

Испит спрематим по овом тексту.

Делове текста између маркера

и

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

4.Б. ГУБИЦИ СНАГЕ, СТЕПЕН ИСКОРИШЋЕЊА И ПРОМЕНА НАПОНА

4Б. 1. ГУБИЦИ У ГВОЖЂУ

О губицима у гвожђу је било речи у одељку 2.1 (одељак о магнетским материјалима) и у одељку 3.4 (одељак о празном ходу).

Губици снаге у гвожђу се одређују на основу индукције у гвожђу, што је величина коју одређује пројектант трансформатора. **На основу индукције у гвожђу и карактеристике магнетних лимова** (која се добија од произвођача лимова) одређује се вредност специфичних губитака (W/m^3), а затим и укупних губитака, множењем специфичних губитака са масом језгра. С обзиром да реална расподела магнетног флукса мало одступа од идеалне равномерне расподеле, пре свега на местима састављања лимова језгра, стварни губици у гвожђу одступају од прорачунске вредности добијене на наведени поједностављен начин. Због тога се уводи **корекција чији је износ дефинисан на основу претходног искуства**. Произвођачи трансформатора дефинишу ове корекције на основу емпиријских података - о вредностима губитака у гвожђу израчунатих коришћењем упрошћеног поступка и губитака који су на произведеном трансформатору измерени у огледу празног хода.

Подсетимо да **флуks у магнетном колу може да се мења током експлоатације** трансформатора, у зависности од мрежног напона на који је прикључен примар, струјног оптерећења (оно утиче на пад напона на отпорности и реактанси расипања примара) и, у случају да он постоји, од положаја регулатора напона. Под претпоставком да су параметри у грани магнетнења константни, губици у магнетном колу би били одређени као **однос квадрата напона на импеданси паралелне импедансе празног хода (R_a, X_μ) и активне отпорности импедансе празног хода R_a** .

Дакле, могуће је одредити снагу губитака у магнетном колу у различитим радним режимима и ту снагу користити при одређивању губитака, степена искоришћења и загревања трансформатора, али се то обично не ради, већ се приближно сматра да су губици у магнетном колу једнаки њиховој номиналној вредности. Разлог је поједностављење прорачуна, који, и поред занемаривања наведених фактора, остаје довољно тачан за потребну намену.

4Б. 2. ГУБИЦИ УСЛЕД СТРУЈЕ ОПТЕРЕЋЕЊА

Губици који су последица протисања струје кроз намотаје (губици због оптерећења) јављају се у **самим намотајима и у конструкционим деловима трансформатора**.

Губици који се због протицања струје јављају у самим намотајима уобичајено се представљају као збир две компоненте:

1) Цулови губици – они се рачунају полазећи од претпоставке да се струја равномерно расподељује по попречном пресеку проводника, односно да је површинска густина струје униформна и једнака количнику струје која протиче кроз намотај ка мрежи и попречног пресека проводника,

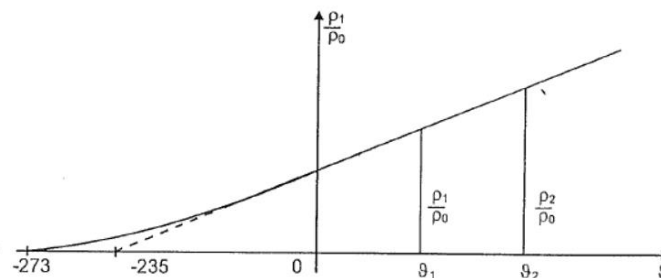
2) Губици који настају као последица одступања стварног профила струје по попречном пресеку проводника од равномерног који је наведен у тачки 1).

Прва компонента (Цулови губици) се одређује на једноставан начин, множењем отпорности која би се имала при протицању једносмерне струје и квадрата ефективне вредности струје кроз намотај:

$$P_{g,J} = \sum (R I^2) = \sum \left(\rho \frac{l}{s} I^2 \right)$$

Губици зависе од струје директно ($\sim I^2$), али и индиректно, преко специфичне електричне отпорности ρ , која је температурно зависна (температура намотаја зависи од струје од температуре амбијента).

На температури апсолутне нуле ($\vartheta = -273^\circ\text{C}$) може се узети да је вредност специфичне електричне отпорности ρ за све метале приближно једнака нули. На слици 4.1 је приказана промена ρ у функцији температуре за бакар, као и линеаризована функција ове зависности (испрекидана линија). За алуминијум се има слична промена, с тим да се пресек са апсцисом, уместо при -235°C остварује при -225°C .



Слика 4Б.1

Из сличности троуглова, за бакар се може написати следећа веза између вредности ρ при температури ϑ_1 (ρ_1) и при температури ϑ_2 (ρ_2):

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{235 + \vartheta_2}{235 + \vartheta_1} \quad (4Б.1)$$

Промена отпорности услед промене температуре има значајну вредност: примера ради, при температури од 75°C (ова вредност одговара уобичајеном номиналном режиму рада, па се често усваја као референтна) већа је од вредности отпорности при 25°C

$$\frac{R_{75}}{R_{25}} = \frac{235 + 75}{235 + 25} = 1.192$$

пута, односно скоро 20 %.

Дакле, однос губитака (P_I) у радном режиму са струјом I_1 и температуром намотаја ϑ_1 и у радном режиму са струјом I_2 и температуром намотаја ϑ_2 износи

$$\frac{P_{J1}}{P_{J2}} = \frac{235 + \vartheta_1}{235 + \vartheta_2} \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^2 \quad (4Б.2)$$

Температуре намотаја ϑ_1 и ϑ_2 зависе од снаге губитака, и одређују се применом алгоритама за термичке прорачуне трансформатора, тако да се при прорачунима високе тачности мора применити итеративна метода.

Наведени Џулови губици се израчунавају као производ отпора намотаја једносмерној струји и квадрата ефективне вредности струје која протиче кроз намотај и мрежу на коју је он повезан. За Џулове губитке се често користи исказ да су то губици који би се имали при протицању једносмерне струје једнаке ефективної вредности стварне наизменичне струје. Овакав исказ индиректно имплицира да у случају протицања једносмерне струје нема ефекта потискивања струје, што значи и да се вредност отпора може одредити коришћењем елементарног израза $\rho \frac{l}{s}$.

Додатни губици (P_d), који се могу одредити помоћу вредности Филдовога фактора, (4А.83), зависе од температуре, али коефицијент њихове температурне промене има реципрочну вредност од коефицијента температурне промене Џулових губитака, као што је већ изречено у тексту испод израза (4А.83).

Губици услед струје оптерећења у номиналном режиму рада представљају гарантовану вредност за трансформатор и она се проверава током фабричких примопредајних испитивања. Поступак је следећи. Оглед кратког споја (одређивање активне и реактивне компоненте напона кратког споја и губитака) се врши при номиналној струји (или вредности блиској номиналној; у том случају се мора извршити и додатно прерачунавање на номиналну струју), у хладном стању, на температури амбијента (ϑ_1). Из резултата овог мерења је потребно одредити губитке при радној температури, која се постиже при номиналној струји и дефинисаној температури амбијента. Како би се избегла потреба да познавањем номиналне радне температуре намотаја, поступак предвиђа прерачунавање на средњу температуру намотаја од 75 °С, која представља њену типичну вредност.

Следећа апроксимација је да се губици у суду и конструкционим деловима трансформатора (P_{konstr}) мењају са струјом и температуром на исти начин као додатни губици у намотају (P_d), као и то да је њихова температура такође 75 °С.

Након усвајања наведених упрошћења, за трофазни трансформатор може се написати

$$P_k(\vartheta_1) = P_{DC}(\vartheta_1) + P_{AC}(\vartheta_1) = 3(R_1(\vartheta_1) + R_2'(\vartheta_1))I_1^2 + P_{AC}(\vartheta_1) \quad (4Б.3)$$

Веза новоуведених ознака са до сада коришћеним величинама и ознакама је: $P_{DC}=P_J$, $P_{AC}=P_d + P_{konstr}$.

R_1 и R_2' представљају отпор примара и отпор секундара једносмерној струји сведен на примар. Ове вредности се одређују коришћењем UI методе, као однос једносмерног мерног напона и једносмерне мерне струје, при температури ϑ_1 . Из измерене вредности губитака у огледу кратког споја при температури ϑ_1 ($P_k(\vartheta_1)$) и израчунате вредности

$$P_{DC}(\vartheta_1) = 3(R_1(\vartheta_1) + R_2'(\vartheta_1))I_1^2, \quad (4Б.4)$$

добија се

$$P_{AC}(\vartheta_1) = P_k(\vartheta_1) - P_{DC}(\vartheta_1), \quad (4Б.5)$$

а из њих вредности компоненти DC и додатних губитака на температури 75 °C:

$$P_{DC75} = \frac{235 + 75}{235 + \vartheta_1} P_{DC \vartheta_1} \quad (4Б.6)$$

$$P_{AC75} = \frac{235 + \vartheta_1}{235 + 75} P_{AC \vartheta_1} \quad (4Б.7)$$

па је:

$$P_{k75} = P_{DC75} + P_{AC75} \quad (4Б.8)$$

Напомена: Прецизније описивање промене губитака у суду и конструкционим деловима трансформатора са температуром је могуће, али није уобичајено, јер не би значајно утицало на коначну вредност губитака. Губици у суду и конструкционим деловима трансформатора при температури ϑ_1 могу се одредити из огледа кратког споја (при температури ϑ_1) тако што се од измерених губитака у огледу кратког споја одузму израчунати губици у намотају ($P_{DC} + P_d$), где се P_d одређују коришћењем вредности Филдовога фактора или на неки прецизнији начин). Они би се могли прерачунати на радну температуру конструкционих делова, коришћењем температурног коефицијента за конструкционе елементе (челик), при чему губици опадају са порастом температуре, аналогну додатним губицима у намотају.

При практичним прорачунима често се примењује и апроксимација да се ови губици посматрају као температурно независни. Ови губици су сразмерни са квадратом струје (флукс који се затвара кроз конструкционе делове је сразмеран струји оптерећења, индуковане струје су сразмерне флуксу, а губици сразмерни са квадратом индукованих струја), што значи да су сразмерни вредности одређеној у огледу кратког споја помноженој са квадратом односа тренутне струје и струје током огледа кратког споја. Дакле, при овој апроксимацији компонента DC губитака, одређена преко R_1 и R_2' измерених једносмерном струјом у хладном стању, расте линеарно са порастом средње температуре намотаја; компонента додатних губитака, одређена преко прорачуна поља, обрнуто је пропорционална средњој температури намотаја; губици у конструкционим деловима, одређени као разлика измерених губитака у огледу кратког споја и израчунатих DC и додатних губитака, не мењају се са температуром. Све три компоненте расту са квадратом струје оптерећења.

4Б. 3. СТЕПЕН ИСКОРИШЋЕЊА СНАГЕ

Степен искоришћења представља однос корисне (излазне) P_2 и утрошене (улазне) P_1 снаге. Разлика улазне и излазне снаге представља снагу генерисања топлотне енергије ΣP_g .

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P_g} = \frac{P_1 - \Sigma P_g}{P_1} \quad (4Б.9)$$

Као номинална снага трансформатора дефинише се његова привидна снага. С обзиром да трансформатор по правилу ради при номиналном напону или вредности напона блиској номиналној, номинални режим рада може се дефинисати и као рад са струјом једнаком номиналној. Степен оптерећења трансформатора (β) уобичајено се исказује као однос струје секундара и номиналне струје секундара, или као однос привидне снаге секундара и номиналне привидне снаге секундара:

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2n}} = \frac{U_{2n} I_2}{U_{2n} I_{2n}} = \frac{S}{S_n} \quad (4Б.10)$$

Корисна (активна) снага је једнака производу привидне снаге и фактора снаге ($\cos \varphi$) оптерећења (на секундарној страни трансформатора), тако да је степен искоришћења снаге једнак

$$\eta = \frac{\beta S_n \cos \varphi}{\beta S_n \cos \varphi + P_k + P_{Fe}} \quad (4Б.11)$$

P_{Fe} представља губитке у гвожђу, а P_k губитке услед струјног оптерећења. У разматрањима која следе, сматраће се да су губици у гвожђу (P_{Fe}) једнаки губицима у празном ходу (P_0), а за губитке услед струјног оптерећења да су једнаки губицима одређеним у огледу кратког споја на температури ϑ_1 ($P_k(\vartheta_1)$), прерачунатим на средњу температуру намотаја од 75°C ($P_k(75^\circ\text{C})$) – видети изразе (4Б.3) до (4Б.8), помноженим са квадратом степена оптерећења трансформатора (β). Тачнији израз за вредности губитака и степен искоришћења се могу успоставити на основу претходних излагања.

$$\eta = \frac{\beta U_{2n} I_{2n} \cos \varphi}{\beta U_{2n} I_{2n} \cos \varphi + \beta^2 P_{k75} + P_0} \quad (4Б.12)$$

Максимални степен искоришћења снаге се одређује као максимум функције $\eta(\beta)$. Изједначавањем извода степена искоришћења $\eta(\beta)$ са нулом долази се до

$$\frac{d\eta}{d\beta} = 0: \quad (4Б.13)$$

$$U_{2n} I_{2n} \cos \varphi \frac{1}{\beta U_{2n} I_{2n} \cos \varphi + \beta^2 P_{k75} + P_0} + \beta U_{2n} I_{2n} \cos \varphi (-1) \frac{U_{2n} I_{2n} \cos \varphi + 2\beta P_{k75}}{(\beta U_{2n} I_{2n} \cos \varphi + \beta^2 P_{k75} + P_0)^2} = 0 \quad (4Б.14)$$

$$U_{2n} I_{2n} \cos \varphi - \beta U_{2n} I_{2n} \cos \varphi \frac{U_{2n} I_{2n} \cos \varphi + 2\beta P_{k75}}{\beta U_{2n} I_{2n} \cos \varphi + \beta^2 P_{k75} + P_0} = 0 \quad (4Б.15)$$

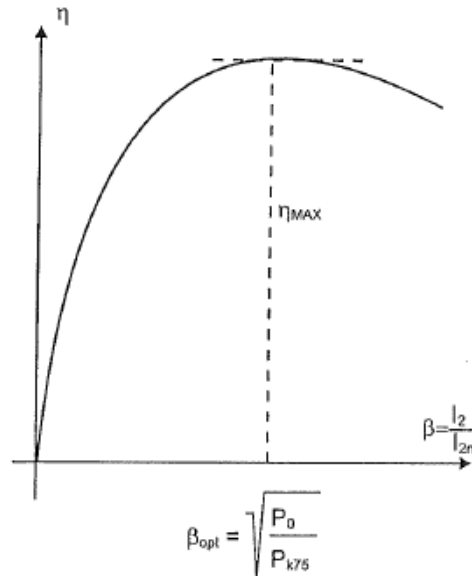
$$U_{2n} I_{2n} \cos \varphi (\beta U_{2n} I_{2n} \cos \varphi + \beta^2 P_{k75} + P_0) = \beta U_{2n} I_{2n} \cos \varphi (U_{2n} I_{2n} \cos \varphi + 2\beta P_{k75}) \quad (4Б.16)$$

$$\beta (U_{2n} I_{2n} \cos \varphi)^2 + \beta^2 P_{k75} U_{2n} I_{2n} \cos \varphi + P_0 U_{2n} I_{2n} \cos \varphi = \beta (U_{2n} I_{2n} \cos \varphi)^2 + 2\beta^2 P_{k75} U_{2n} I_{2n} \cos \varphi \quad (4Б.17)$$

$$P_0 U_{2n} I_{2n} \cos \varphi = \beta^2 P_{k75} U_{2n} I_{2n} \cos \varphi \quad (4Б.18)$$

Решавањем претходног израза по β долази се до вредности оптерећења (β^*) при коме се има максимални степен искоришћења:

$$\beta^* = \sqrt{\frac{P_0}{P_{k75}}} \quad (4Б.19)$$



Слика 4Б.2

Дакле, када би трансформатор радио са константним оптерећењем (β), то би представљало рад у радној тачки са максималним степеном искоришћења у случају да важи услов дат изразом (4Б.19).

У дужем временском периоду, на пример у типичном циклусу од годину дана (t_g), збирни степен искоришћења, исказан преко енергије, једнак је

$$\eta_g = \frac{\int_0^{t_g} P(t) dt}{\int_0^{t_g} P(t) dt + \int_0^{t_g} P_g(t) dt} \quad (4Б.20)$$

У уобичајеном случају да је оптерећење трансформатора током године мање или једнако номиналном ($\beta_{max} < 1$), збирни степен искоришћења ће бити већи ако максимум степена искоришћења снаге (η_{max}) не наступи при номиналном, већ при неком мањем оптерећењу (β^*).

Искуство показује да је за типичне облике промене дијаграма оптерећења дистрибутивних трансформатора током године еквивалентна вредност оптерећења, одређена по критеријуму да се при њој има исти степен искоришћења енергије (β_{ekv}),

$$\frac{\int_0^{t_g} P(t) dt}{\int_0^{t_g} P(t) dt + \int_0^{t_g} P_g(t) dt} = \frac{\beta_{ekv} U_{2n} I_{2n} \cos \varphi}{\beta_{ekv} U_{2n} I_{2n} \cos \varphi + \beta_{ekv}^2 P_{k75} + P_0} \quad (4Б.21)$$

износи око $\beta_{ekv} \approx 0.45$. То значи да би се максимална вредност степена искоришћења, исказана преко укупне пренете и изгубљене енергије, постигла у случају да је корен количника номиналних губитака у магнетном колу (P_0) и номиналних губитака услед оптерећења (P_k (75 °C)) једнак ≈ 0.45 , што значи да однос губитака (P_0 / P_k (75 °C)) треба да износи ≈ 0.2 . Трансформатор се може пројектовати тако да се оствари ова вредност, а да се при томе имају складне димензија магнетног кола и намотаја (на пример однос висине и пречника намотаја).

Оптерећење при коме се достиже максимум степена искоришћења не зависи од фактора снаге (израз (4Б.19)). Из израза (4Б.12) једноставно се може закључити да се апсолутни максимум степена искоришћења постиже при фактору снаге $\cos \varphi = 1$, и за оптерећење $\beta_{opt} = \sqrt{(P_0 / P_{k75})}$.

4Б. 4. Мере за повећање енергетске ефикасности

Повећања енергетске ефикасности код трансформатора подразумева смањење губитака енергије као паразитног ефекта при конверзији енергије са једног на други напонски ниво.

Једна од "вечитих идеја" је остварити суперпроводност намотаја, односно применити такве материјале и охладити их на толико ниске температуре да им отпор падне на тако малу вредност да губици у намотајима постану занемарљиви. Ово је изводљиво, али стање технологије, цена оваквог постројења и његова комплексност, па самим тим и тешко одржавање и повећан ризик од испада из погона, нису довели до њихове значајније примене у пракси. Не треба заборавити и утрошак енергије постројења за добијање течног хелијума или азота као расхладног средства (њихова температура се мора одржавати на веома ниским вредностима; развојем савремених материјала повећава се температура при којој се постижу суперпроводна својства, али је та температура и даље веома ниска). Поред температуре, услов за постизање суперпроводних својстава је да јачина магнетног поља у коме се налази проводник не прелази граничне вредности. Због наведених разлога, суперпроводни намотаји су још увек на нивоу истраживачких пројеката и пилот постројења.

Следећа могућност је оптимизација броја трансформатора у паралелном раду. Паралелисањем више трансформатора смањују се губици у намотајима (они су сразмерни квадрату струје), а повећавају се губици у магнетном колу. Пример: ако је оптерећење једног трансформатора β , губици износе

$$P_{g1} = \beta^2 P_{k75} + P_0 \quad (4Б.22)$$

По укључењу другог трансформатора, односно при паралелном раду два трансформатора, губици би износили

$$P_{g1} = 2 \left(\frac{\beta}{2} \right)^2 P_{k75} + 2P_0 = \beta^2 \frac{P_{k75}}{2} + 2P_0 \quad (4Б.23)$$

Смањење губитака енергије, односно повећање степена искоришћења може се постићи повећањем димензија трансформатора (повећање пресека магнетног кола, чиме се смањује магнетна индукција и губици у језгру, или повећањем пресека намотаја, чиме се смањује густина струје и губици у намотају). Повећање димензија значи и повећање цене трансформатора. Актуелизацијом трошкова, тако што се на раније трошкове (најранији су трошкови изградње постројења, односно набавке трансформатора) примењује каматна стопа, може се проценити да ли се исплати иницијално улагање у већи трансформатор, који има мање губитке, јер се његовом применом смањују каснији експлоатациони губици и остварује смањење експлоатационих трошкова. Овакав приступ може бити интересантан у специфичним условима експлоатације трансформатора, на пример у подручјима где је у дужем временском периоду током године оптерећење веома мало, попут области у којима се доминантно налазе туристички и викенд објекти. У таквим случајевима има смисла применити трансформаторе који имају мале губитке у магнетном колу. Овакав закључак би проистекао и након одређивања вредности β_{ekv} према изразу (4Б.21) и применом поступка описаног у тексту непосредно после израза (4Б.21).

Једна од могућности да се повећа енергетска ефикасност, односно смањи изгубљена енергија, је да се топлота која се ствара у трансформатору искористи за загревање просторија или загревање воде.

Ова могућност би се могла реализовати коришћењем стандардних компактних хладњака уље - вода. При томе је битно да се осигура да проток воде кроз хладњак и температура воде на уласку у хладњак остану у опсегу који гарантује снагу хлађења за коју је хладњак предвиђен. Поред тога, компактни хладњаци морају бити одржавани, односно морају се чистити, јер током рада долази до таложења материја из уља, а посебно воде, на цеви у хладњаку, што доводи до смањења расхладне снаге хладњака, а тиме и до повећања температуре уља. Одржавање температуре воде на уласку у хладњак мора се остварити у свим радним режимима система. Примера ради, у зимском периоду, вода се може загревати у хладњаку уље - вода, загрејана вода цевима довести до размењивача топлоте вода – ваздух; ваздух загрејан у том размењивачу топлоте може се користити за загревање просторија, а вода охлађена у размењивачу топлоте вода - ваздух цевима се враћа на улаз хладњака уље - вода. У току лета ово није опција.

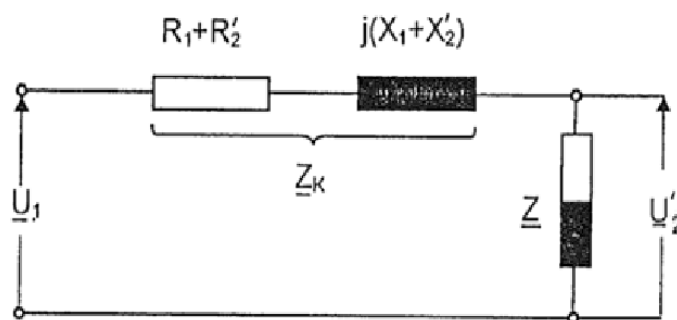
4Б.5. Израчунавање промене напона

За понашање трансформатора као дела електроенергетске мреже битна је промена напона услед протицања струје. Најчешћи случај је да струја на секундару трансформатора има индуктивни карактер и тада на трансформатору долази до пада напона (напон на секундару сведен на примар је мањи од напона примара). Уколико струја има капацитивни карактер, сведена вредност напона секундару може да буде већа од напона примара.

Прорачун промене напона се уобичајено врши коришћењем комплетне Т заменске шеме. Струја у попречној грани у односу на струју оптерећења трансформатора је по правилу толико мала да практично не утиче на пад напона на трансформатору.

У случају мале струје оптерећења, струја у грани магнетнења утиче на израчунату вредност пада напона, али је пад напона у тим случајевима толико мали да грешка коју уноси занемарење струје у грани магнетнења неће угрозити критеријум максималне дозвољене промене напона на трансформатору. Уколико се баш жели тачније одређивање вредности пада напона у случајевима малих, поготову доминантно активних, оптерећења, треба уважити и струју кроз грану магнетнења заменске шеме.

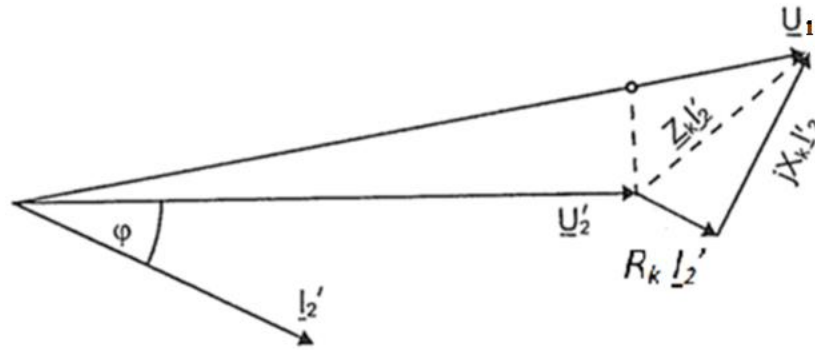
Еквивалентна шема након занемарења гране магнетнења приказана је на слици 4Б.3: на ред са импедансом оптерећења \underline{Z} везује се само импеданса кратког споја трансформатора \underline{Z}_k .



Слика 4Б.3

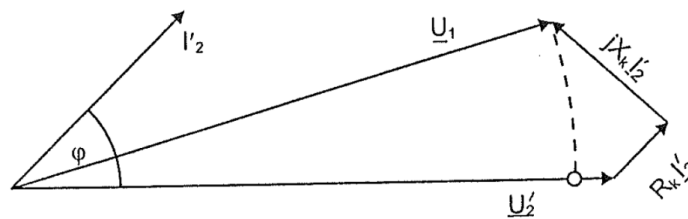
На слици 4Б.4 приказан је фазорски дијаграм за случај да оптерећење на секундару има индуктивни карактер. Као референтни фазор је усвојен фазор напона на секундару сведен на примар (\underline{U}_2'). За разматрани случај индуктивног оптерећења, струја на секундару касни за напонам на секундару. Напон на примару \underline{U}_1 једнак је збири напона \underline{U}_2' и пада напона који струја \underline{I}_2' ($=\underline{I}_1$) ствара на импеданси \underline{Z}_k ($=R_k+jX_k$). Фазор промене напона износи $\Delta\underline{U}=\underline{Z}_k \underline{I}_2'$. **Пад напона је једнак**

$|\underline{U}_1| - |\underline{U}_2'|$, а не $|\Delta \underline{U}|$, јер је ра правилан рад пријемника (генерално напонске прилике у мрежи) релевантна ефективна вредност напона на пријемнику (на произвољном месту у мрежи).



Слика 4Б.4

На слици 4Б.5 приказан је фазорски дијаграм за случај капацитивног оптерећења на секундару. У приказаном случају, напон секундара сведен на примар има већу вредност од напона примара: $|\underline{U}_2'| > |\underline{U}_1|$.



Слика 4Б.5

Увођењем ознака

$$U_r = R_k I_2' \quad (4Б.24)$$

$$U_x = X_k I_2' \quad (4Б.25)$$

а затим и

$$a = U_r \cos \varphi + U_x \sin \varphi \quad (4Б.26)$$

$$b = U_x \cos \varphi - U_r \sin \varphi \quad (4Б.27)$$

може се написати

$$U_2' + a = U_1 \cos \theta \quad (4Б.28)$$

На слици 4Б.6, за случај индуктивног оптерећења, доцртане су још неке карактеристичне величине, преко којих ће се успоставити приближан израз за израчунавање пада напона.

Имајући у виду однос величина, пре свега да су a и b много мањи од U_1 , други сабирак у изразу (4Б.36), који садржи квадрат мале величине, много је мањи од првог, па се може занемарити без значајног губитка тачности прорачуна. Тада се израз (4Б.36) своди на

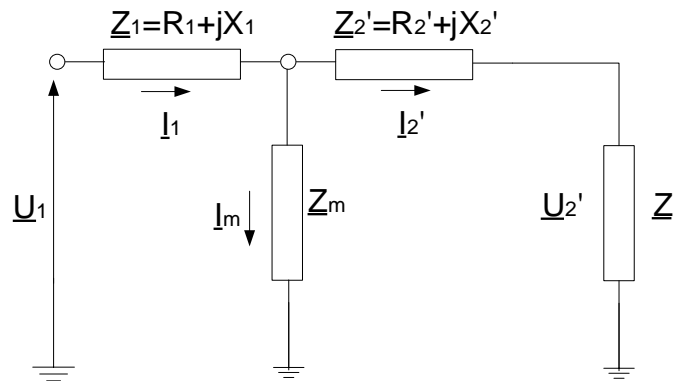
$$\Delta U \approx a = U_r \cos \varphi + U_x \sin \varphi \quad (4Б.37)$$

Изрази (4Б.36) и (4Б.37) могу се написати и у процентуалним вредностима, тако што се поделе са номиналном вредношћу напона и помноже са 100. Израз (4Б.36) исказан у процентуалним вредностима (и то за случај да је напон на примару једнак номиналном, $u_1 = u_{1n}$) гласи

$$\Delta u_{\%} = a_{\%} + \frac{b_{\%}^2}{200} \quad (4Б.38)$$

Испитно питање:

Написати изразе, укључујући и две једначине по другом Кирхофовом закону и једну једначину по првом Кирхофовом закону, чијим се решавањем може доћи до вредности пада напона на трансформатору без да се врши било какво занемарење. Импеданса оптерећења секундар је позната – њена сведена вредност на примар износи Z' .



Слика 4Б.6

Систем три комплексне једначине са три непознате (I_1 , I_2' и I_m):

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_1 \underline{I}_1 + \underline{Z}_m \underline{I}_m \quad (4Б.39)$$

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_1 \underline{I}_1 + \underline{Z}'_2 \underline{I}'_2 + \underline{Z}' \underline{I}'_2 \quad (4Б.40)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_m + \underline{I}'_2 \quad (4Б.41)$$

Овај систем једначина једноставно се решава у Mathcad-у.

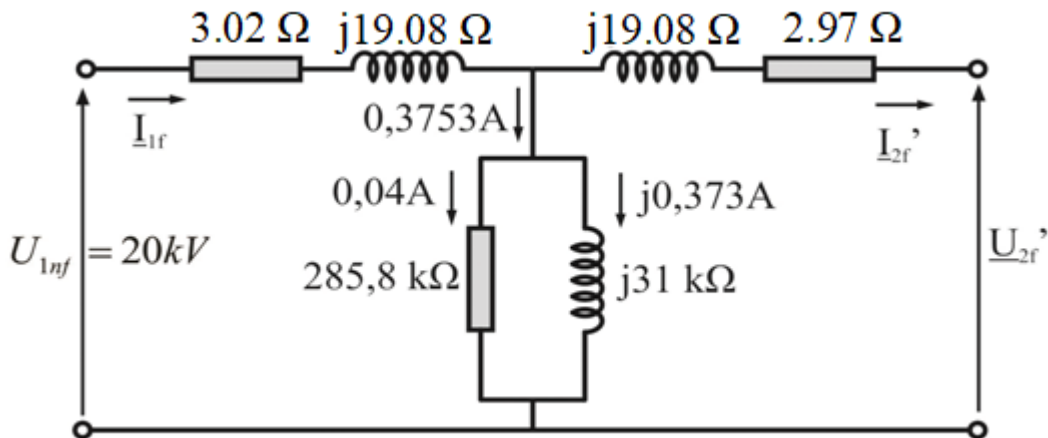
Вредност напона на секундару:

$$\underline{U}'_2 = \underline{Z}' \underline{I}'_2 \quad (4Б.42)$$

Пад напона:

$$\Delta u_{\%} = 100 \frac{U_1 - U_2'}{U_1} = \frac{|\underline{U}_1| - |\underline{U}'_2|}{|\underline{U}_1|} \quad (4Б.43)$$

Пример решења у Mathcad-у је дат за номинално, чисто омско, оптерећење.



$$i := \sqrt{-1}$$

Ulazni podaci:

$$rK_I := 3.02 \quad xK_I := 19.08 \quad rK_II := 2.97 \quad xK_II := 19.08$$

$$X\mu := 31 \cdot 10^3 \quad Ra := 285.8 \cdot 10^3 \quad U1nf := 20 \cdot 10^3 \quad Sn := 1000 \cdot 10^3$$

$$Zopt := \frac{U1nf^2}{Sn} \quad Z1 := rK_I + i \cdot xK_I \quad Z2 := rK_II + i \cdot xK_II \quad Zm := \frac{Ra \cdot i \cdot X\mu}{Ra + i \cdot X\mu}$$

$$U1 := U1nf$$

Pocetna iteracija $I1 := 30 \quad I2 := 30 \quad Im := 1$

Given

$$U1 = Z1 \cdot I1 + Zm \cdot Im$$

$$U1 = Z1 \cdot I1 + Z2 \cdot I2 + Zopt \cdot I2$$

$$I1 = Im + I2$$

$$\text{Resenje} := \text{Find}(I1, I2, Im)$$

$$I1 := \text{Resenje}_0 = 48.841 - 5.224i \quad I2 := \text{Resenje}_1 = 48.801 - 4.584i \quad Im := \text{Resenje}_2 = 0.04 - 0.64i$$

$$U2 := U1 - Z1 \cdot I1 - Z2 \cdot I2 = 1.952 \times 10^4 - 1.834i \times 10^3$$

$$\text{delta}U := 100 \cdot \frac{|U1| - |U2|}{|U1|} = 1.968$$