

9. Несиметрични рад трофазних трансформатора

До сада детаљније приказани математички модели су се односили на симетричне радне режиме трофазних трансформатора, које карактеришу симетричне струје и напони по фазама:

- Напони имају исте ефективне вредности по све три фазе
- Струје имају исте ефективне вредности по све три фазе
- Фазни померај између фазних напона 120°
- Исти фазни померај струје у односу на напон у свакој од фаза

За симетричне режиме је карактеристично да не постоје:

- струја кроз нулти проводник (нулти проводник може да постоји у случају да је спрега звезда)
- флуks који би од тачке на средини горњег јарма напуштао језгро и затварао се кроз ваздух и суд и конструктивне металне делове

За симетричне режиме рада методе се свде на анализу струја и напона по фази, о чему се детаљније било речи у претходним поглављима.

У случају несиметричних режима рада могу да се појаве и струје кроз нулти проводник и флуks који напушта магнетно коло и затвара се кроз ваздух. Може се наслутити да параметри, попут реактансе магнећења, при несиметричним режимима, могу значајно да се разликују од параметара коришћених при анализи симетричних режима.

За анализе несиметричних режима рада модел постаје сложенији. Најпогодније је применити **теорију симетричних компоненти**, која је управо развијена да се поједностави анализа несиметричних радних режима у трофазним електричним колима.

У пракси је од интереса познавати вредности напона и струја при несиметричним режимима како кроз намотаје трансформатора, тако и у електроенергетској мрежи. Несиметрије у напонима су непожељне, јер су опрема у електроенергетској мрежи и пријемници електричне енергије предвиђени за напајање напоном (трфазним или монофазним) номиналне учестаности и номиналне ефективне вредности, а у случају трофазних напона и фазног помераја између вредности по појединим фазама од 120° . Последице несиметрија напона су различите, а у зависности од природе и интензитета могу бити:

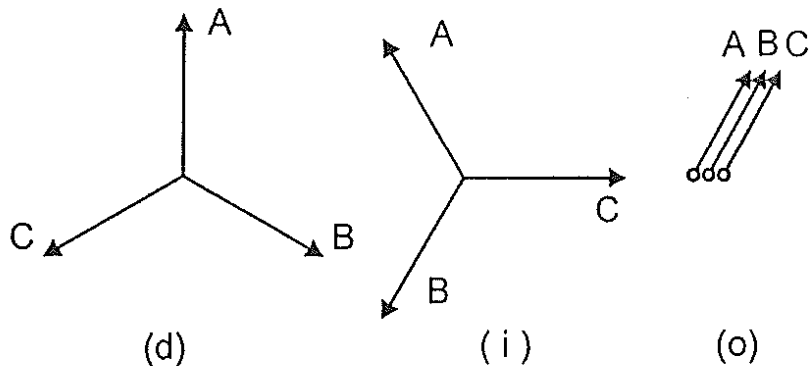
- мање опасни (мање повећање губитака, температура, вибрација или буке),
- такви да изазивају губитак функционалности пријемника електричне енергије (на пример због смањења максималног момента мотора)
- оштећења (на пример прегоревана извора светлости).

Постоје два типична несиметрична режима:

- услед несиметрије оптерећења по фазама или несиметрије напона на примару трансформатора
- несиметрични кварови - на пример кратак спој фазног и нулног проводника, међуфазни кратак спој или прекид проводника.

9. 1. ОСНОВЕ ТЕОРИЈЕ СИМЕТРИЧНИХ КОМПОНЕНТИ

По теорији симетричних компоненти, несиметрични трофазни систем се разлаже на три уравнотежена система: директни, инверзни и нулти (слика 9.1).



Слика 9.1

Дакле, уместо да се постављају једначине напонске и струјне равнотеже, уважавајући сопствене и флуksне обухвате између фаза, уместо несиметричног трофазног система, након примене математичке трансформације, разматрају се три фиктивна система:

- директан, у коме је редослед фаза такав да фазор (напона или струје) фазе В касни за фазором фазе А, а фазор фазе С касни за фазором фазе В за 120°
- инверзан, у коме је редослед фаза такав да фазор (напона или струје) фазе В предњачи испред фазора фазе А, а фазор фазе С предњачи испред фазора фазе В за 120°
- Нулти, у коме су фазори у све три фазе идентични

Поступак је следећи:

- пође се од несиметрије у трофазном систему (на пример, за случај кратког споја фазе и нуле) и ова несиметрија опише математичким исказом за напон или струју (за претходни пример кратког споја фазе и нуле напон на месту у и фази у којој је дошло до кратког споја једнак нули)
- изврши се трансформација несиметричног трофазног система у три уравнотежена система (директни, инверзни и нулти)
- одреде се струје и напони у директном, инверзном и нултом систему
- изврши се инверзна трансформација, којом се из израчунатих вредности напона и струја у директном, инверзном и нултом систему добију вредности несиметричних напона и струја у несиметричном трофазном систему.

На даље читати делове из књиге [3], доступне у електронској форми:

<https://www.techbooksynd.com/download/?file=6347>

Трансформација из трофазног (a, b, c) у d, i, o систем и обрнуто:

- Поглавље 8.1, почетак на страни 493.

Симетричне компоненте импедансног оптерећења:

- Поглавље 8.2, почетак на страни 499, читати до краја примера на страни 503.
- Остатак поглавља 8.2. није потребно читати за испит. Напомена за студенте који покажу интерес да читају овај текст: Z_{ab} , Z_{ac} и Z_{bc} представљају међусобне импедансе (услед магнетне спреге) између појединих фаза трофазног система. У моделу са слике (Figure 8.7) се сматра да нема импедансе између звездишта трофазног оптерећења (спрега Y).

"Per unit" модели трофазних двонамотајних трансформатора у систему симетричних компоненти

- Поглавље 8.6, почетак на страни 516.

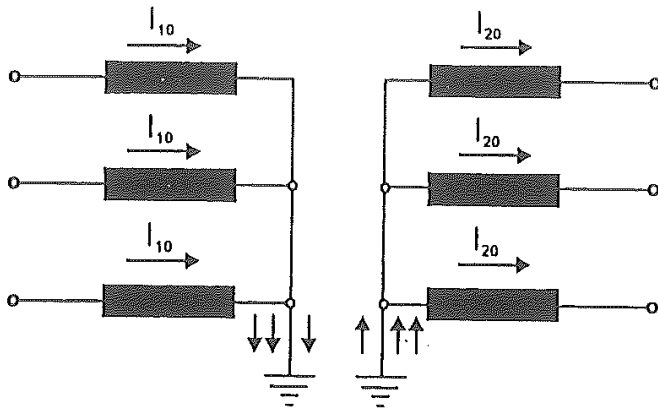
Импедансе трансформатора, односно заменска шема трансформатора као дела комплетне заменске шеме разматране електроенергетске мреже, у директном (d) и инверзном (i) систему су идентичне онима које су до сада разматране (први пут су дате на сликама 3.8. и 3.9.). Као заменска шема се може користити шема трансформатора са или без гране магнетнећења.

Сада ће се анализирати импедансе трансформатора у нултом систему (o), са стране примара и са стране секундара, које значајно зависи од спреге трансформатора. У случају спреге звезда (Y), од зависи од присуства неутралног проводника. Полазећи од слике 7.7., као и разумевања простирања флукса по стубу магнетног кола, закључује се следеће (коментари (K1) – (K4) проистичу из слике 7.7):

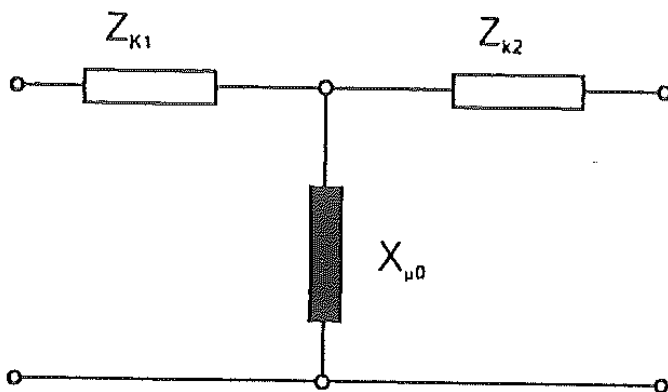
- (K1) У случају Y спреге и да не постоји неутрални проводник, импеданса у нултом систему (o) на напонској страни спрегнутој у Y је бесконачна.
- (K2) У случају Y спреге и да постоји неутрални проводник (спрега YN), импеданса у нултом систему (o) на напонској страни спрегнутој у Y зависи од спреге на другим напонским странама (на даље ће се посматрати двонамотајни трансформатори):
 - (K3) Ако је спрега на другој напонској страни d, импеданса у нултом систему (o) је приближно једнака импеданси у директном (d), односно инверзном (i), систему. Тада се трансформатор у нултом систему види као импеданса кратког споја, која се одређује из класичног огледа кратког споја.
 - (K4) Ако је спрега на другој напонској страни up (звезда са неутралним проводником) - слика 9.3, импеданса у нултом систему (o) је приближно једнака импеданси у директном (d), односно инверзном (i) - слика 9.4. Тада се трансформатор у нултом систему приказује преко класичне заменске шеме у директном (d), односно инверзном (i) систему.
 - Ако је спрега на другој напонској страни у (звезда без неутралног проводника), импеданса у нултом систему (o) зависи од конструкције магнетног кола:
 - Ако је језгро петостубно, импеданса у нултом систему (o) је приближно једнака импеданси магнетнећења - $Z_{\mu o}$ (слика 9.5): $Z_o \approx Z_{\mu o}$
 - Ако је језгро тростубно, импеданса у нултом систему (o) је приближно једнака збиру импедансе (отпорности намотаја и реактансе расипања) на

посматраној напонској страни (импеданса у директном (d), односно инверзном (i) систему) - Z_{k2} и импедансе једнаке количнику квадрата броја навојака и магнетног отпора простирању магнетног флука од изласка из језгра до суда и гвоздених конструктивних делова кроз које се флукс затвара по изласку из магнетног кола - $Z_{\mu 0}$: $Z_o = Z_{k2} + Z_{\mu 0}$; исто као на слици 9.5., при чему је у случају тростубног језгра $Z_{\mu 0}$ је много мања него у случају петостубног језгра.

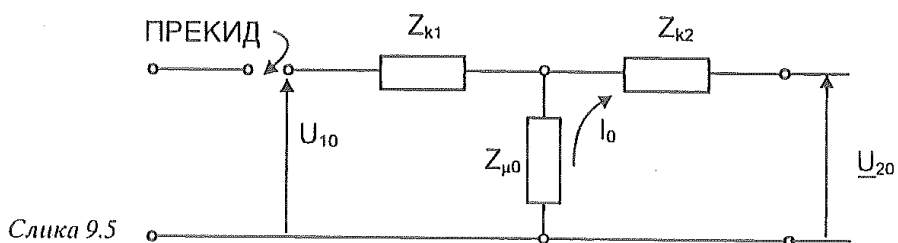
- У случају спреге D, збир три фазора фазних напона (напона у три гране троугла) је једнак нули, из чега следи да је вредност нулте компоненте фазног напона у свакој грани троугла једнака нули. Нулте компоненте струје се не појављују у линијској струји јер је њихова фазна вредност иста у све три фазе (у све три гране троугла). Појављивање и вредност нулте компоненте струје зависи од спреге на другој напонској страни: струја ће постојати само у случају спреге уп на другој напонској страни (слика 7.7.). У том случају, нулта импеданса је приближно једнака импеданси кратког споја $Z_o = Z_{k1} + Z_{k2}$, која се одређује из класичног огледа кратког споја.



Слика 9.3



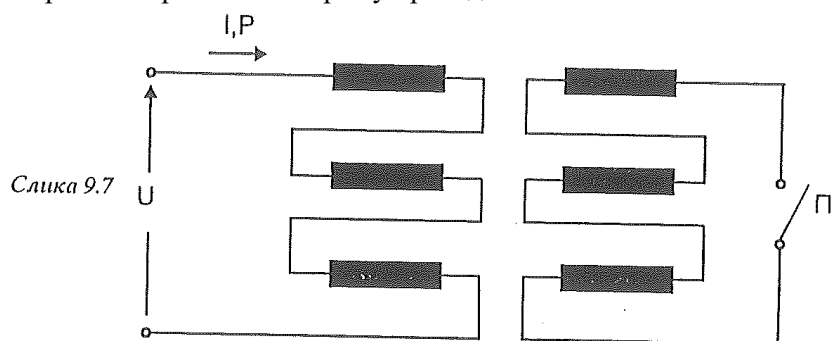
Слика 9.4



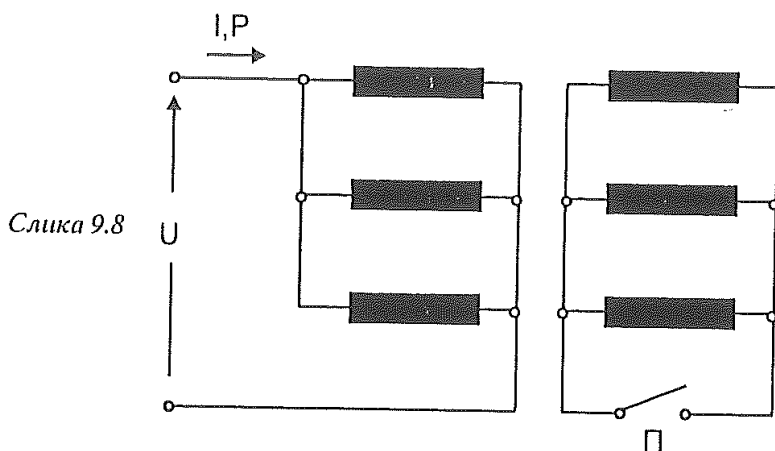
Слика 9.5

Шеме за мерење нултих импеданси

Мерна шема може бити заснована на редној вези намотаја (слика 9.7) или паралелној вези намотаја (слика 9.8). Мерење се врши на напонској страни на којој се могу успоставити нулте струје. Мерење се врши по затварању прекидача П.



Слика 9.7



Слика 9.8

За редну везу (слика 9.7), параметри се одређују из израза:

$$Z_0 = \frac{U}{3I}, R_0 = \frac{P}{3I^2}, X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \quad (9.1)$$

За паралелну везу (слика 9.8), параметри се одређују из израза:

$$Z_0 = \frac{3U}{I}, R_0 = \frac{3P}{I^2}, X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \quad (9.1)$$

Несиметрични кварови (кратки спојеви):

- Поглавље 9, почетак на страни 547, читати до краја примера на страни 564.

Литература

[1] <http://suetf.org/materijali/TEK/10%20Simetricne.pdf>

[2] Ђаловић, Д.: "Решени проблеми из теорије електричних кола", ИРО "Грађевинска књига", Београд, 1981.

[3] J. Duncan Glover, Thomas J. Overbye, Mulukutla S. Sarma: "POWER SYSTEM ANALYSIS AND DESIGN, 6th Edition, Cengage Learning, 2017., ISBN: 978-1-305-63213-4