

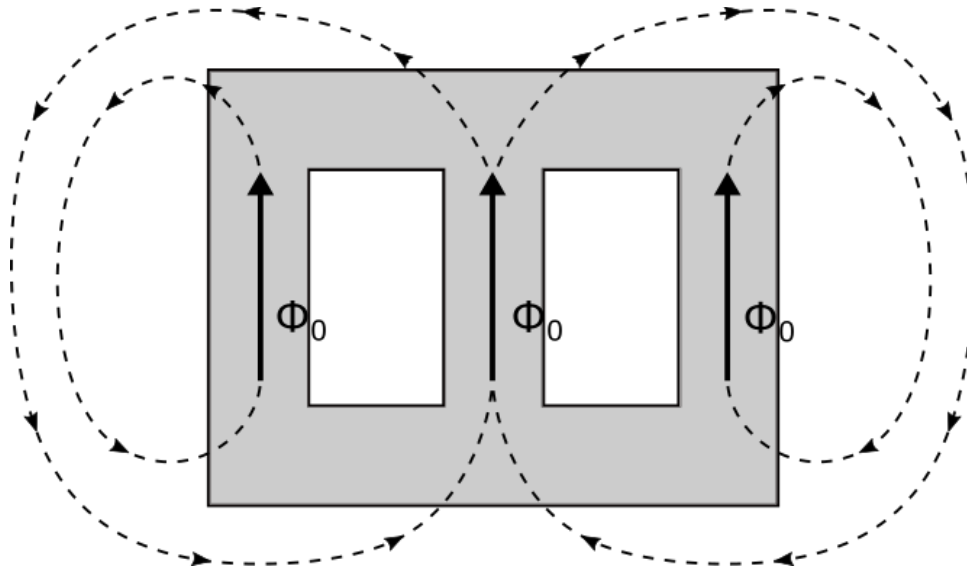
## 9. Несиметрични рад трофазних трансформатора

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
- Фазни померај између фазних напона  $120^\circ$
- Струје имају исте ефективне вредности у све три фазе
- У свакој од фаза се има исти фазни померај струје у односу на напон

За симетричне режиме је карактеристично да не постоје:

- струја кроз нулти проводник (нулти проводник може да постоји у случају да је спрега звезда)
- флукс који би од тачке на средини горњег јарма напуштао језгро и затварао се кроз ваздух и суд и конструктивне металне делове (нулти флукс који је у фази у сва три стуба простубног трансформатора па због тога нема повратну путању кроз језгро)



За симетричне режиме рада математички модел се своди на анализу струја и напона по фази, о чему је детаљније било речи у претходним поглављима.

У случају несиметричних режима рада могу да се појаве и струје кроз нулти проводник и флукс који напушта магнетно коло и затвара се кроз ваздух. Може се наслутити да параметри, попут реактансе магнетног, 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 (трофазним или монофазним) номиналне учестаности и номиналне ефективне вредности. Поред тога, фазни померај напона код трофазних система треба да буде  $120^\circ$ . Одступање од ових карактеристика напона изазива одређене последице, које, у зависности од природе и интензитета, могу бити:

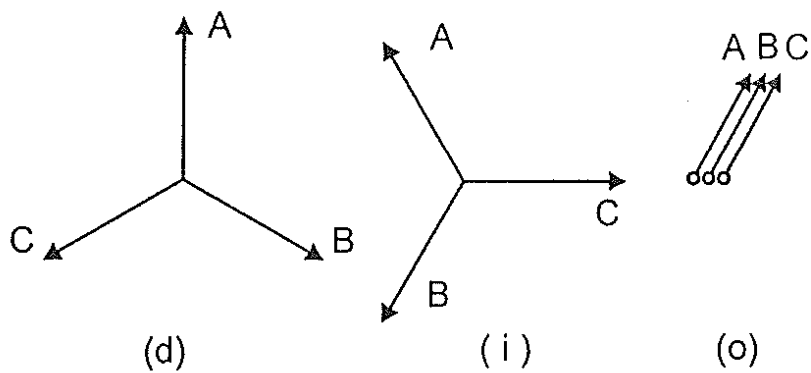
- мање опасни (мање повећање губитака, температура, вибрација или буке),
- такви да изазивају губитак функционалности пријемника електричне енергије (на пример због смањења максималног момента мотора)
- оштећења (на пример прегоревања извора светлости).

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 за несиметрични трофазни систем постављају једначине напонске и струјне равнотеже, уважавајући сопствене и флуksне обухвате између фаза, примењује се математичка трансформација која несиметрични трофазни систем разлаже на 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  $120^\circ$
- 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  $120^\circ$
- Нулти, у коме су фазори у све три фазе идентични

Поступак је следећи:

- пође се од несиметрије у трофазном систему и ова несиметрија се опише математичким исказом за напон или струју. Примера ради, за случај кратког споја између фазе и нуле, напон на месту и у фази у којој је дошло до кратког споја једнак је нули, а струје у друге две фазе су једнаке нули.
- изврши се трансформација несиметричног трофазног система у три уравнотежена система (директни, инверзни и нулти); за претходно описани пример несиметрични напон на месту квара, при чему су у две фазе напони једнаки номиналним и померени за  $120^\circ$ , а у трећој напон једнак нули би се трансформисао у напоне у три уравнотежена система (директни, инверзни и нулти)
- реше се директни, инверзни и нулти систем, односно одреде се расподеле струје у гранама и напони у чворовима у сваком од система
- изврши се инверзна трансформација, којом се из израчунатих вредности напона и струја у директном, инверзном и нултом систему добију вредности несиметричних напона у свим чворовима и струја у свим гранама у несиметричном трофазном систему.

На даље читати делове из књиге [1].

<https://www.techbooksyard.com/download/?file=10288>

Могуће download неће штети преко Google Chrome-a, већ да мора да се користи други browser.

## **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) и неутралног проводника.

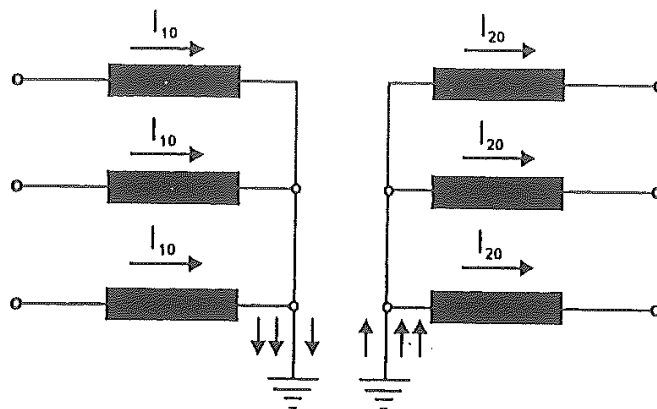
## **"Per unit" модели трофазних двонамотајних трансформатора у систему симетричних компоненти**

- Поглавље 8.6, почетак на страни 516.

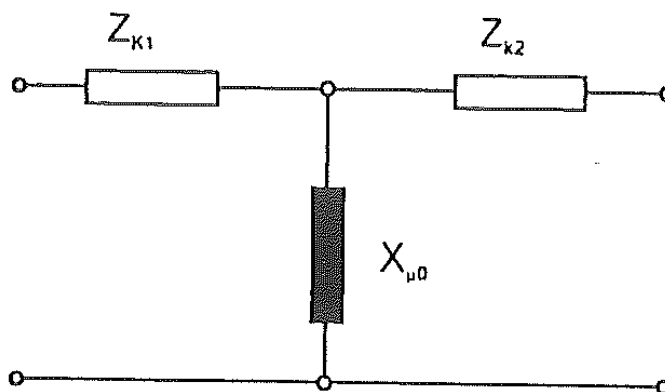
Импедансе трансформатора, односно заменска шема трансформатора као дела комплетне заменске шеме разматране електроенергетске мреже, у директном (d) и инверзном (i) систему су идентичне онима које су до сада разматране (први пут су дате на сликама 3.8. и 3.9.). Као заменска шема се може користити шема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

Импедансе трансформатора у нултом систему (о), са стране примара и са стране секундара значајно зависи од спреге трансформатора. У случају спреге звезда (Y), оне зависе од присуства неутралног проводника. Полазећи од слике 7.6., као и разумевања простирања флукса по стубу магнетног кола, закључује се следеће:

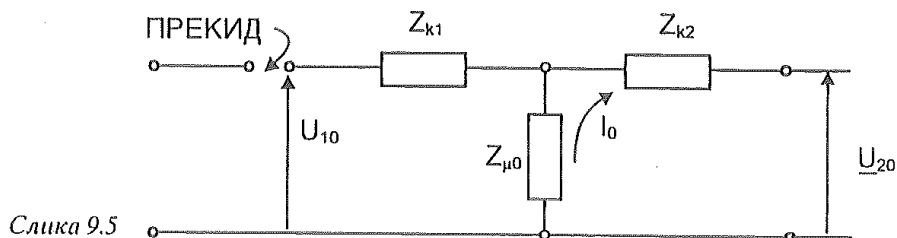
- (K1) Ако је спрега Y и не постоји неутрални проводник: импеданса у нултом систему (о) на напонској страни спрегнутој у Y је бесконачна (и моделује се у заменској шеми као отворен прекидач).
- (K2) Ако је спрега Y и постоји неутрални проводник (спрега YN): импеданса у нултом систему (о) на напонској 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 троугао (d), заменска шема трансформатора у нултом систему (о) је идентична заменској шеми у директном, односно инверзном, систему – слика 9.4, при чему је разлика у томе да је постоји отворен прекидач у нултој заменској шеми између мреже и стране спрегнуте у троугао.
  - (K4) Ако је спрега на другој напонској страни уп (звезда са неутралним проводником) - слика 9.3, заменска шема трансформатора у нултом систему (о) је идентична заменској шеми у директном, односно инверзном, систему – слика 9.4. У овом случају прекидач у нултој заменској шеми између мреже и стране уп је затворен.
  - Ако је спрега на другој напонској страни у (звезда без неутралног проводника), еквивалента импеданса трансформатора у нултом систему (о) која се види са стране прикључних ВН крајева је једнака:
    - Ако је језгро петостубно, приближно импеданси магнећења -  $Z_{\mu o}$  (слика 9.5):  $Z_o \approx Z_{\mu o}$
    - Ако је језгро тростубно, приближно збиру импедансе (отпорности намотаја и реактансе расипања) на посматраној напонској страни -  $Z_{k2}$  и импедансе једнаке количнику квадрата броја навојака и магнетног отпора простирању магнетног флукса ( $N^2/R_{\mu}$ ) од изласка из језгра до суда и гвоздених конструктивних делова кроз које се флукс затвара по изласку из магнетног кола -  $Z_{\mu o}$ :  $Z_o = Z_{k2} + Z_{\mu o}$ ; дакле, исто као у случају петостубног језгра, али је  $Z_{\mu o}$  у случају тростубног језгра 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 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 кроз саме намотаје зависи од спреге на другој напонској страни: струја се може појавити само у случају спреге уп на другој напонској страни (слика 7.6.).



Слика 9.3



Слика 9.4



Слика 9.5

### Несиметрични кварови (кратки спојеви):

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

#### Литература

[1] 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