објашњење је илустровано на слици 7.9 (а). Као што се може видети са слике, напони напајања су простопериодични, али у односу на „земљу“, тј. у односу нулти референтни потенцијал. С друге стране, напон неутралне тачке трансформатора није фиксан, јер неутрална тачка није уземљена, тако да се може наћи на било ком потенцијалу. Без обзира на потенцијал неутралне тачке, напони у односу на земљу и међуфазни напони остају **непромењени**. У случају када се јави zasiћење магнетског кола, долази до изобличења флуксева, тако да напони **између крајева намотаја** постају изобличени, тј. садрже трећи хармоник. Ово се манифестује променом потенцијала изоловане неутралне тачке трансформатора, који ће садржати трећи хармоник у односу на референтни потенцијал (земљу). Због једновремености и једнакости трећих хармоника флукса, њихов векторски збир, тј. збир њихових тренутних вредности, није једнак нули, тако да се резултујући флукс мора затварати ван магнетног кола, кроз ваздух, челичне елементе суда и других конструкционих делова трансформатора, стварајући додатне губитке (слика 7.10).



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

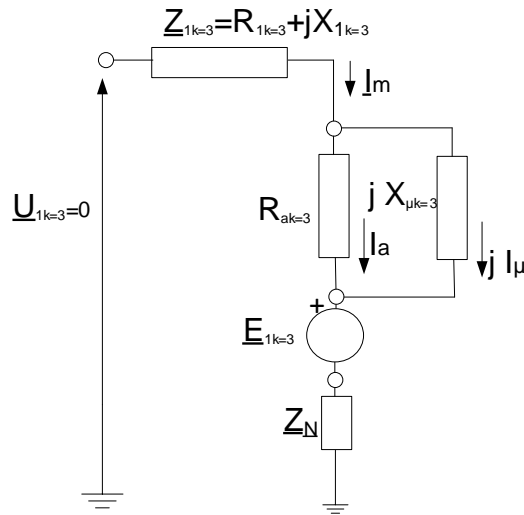


Слика 7.10 Путања флукса трећег хармоника у језгру тростубног трансформатора

Код трансформатора на чијем је примару спрега уземљена звезда (YN), при појави засићења магнетског кола, јављају се струје трећег хармоника у намотајима (њихов збир се затвара кроз неутрални проводник), а напони између крајева фазних намотаја, па самим тим и флуксеви намотаја и флуксеви по стубовима трансформатора, остају простопериодични. Ово је илустровано на слици 7.9 (б).

Магнетски отпор на путу трећег хармоника флукса кроз ваздух (слика 7.10), чија је вредност у случају спреге Y велика, већи је него на путу флукса основног хармоника, тако да је еквивалентна индуктивност магнетског кола за трећи хармоник знатно мања него за основни. Због смањења реактансе магнетског кола, за анализу понашања трансформатора при раду у празном ходу потребно је посматрати шему на слици 7.11., у којој фигурише и импеданса расипања на примару (импеданса магнетског кола опада, па није више доминантна, као за хармонике чији ред није дељив са три). Импеданса Z_N на слици 7.11 представља велику импедансу преко које се може затворити трећи хармоник струје – као што је речено, у случају спреге Y неутрална тачка трансформатора није повезана са земљом, али трипли хармоници могу да се затворе кроз паразитне капацитивне импедансе, према земљи.

Капацитивне импедансе су велике, због чега долази до пораста потенцијала звездишта у односу на земљу (већ поменуто у претходном тексту и приказано на слици 7.9 а).



Слика 7.11.

Описана појава код спреге Y је опасна јер изазива повећање ефективне вредности напона у звездишту, али и на свакој од позиција у намотају према кућишту. Због претходно изложеног, спрега Y на примару није добро решење, па је ова спрега у неким земљама и забрањена.

7.3. 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 снаге трансформатора који остаје у раду већа или једнака потрошњи пријемника, не постоји никакво ограничење у погледу напајања, односно може се наставити трајно напајање свих пријемника.
- 2) Економичност, односно побољшање енергетске ефикасности на основу смањења губитака у експлоатацији - погледати одељак 4.5.
- 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 погодно решење за овакву ситуацију.
- 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.

Правилан рад два или више трансформатора у паралели значи:

- 1) Да они деле оптерећење сразмерно својим номиналним снагама,
- 2) Да нема непотребних губитака као резултат циркулационих струја,
- 3) Да буде избегнута хаварија услед великих струја услед неадекватних карактеристика трансформатора или њиховог погрешног везивања.

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

- 1) Преносни однос (номинални напони примара и секундара),
- 2) Сатни број,
- 3) Релативни напон кратког споја,
- 4) Исти редослед фаза на секундару (а, b, c).

Уколико не важе ставке 1) и 2) из претходног пасуса појавиће се циркулационе струје. Ове циркулационе струје могу да буду веома велике, приближне струјама кратког споја, уколико би се на секундару паралелисали трансформатори значајно различитог сатног броја. Велике циркулационе струје би се јавиле и у случају да се паралелно вежу различите фазе на секундару. Са друге стране, и у случају исправно пројектованог и изведеног решења (паралелна везе трансформатора истог номиналног преносног односа, фазног редоследа и сатног броја), постојаће циркулационе струје, много мањег интензитета, јер увек постоји мало одступање стварних од номиналних вредности преносног односа (конструктивне и производне толеранције).

Пре него што се уведе општа заменска шема паралелно везаних трансформатора, потребно је продискутовати начин формирања заменске шеме 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 ка секундару, и обрнуто, врши се преко односа трансформације (односа броја навојака на примару и секундару¹). Овакав приступ је приказан у одељку 3.4.

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. То би значило да се импеданса кратког споја одређена из огледа кратког споја одређује користећи фазни напон (једнак линијском напону стране напајане у огледу кратког споја (вишенAPONске стране), подељеном са $\sqrt{3}$); струја је једнака мереној (линијској) струји стране напајане у огледу кратког споја. Отпорност кратког споја се одређује из једнакости измерене снаге губитака и троструког производа отпорности и мерене (линијске) струје стране напајане у огледу кратког споја. 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. 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. Ово је последица чињенице да је сатни број дефинисан као фазни померај између одговарајућих еквивалентних фазних напона примара и секундара (видети поглавље 7.2.2).

¹ Осим код спреге сломљена звезда (погледати поглавље 7.2.1)

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

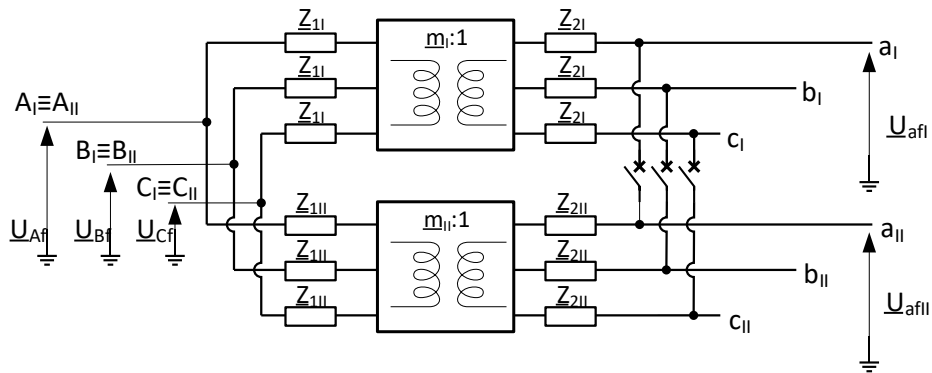
Сада ће бити показано да је код анализе паралелног рада погодно користити Приступ Б. На Слици 7.12 приказана је принципска шема два трофазна трансформатора који, по затварању прекидача на секундару, раде паралелно. У општем случају, преносни односи и сатни бројеви ова два трансформатора се међусобно разликују. Уводи се комплексни преносни однос:

$$\underline{m} = m \cdot e^{jk \cdot 30^\circ} \quad (7.4)$$

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*, тј. напони посматране фазе у односу на неутралну тачку (стварно звездиште у случају спреге звезда и сломљена звезда, фиктивно звездиште у случају спреге троугао). Напони \underline{U}_{afI} и \underline{U}_{afII} су напони празног хода секундера првог и другог трансформатора, с обзиром на то да су оба трансформатора у посматраном режиму неоптерећена и да крајеви ова два трансформатора још увек нису спојени. Са Сlike 7.12 је очигледно да је, уколико се жели да посматрани трансформатори раде паралелно, неопходно да буде испуњен услов:

$$\underline{U}_{afI} = \underline{U}_{afII} \quad (7.5)$$

Наравно, исти услов треба да буде испуњен и 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 никаквог оптерећења на нисконапонској страни. Ова струја би била ограничена само импедансом кратког споја једног и другог трансформатора.



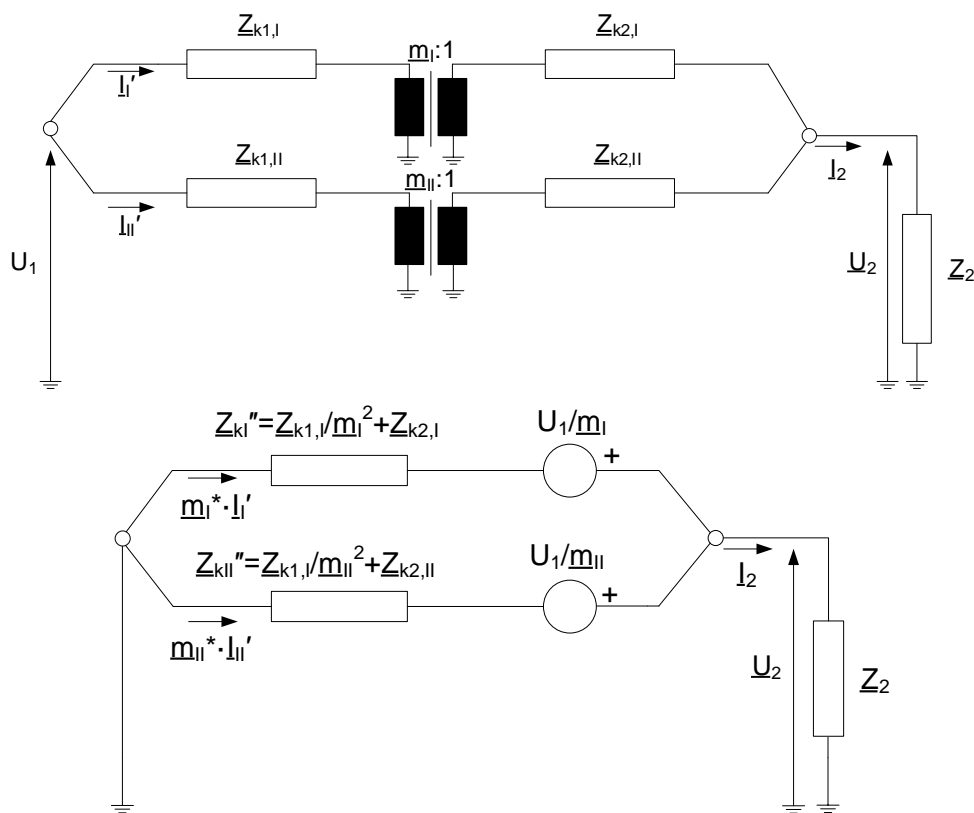
Слика 7.12 – Принципска шема два трофазна трансформатора које треба да раде паралелно

На основу Сlike 7.12 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 секундера 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:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{af0,I} &= \frac{\underline{U}_{Af}}{\underline{m}_I} = \frac{\underline{U}_{Af}}{m_I \cdot e^{jk_I \cdot 30^\circ}} = \frac{\underline{U}_{Af}}{m_I} e^{-jk_I \cdot 30^\circ} \\ \underline{U}_{af0,II} &= \frac{\underline{U}_{Af}}{\underline{m}_{II}} = \frac{\underline{U}_{Af}}{m_{II} \cdot e^{jk_{II} \cdot 30^\circ}} = \frac{\underline{U}_{Af}}{m_{II}} e^{-jk_{II} \cdot 30^\circ} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \underline{U}_{af0,I} = \underline{U}_{af0,II} \Leftrightarrow \underline{m}_I = \underline{m}_{II} \quad (7.6)$$

Аналогно важи и за друге две фазе. 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 7.13: горња шема садржи стварне еквивалентне фазне напоне и линијске струје на примару и на секундару, док су у 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 7.13 - 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 m_I и m_{II} представљају комплексне бројеве. У шеми сведеној на секундар, напони примара су сведени на секундар користећи комплексни преносни однос³:

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°)

$$\begin{aligned}\underline{U}_{1,I}'' &= \underline{U}_1 / \underline{m}_I = \underline{U}_1 / (m_I \cdot e^{j k_I \cdot 30^\circ}) = \frac{\underline{U}_1}{m_I} \cdot e^{-j k_I \cdot 30^\circ} \\ \underline{U}_{1,II}'' &= \underline{U}_1 / \underline{m}_{II} = \underline{U}_1 / (m_{II} \cdot e^{j k_{II} \cdot 30^\circ}) = \frac{\underline{U}_1}{m_{II}} \cdot e^{-j k_{II} \cdot 30^\circ}\end{aligned}\quad (7.7)$$

где су k_I и k_{II} сатни бројеви првог и другог трансформатора, респективно. Приметити да при свођењу струја треба користити *конјуговано комплексну* вредност комплексног преносног односа, како би се добио исти фазни померај као напоне:

$$\begin{aligned}\underline{I}_I'' &= \underline{I}_I' \cdot \underline{m}_I^* = \underline{I}_I' \cdot (m_I \cdot e^{j k_I \cdot 30^\circ})^* = \underline{I}_I' \cdot m_I \cdot e^{-j k_I \cdot 30^\circ} \\ \underline{I}_{II}'' &= \underline{I}_{II}' \cdot \underline{m}_{II}^* = \underline{I}_{II}' \cdot (m_{II} \cdot e^{j k_{II} \cdot 30^\circ})^* = \underline{I}_{II}' \cdot m_{II} \cdot e^{-j k_{II} \cdot 30^\circ}\end{aligned}\quad (7.8)$$

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 добијених 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).

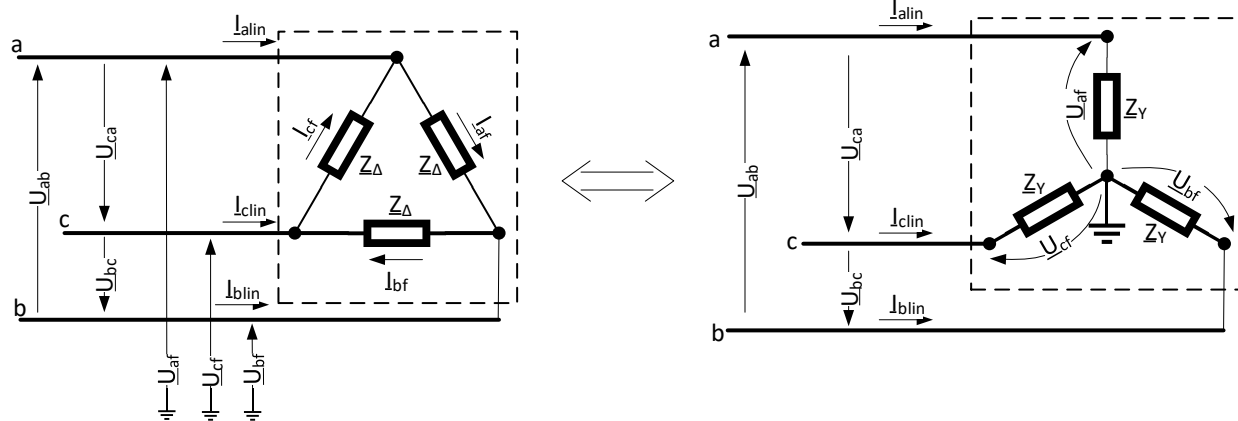
На слици 7.14 приказан је намотај трансформатора у спрези троугао (D) и еквивалентни намотај, који се користи у Приступу Б. Еквивалентирање се мора извршити тако да се, посматрано са стране мреже, ништа не мења: потребно је да односи еквивалентних фазних напона и линијских струја буду исти у оба случаја. За импедансе намотаја у ова два случаја важи:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_\Delta &= \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{I}_{af}} = \frac{\underline{U}_{lin}}{\underline{I}_f} \cdot e^{j\varphi_k} \\ \underline{Z}_Y &= \frac{\underline{U}_{af}}{\underline{I}_{alin}} = \frac{\underline{U}_f}{\underline{I}_{lin}} \cdot e^{j\varphi_k}\end{aligned}\quad (7.9)$$

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 и импеданси добијених које се односе на физичке фазне намотаје (\underline{Z}_Δ):

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_f &= \underline{U}_{lin} / \sqrt{3} \\ \underline{I}_{lin} &= \underline{I}_f \cdot \sqrt{3} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \underline{Z}_Y = \frac{\underline{U}_{lin} / \sqrt{3}}{\underline{I}_f \cdot \sqrt{3}} \cdot e^{j\varphi_k} = \frac{\underline{Z}_\Delta}{3}\quad (7.10)$$

Добијени израз одговара еквивалентирању троугао-звезда добро познатом из основа електротехнике. Укупна вредност укупне импедансе кратког споја \underline{Z}_Δ из огледа кратког споја, са напајане напонске стране која је вазана у троугао, одређује се као количник линијског напона и струје измерене у линијском проводнику подељене са $\sqrt{3}$.



Слика 7.14 – Еквивалентирање спреге троугао еквивалентном звездом

Пример: Два трансформатора са подацима⁴:

Трансформатор	I	II
Ном. напон примара	U_{1n}	U_{1n}
Ном. напон секундара	U_{02}^I	U_{02}^{II}
Ном. Снага	S_{nI}	S_{nII}
Спрега	Dy5	Yd7
Импеданса КС примара	$Z_{k1,I}^{\Delta}$ ⁵	$Z_{k1,II}$
Импеданса КС секундара	$Z_{k2,I}$	$Z_{k2,II}^{\Delta}$

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

Решење:

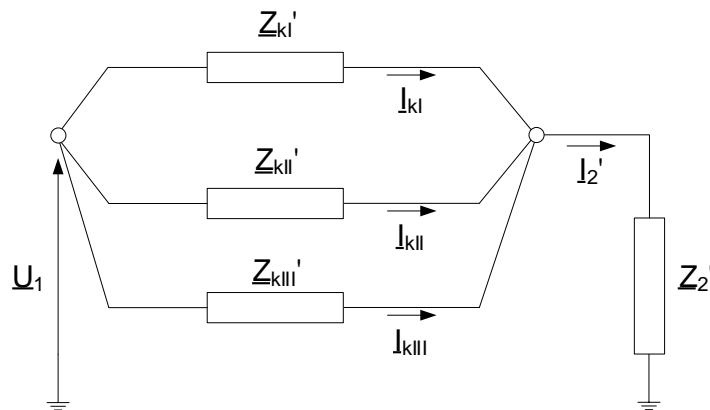
Општи облик еквивалентног кола, сведеног на секундар, за анализу паралелног рада приказано је на Слици 7.13 (доле). Веза између величина у еквивалентном колу, наведених пре знака једнакости, и величина датих у табели са параметрима из претходне табеле, гласи:

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

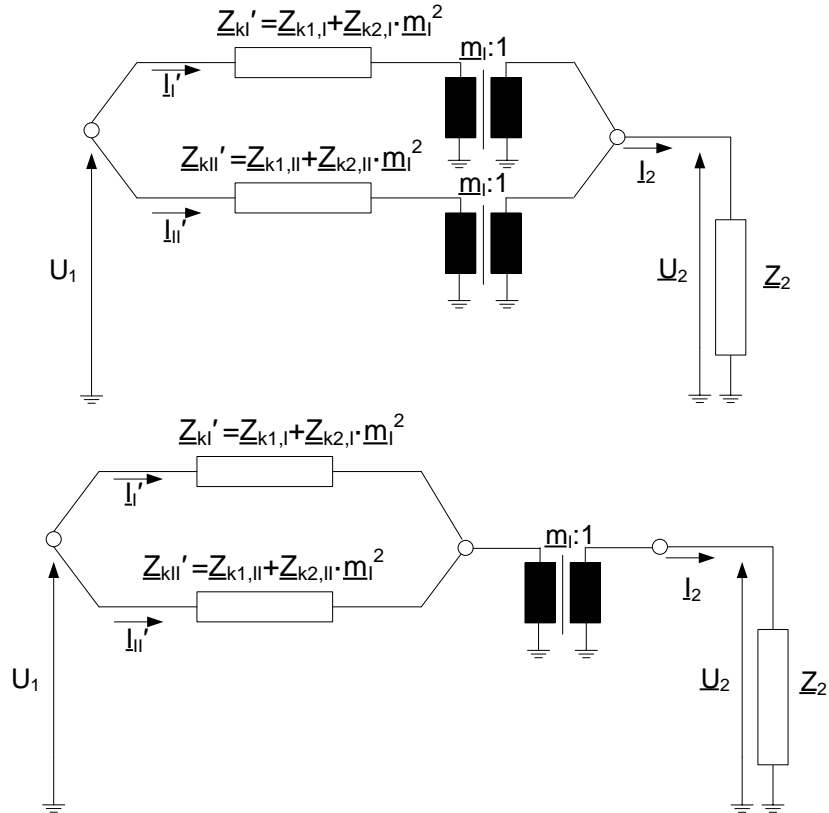
⁵ Експонентом Δ наглашено је су импедансе кратког споја дате за физички намотај, те да их треба свести на спрегу звезда приликом конструисања шеме; импедансе намотаја у спреси Y већ имају одговарајуће вредности и не треба их мењати.

$$\begin{aligned}
U_1 &= U_{1n} / \sqrt{3} \\
\underline{Z}_{k1,I} &= \underline{Z}_{k1,I}^\Delta / 3 \\
\underline{Z}_{k2,I} &= \underline{Z}_{k2,I} \\
\underline{Z}_{k1,II} &= \underline{Z}_{k1,II} \\
\underline{Z}_{k2,II} &= \underline{Z}_{k2,II}^\Delta / 3 \\
\underline{m}_1 &= \frac{U_{1f1}}{U_{2f1}} e^{j5.30} = \frac{U_{1lin1}}{U_{2lin1}} e^{j5.30} = \frac{U_{1n}}{U_{02}} e^{j5.30} \\
\underline{m}_1 &= \frac{U_{1n}}{U_{02}^1 / \sqrt{3}} e^{j5.30} \\
\underline{m}_2 &= \frac{U_{1f2}}{U_{2f2}} e^{j7.30} = \frac{U_{1lin2}}{U_{2lin2}} e^{j7.30} = \frac{U_{1n}}{U_{02}} e^{j7.30}
\end{aligned}
\tag{7.11}$$

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 7.15. Начин на који се долази до шеме на слици 7.15 је илустрован на слици 7.16, за случај приказан на слици 7.16, који приказује два паралелна трансформатора идентичних преносних односа.



Слика 7.15 - Заменска шема три паралелно везана трансформатора истог преносног односа, сведена на напонски ниво примара



Слика 7.16 - Заменска шема два паралелно везана трансформатора истог преносног односа, сведена на напонски ниво примара, формирана полазећи од горње слике 7.13

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 је 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:

$$\frac{1}{Z_{ke}} = \frac{1}{Z_{kI}} + \frac{1}{Z_{kII}} + \frac{1}{Z_{kIII}} \quad (7.12)$$

$$\underline{Z}_{kI} I_{kI} = \underline{Z}_{kII} I_{kII} = \underline{Z}_{kIII} I_{kIII} = \underline{Z}_{ke} I_2' \quad (7.13)$$

Пошто је напон на примару једнак, расподела укупне снаге (S) по појединачним трансформаторима (S_I , S_{II} и S_{III}) ће бити

$$S_I = U_1 I_1 = U_1 \frac{Z_{ke} I_2'}{Z_{kI}} = U_1 I_2' \frac{Z_{ke}}{Z_I} = S \frac{Z_{ke}}{Z_I} \quad (7.14)$$

$$S_{II} = U_1 I_2 = U_1 \frac{Z_{ke} I_2'}{Z_{kII}} = U_1 I_2' \frac{Z_{ke}}{Z_{II}} = S \frac{Z_{ke}}{Z_{II}} \quad (7.15)$$

$$S_{III} = U_1 I_{III} = U_1 \frac{Z_{ke} I_2'}{Z_{kIII}} = U_1 I_2' \frac{Z_{ke}}{Z_{III}} = S \frac{Z_{ke}}{Z_{III}} \quad (7.16)$$

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

$$Z_k = \frac{U_1 u_{k\%}}{I_n 100} \quad (7.17)$$

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

$$\frac{1}{Z_{ke}} = \frac{1}{Z_{kI}} + \frac{1}{Z_{kII}} + \frac{1}{Z_{kIII}} = \frac{100}{U_1} \left(\frac{I_{nI}}{u_{k\%I}} + \frac{I_{nII}}{u_{k\%II}} + \frac{I_{nIII}}{u_{k\%III}} \right) \quad (7.18)$$

$$\frac{1}{Z_{ke}} = \frac{1}{Z_{kI}} + \frac{1}{Z_{kII}} + \frac{1}{Z_{kIII}} = \frac{100}{U_1} \sum_{i=I}^{III} \frac{I_{ni}}{u_{k\%i}} \quad (7.19)$$

Уврштавањем импеданси кратког споја изражених преко релативних напона кратког споја у процентима, номиналног напона и номиналне струје у изразе (7.5), (7.6) и (7.7) добија се

$$\frac{S_I}{S} = \frac{100 I_{nI}}{u_{kI\%} U_1} \frac{U_1}{100} \frac{1}{\sum_{i=I}^{III} \left(\frac{I_{ni}}{u_{ki\%}} \right)} = \frac{S_{nI}}{u_{kI\%}} \frac{1}{\sum_{i=I}^{III} \left(\frac{S_{ni}}{u_{ki\%}} \right)} \quad (7.20)$$

$$\frac{S_{II}}{S} = \frac{100 I_{nII}}{u_{kII\%} U_1} \frac{U_1}{100} \frac{1}{\sum_{i=I}^{III} \left(\frac{I_{ni}}{u_{ki\%}} \right)} = \frac{S_{nII}}{u_{kII\%}} \frac{1}{\sum_{i=I}^{III} \left(\frac{S_{ni}}{u_{ki\%}} \right)} \quad (7.21)$$

$$\frac{S_{III}}{S} = \frac{100 I_{nIII}}{u_{kIII\%} U_1} \frac{U_1}{100} \frac{1}{\sum_{i=I}^{III} \left(\frac{I_{ni}}{u_{ki\%}} \right)} = \frac{S_{nIII}}{u_{kIII\%}} \frac{1}{\sum_{i=I}^{III} \left(\frac{S_{ni}}{u_{ki\%}} \right)} \quad (7.22)$$

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

$$\frac{S_i}{S} = \frac{S_{ni}}{u_{k\%}} \frac{1}{\frac{1}{u_{k\%}} \sum_{i=I}^{III} S_{ni}} = \frac{S_{ni}}{S} \quad (7.23)$$

Дакле, да би трансформатори распоређивали снагу пропорционално својим номиналним снагама, потребно је да имају што сличније (исте) релативне напоне кратког споја. Оријентациона граница толеранције у пракси је да се вредности релативног напона кратког споја разликују максимално за 10%. Шема приказана на слици 7.13 описује општи случај, па се на основу ње и одговарајућих једначина може одредити расподела оптерећења за било коју разлику у преносном односу и у релативном напону кратког споја трансформатора.

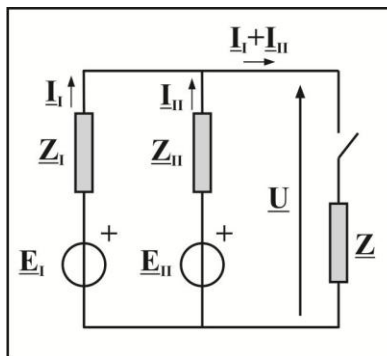
Пример (подаци из задатка 23 са вежби):

Два трансформатора у паралелном раду имају следеће податке:

ТРАНСФОРМАТОР	I	II
I_{2n} – номинална струја секундара	200 А	600 А
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:

- $I_{2n_I} := 200$ $I_{2n_II} := 600$
- $rK_I := 0.02$ $rK_II := 0.025$
- $xK_I := 0.05$ $xK_II := 0.06$
- $U_{02_I} := 245$ $U_{02_II} := 240$
- $Z_{opt} := 0.25 + i \cdot 0.1$

Resenje:

$$ZK_I := (rK_I + i \cdot xK_I) \cdot \frac{U02_I}{I2n_I} = 0.025 + 0.061i$$

$$ZK_{II} := (rK_{II} + i \cdot xK_{II}) \cdot \frac{U02_{II}}{I2n_{II}} = 0.01 + 0.024i$$

$$E_I := U02_I \quad E_{II} := U02_{II}$$

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

Given

$$E_I - ZK_I \cdot I_I = Zopt \cdot (I_I + I_{II})$$

$$E_{II} - ZK_{II} \cdot I_{II} = Zopt \cdot (I_I + I_{II})$$

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

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

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

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

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

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>