

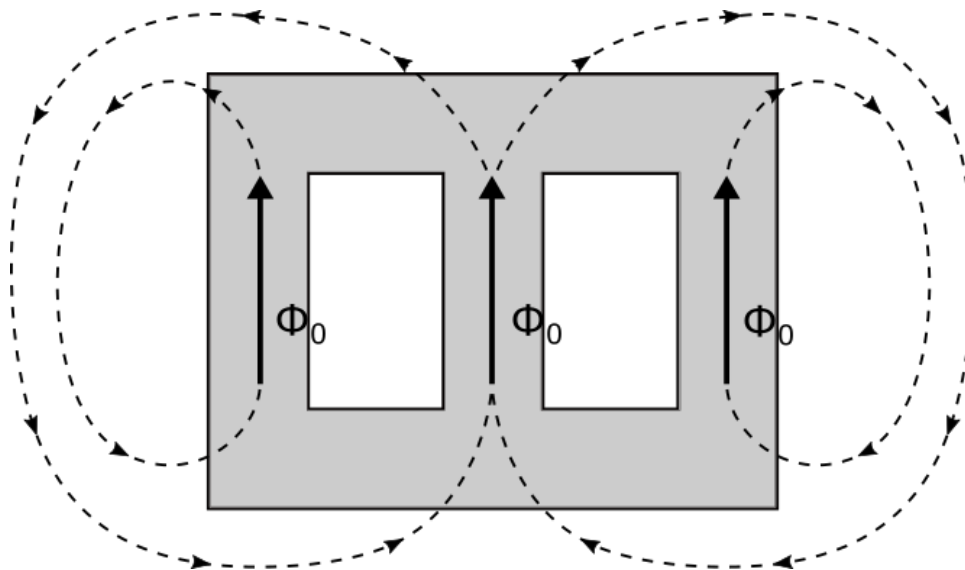
## 9. Несиметрични рад трофазних трансформатора

Детаљни математички модели приказани у претходним излагањима важили су за симетричне радне режиме трофазних трансформатора, које карактеришу симетричне струје и напони по фазама:

- Напони имају исте ефективне вредности у све три фазе
- Фазни померај између фазних напона  $120^\circ$
- Струје имају исте ефективне вредности у све три фазе
- Фазни померај струје у односу на напон у сваке три фазе је исти

За симетричне режиме је карактеристично да не постоји:

- струја кроз нулти проводник (нулти проводник може да постоји у случају спреге звезда)
- флукс који би напуштао језгро и затварао се кроз ваздух и суд и конструктивне металне делове (пример таквог флукса је флукс у „nulтом систему“ који је у фази у сва три стуба тростубног трансформатора, па због тога нема повратну путању кроз језгро и мора се затворити кроз путању ван језгра)



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. Из теоријских разматрања у претходном делу курса може се наслутити да параметри при несиметричним режимима могу значајно да се разликују од параметара коришћених при анализи симетричних режима. Илустрације ради, магнетни отпор флуксу који се затвара кроз ваздух је много већи, а, последично, реактанса магнећења по стубу много мања.

Електричне и магнетне појаве постају комплексније при несиметричним режимима, а тиме и математички модел који их описује. Најпогодније је применити **теорију симетричних**

**компоненти**, која је развијена управо за анализу несиметричних радних режима у трофазним електричним колима. Ова теорија се заснива на „математичкој фикцији“ да се **стварни несиметрични трофазни систем** посматра као **три фиктивна симетрична система**. Полазећи од стварног система формирају се три фиктивна. Следећи корак је вршење прорачуна у сваком од фиктивних система. На основу резултата прорачуна у фиктивним системима израчунавају се вредности електричних величина (напона и струја) у стварном несиметричном трофазном систему.

У пракси од интереса је познавати вредности напона и струја при несиметричним режимима, и то 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 напонем (симетричним трофазним или монофазним) номиналне учестаности и номиналне ефективне вредности. Одступање од ових карактеристика напона изазива одређене последице, које, у зависности од природе и интензитета, могу бити:

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

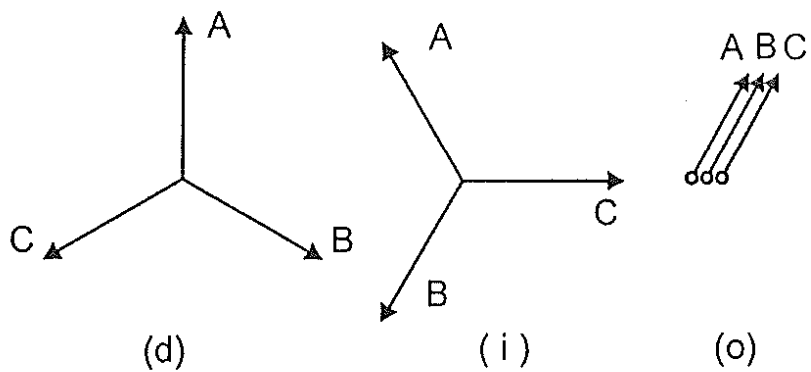
У несиметричне режиме спадају и несиметрични кварови, од којих неки доводе и до угрожености човека и животиња. Примера ради, при споју фазног проводника са уземљеним неутралним проводником може доћи до појаве опасних напона између изложених електропроводних делова и земље, односно до излагању човека који стоји на земљи и додирује изложени електропроводни део.

Постоје два квалитативно различита типа несиметричних 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, стварни несиметрични трофазни систем се разлаже на три фиктивна 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

У наставку текст ће се реферисати на делове уџбеника [1], који се може наћи на линку:

[https://web.nit.ac.ir/~shahabi.m/M.Sc%20and%20PhD%20materials/Power%20System%20Transient%20Analysis%20Course/Books/Power%20System%20Analysis%20and%20Design%20by%20Glover%20and%20Sarma\\_6thEdition.pdf](https://web.nit.ac.ir/~shahabi.m/M.Sc%20and%20PhD%20materials/Power%20System%20Transient%20Analysis%20Course/Books/Power%20System%20Analysis%20and%20Design%20by%20Glover%20and%20Sarma_6thEdition.pdf)

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

- [1], Поглавље 8.1, почетак на страни 493.

## 9.3. Симетричне компоненте импедансног оптерећења

- [1], Поглавље 8.2, почетак на страни 499, читати до краја примера 8.4. Применом принципа приказаног у 8.2 може се математички описати и случај различитих импеданси оптерећења по фазама (различите  $Z_{Ya}$ ,  $Z_{Yb}$  и  $Z_{Yc}$ ).
- [1], 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.

## 9.4. Комплетан модел система

За моделовање целог система, који садржи импедансе оптерећења и елементе мреже (ваздушне водове, каблове, трансформаторе итд.) у моделу система се појављују и импедансе којима се моделују елементи мреже. У одељку 9.5. се разматра модел двонамотајних трансформатора. Специјални случај општег модела који садржи и импедансе оптерећења и импедансе елемената мреже, представљају кварови, када се уместо импеданси оптерећења јављају кратки спојеви (импеданса једнака нули) или отворене везе (бесконачна импеданса). Кратки спојеви се разматрају у поглављу 9.6.

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

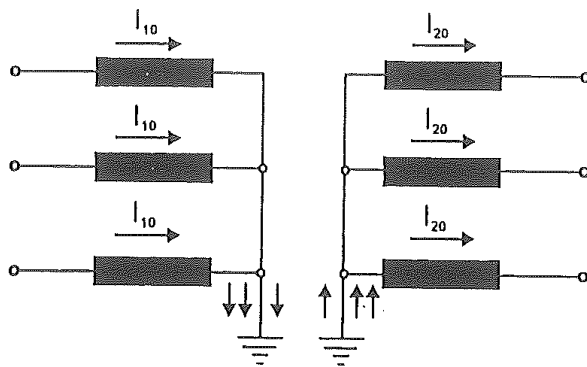
- Поглавље 8.6, почетак на страни 516.

Импедансе трансформатора, односно заменска шема трансформатора као дела комплетне заменске шеме разматране електроенергетске мреже, у директном (d) и инверзном (i) систему су идентичне

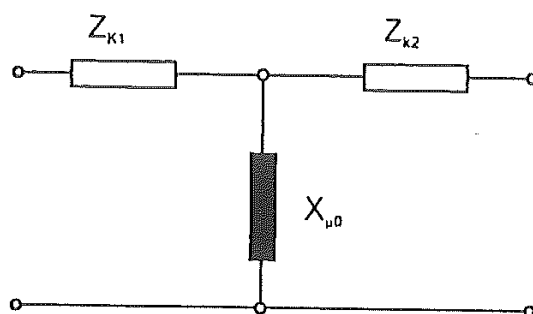
онима које су до сада разматране (први пут су дате на сликама 3.8. и 3.9., поновљено на слици 7.6). Као заменска шема се може користити шема трансформатора са или без гране магнећења.

Импедансе трансформатора у нултом систему (0), са стране примара и са стране секундара значајно зависе од спреге трансформатора. У случају спреге звезда (Y), оне зависе од присуства неутралног проводника. Полазећи од слике 7.6., као и разумевања простирања флуksа по стубу магнетног кола, закључује се следеће:

- (K1) Ако је спрега Y и не постоји неутрални проводник: импеданса у нултом систему (0) на напонској страни спрегнутој у Y је бесконачна (и моделује се у заменској шеми као отворен прекидач).
- Ако је спрега Y и постоји неутрални проводник (спрега YN): импеданса у нултом систему (0) зависи од спреге на другим напонским странама (на даље ће се посматрати двонамотајни трансформатори):
  - (K2) Ако је спрега на другој напонској страни уп (звезда са неутралним проводником) - слика 9.3, заменска шема трансформатора у нултом систему (0) је по облику идентична, са параметрима блиским параметрима у 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.
  - (K3) Ако је спрега на другој напонској страни троугао (d), заменска шема трансформатора у нултом систему (0) је по облику идентична, са параметрима блиским параметрима у заменској шеми у директном, односно инверзном, систему – слика 9.4, при чему постоји прекид (отворен прекидач) у нултој заменској шеми између мреже и стране спрегнуте у троугао.
  - (K4) Ако је спрега на другој напонској страни у (звезда без неутралног проводника), еквивалента импеданса трансформатора у нултом систему (0) је једнака збиру отпорности намотаја и реактансе расипања на страни YN и импедансе магнећења ( $Z_{\mu 0}$ ), чија вредност зависи од тога да ли језгро петостубно или тростубно. У случају петостубног језгра флуks се затвара кроз повратне стубове, због чега је магнетни отпор ( $R_{\mu}$ ) мањи, а импеданса магнећења ( $Z_{\mu 0} = N^2 / R_{\mu}$ ) већа него у случају тростубног језгра, када је путања магнетног флуksа кроз стуб магнетног кола, затим кроз ваздух и кроз суд и гвоздене конструкционе делове трансформатора. Магнетни отпор у случају тростубног трансформатора има велики отпор због дела путање кроз ваздух. У случају петостубног језгра нулта импеданса је приближно једнака импеданси магнећења код симетрично оптерећеног трансформатора.
- (K5) У случају спреге D, нулте компоненте струје се не појављују у линијској струји јер су исте у све три фазе и немају где да се затворе. Због тога се спрега D са стране мреже види као прекид у нултој заменској шеми (видети K3). 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 9.3



Слика 9.4

### 9.6. Несиметрични кварови (кратки спојеви)

Принцип формирања заменске шеме која описује кратак спој је да се напојна мрежа до места кратког споја замењује Тевеновим генератором, који садржи идеални напонски извор и имедансу. То важи за сваки од три фиктивна  $d$ ,  $i$  и  $0$  система, при чему идеални напонски извор фигурише само у  $d$  систему, док се мрежа у  $i$  и  $0$  системима еквивалентира импедансом мреже.

- Поглавље 9, почетак на страни 547, читати до краја примера 9.6. (страница 566). **Садржај поглавља 9.3, 9.4, 9.5 из [1] представља садржај из кога ће се постављати теоријска питања на колоквијуму / испиту.**

#### 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