

1. TRANSFORMÁTORY

1.1 Všeobecne

Elektrické stroje slúžia na premenu elektrickej energie na mechanickú (elektrické motory), mechanickej energie na elektrickú (generátory), alebo prenášajú elektrickú energiu z jedného obvodu do druhého, pri zmene určitých jej parametrov (transformátory). Prakticky všetky elektrické stroje sa skladajú z elektrického systému, tvoreného vinutiami, magnetického systému, ktorý je obvykle tvorený feromagnetickým obvodom a mechanického systému (hriadeľ, ložiská a ďalšie mechanické časti, statické, alebo rotačné).

Aby sa zvýšila hodnota magnetického toku a znížili požiadavky na budenie, magnetické obvody sa skladajú z feromagnetického materiálu (železa), ktorého obvyklá magnetizačná charakteristika je na obr.1.1a. Cenu, ktorú zaplatíme za vysoký nárast magnetickej indukcie pri danej intenzite magnetického poľa v porovnaní s nemagnetickými materiálmi sú straty v železe a nelineárna závislosť $B=f(H)$ vplyvom nasýtenia. Prevádzkový bod je hneď za lineárnou oblasťou, v nasýtenej oblasti, (približne okolo 1 T, aj keď v určitých častiach stroja, napr. zuboch, môže prekročiť túto hodnotu o 50 % aj viac), aby sa plne využila schopnosť magnetického materiálu vytvoriť magnetickú indukciu a magnetický tok.

Rovnice opisujúce požiadavky budenia magnetického toku možno odvodiť nasledujúco:

Vzťah magnetickej indukcie B a intenzity magnetického poľa H je daný pomocou magnetickej permeability materiálu μ . Ak je intenzita H vytvorená cievkou s N závitmi, ktorými preteká prúd I a magnetický obvod má dĺžku l , potom možno písať:

$$B = \mu H = \mu \frac{IN}{l} \quad (1.1)$$

Magnetický tok dostaneme násobením plochou, ktorou tento tok presakuje a úpravou tak, aby sme do vzťahu dostali magnetický odpor R_{mag} a magnetickú vodivosť Λ_{mag} :

$$\Phi = BS = IN \frac{\mu S}{l} = \frac{IN}{R_{\text{mag}}} = IN \Lambda_{\text{mag}} \quad (1.2)$$

kde súčin IN je magnetické napätie, t. j. celkový prúd obopínajúci magnetický obvod.

$$\Phi = \frac{U_{\text{mag}}}{R_{\text{mag}}} = U_{\text{mag}} \Lambda_{\text{mag}} \quad (1.3)$$

Tento vzťah je známy pod názvom Hopkinsonov zákon. Magnetické napätie sa teda počíta pre daný magnetický tok a určitú geometriu magnetického obvodu. Ak je cievok viac, celkové magnetické napätie sa vypočíta ako súčet magnetických napätí jednotlivých

cievok. Na obr. 1.1b sú znázornené dve cievky s príslušnými magnetickými napätiami a ich súčet, ktorý tvorí výsledné napätie. Niekedy je výhodné jednotlivé zložky magnetického napätia uvažovať v tom istom smere ako je to napr. na obr. 1.1b, ale v praxi sa častejšie uvažuje, že jedna cievka magnetizuje v opačnom smere ako druhá.

Pre určité geometrické rozmery magnetického obvodu je indukované napätie vyvolané časovou zmenou magnetického toku dané vzťahom:

$$u_i = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.4)$$

kde $N\Phi = \Psi$ je spriahnutý (zviazaný) magnetický tok (t. j. magnetický tok Φ zviazaný s N závitmi cievky). Po úprave:

$$u_i = N \frac{d\Phi}{di} \frac{di}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (1.5)$$

kde

$$L = N \frac{d\Phi}{di} = N \frac{iN\Lambda_{\text{mag}}}{i} = N^2 \Lambda_{\text{mag}} = \frac{N^2}{R_{\text{mag}}} = N^2 \frac{\mu S}{l} \quad (1.6)$$

je indukčnosť magnetického obvodu. Ako vidno zo vzťahu (1.6) je úmerná štvorcu počtu závitov a magnetickej vodivosti magnetického obvodu. Tento vzťah je veľmi dôležitý pre výpočet jednotlivých indukčností elektrických strojov.

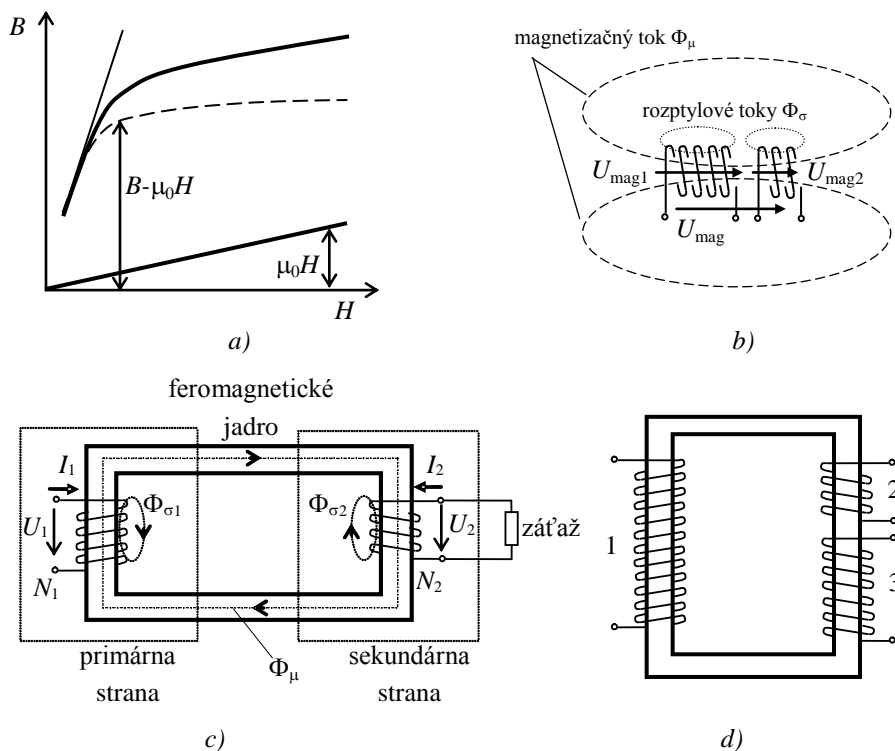
Veličiny ako magnetické napätie, elektrické napätie, elektrický prúd a pod. sú skalárne veličiny, nie vektory. Ak však uvažujeme, že sú to sínusové veličiny, t. j. ich časová zmena prebieha podľa sínusoidy, môžeme ich reprezentovať časovými fázormi, skrátene „fázormi“, pomocou ktorých budeme kresliť fázorové diagramy. Budeme ich označovať hrubými veľkými písmenami (pozri obr. 1.2 a ďalšie).

Snáď je dobré pripomenúť, že úplná a presná analýza elektrických strojov je taká komplexná, že je takmer nemožné zvládnuť ju v jednej knihe. Preto uvádzame, že hlavnou náplňou tejto knihy sú numerické príklady z prevádzky elektrických strojov a na teóriu sa zameriame len toľko, koľko je nevyhnutné na pochopenie výpočtu príkladov. Tak si študenti, elektrotechnickí bakalári a inžinieri budú môcť konfrontovať svoju schopnosť vybrať správne rovnice, dosadiť správne hodnoty do algebraických výrazov a dať tak odpoveď na určitý špecifický problém. Pochopenie problému rastie úmerne so schopnosťou si uvedomiť, že odvodené rovnice opisujú fyzikálne správanie sa strojov v matematických výrazoch.

1.2 Základy teórie transformátorov

Transformátor je netočivý elektrický stroj, ktorý pracuje na základe zákona elektromagnetickej indukcie. Mení privedené striedavé napätie a prúd na iné hodnoty

napätia a prúdu bez zmeny frekvencie. Pri transformácii ostáva výkon nezmenený, ak neuvažujeme straty transformátora, t. j. celkom malú spotrebu činného výkonu v samotnom transformátore. Transformátor možno použiť na transformáciu jednofázového alebo viacfázového napätia alebo prúdu. Najčastejšie sa v praxi používajú jednofázové a trojfázové transformátory, ktorými sa budeme podrobnejšie zaoberať. Základná predstava o magnetickom obvode, vinutiach transformátora a ich usporiadaní vhodnom pre pochopenie činnosti transformátora je na obr. 1.1. Ak má transformátor len dve vinutia, voláme ho dvojvinuťový (obr. 1.1c – obe cievky vytvárajú spoločný magnetický tok), ak na sekundárnej strane má ďalšie, tzv. terciárne vinutie, voláme ho trojvinuťový (1.1d).



Obr. 1. 1.a) Obvyklá magnetizačná charakteristika feromagnetického materiálu, b) Dve cievky v jednoduchom magnetickom obvode s príslušnými magnetickými napätiami a znázornením celkového a rozptylového magnetického toku, c) Základné usporiadanie magnetického obvodu a vinutí dvojvinuťového transformátora d) Trojvinuťový transformátor

Veľkosť efektívnej hodnoty indukovaného napätia sínusového priebehu jednej fázy transformátora odvodíme tak, že predpokladáme harmonický sínusový priebeh magnetického toku,

$$\Phi = \Phi_{\max} (\sin \omega t + \alpha) \quad (1.7)$$

kde α je posun voči sínusoide prechádzajúcej počiatkom. Ak $\alpha=0$, potom

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin \omega t \quad (1.8)$$

a podľa (1.4) je okamžitá hodnota indukovaného napätia:

$$u_i = N\Phi_{\max} \omega \cos \omega t = U_{i\max} \cos \omega t = U_{i\max} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (1.9)$$

kde amplitúda indukovaného napätia je

$$U_{i\max} = N\Phi_{\max} 2\pi f \quad (1.10)$$

a jeho efektívna hodnota

$$U_{if} = \frac{U_{i\max}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}\pi f \Phi_{\max} N = U_{iz} N \quad (1.11)$$

$$\text{pričom } \Phi_{\max} = B_{\max} S \quad (1.12)$$

kde B_{\max} je amplitúda magnetickej indukcie, N počet závitov jednej fázy vinutia, S plocha prierezu jadra transformátora a f frekvencia časovej zmeny magnetického toku., resp. privedeného napätia a U_{iz} je indukované napätie v jednom závite. Zo vzťahu (1.11) možno vypočítať počet závitov, ktorý je potrebný na dosiahnutie daného indukovaného napätia.

Dôležitým parametrom transformátora je jeho prevod, obvykle označovaný p . V jednofázovom transformátore je prevod p definovaný pomerom primárneho a sekundárneho indukovaného napätia. Pretože indukované napätie na primárnej strane nemožno odmerať, je prevod daný pomerom svorkových napätí primárneho a sekundárneho vinutia v stave naprázdno U_1 / U_{20} . V tomto stave je totiž svorkové napätie sekundárnej strany rovné indukovanému napätiu $U_{2i} = U_{20}$. Ak je transformátor v stave naprázdno napájaný zníženým napätím tak, aby prúd naprázdno vytváral na parametroch primárneho vinutia zanedbateľný úbytok napätia (pozri obr. 1.3b), potom môžeme sotožniť aj na primárnej strane svorkové a indukované napätie a možno písať:

$$p = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{\sqrt{2}\pi f \Phi_{\max} N_1}{\sqrt{2}\pi f \Phi_{\max} N_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.13)$$

Zo vzťahu (1.13) vidno, že prevod jednofázového transformátora možno vypočítať aj pomocou pomeru počtu závitov primárneho a sekundárneho vinutia.

Menovitý výkon jednofázového transformátora je daný vzťahom:

$$S_N = U_N I_N \quad (1.14)$$

Ak máme k dispozícii fázové hodnoty napätí a prúdov, pre menovitý výkon trojfázového transformátora platí:

$$S_N = 3U_{Nf} I_{Nf} \quad (1.15)$$

Pri zapojení do hviezdy sa však obvykle meria, resp. zadáva združené napätie U_N , preto je trojfázový výkon pohodlnejšie počítat' priamo nasledujúco:

$$S_N = \sqrt{3}U_N I_{Nf} \quad (1.16)$$

Ak je niektoré vinutie trojfázového transformátora zapojené do trojuholníka, meria alebo sa zadáva obvykle združený prúd I_N a vzťah pre trojfázový výkon je odvodený takto:

$$S_N = \sqrt{3}U_N I_N \quad (1.17)$$

pretože $U_N = U_{Nf}$.

Podielom menovitého fázového napätia a menovitého fázového prúdu je definovaná menovitá impedancia (pozri obr.1.7d), ktorá je obvykle vzťažnou hodnotou pre **definovanie** pomerných veličín transformátora:

$$Z_N = \frac{U_{Nf}}{I_{Nf}} \quad (1.18)$$

1.3 Náhradná schéma transformátora a určovanie jej prvkov

Náhradná schéma transformátora v tvare T-článku je na obr. 1.2. Kreslí sa vždy pre jednu fázu, aj v prípade viacfázových transformátorov, ak predpokladáme súmernosť ich fáz. Preto napätia a prúdy v náhradnej schéme sú vždy fázové hodnoty. Toto je dôležité si uvedomiť najmä v trojfázových transformátoroch, kde v zapojení do hviezdy sa obvykle meria združené napätie a pri zapojení do trojuholníka združený prúd.

Prvky náhradnej schémy sú usporiadané v pozdĺžnej a priečnej vetve. Prvky, napätia a prúdy sekundárnej strany sú prepočítané na primárnu stranu, čo je označené čiarkou nad písmenom označujúcim daný prvok.

Úplná náhradná schéma na obr. 1.2 predstavuje tri impedancie, a sice impedanciu primárneho vinutia Z_1 , impedanciu sekundárneho vinutia prepočítanú na primárnu stranu Z'_2 , a impedanciu priečnej vetvy Z_0 .

$$Z_1 = R_1 + jX_{\sigma 1}, \quad (1.19)$$

kde R_1 je činný odpor primárneho vinutia a $X_{\sigma 1}$ je rozptylová reaktancia primárneho vinutia,

$$Z'_2 = R'_2 + jX'_{\sigma 2}, \quad (1.20)$$

kde R'_2 je odpor sekundárneho vinutia prepočítaný na primárnu stranu a $X'_{\sigma 2}$ je **rozptylová** reaktancia sekundárnej strany prepočítaná na primárnu stranu.

Impedancia naprázdno, daná paralelne zapojenými prvkami je

$$\mathbf{Z}_0 = \frac{R_{Fe} jX_\mu}{R_{Fe} + jX_\mu} \quad (1.21)$$

kde R_{Fe} je odpor reprezentujúci straty v železe a X_μ je magnetizačná reaktancia. Admitancia naprázdno je definovaná ako prevrátená hodnota impedancie naprázdno

$$\mathbf{Y}_0 = \frac{1}{\mathbf{Z}_0} = \frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{jX_\mu} = G_{Fe} - jB_\mu \quad (1.22)$$

kde

$$G_{Fe} = \frac{1}{R_{Fe}} \quad (1.23)$$

je konduktancia a

$$-jB_\mu = \frac{1}{jX_\mu} \quad (1.24)$$

je susceptancia, čiže prevrátená hodnota magnetizačnej reaktancie.

Prvky náhradnej schémy možno určovať výpočtom a meraním. Typickým prípadom, kedy sa prvky náhradnej schémy určujú výpočtom je návrh transformátora, v rámci ktorého sa, okrem iného, po určení rozmerov magnetického obvodu, počtu závitov a ich usporiadania, materiálu a prierezu vodiča, počíta činný odpor jednotlivých vinutí a ich rozptylové reaktancie.

Keď je transformátor vyrobený, je potrebné potvrdiť presnosť výpočtu parametrov náhradnej schémy a ostatných predpokladaných prevádzkových vlastností transformátora. Preto treba uskutočniť určité merania. Za základné typy merania potrebné na určovanie prvkov náhradnej schémy transformátora možno považovať meranie naprázdno a meranie nakrátko. Okrem toho je dôležité meranie odporov vinutí jednosmerným prúdom. Meranie prevodu sa robí v rámci merania naprázdno.

Jednotlivé merania môžeme uskutočniť tak, že za primárne považujeme ktorékoľvek vinutie, dôležité je, aká je menovitá hodnota napätia a prúdu jednotlivých vinutí a aký zdroj elektrickej energie máme k dispozícii. Ak je z akýchkoľvek dôvodov potrebné robiť meranie naprázdno z inej strany ako meranie nakrátko, je nutné najprv prepočítať namerané hodnoty na jednu stranu, pevne definovanú, a to buď stranu vyššieho napätia alebo nižšieho napätia (pozri príklad 1.17).

V nasledujúcom opise predpokladáme, že to isté vinutie je považované za primárne pre obidva typy merania. Preto namerané hodnoty a z nich vypočítané prvky náhradnej schémy možno považovať priamo za prvky náhradnej schémy prepočítané na primárnu stranu.

1.3.1 Meranie naprázdno

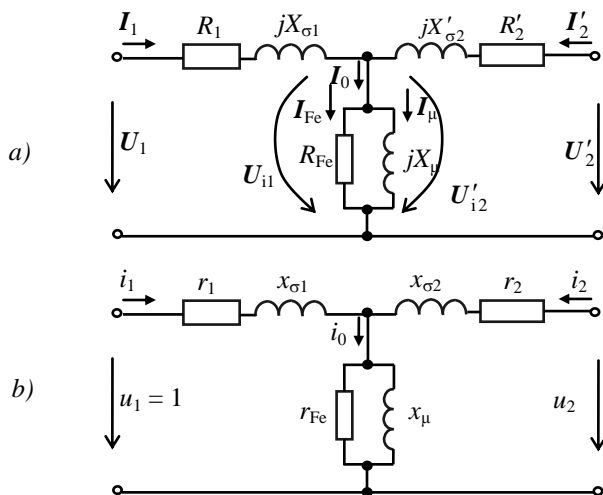
Sekundárna strana transformátora je rozpojená, čiže sekundárny prúd je nulový, na primárnu stranu pripojíme napätie s menovitou frekvenciou v rozpätí až po 120 % U_N , resp. pri priemyselných skúškach robíme meranie len pri menovom napätí. Pretože podľa obr.1.3b, magnetizačná reaktancia X_μ je oveľa väčšia ako rozptylová reaktancia primárneho vinutia $X_{\sigma 1}$ a odpor reprezentujúci straty v železe R_{Fe} je oveľa väčší ako činný odpor primárneho vinutia R_1 , náhradnú schému možno zjednodušiť tak, že R_1 aj $X_{\sigma 1}$ zanedbávame. Potom $U_1=U_{i1}$, ako to vidno na obr.1.3a. Sekundárne hodnoty R'_2 a $X'_{\sigma 2}$ sú tiež zanedbané, pretože sekundárny prúd je nulový. Za týchto okolností je primárny prúd tzv. prúdom naprázdno I_0 , ktorý sa skladá z dvoch zložiek: jednu zložku tvorí prúd magnetizačný I_μ , ktorý je posunutý za indukovaným napätím o 90° , druhú zložku tvorí prúd na krytie strát v železe I_{Fe} , ktorý je vo fáze s indukovaným napätím, ako to vidno na obr. 1.4. Ak prvky primárneho vinutia nemožno zanedbať, svorkové napätie U_1 je väčšie ako indukované napätie o úbytky napätí na prvkoch primárneho vinutia. Veličiny, ktoré sú vyznačené tučným typom písma predstavujú fázory.

V stave naprázdno meriame napätie, prúd naprázdno a príkon naprázdno. Z týchto nameraných hodnôt počítame účinník naprázdno a pre menovité napätie počítame prvky a prúdy v priechnej vetve I_0 , I_μ , I_{Fe} , R_{Fe} , X_μ , pričom

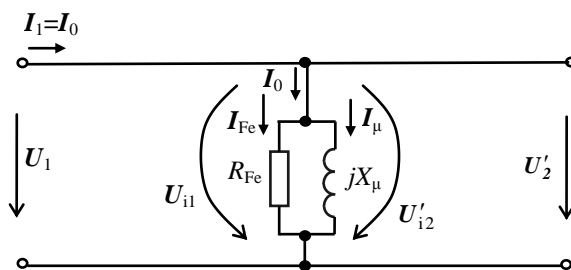
$$I_0 = I_{Fe} \pm jI_\mu \quad (1.25)$$

čo vzhľadom na orientáciu osí komplexnej roviny podľa obr. 1.4 znamená:

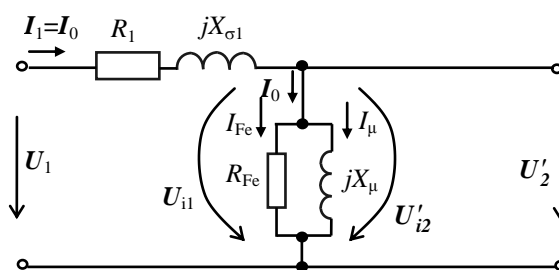
$$I_0 = I_{Fe} - jI_\mu \quad (1.26)$$



Obr. 1.2 a) Úplná náhradná schéma transformátora. Prvky sekundárnej strany sú prepočítané na primárnu stranu, b) náhradná schéma s pomernými veličinami

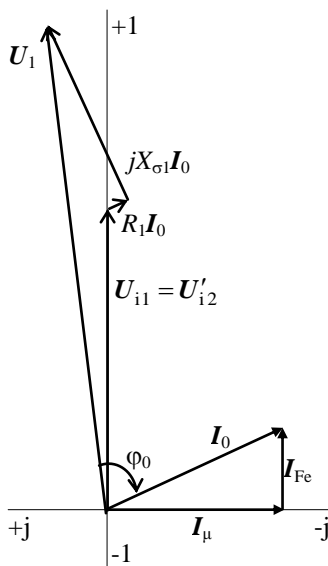


a)



b)

Obr. 1.3 Zjednodušená náhradná schéma pre stav naprázdno, a) Prvky primárneho aj sekundárneho vinutia sú zanedbané, b) Len prvky sekundárneho vinutia sú zanedbané



Obr. 1. 4 Fázorový diagram v stave naprázdno

Účinník naprázdno jednofázového transformátora vypočítame z údajov wattmetra (ΔP_0), ampérmetra (I_0), a voltmetra (U_N):

$$\cos \varphi_0 = \frac{\Delta P_0}{S_0} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{j0}}{U_N I_0} = \frac{\Delta P_{Fe} + R_1 I_0^2}{U_N I_0} \quad (1.27)$$

Straty naprázdno ΔP_0 tvoria straty v železe ΔP_{Fe} a straty v primárnom vinutí prechodom prúdu naprázdno ΔP_{j0} . Pretože straty ΔP_{j0} sú veľmi malé voči stratám v železe ΔP_{Fe} , obvykle sa zanedbávajú. Potom za straty naprázdno sa považujú straty v železe, a tak sa aj volajú. To isté platí pre trojfázový transformátor. Pritom ΔP_0 sú udávané v katalógoch trojfázových transformátorov pre všetky tri fázy spolu ako jeden údaj.

Pre trojfázový transformátor platí:

$$\cos \varphi_0 = \frac{\Delta P_0}{S_0} = \frac{3R_{Fe} I_{Fe}^2 + 3R_1 I_{0f}^2}{3U_{1f} I_{0f}} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{j0}}{3U_{1f} I_{0f}} = \frac{\Delta P_0}{3U_{1f} I_{0f}} = \frac{\Delta P_0}{\sqrt{3} U_1 I_0} \quad (1.28)$$

kde U_1 je združené napätie pri zapojení do hviezdy.

Pre činnú zložku prúdu naprázdno podľa fázového diagramu na obr. 1.4 platí:

$$I_{Fe} = I_{0f} \cos \varphi_0 \quad (1.29)$$

a pre magnetizačný prúd :

$$I_{\mu} = I_{0f} \sin \varphi_0 = I_{0f} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0} \quad (1.30)$$

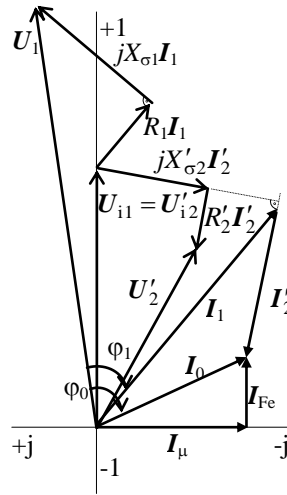
Odpor reprezentujúci straty v železe, ak zanedbávame úbytky napätia, sa vypočíta pomocou fázového primárneho svorkového napätia U_{1f} :

$$R_{Fe} = \frac{U_{1f}}{I_{Fe}} \quad (1.31)$$

Podobne pre magnetizačnú reaktanciu platí:

$$X_{\mu} = \frac{U_{1f}}{I_{\mu}} \quad (1.32)$$

Tým sú určené prvky priečnej vetvy náhradnej schémy a príslušné zložky prúdu naprázdno.



Obr. 1.5 Fázorový diagram pre úplnú náhradnú schému pri zaťažení induktívnym charakterom záťaže

1.3.2 Meranie nakrátko

Sekundárne svorky sú spojené nakrátko, na svorky primárneho vinutia je priložené také znížené napätie, ktoré vyvolá vo vinutiach menovité prúdy. Meriame príkon nakrátko, prúd nakrátko a napätie nakrátko. Z merania nakrátko určujeme prvky pozdĺžnej vetvy R_1 – činný odpor primárneho vinutia, R'_2 – činný odpor sekundárneho vinutia prepočítaný na primárnu stranu, $X_{\sigma 1}$ – rozptylová reaktancia primárneho vinutia, $X'_{\sigma 2}$ – rozptylová reaktancia sekundárneho vinutia prepočítaná na primárnu stranu.

Činný príkon transformátora meraný v stave nakrátko sa celý premení na teplo, a preto tvorí straty transformátora. Keďže straty v transformátore môžu vzniknúť v železe (v magnetickom obvode), vo vinutí (straty Jouleové) a straty dodatočné, v stave nakrátko je bilancia strát takáto: V stave nakrátko sa meria pri zníženom napätí, takže straty v železe sú zanedbateľné. Preto celý údaj wattmetra, t. j. celý príkon nakrátko môžeme považovať za straty nakrátko ΔP_k , ktoré tvorí súčet strát Jouleových a strát dodatočných. Pri menovitom prúde sú to menovité straty nakrátko ΔP_{kN} (podrobnejšie pozri v [2]).

Prvky sekundárnej strany sa prepočítavajú na primárnu stranu pomocou prevodu p takto:

$$U'_2 = U_2 p \quad (1.33)$$

$$I'_2 = I_2 / p \quad (1.34)$$

$$R'_2 = R_2 p^2 \quad (1.35)$$

$$X'_{\sigma 2} = X_{\sigma 2} p^2 \quad (1.36)$$

Úplná náhradná schéma transformátora je obr. 1.2.

Pri riešení príkladov s trojfázovým transformátorom treba zdôrazniť určité zásady týkajúce sa prevodu transformátora:

1. V prípade 3-fázových zariadení (a teda aj transformátorov) je vždy udávané združené napätie (pri zapojení do hviezdy), združený prúd (pri zapojení do trojuholníka) a celkový výkon všetkých troch fáz (aj straty sú dané za všetky tri fázy ako jeden údaj).
2. Prevod transformátorov sa udáva pomerom napätí pri chode naprázdno, kedy možno úbytky napätí vo vstupnom vinutí zanedbať. Iba pri transformátoroch s výkonom do 5 kVA sa udáva pomer napätí pri menovitom zaťažení. (Transformátory s výkonom do 5 kVA sa označujú ako transformátorčeky). Pri trojfázových transformátoroch sa prevod udáva pomerom združených napätí. Výkon transformátora sa udáva zdanlivým výkonom v kVA (resp. VA), lebo veľkosť činného výkonu bude podľa charakteru zaťaženia, teda podľa účinníka rôzna.
3. **Náhradná schéma sa vždy kreslí pre jednu fázu**, t. j. odpor vinutia jednej fázy, reaktancia vinutia jednej fázy, a teda aj napätie a prúd jednej fázy. To znamená, že je nevyhnutné zo združeného napätia pri zapojení do hviezdy určiť fázové napätie a pri zapojení do trojuholníka určiť prúd vo fáze vinutia. V náhradnej schéme treba pracovať výhradne s prúdom vo fáze vinutia a napätím na fáze vinutia.
4. Prevod transformátora je daný pomerom primárneho a sekundárneho napätia v stave naprázdno, ale v prípade trojfázového transformátora je tento pomer totožný s pomerom počtu závitov len v prípade zapojenia Yy , alebo Dd . Akonáhle je zapojenie kombinované, napr. Yd , Dy , Yz atď., prevod daný pomerom združených napätí sa nezohoduje s pomerom počtu závitov. Preto pri prepočte hodnôt impedancií (odporov, reaktancií) zo sekundárneho na primárne vinutie (alebo opačne), **sa pracuje s pomerom počtu závitov, fázových napätí, resp. fázových prúdov p_N . Tento prevod sa nemusí zhodovať s prevodom p , daný pomerom združených napätí. Podrobnejšie sa takýmito prípadmi budeme zaoberať v príslušných príkladoch.**

$$p_N = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{1f}}{U_{2f}} = \frac{I_{2f}}{I_{1f}} \quad (1.37)$$

Transformátor v stave nakrátko možno charakterizovať upravenou náhradnou schémou podľa obr. 1.6, v ktorej berieme do úvahy, že prúd nakrátko je oveľa väčší ako prúd naprázdno, a preto priečnu vetvu náhradnej schémy možno zanedbať. Potom sa transformátor javí ako sériový $R-L$ obvod, ktorého impedanciu možno vyjadriť nasledujúco:

$$Z_k = R_1 + R'_2 + j(X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2}) = R_k + jX_{\sigma k} \quad (1.38)$$

kde R_k je celkový činný odpor transformátora, daný súčtom činného odporu primárneho vinutia a činného odporu sekundárneho vinutia prepočítaného na primárnu stranu:

$$R_k = R_1 + R'_2 \quad (1.39)$$

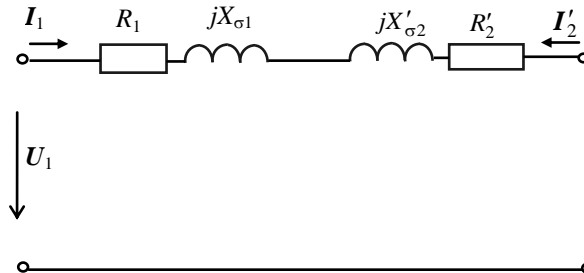
a $X_{\sigma k}$ je celková rozptylová reaktancia transformátora, daná súčtom rozptylovej reaktancie primárneho vinutia a rozptylovej reaktancie sekundárneho vinutia prepočítanej na primárnu stranu:

$$X_{\sigma k} = X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2} \quad (1.40)$$

Absolútna hodnota impedancie nakrátko vychádza zo vzťahu (1.38):

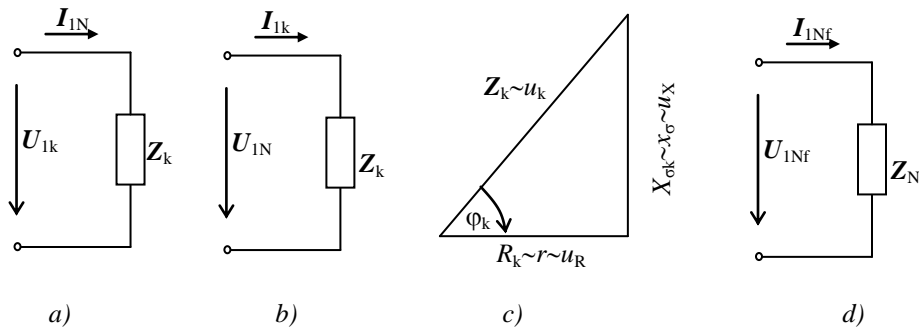
$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_{\sigma k}^2} \quad (1.41)$$

Pre prevádzku transformátora je veľmi dôležitá hodnota tzv. napätia nakrátko U_k , najmä v jeho pomernom, resp. percentuálnom vyjadrení (pozri (1.47)). Napätie nakrátko U_k je také napätie, ktoré treba priložiť na svorky primárneho vinutia, ktorého sekundárne vinutie je skratované, aby vinutiami pretekali menovité prúdy. Je zrejmé, že toto napätie je dané impedanciou nakrátko Z_k , ako je to schematicky znázornené na obr. 1.7a. Indexmi 1 pri napätí a prúde je zdôraznené, že sú to hodnoty na primárnej strane, lebo aj v hodnote Z_k je sekundárna strana prepočítaná na primárnu.



Obr. 1.6 Náhradná schéma transformátora v stave nakrátko

Transformátor v stave nakrátko možno charakterizovať impedanciou nakrátko, ktorá zahŕňa impedancie primárneho aj sekundárneho vinutia, a možno ho znázorniť stručným obvodom, ako to vidno na obr. 1.7a,b,c,d (pozri legendu pod obrázkom). Z obr. 1.7b vidno, že ak na primárne svorky je pripojené menovité napätie, obvodom pretečie skratový prúd, ktorý je niekoľkonásobne vyšší ako menovitý prúd. Jeho veľkosť závisí od hodnoty impedancie nakrátko, čiže veľkosti činného odporu a rozptylovej reaktancie.



Obr. 1.7 Zjednodušená náhradná schéma transformátora zo strany primárneho vinutia (t. j. sekundárne veličiny sú prepočítané na primár), ak je transformátor a) v stave nakrátko a je napájaný napätím nakrátko, kedy vinutiami pretekajú menovité prúdy, b) v stave nakrátko a je napájaný menovitým napätím, kedy vinutiami pretekajú prúdy nakrátko, c) Zložky impedancie nakrátko sú znázornené trojuholníkom odporov s fázovým posunom φ_k , d) v stave menovitom, t. j. primárna strana je napájaná menovitým napätím, sekundárne vinutie je zaťažené menovitou záťažou a vinutiami pretekajú menovité prúdy

1.3.3 Pomerné veličiny transformátora

Obľúbeným nástrojom v teórii elektrických strojov sú pomerné (bezrozmerné, jednotkové) veličiny, ktoré vznikajú tak, že skutočné veličiny vzťahujeme k základnej, vzťažnej veličine. V angličtine sa nazývajú „per unit values“, a používa sa skratka „p.u.“. Ak takéto hodnoty vynásobíme 100, sú to potom percentuálne hodnoty a udávajú sa v percentách.

V transformátoroch vzťažnou veličinou na definovanie pomerných odporov je menovitá impedancia Z_N , ktorá je daná ako pomer menovitého fázového napätia a menovitého fázového prúdu (menovitá impedancia je vždy hodnotou pre jednu fázu):

$$Z_N = \frac{U_{Nf}}{I_{Nf}} \quad (1.42)$$

Potom pomerný činný odpor je definovaný ako pomer skutočného celkového činného odporu transformátora R_k daného vzťahom (1.39) a menovitej impedancie:

$$r = \frac{R_k}{Z_N} \quad [-] \quad (1.43)$$

resp. percentuálna hodnota činného odporu:

$$r_{\%} = \frac{R_k}{Z_N} 100 \quad [\%] \quad (1.44)$$

Podobným spôsobom sú definované aj ostatné pomerné veličiny, ďalej však budeme pracovať len s percentuálnymi veličinami.

Percentuálna hodnota rozptylovej reaktancie je

$$x_{\sigma \%} = \frac{X_{\sigma k}}{Z_N} 100 \quad [\%] \quad (1.45)$$

kde $X_{\sigma k}$ je daná vzťahom (1.40).

Percentuálna hodnota impedancie nakrátko je daná pomerom skutočnej impedancie nakrátko Z_k , danej vzťahom (1.41) a menovitej impedancie:

$$z_k \% = \frac{Z_k}{Z_N} 100 \quad [\%] \quad (1.46)$$

Podobne sú definované ostatné pomerné a percentuálne hodnoty transformátora, napríklad napätie nakrátko a prúd naprázdno.

Pomerné napätie nakrátko je pomer skutočného napätia nakrátko U_k [V] a napätia menovitého. Percentuálna hodnota je daná takto:

$$u_k \% = \frac{U_{1k}}{U_{1N}} 100 \quad [\%] \quad (1.47)$$

pritom buď obidve hodnoty napätí sú fázové, alebo obidve združené.

Ak vzťah (1.47) upravíme pomocou Ohmovho zákona podľa obr. 1.7a,d vidíme, že číselná pomerná, resp. percentuálna hodnota napätia nakrátko je zhodná s číselnou hodnotou impedancie nakrátko:

$$u_k = \frac{U_k}{U_N} = \frac{Z_k I_{1N}}{Z_N I_{1N}} = \frac{Z_k}{Z_N} = z_k \quad (1.48)$$

To znamená, že hodnota napätia nakrátko je obrazom impedancie nakrátko transformátora, t. j. väčšia hodnota napätia nakrátko znamená väčšiu hodnotu impedancie nakrátko, čiže činných odporov a rozptylových reaktancií a opačne. Väčšia hodnota napätia nakrátko, čiže impedancie nakrátko znamená tiež menší skratový prúd. Túto nepriamu úmernosť medzi napätím nakrátko a skratovým prúdom možno odvodiť na základe obr. 1.7 b,d nasledujúco:

$$u_{k \%} = z_{k \%} = \frac{Z_k}{Z_N} 100 = \frac{\frac{U_N}{I_k}}{\frac{U_N}{I_N}} 100 = \frac{I_N}{I_k} 100 \quad (1.49)$$

čiže presnejšie - trvalý prúd nakrátko na primárnej strane je priamo-úmerný svojmu menovitému prúdu a nepriamo-úmerný napätiu nakrátko:

$$I_{1k} = \frac{I_{1N}}{u_{k\%}} 100 \text{ [A; A, \%]} \quad (1.50a)$$

Možno treba podotknúť, že prúd nakrátko na sekundárnej strane je viazaný na primárny prúd cez prevod, t. j. je p -krát väčší:

$$I_{2k} = pI_{1k} \quad (1.50b)$$

Z teórie prechodových javov je známe, že najväčšiu hodnotu dosiahne skratový prúd počas prvej polperiódy a dosiahne hodnotu (na primárnej strane):

$$I_{1k\text{dyn}} = \sqrt{2}I_{1k} \left(1 + e^{-\frac{\pi r}{x}}\right) \quad (1.51a)$$

Podobne na sekundárnej strane pretečie nárazový dynamický prúd:

$$I_{2k\text{dyn}} = \sqrt{2}I_{2k} \left(1 + e^{-\frac{\pi r}{x}}\right) \quad (1.51b)$$

alebo ho dostaneme prepočtom cez prevod (pozri 1.50b).

Ďalšie užitočné vzťahy odvodíme na základe trojuholníka impedancie, obr. 1.7c, kde vidno vzťah medzi celkovým činným odporom R_k , celkovou rozptylovou reaktanciou $X_{\sigma k}$, účinníkom nakrátko $\cos \varphi_k$ a impedanciou nakrátko Z_k :

$$r_{\%} = \frac{R_k}{Z_N} 100 = \frac{Z_k \cos \varphi_k}{Z_N} 100 = u_{k\%} \cos \varphi_k = u_{R\%} \quad (1.52)$$

kde u_R sa volá činná zložka napätia nakrátko

$$x_{\sigma\%} = \frac{X_{\sigma k}}{Z_N} 100 = \frac{Z_k \sin \varphi_k}{Z_N} 100 = u_{k\%} \sin \varphi_k = u_{X\%} \quad (1.53)$$

kde u_X je reaktančná zložka napätia nakrátko.

$$r^2 + x^2 = u_R^2 + u_X^2 = u_k^2 (\cos^2 \varphi_k + \sin^2 \varphi_k) = u_k^2 \quad (1.54)$$

čo znamená, že trojuholník impedancií je totožný s trojuholníkom pomerných, resp. percentuálnych veličín. Na obr. 1.7c je znázornená úmernosť veličín na jednotlivých stranách trojuholníka, a to aj s hodnotami zložiek napätia nakrátko u_R a u_X .

Pomerný, resp. percentuálny činný odpor možno vypočítať aj pomocou menovitých strát nakrátko (strát nakrátko pri menovitom prúde) a menovitého výkonu:

$$r_{\%} = \frac{R_k}{Z_N} 100 = \frac{R_k I_{1N}^2}{Z_N I_{1N}^2} 100 = \frac{\Delta P_{kN}}{S_N} 100 \quad (1.55)$$

Toto je veľmi užitočný vzťah na výpočet parametrov náhradnej schémy transformátorov, lebo ak sú zadané údaje transformátora z katalógov výrobcov, okrem menovitého výkonu

obvykle obsahujú aj menovité straty nakrátko. Tak možno vypočítať r a zo vzťahu (1.54) vypočítame x_{σ} takto:

$$x_{\sigma} = \sqrt{u_k^2 - r^2} \quad (1.56)$$

Potom na základe vzťahov (1.44) a 1.45) môžeme vypočítať celkový činný odpor R_k a celkovú rozptylovú reaktanciu $X_{\sigma k}$. Ďalší postup výpočtu parametrov transformátorov uvedieme v jednotlivých príkladoch.

Pomerný prúd naprázdno je pomer skutočného prúdu naprázdno a menovitého prúdu. Ak chceme dostať percentuálnu hodnotu, pomernú hodnotu treba vynásobiť 100, takto:

$$i_{0\%} = \frac{I_0}{I_N} 100 \quad [\%] \quad (1.57)$$

Treba zdôrazniť, že percentuálna hodnota prúdu naprázdno je stále tá istá, bez ohľadu na to, na ktorom vinutí prúd naprázdno zisťujeme, t. j. ktoré vinutie napájame a ktoré je rozpojené. Dôležité je, že prúd naprázdno na príslušnom vinutí je vzťahnuté k svojmu menovitému prúdu. Čiže možno písať takúto rovnosť:

$$i_{0\%} = \frac{I_{10}}{I_{1N}} 100 = \frac{I_{20}}{I_{2N}} 100 \quad (1.58)$$

Z toho vyplýva výhoda práce s pomernými, resp. percentuálnymi veličinami. Ak poznáme pomerné, resp. percentuálne veličiny a príslušné menovité hodnoty, tak napr. zo vzťahu (1.58) by sme určili, aký by bol prúd naprázdno I_{20} , keby bol transformátor napájaný zo sekundárnej strany. A pretože účinník naprázdno a straty naprázdno sú tiež rovnaké, bez ohľadu na to, z ktorej strany meranie robíme, môžeme pomocou prúdu I_{20} pri danom sekundárnom napätí určiť prvky priečnej vetvy náhradnej schémy ako sa oni javia zo sekundárnej strany. Takto zistené prvky by k prvkom zisteným zo strany primárnej strany mali vzťah cez štvorec prevodu p (pozri príslušné príklady).

Podobne môžeme uvažovať aj o napätí nakrátko, ale museli by sme vo vzťahoch dôslednejšie písať indexy. Takže presne by to malo byť takto:

$$u_{k\%} = \frac{U_{1k}}{U_{1N}} 100 = \frac{U_{2k}}{U_{2N}} 100 \quad (1.59)$$

Čiže ak poznáme percentuálne napätie nakrátko a menovité napätie na sekundárnej strane, vieme vypočítať, aké napätie treba priložiť na sekundárnu stranu pri skratovanej primárnej strane, aby vinutiami pretekali menovité prúdy. Výpočet by mohol pokračovať výpočtom impedancie nakrátko zo sekundárnej strany, t. j. hodnoty sekundárnej strany by boli skutočné a primárne by boli prepočítané na sekundárnu stranu. Impedancia nakrátko zo sekundárnej strany Z_{2k} by bola v ohmoch iná ako impedancia z primárnej strany Z_{1k} , a ich vzájomný vzťah by bol cez štvorec prevodu, ale percentuálna hodnota z_k by bola tá istá:

$$z_{k\%} = \frac{Z_{1k}}{Z_{1N}} 100 = \frac{Z_{2k}}{Z_{2N}} 100 \quad (1.60)$$

1.3.4 Náhradná schéma s pomernými veličinami

Ako sme videli v predchádzajúcich kapitolách, všetky ťažkosti s prepočítavaním hodnôt z jednej strany transformátora na druhú by sme odstránili, keby sme pracovali s pomernými, resp. percentuálnymi veličinami. To by znamenalo úpravu TR na jednotkový prevod (pozri pr. 1.6k). Na obr. 1.2b je takáto náhradná schéma a jej prvky ako bezrozmerné veličiny vypočítame takto:

$$r_1 = \frac{R_1}{Z_{1N}} \quad [-] \quad (1.61)$$

$$r_2 = \frac{R_2}{Z_{2N}} \quad [-] \quad (1.62)$$

Pričom

$$r_1 + r_2 = r = \frac{R_k}{Z_{1N}} = \frac{R_1 + R'_2}{Z_{1N}} \quad [-] \quad (1.63)$$

$$x_{\sigma 1} = \frac{X_{\sigma 1}}{Z_{1N}} \quad [-] \quad (1.64)$$

$$x_{\sigma 2} = \frac{X_{\sigma 2}}{Z_{2N}} \quad [-] \quad (1.65)$$

Pričom

$$x_{\sigma 1} + x_{\sigma 2} = x_{\sigma} = \frac{X_{\sigma k}}{Z_{1N}} = \frac{X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2}}{Z_{1N}} \quad [-] \quad (1.66)$$

a

$$r^2 + x_{\sigma}^2 = u_k^2 \quad [-] \quad (1.67)$$

Prvky v priečnej vetve:

$$i_0 = \frac{I_{01}}{I_{1N}} = \frac{I_{02}}{I_{2N}} \quad [-] \quad (1.68)$$

ako to bolo uvedené v (1.58), ale v percentuálnom vyjadrení.

$$r_{\text{Fe}} = \frac{R_{\text{Fe1}}}{Z_{1\text{N}}} = \frac{R_{\text{Fe2}}}{Z_{2\text{N}}} \quad [-] \quad (1.69)$$

$$x_{\mu} = \frac{X_{\mu1}}{Z_{1\text{N}}} = \frac{X_{\mu2}}{Z_{2\text{N}}} \quad [-] \quad (1.70)$$

Ak je transformátor napájaný menovitým napätím, potom

$$u_1 = \frac{U_1}{U_{1\text{N}}} = \frac{U_{1\text{N}}}{U_{1\text{N}}} = 1 \quad [-] \quad (1.71)$$

Na sekundárnej strane vzťahujeme svorkové napätie k hodnote napätia naprázdno, takže v stave naprázdno je

$$u_2 = \frac{U_{20}}{U_{20}} = 1 \quad [-] \quad (1.72)$$

a pri danom zaťažení, keď sa prejavia úbytky napätia:

$$u_2 = \frac{U_2}{U_{20}} \leq \text{alebo} \geq 1 \quad [-] \quad (1.73)$$

podľa typu záťaže. Pomerný prúd na primárnej a sekundárnej strane vyjadríme na oboch stranách rovnakým prúdom i :

$$i = \frac{I_1}{I_{1\text{N}}} = \frac{I_2}{I_{2\text{N}}} \quad [-] \quad (1.74)$$

V kapitole 1.4 sa tento pomerný prúd nazýva pomerné zaťaženie λ , lebo vyjadruje aj pomer výkonov.

Percentuálne veličiny dostaneme, ak pomerné veličiny vynásobíme 100, ako to bolo v kapitole 1.3.3. Náhradná schéma s pomernými veličinami je na obr.1.2b.

1.4 Úbytok napätia transformátora

Skutočný úbytok napätia transformátora ΔU_2 je rozdiel sekundárneho napätia naprázdno U_{20} (štitková hodnota sekundárneho napätia je napätie v stave naprázdno) a sekundárneho napätia U_2 pri danom zaťažení prúdom I_2 a účinníku záťaže $\cos\varphi_{z1}$:

$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2 \quad (1.75)$$

Pomerný úbytok napätia dostaneme, ak skutočný úbytok ΔU_2 vzťahujeme k napätiu naprázdno U_{20} a percentuálny, ak túto hodnotu vynásobíme 100, t. j.:

$$\Delta u_{\%} = \frac{\Delta U_2}{U_{20}} \cdot 100 = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100 \quad (1.76)$$

Percentuálny úbytok napätia Δu je odvodený tak, aby obsahoval prvky, na ktorých úbytky napätia vznikajú, t. j. R_k a $X_{\sigma k}$, ďalej účinník $\cos \varphi_{zt}$ záťaže a prúd, pri ktorých úbytok počítame. Tak bol percentuálny úbytok napätia definovaný nekonečným radom členov, ktorý sa zjednodušuje takto:

a) Pre $u_k < 4\%$ stačí uvažovať len prvý člen radu:

$$\Delta u_{\%} = \frac{\Delta U_2}{U_{20}} \cdot 100 = \frac{I_1}{I_{1N}} (r_{\%} \cos \varphi_{zt} \pm x_{\sigma\%} \sin \varphi_{zt}) \quad (1.77)$$

kde I_1 je prúd, pri danom zaťažení, t. j. pri ktorom úbytok počítame a $\cos \varphi_{zt}$ je účinník záťaže. Pri induktívnom charaktere záťaže sa používa znamienko + a pri kapacitnom charaktere záťaže znamienko -, lebo pri kapacitnom zaťažení sa berie namiesto uhla φ uhol $-\varphi$, čo vedie na výraz $-\sin \varphi$.

Hodnoty Δu , r , x_{σ} sú buď všetky pomerné veličiny, alebo sú všetky v percentách. Pomer I_1/I_{1N} je pomerné zaťaženie, čiže je to tiež pomerná hodnota. Pomerné zaťaženie môžeme počítat' aj z pomeru sekundárnych hodnôt prúdov, alebo po vynásobení čitateľa aj menovateľa konštantným napätím aj z pomeru výkonov:

$$\lambda = \frac{I_1}{I_{1N}} = \frac{I_2}{I_{2N}} = \frac{S}{S_N} \quad \text{pri } U_1 = \text{konšt.} \quad (1.78)$$

b) Pre $u_k = 4\%$ až 20% treba brať dva členy radu takto:

$$\Delta u_{\%} = \lambda (r_{\%} \cos \varphi_{zt} \pm x_{\sigma\%} \sin \varphi_{zt}) + \frac{1}{200} (\lambda)^2 (x_{\sigma\%} \cos \varphi_{zt} \mp r_{\%} \sin \varphi_{zt})^2 [\%] \quad (1.79)$$

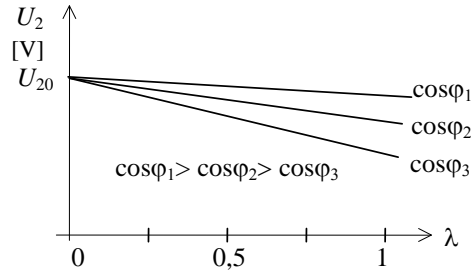
čiže hodnoty Δu , r , x_{σ} sú v percentách, čo sme zvýraznili indexom %. Ak Δu , r , x_{σ} sú hodnoty pomerné, vzťah (1.79) sa zmení na tvar:

$$\Delta u = \lambda (r \cos \varphi_{zt} \pm x_{\sigma} \sin \varphi_{zt}) + \frac{1}{2} (\lambda)^2 (x_{\sigma} \cos \varphi_{zt} \mp r \sin \varphi_{zt})^2 [-] \quad (1.80)$$

Z oboch výrazov (1.79) aj (1.80) vidno, že význam druhého člena sa zvýši najmä pri $\cos \varphi_{zt}$ blízko 1, pretože obvykle býva $x_{\sigma} > r$. Výpočet úbytku napätia súvisí s vonkajšou charakteristikou transformátora. Vonkajšia charakteristika transformátora, aj akéhokoľvek iného zdroja elektrickej energie (dynama, synchronného generátora,...) je závislosť napätia od zaťaženia. Preto ak sme vypočítali percentuálny úbytok napätia, z neho vypočítame skutočný úbytok napätia vo voltoch, resp. skutočné napätie na sekundárnej strane transformátora pri danom zaťažení pomocou vzťahu 1.76:

$$\Delta U_2 = \frac{\Delta u_{\%} U_{20}}{100} \quad (1.81)$$

$$U_2 = U_{20} - \Delta U_2 \quad (1.82)$$



Obr. 1.8 Vonkajšie charakteristiky transformátora pre účinníky záťaže induktívneho charakteru

1.5 Účinnosť transformátora

Účinnosť transformátora pri danom zaťažení je daná pomerom činného výkonu na výstupe transformátora P_2 a príkonu na vstupe transformátora P_1 . Príkon P_1 je o straty ΔP väčší ako výkon P_2 . Takže ak činný výkon vyjadríme pomocou zdanlivého výkonu a účinníka záťaže, môžeme napísať:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{S_2 \cos \varphi_{z1}}{S_2 \cos \varphi_{z1} + \Delta P} \quad (1.83)$$

Straty ΔP sú súčtom strát naprázdno ΔP_0 a strát nakrátko ΔP_k (podrobnejšie pozri v [2]). Pri konštantnom primárnom napätí sa straty naprázdno so záťažou nemenia, ale straty nakrátko závisia od zaťaženia. Pri menovitom prúde straty nakrátko trojfázového transformátora sú:

$$\Delta P_{kN} = 3R_k I_{1N}^2 \quad (1.84)$$

a pri ľubovoľnom prúde I_1 :

$$\Delta P_k = 3R_k I_1^2 = 3R_k (\lambda I_{1N})^2 = \lambda^2 \Delta P_{kN} \quad (1.85)$$

kde sme použili vzťah (1.78) na vyjadrenie ľubovoľného prúdu pomocou koeficienta pomerného zaťaženia λ a menovitého prúdu. Ak aj na vyjadrenie ľubovoľnej záťaže S_2 pri ktorej účinnosť počítame, použijeme vzťah (1.78), potom vzťah (1.83) možno prepísať takto:

$$\eta = \frac{\lambda S_N \cos \varphi_{z1}}{\lambda S_N \cos \varphi_{z1} + \Delta P_0 + \lambda^2 \Delta P_{kN}} \quad (1.86)$$

Ako je známe, maximálna účinnosť nastane pri takom zaťažení, pri ktorom sa rovnajú straty nezávislé od zaťaženia ΔP_0 a závislé od zaťaženia ΔP_k :

$$\Delta P_0 = \Delta P_k = 3R_k I_1^2 = 3R_k \frac{I_{1N}^2}{I_{1N}^2} I_1^2 = 3R_k I_{1N}^2 \frac{I_1^2}{I_{1N}^2} = \Delta P_{kN} \lambda_{\eta \max}^2 \quad (1.87)$$

kde sme pri koeficiente pomerného zaťaženia použili index „ $\eta \max$ “, čo znamená, že to je také zaťaženie, pri ktorom je účinnosť maximálna a tento koeficient vypočítame zo vzťahu (1.73) takto:

$$\lambda_{\eta \max} = \sqrt{\frac{\Delta P_0}{\Delta P_{kN}}} \quad (1.88)$$

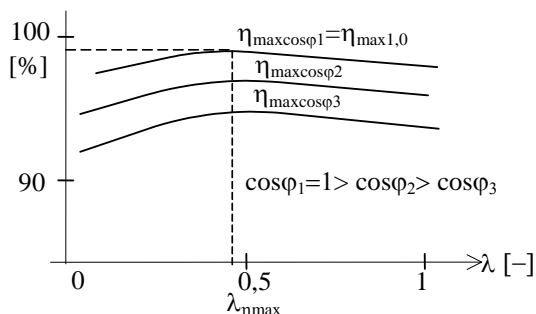
Potom maximálna účinnosť pri danom účinníku záťaže $\cos \varphi_{zt}$ je daná takto:

$$\eta_{\max} = \frac{\lambda_{\eta \max} S_N \cos \varphi_{zt}}{\lambda_{\eta \max} S_N \cos \varphi_{zt} + \Delta P_0 + \lambda_{\eta \max}^2 \Delta P_{kN}} \quad (1.89)$$

Závislosť $\eta = f(\lambda)$ predstavuje pre každý účinník krivku s maximom pri $\lambda_{\eta \max}$, ako vidno na obr. 1.9. Najvyššiu možnú účinnosť dosiahneme pri účinníku $\cos \varphi_{zt} = 1,0$ a pomernom zaťažení $\lambda_{\eta \max}$ a vypočítame ju takto:

$$\eta_{1,0} = \frac{\lambda_{\eta \max} S_N}{\lambda_{\eta \max} S_N + \Delta P_0 + \lambda_{\eta \max}^2 \Delta P_{kN}} \quad (1.90)$$

Táto krivka je tiež znázornená na obr. 1.9.



Obr. 1.9 Účinnosť transformátora v závislosti od zaťaženia pre rôzne účinníky

1.6 Paralelná spolupráca transformátorov

Transformátory pracujú paralelne vtedy, keď sú pripojené na spoločnú sieť na primárnej strane a dodávajú elektrickú energiu do spoločnej záťaže na sekundárnej strane. Transformátory, ktoré sa majú paralelne spojiť, musia spĺňať nasledujúce podmienky.

Musia mať

- a) rovnaké menovité vstupné a výstupné napätie, t. j. rovnaké prevody napätia naprázdno
 b) približne rovnaké napätia nakrátko (tolerancia $\pm 10\%$ vzhľadom k menšiemu u_k)
 c) rovnaké uhly natočenia (rovnaké hodinové uhly) pri spojení rovnako označených svoriek (medzi ktorými nebol nameraný rozdiel napätí).

Vzhľadom na výrobné tolerancie na prevod napätia naprázdno a napätia nakrátko je potrebné skúmať efektívnosť paralelného chodu transformátorov. Transformátory a, b, \dots, i , ktoré pracujú paralelne, si rozdelia celkovú záťaž S_{celk} v takomto pomere:

$$S_a : S_b : \dots : S_i = \frac{S_{Na}}{u_{ka}} : \frac{S_{Nb}}{u_{kb}} : \dots : \frac{S_{Ni}}{u_{ki}} \quad (1.91)$$

To znamená, že výkon S_a , ktorým sa zúčastňuje transformátor a na celkovej záťaži S_{celk} , je priamo-úmerný jeho menovitému výkonu a nepriamo-úmerný jeho napätiu nakrátko, atď., pričom platí, že:

$$S_a + S_b + \dots + S_i = S_{\text{celk}} \quad (1.92)$$

Z toho vyplýva, že transformátor s väčším u_k preberá na seba menšiu záťaž na úkor transformátora s menším u_k . Preto, aby transformátor s menším u_k nebol preťažený, obmedzuje sa ním dodávaný výkon na jeho menovitý výkon. Ak je to napr. transformátor a , tak $S_a = S_{Na}$. Potom transformátor s väčším u_k bude odľahčený, t. j. bude do spoločnej záťaže dodávať výkon menší ako je jeho menovitý výkon. Aby táto spolupráca bola efektívna, definuje sa činiteľ efektívneho využitia skupiny paralelne pracujúcich transformátorov:

$$\kappa = \frac{\sum S_i}{\sum S_{Ni}} 100 \geq 95\% \quad (1.93)$$

kde v čitateli je súčet výkonov, ktoré transformátory dodávajú do spoločnej záťaže, pričom dodávaný výkon transformátora s najmenším u_k je jeho menovitý výkon a v menovateli je súčet menovitých výkonov všetkých paralelne pracujúcich transformátorov, t. j. výkonov, ktoré by do spoločnej záťaže mohli dodávať, keby všetky mali úplne rovnaké u_k .

Ak nie je celkom presne splnená požiadavka rovnakého prevodu, resp. svorkového napätia, vinutiami transformátorov sa pretláča vyrovnávací prúd. Ten je priamo-úmerný absolútnej hodnote rozdielu fázových napätí na svorkách transformátorov a nepriamo-úmerný súčtu ich impedancií nakrátko:

$$I_{\text{vyr}} = \frac{|U_{fa} - U_{fb}|}{Z_{ka} + Z_{kb}} \quad (1.94)$$

1.7 Trojvinuťové transformátory

Ako bolo uvedené v kap. 1.1, transformátor môže mať aj viac ako dve vinutia. Potom sa nazývajú viacvinuťové. V silnoprúdovej elektrotechnike sa najviac používajú

trojvinuťové transformátory. Pri súčasnej činnosti všetkých troch vinutí, umiestnených na jednom jadre sa najčastejšie vyskytuje prípad napájania jedného vinutia a odber z dvoch vinutí. V takom prípade závisí napätie každého z uvedených vinutí nielen od jeho zaťaženia, ale aj od zaťaženia druhého vinutia. Súvisí to s úbytkami napätia na činných odporoch a rozptylových reaktanciách všetkých troch vinutí (pozri kap. 1.4 a príklad 1.24). Náhradná schéma a fázorový diagram trojvinuťového transformátora sú zostavené na rovnakom princípe ako dvojvinuťového a budú uvedené v príslušných príkladoch (príklady 1.3, 1.4, a 1.5). Meraniu a výpočtu parametrov náhradnej schémy trojvinuťového transformátora je venovaná kap. 2.14 v [2].

1.8 Zmena počtu fáz

Okrem transformácie prúdu a napätia možno meniť aj počet fáz.

1.8.1 Zmena počtu fáz na celočíselný násobok troch

Najjednoduchšia je zmena počtu fáz na taký počet, ktorý je celistvým násobkom počtu fáz siete, t. j. násobkom troch, napr. z troch na šesť, deväť, alebo dvanásť (pozri príklad 1.25.).

1.8.2 Scottovo zapojenie

Transformáciu z troch na dve fázy, alebo naopak, možno uskutočniť dvoma jednofázovými transformátormi v zapojení, ktoré sa nazýva Scottovo zapojenie. Obidva transformátory majú rovnaký výkon, ale odlišný prevod aj zapojenie. Sú spojené elektricky, ale nie magneticky. Jeden transformátor sa volá „hlavný“ a druhý „pomocný“. Ak N_1 je počet závitov prislúchajúci združenému napätiu trojfázovej siete (primárna strana) a N_2 je počet závitov prislúchajúci fázovému napätiu dvojfázovej siete (sekundárna strana), prevodový pomer je $N_1/(\sqrt{3}N_2)$, ako to vyplýva z obr. 1.22 v príklade 1.26. Na jednom transformátore je požiadavka vyviesť stredný bod, t. j. urobiť odbočku uprostred závitov N_1 , druhý má požiadavku urobiť odbočku na $0,866 N_1$. Kvôli jednoduchosti výroby obidva transformátory môžu byť rovnaké, ale z jedného sa využije odbočka uprostred a z druhého odbočka pri $86,6 \% N_1$. Napätie v dvoch sekundárnych vinutiach je časovo posunuté o 90° . Symetrická záťaž na dvojfázovej strane sa v ideálnom prípade objaví ako symetrická aj na trojfázovej strane. Treba poznamenať, že dvojfázové obvody sekundárnej strany možno zapojiť tak, že tvoria dvojfázový, trojvodičový systém. Princíp činnosti, spôsob zapojenia, fázorový diagram a výpočet prúdov vo vinutiach je uvedený v príklade 1.26. Konkrétny príklad je počítaný v príklade 1.27.

1.8.3 Zapojenie do V, alebo zapojenie do otvoreného trojuholníka

Dva jednofázové transformátory zapojené do V, alebo ináč povedané, do otvoreného trojuholníka, môžu zabezpečiť prevádzku v trojfázovej sieti, ako je to vysvetlené v príklade 1.28.

RIEŠENÉ PRÍKLADY

Príklad 1.1

Jadro jednofázového a) dvojvinutového, b) trojvinutového transformátora má štvorcový prierez so stranou 20 mm. Primárne vinutie je na 230 V, sekundárne na 110 V a terciárne vinutie trojvinutového transformátora má odbočku uprostred a má dávať 6-0-6 V. Vypočítajte potrebný počet závitov každého vinutia pre 50 Hz a dovolený magnetický tok v jadre tak, aby magnetická indukcia neprekročila 1 T. Zanedbajte vnútornú impedanciu transformátora.

Riešenie:

Pokyn, aby sme zanedbali vnútornú impedanciu transformátora znamená, že neuvažujeme úbytky napätia na činných odporoch a rozptylových reaktanciách a indukované napätie sa bude rovnať svorkovému napätiu. Napätový prevod možno len zriedkakedy dosiahnuť úplne presne. Nízkonapäťové vinutie navrhujeme teda ako prvé, lebo na nízkonapäťovej strane je najnižší počet závitov a skutočný počet závitov vždy musí byť celé číslo, preto určenie príslušného počtu závitov je najhrubšie tu. Maximálna hodnota magnetického toku nesmie presiahnuť

$$\Phi = BS = 1(20 \cdot 10^{-3})^2 = 400 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}$$

a) Výpočet pre dvojvinutový transformátor

Indukované napätie na závit na sekundárnej strane je

$$U_{iz} = \sqrt{2}\pi f \Phi = \sqrt{2}\pi 50 \cdot 400 \cdot 10^{-6} = 0,08886 \text{ V/závit}$$

Potom potrebný počet závitov na sekundárnej strane je

$$N_2 = \frac{U_2}{U_{iz}} = \frac{110}{0,08886} = 1237,9 = 1238 \text{ závitov}$$

Počet závitov na primárnej strane vypočítame z prevodu:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} \Rightarrow N_1 = \frac{U_1}{U_2} N_2 = \frac{230}{110} 1238 = 2588,54 = 2589 \text{ závitov, resp. 2590,}$$

ak potrebujeme páry počet závitov (pozri poznámku ďalej).

b) Výpočet pre trojvinutový transformátor

Z rovnice pre indukované napätie jednej časti terciárneho vinutia 6 V

$$6 = \sqrt{2}\pi 50 \cdot 400 \cdot 10^{-6} \cdot N_3$$

dostaneme $N_3 = 67,57$ a zaokrúhlime na najbližšie väčšie celé číslo 68, aby sme sa vyhli prekročeniu maximálnej dovolenej hodnoty magnetickej indukcie a magnetického toku. Takže teraz bude B trochu nižšie ako 1 T. Pre sekundárne vinutie platí

$$\frac{N_2}{N_3} = \frac{110}{6},$$

takže $N_2 = 1246,7$ a zaokrúhlime na $N_2 = 1247$ závitov.

Pre primárne vinutie platí

$$\frac{N_1}{N_3} = \frac{230}{6},$$

takže $N_1 = 2606,7$ a dáme $N_1 = 2607$ závitov. Terciárne vinutie bude mať 2 x 68 závitov.

Treba poznamenať, že:

1. Ak je transformátor jadrový, každé vinutie sa rozdelí na dve časti, na každom jadre po jednej časti. Potom je potrebné vybrať najbližšie párne číslo, aby boli obe časti rovnaké.
2. Niekedy je potrebné vedieť, aké je napätie na jeden závit, alebo koľko závitov treba na jeden volt. Pre tu uvažované jadro a frekvenciu 50 Hz je $6/67,57 = 88,8$ mV / závit, alebo 11,26 závitov na volt.

Príklad 1.2

Jednofázový transformátor 230/6 V meriame a) v stave naprázdno, b) v stave nakrátko. Pri meraní naprázdno je pri menovitom primárnom napätí 230 V, prúd naprázdno 0,1 A pri účinníku naprázdno $\cos\varphi_0 = 0,18$. Pri meraní nakrátko je na primárnych svorkách znížené napätie 20 V, prúd je 1 A a príkon 10 W.

1. Vypočítajte zložky prúdu naprázdno a prvky priečnej vetvy náhradnej schémy, t. j. magnetizačnú reaktanciu a odpor reprezentujúci straty v železe pri magnetizácii (napájani) z primárnej strany. Vypočítajte, aké hodnoty týchto prvkov by mal transformátor pri napájaní zo sekundárnej strany a aký by bol prúd naprázdno zo sekundárnej strany.
2. Vypočítajte hodnoty rozptylovej reaktancie a činného odporu prepočítané na primárnu stranu, a skutočné hodnoty sekundárnej strany a potom hodnoty prepočítané na sekundárnu stranu a opäť aj skutočné hodnoty odporov aj rozptylových reaktancií. Takto získané skutočné hodnoty navzájom porovnajte.
3. Vypočítajte sekundárne napätie, ak na sekundárne svorky pripojíme impedanciu záťaže $Z_{zt} = (0,12 + j0,09)\Omega$ a zanedbáme priečnu vetvu náhradnej schémy (magnetizačnú reaktanciu a straty v železe)

Riešenie:

Prevod transformátor, ktorý budeme potrebovať pri ďalších výpočtoch je:

$$p = \frac{230}{6} = 38,33$$

1. Náhradná schéma transformátora je na obr. 1.2 a schéma upravená pre stav naprázdno je na obr. 1.3. Na týchto obrázkoch, aj na obr. 1.4, kde je fázorový diagram pre stav naprázdno vidno, že zložky prúdu naprázdno sú magnetizačný prúd I_μ , pomocou ktorého vypočítame magnetizačnú reaktanciu X_μ a prúd reprezentujúci straty v železe I_{Fe} , pomocou ktorého vypočítame odpor reprezentujúci straty v železe nasledujúco:

$$I_\mu = I_0 \sin \varphi_0 = 0,1 \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0} = 0,1 \sqrt{1 - 0,18^2} = 0,09836 \text{ A}$$

$$X_\mu = \frac{U_{1N}}{I_\mu} = \frac{230}{0,09836} = 2338,34 \text{ } \Omega = 2,338 \text{ k}\Omega$$

$$I_{Fe} = I_0 \cos \varphi_0 = 0,1 \cdot 0,18 = 0,018 \text{ A}$$

$$R_{Fe} = \frac{U_{1N}}{I_{Fe}} = \frac{230}{0,018} = 12777,77 \text{ } \Omega = 12,777 \text{ k}\Omega$$

Prúd naprázdno ako fázor v Gaussovej rovine podľa obr. 1.4 možno vyjadriť takto:

$$I_0 = I_{Fe} - jI_\mu = 0,018 - j0,09836 = I_0 \angle -\varphi_0 = 0,1 \angle -88,47 \text{ A}$$

Straty v železe by boli:

$$\Delta P_{Fe} = R_{Fe} I_{Fe}^2 = 12777,77 \cdot 0,018^2 = 4,139 \text{ W}$$

Ako sa dozvieme v bode 2), činný odpor primárneho vinutia R_1 je 5Ω . Preto by sme mohli vypočítať, aké Jouleove straty (index „j“) na primárnom vinutí (čiže na odpore R_1 - index 1) vznikajú prechodom prúdu naprázdno (index 0):

$$\Delta P_{j10} = R_1 I_0^2 = 5 \cdot 0,1^2 = 0,05 \text{ W}$$

Straty v stave naprázdno

$$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{j10} = 4,139 + 0,05 = 4,189 \text{ W}$$

Ako vidno, Jouleove straty v stave naprázdno sú zanedbateľné, a preto sa uvažuje, že:

$$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe}$$

a straty v železe sa považujú za straty naprázdno, ako to bolo vysvetlené v teoretickej časti tejto kapitoly.

Prvky R_{Fe} a X_μ platia pre náhradnú schému transformátora prepočítanú na primárnu stranu, t. j. tak sa javí transformátor pri napájaní z primárnej strany, teda zo strany

vyššieho napätia. Pri dôslednom značení indexov by sme tieto prvky mali označovať indexom 1, t. j. R_{Fe1} , $X_{\mu1}$. Ale pretože sa obvykle pracuje s prvkami prepočítanými na primárnu stranu transformátora, tieto indexy sa vynechávajú.

Z hľadiska vybavenia laboratórií a skúšobní je však niekedy výhodnejšie merať transformátor v stave naprázdno zo strany nižšieho napätia (t. j. zo strany sekundárneho vinutia) a je potrebné prvky náhradnej schémy a veľkosti prúdov prepočítavať z tejto strany na stranu vyššieho napätia.

Veľkosť magnetického napätia $U_{mag}=NI$, ktorým sa vytvorí magnetický tok v transformátore je rovnaký, bez ohľadu na to, z ktorej strany sa magnetizuje, t. j. pri vyššom napätí, a teda väčšom počte závitov N_1 na to stačí menší prúd I_{01} a pri nižšom napätí a menšom počte závitov N_2 to musí byť väčší magnetizačný prúd, ktorý je dominantnou zložkou prúdu naprázdno I_{02} . Preto môžeme napísať rovnosť magnetických napätí:

$$N_1 I_{01} = N_2 I_{02}$$

Zo sekundárnej strany, t. j. zo strany nižšieho napätia by prúd naprázdno bol p -krát väčší ako prúd naprázdno zo strany vyššieho napätia

$$I_{02} = I_{01} \frac{N_1}{N_2} = I_{01} p$$

Čiže ak sa meranie uskutoční zo strany nižšieho napätia a nameraný prúd naprázdno je I_{02} , uvedeným prepočtom môžeme vypočítať, aký prúd naprázdno I_{01} by tiekol vinutím na strane vyššieho napätia, ak by toto vinutie bolo napájané jeho menovitým napätím:

$$I_{01} = I_{02} \frac{N_2}{N_1} = I_{02} \frac{1}{p}$$

Pri určovaní prvkov náhradnej schémy zo sekundárnej strany (budeme im dávať index 2) postupujeme podobne ako v prípade napájania z primárnej strany. Meriame napätie, prúd a príkon a počítame prvky priečnej vetvy:

$$X_{\mu2} = \frac{U_{20}}{I_{\mu2}} = \frac{U_{20}}{I_{02} \sin \varphi_{02}}$$

$$R_{Fe2} = \frac{U_{20}}{I_{Fe2}} = \frac{U_{20}}{I_{02} \cos \varphi_{02}}$$

$$\text{kde } \cos \varphi_{02} = \frac{P_{02}}{U_{20} I_{02}}$$

Hodnota $X_{\mu2}$ po prepočítaní na primárnu stranu sa má rovnať hodnote $X_{\mu1}$, t. j.:

$$X_{\mu1} = X_{\mu2} p^2$$

Podobným spôsobom prepočítame odpor reprezentujúci straty v železe R_{Fe2} na primárnu stranu

$$R_{Fe1} = R_{Fe2} p^2$$

Je vhodné spomenúť, že údaje o účinníku a činnom príkone sú rovnaké bez ohľadu na to, z ktorej strany je transformátor napájaný, t. j.

$$\cos \varphi_{01} = \cos \varphi_{02} = \cos \varphi_0$$

$$\Delta P_{01} = \Delta P_{02} = \Delta P_0$$

2. Účinník nakrátko je

$$\cos \varphi_k = \frac{P}{UI} = \frac{10}{20 \cdot 1} = 0,5$$

a impedancia nakrátko

$$Z_k = \frac{U}{I} = \frac{20}{1} = 20 \Omega$$

Impedancia nakrátko prepočítaná na primárnu stranu je

$$\begin{aligned} Z_k &= R_k + jX_{\sigma k} = (R_1 + R'_2) + j(X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2}) = \\ &= Z_k (\cos \varphi_k + j \sin \varphi_k) = 20(0,5 + j0,866) = 10 + j17,32 \Omega \end{aligned}$$

To znamená, že celkový činný odpor transformátora prepočítaný na primárnu stranu (index 1 pre jednoduchosť nepíšeme) $R_k = (R_1 + R'_2)$ je 10Ω a celková rozptylová reaktancia prepočítaná na primárnu stranu $X_{\sigma k} = (X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2})$ je $17,32 \Omega$.

Ak nemáme ďalšie podrobnejšie údaje, tak celkový odpor R_k rozdelíme na primárnu a sekundárnu stranu tak, že predpokladáme

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_k}{2} \Rightarrow R_1 = 5 \Omega; R'_2 = 5 \Omega \Rightarrow R_2 = \frac{R'_2}{p^2} = \frac{5}{38,33^2} = 0,0034 \Omega$$

lebo ak odpor R_2 je prepočítaný na primárnu stranu, t. j. na ten istý počet závitov ako má primárna strana, bude mať takú istú hodnotu ako odpor R_1 . Jeho skutočná hodnota R_2 je však p^2 – krát menšia.

Podobne vypočítame skutočné hodnoty rozptylových reaktancií:

$$X_{\sigma 1} = X'_{\sigma 2} = \frac{X_{\sigma k}}{2} = \frac{17,32}{2} = 8,66 \Omega \Rightarrow X_{\sigma 2} = \frac{8,66}{38,33^2} = 0,00589 \Omega$$

Impedancia nakrátko prepočítaná na sekundárnu stranu (na odlíšenie od tej, ktorá bola prepočítaná na primárnu stranu, ju označíme Z_{k2} , rovnako aj odpor a rozptylovú reaktanciu), je tiež p^2 -krát menšia ako tá, ktorá bola prepočítaná na primárnu stranu:

$$Z_{k2} = Z_k \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 = \left(\frac{6}{230} \right)^2 (10 + j17,32) =$$

$$= (R_{k2} + jX_{\sigma k2}) = (R'_1 + R_2) + j(X'_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}) = (0,0068 + j0,01178) \Omega$$

To znamená, že skutočné hodnoty odporov sú teraz tie, ktoré sú na sekundárnej strane a primárne hodnoty sú prepočítané na sekundárnu stranu. Aby sme z nich dostali skutočné hodnoty na primárnej strane, treba ich prepočítať cez p^2 (to je už skúška správnosti výpočtu):

$$R'_1 = R_2 = \frac{0,0068}{2} = 0,0034 \Omega \Rightarrow R_1 = R'_1 p^2 = 0,0034 \cdot 38,33^2 = 4,995 \Omega$$

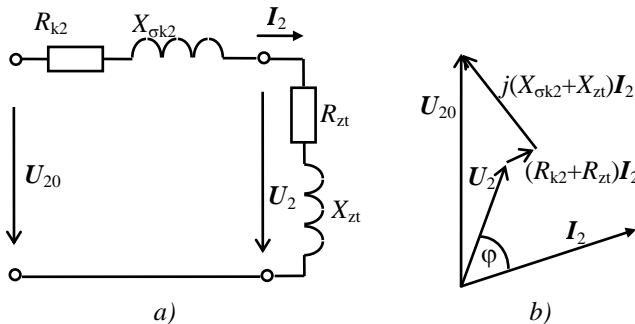
$$X'_{\sigma 1} = X_{\sigma 2} = \frac{0,01178}{2} = 0,00589 \Omega \Rightarrow X_{\sigma 1} = X'_{\sigma 1} p^2 = 0,00589 \cdot 38,33^2 = 8,6585 \Omega$$

Ako z týchto výpočtov vidno, obidvoma spôsobmi prepočtov sme získali rovnaké skutočné hodnoty parametrov pozdĺžnej vetvy náhradnej schémy, ktoré sú nasledujúce: $R_1 = 5 \Omega$, $R_2 = 0,0034 \Omega$, $X_{\sigma 1} = 8,66 \Omega$, $X_{\sigma 2} = 0,00589 \Omega$.

3. Pri výpočtoch týkajúcich sa zaťaženého transformátora je pohodlnejšie pracovať s náhradnou schémou prepočítanou na sekundárnu stranu (obr.1.10a). Celková impedancia obvodu podľa náhradnej schémy a záťaže podľa obr.1.10 je

$$Z_{\text{celk}} = Z_{k2} + Z_{zt} = (R_{k2} + R_{zt}) + j(X_{\sigma k2} + X_{zt}) =$$

$$= (0,0068 + 0,12) + j(0,01178 + 0,09) = (0,1268 + j0,10178) \Omega$$



Obr.1.10 a) Náhradná schéma transformátora s prvkami prepočítanými na sekundárnu stranu a s impedanciou záťaže, b) príslušný ilustračný fázorový diagram

Prúd na sekundárnej strane a záťaži je:

$$I_2 = \frac{U_{20}}{Z_{\text{celk}}} = \frac{6}{0,1268 + j0,10178} = \frac{6(0,1268 - j0,10178)}{(0,1268)^2 + (0,10178)^2} =$$

$$= 28,77 - j23,1 = 36,9 \angle -38,8^\circ \text{ A}$$

Napätie na sekundárnych svorkách, t.j. na záťaži Z_{zt} je

$$U_2 = I_2 Z_{zt} = 36,9 \angle -38,8^\circ \sqrt{0,12^2 + 0,09^2} \angle 37^\circ = 5,535 \angle -1,8^\circ \text{ V}$$

Iný postup je taký, že vypočítame úbytok napätia na vnútornej impedancii transformátora. Ako je zrejmé z fázorového diagramu na obr.1.10b, ktorý je nakreslený bez mierky, je skutočný úbytok napätia približne daný (nepresnosť je v tom, že zanedbávame fázový posun medzi napätím U_{20} a U_2 , ktorý je podľa predchádzajúceho výpočtu len $1,8^\circ$):

$$\Delta U_2 = R_{k2} I_2 \cos \varphi_{zt} + X_{\sigma k2} I_2 \sin \varphi_{zt} = 36,9(0,0068 \cdot 0,8 + 0,01178 \cdot 0,6) = 0,462 \text{ V}$$

$$\text{kde } \cos \varphi_{zt} = \frac{R_{zt}}{Z_{zt}} = \frac{0,12}{0,15} = 0,8 \text{ pričom } Z_{zt} = \sqrt{R_{zt}^2 + X_{zt}^2} = \sqrt{0,12^2 + 0,09^2} = 0,15 \text{ } \Omega$$

Potom svorkové napätie je $U_2 = 6 - 0,462 = 5,538 \text{ V}$

Treba poznamenať, že ak by účinník záťaže bol kapacitného charakteru, znamienko vo vzťahu pre ΔU_2 by bolo mínus, úbytok napätia by mohol byť záporný (ak by člen s reaktanciou bol väčší ako člen s čínnym odporom) a svorkové napätie vyššie ako napätie naprázdno.

Príklad 1.3

Trojfázový, trojvinuťový 50 Hz transformátor má primárne, sekundárne a terciárne vinutie pre každú fázu s hodnotami 6600/1000/440 V v zapojení Ddy. Vypočítajte potrebný počet závitov, aby maximálna hodnota magnetického toku nepresiahla 0,03 Wb. Ďalej vypočítajte primárny prúd, ak je na sekundárnu stranu pripojená záťaž 100 kVA s účinníkom $\cos \varphi_2 = 0,8$ induktívneho charakteru a na terciárne vinutie 50 kW s jednotkovým účinníkom $\cos \varphi_3 = 1$. Zanedbajte vnútornú impedanciu transformátora a prúd naprázdno I_0 .

Riešenie:

Tak ako v príklade 1.1, určíme najprv počet závitov nízkonapäťovej terciárnej strany. Pokyn zanedbať vnútornú impedanciu transformátora znamená, že indukované napätie je totožné so svorkovým napätím. Terciárna strana je zapojená do hviezdy, preto v počte závitov N_3 sa má indukovať fázové napätie U_{3f} (pozri obr. 1.11):

$$\frac{440}{\sqrt{3}} = \sqrt{2} \pi 50 \cdot 0,03 \cdot N_3 \Rightarrow N_3 = 38,14$$

Na fázu dáme $N_3 = 39$ závitov, aby sme udržali magnetický tok pod určenou hranicou 0,03 Wb. Ak by bola požiadavka rozdeliť závitov do dvoch vrstiev, treba počet závitov zaokrúhliť na párny počet, teda 40.

Pre sekundárnu stranu platí, že v zapojení do trojuholníka sa v počte závitov N_2 má indukovať celé napätie 1000 V, preto

$$\frac{N_2}{N_3} = \frac{U_2}{U_{3f}} = \frac{1000}{440/\sqrt{3}} \Rightarrow N_2 = 153,5$$

a dáme $N_2 = 154$ závitov na fázu.

Pre primárnu stranu, kde je tiež zapojenie do trojuholníka, platí podobne

$$\frac{N_1}{N_3} = \frac{U_1}{U_{3f}} = \frac{6600}{440/\sqrt{3}} \Rightarrow N_1 = 1013,2$$

a dáme $N_1 = 1013$ závitov na fázu.

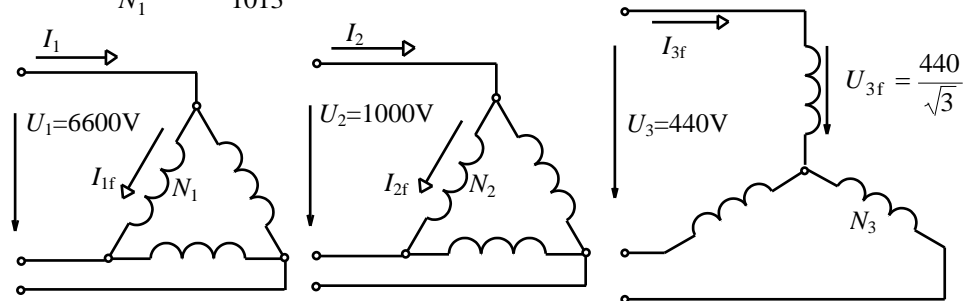
Stav pri zaťažení:

Terciárny prúd vo fáze vinutia pri zapojení do hviezdy

$$I_{3f} = \frac{S_3}{\sqrt{3}U_3} = \frac{50000}{\sqrt{3} \cdot 440} = 65,6 \text{ A}$$

Po prepočítaní na primárnu stranu

$$I'_{3f} = I_{3f} \frac{N_3}{N_1} = 65,6 \frac{39}{1013} = 2,525 \text{ A}$$



Obr. 1.11 Ilustračný obrázok zapojenia jednotlivých vinutí do trojuholníka a hviezdy

Ten istý výsledok dostaneme, ak terciárny výkon podelíme priamo fázovým primárnym napätím (prepočítať na primárnu stranu znamená, že sa pýtame, aký prúd by vinutím tiekol, keby to bolo pri danom výkone a primárnom napätí)

$$I'_{3f} = \frac{S_3}{3U_1} = \frac{50000}{3 \cdot 6600} = 2,525 \text{ A}$$

Vo fázorovom vyjadrení je

$$I'_{3f} = 2,525 + j0 \quad \text{pretože } \cos \varphi_3 = 1.$$

Podobne vypočítame prúd sekundárnej strany prepočítaný na primárnu stranu

$$I'_{2f} = \frac{S_2}{3U_1} (\cos \varphi_2 - j \sin \varphi_2) = \frac{100000}{3 \cdot 6600} (0,8 - j0,6) = 4,04 - j3,03 \text{ A}$$

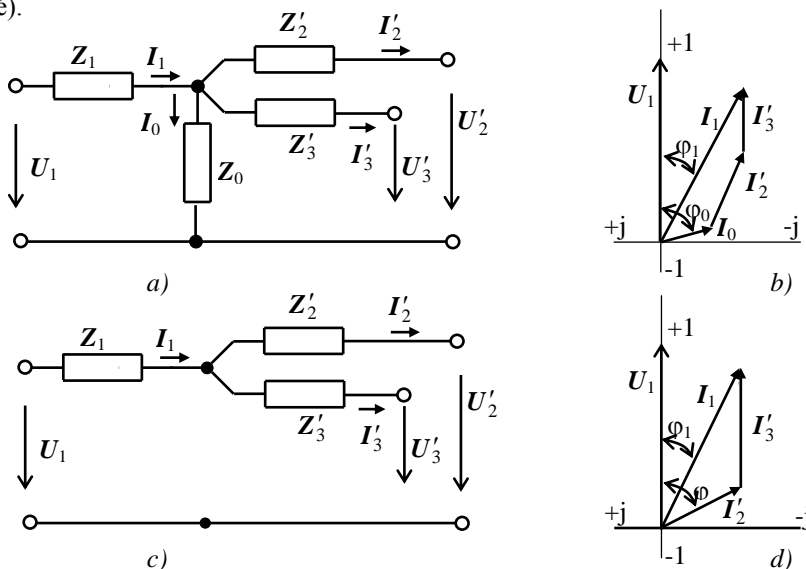
Orientácia kladnej reálnej a zápornej imaginárnej zložky zodpovedá voľbe umiestnenia napätia do kladnej reálnej osi. Potom prúdy odpovedajúce induktívnej záťaži s účinníkom $\cos \varphi$ sú o uhol φ posunuté za napätím, t. j. majú kladnú reálnu a zápornú imaginárnu zložku. (Prúdy s kapacitným charakterom zaťaženia by boli umiestnené pred napätím, a teda by mali kladnú reálnu a kladnú imaginárnu zložku.) Toto platí len ak sú prúdy orientované tak, ako na obr.1.12. Podľa náhradnej schémy a fázorového diagramu na obr.1.12a,b je súčet fázorov prúdov daný takto:

$$I_{1f} - I_{0f} - I'_{2f} - I'_{3f} = 0 \quad \text{čiže} \quad I_{1f} = I_{0f} + I'_{2f} + I'_{3f}$$

Ak priečnu vetvu zanedbáme, t. j. prúd naprázdno sa rovná nule, potom (pozri obr. 1.12c,d)

$$I_{1f} = I'_{2f} + I'_{3f}$$

Všimnime si, že dôsledne sčítavame fázové prúdy. To je dôležité najmä vtedy, keď je kombinované zapojenie do trojuholníka a hviezdy, pretože len fázový prúd, ktorý tečie vinutím sekundárneho alebo terciárneho vinutia má svoju odozvu vo fázovom prúde primárneho vinutia. Aj v náhradnej schéme, v ktorej jej prvky (odpory a reaktancie) platia pre vinutia fáz, t. j. sú to fázové hodnoty, musia byť nakreslené aj fázové prúdy (nie zdužené).



Obr.1.12 a) Náhradná schéma trojvinutového transformátora s uvažovaním priečnej vetvy náhradnej schémy. b) Fázorový diagram pre prípad, že priečnu vetvu berieme do úvahy. c) Náhradná schéma so zanedbanou priečnou vetvou. d) Fázorový diagram pre prípad, že priečnu vetvu zanedbávame.

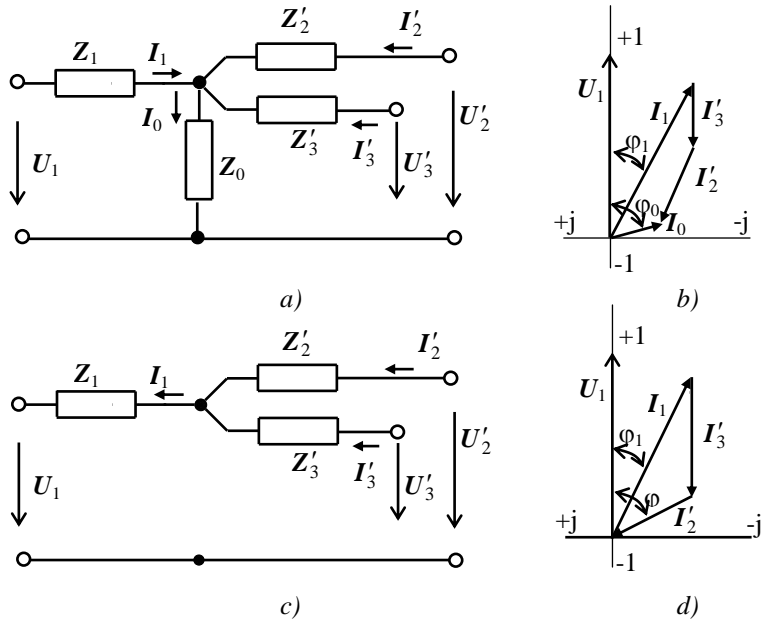
Ak podľa zadania zanedbávame prúd I_0 , tak pre primárny prúd podľa predchádzajúceho vzťahu platí:

$$I_{1f} = I'_{2f} + I'_{3f} = 4,04 - j3,03 + 2,525 = 6,565 - j3,03 = 7,23 \angle -24,7^\circ \text{ A}$$

Tento fázový prúd so svojou kladnou reálnou a zápornou imaginárnou zložkou vidno na obr. 1.12d.

Ten istý výsledok dostaneme, ak prúdy v sekundárnom a terciárnom vinutí orientujeme opačne, t. j. podľa obr. 1.13a,b môžeme napísať

$$I_{1f} + I'_{2f} + I'_{3f} - I_{0f} = 0 \quad \text{Potom} \quad I_{1f} = -I'_{2f} - I'_{3f} + I_{0f}$$



Obr.1.13 a) Náhradná schéma, b) fázorový diagram trojvinutového transformátora pri danom zaťažení, s rešpektovaním prúdu naprázdno. c) Náhradná schéma so zanedbanou priečnou vetvou. d) Vo fázorovom diagrame je priečna vetva, t. j. prúd I_0 zanedbaný. Oproti obr. 1.12 je opačná orientácia prúdov sekundárneho a terciárneho vinutia

Resp. ak zanedbáme prúd naprázdno, potom

$$I_{1f} = -I'_{2f} - I'_{3f}$$

Pritom fázory prúdov sú orientované opačne (pozri obr. 1.13d), čiže ak sekundárny prúd posunieme do začiatku súradnicovej sústavy, tak vidíme, že má zápornú reálnu a kladnú imaginárnu zložku a terciárny prúd posunutý do začiatku súradnicovej sústavy má len zápornú reálnu zložku a nulovú imaginárnu.

Konkrétny výpočet pre tento prípad orientácie prúdov je nasledujúci:

$$\mathbf{I}_{1f} = -\mathbf{I}'_{2f} - \mathbf{I}'_{3f} = -(-4,04 + j3,03) - (-2,525) = 6,565 - j3,03 = 7,23 \angle -24,7^\circ \text{ A}$$

čo je ten istý výsledok ako sme dostali vyššie pre obr. 1.12.

$$\text{Združený primárny prúd je } \sqrt{3} \cdot 7,23 = 12,52 \text{ A s účinníkom } \cos \varphi_1 = \frac{6,565}{7,23} = 0,908$$

induktívneho charakteru, t.j. prúd je za napätím, ako je to zrejme z obr. 1.12d a obr. 1.13d.

Príklad 1.4

Trojfázový trojvinuťový transformátor 6600/660/220 V v zapojení Yyd v stave naprázdno má príkon $S_0 = 50 \text{ kVA}$ pri účinníku naprázdno $\cos \varphi_0 = 0,15$. Vypočítajte príkon na primárnej strane S_1 a jeho účinník $\cos \varphi_1$, ak na sekundárnej strane dodáva prúd $I_2 = 870 \text{ A}$ pri $\cos \varphi_2 = 0,8$ ind. a na terciárnej strane dodáva združený prúd $I_3 = 260 \text{ A}$ pri účinníku $\cos \varphi_3 = 1$. Zanedbajte vnútorné impedancie vinutí.

Riešenie:

Zapojenie je odlišné od predchádzajúceho príkladu (obr.1.11), pre lepšie pochopenie si treba nakresliť zodpovedajúci obrázok. Aj teraz platí náhradná schéma z obr. 1.12a, včítane priečnej vetvy s prúdom naprázdno. Pri danej orientácii prúdov primárny prúd vypočítame podľa vzťahu: $\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_0 + \mathbf{I}'_2 + \mathbf{I}'_{3f}$ (obr.1.12a,b). Na primárnej a sekundárnej strane je zapojenie do hviezdy, preto skutočnosť, že je to fázový prúd nemusíme zdôrazňovať, terciárne vinutie je zapojené do trojuholníka, tak treba zvýrazniť, že sa pripočítava fázový prúd, nie združený. Výsledok musí byť rovnaký aj pre orientáciu prúdov podľa obr. 1.13a,b, ale podľa fázorového diagramu treba správne napísať fázory jednotlivých prúdov. Na obr. 1.14a,b sú znázornené obidva spôsoby orientácie prúdov. Tu uvedieme výpočet podľa obr. 1.14a:

$$\mathbf{I}_0 = \frac{S_0}{\sqrt{3}U_1} (\cos \varphi_0 - j \sin \varphi_0) = \frac{50000}{\sqrt{3} \cdot 6600} (0,15 - j0,9887) = (0,656 - j4,324) \text{ A}$$

$$\mathbf{I}'_2 = \mathbf{I}_2 (\cos \varphi_2 - j \sin \varphi_2) \frac{U_{2f}}{U_{1f}} = 870(0,8 - j0,6) \frac{660/\sqrt{3}}{6600/\sqrt{3}} = (69,6 - j52,2) \text{ A}$$

$$\mathbf{I}'_{3f} = \mathbf{I}_{3f} (\cos \varphi_3 + j \sin \varphi_3) \frac{U_{3f}}{U_{1f}} = \frac{260}{\sqrt{3}} (1 + j0) \frac{220}{6600/\sqrt{3}} = (8,667 + j0) \text{ A}$$

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_0 + \mathbf{I}'_2 + \mathbf{I}'_{3f} = (0,656 - j4,324) + (69,6 - j52,2) + (8,667 + j0) = 78,92 - j56,52$$

$$\mathbf{I}_1 = I_1 \angle \varphi_1 = \sqrt{78,92^2 + 56,52^2} \angle \arctg \frac{56,52}{78,92} = 97,07 \text{ A} \angle -35,6^\circ$$

pričom účinník na primárnej strane je

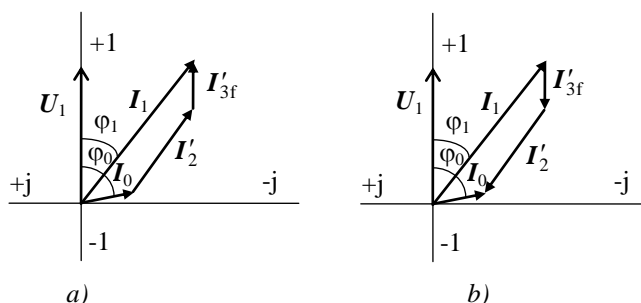
$$\cos \varphi_1 = \frac{78,92}{97,07} = 0,813 \text{ ind.}$$

Vstupný zdanlivý príkon

$$S_1 = \sqrt{3} 6600 \cdot 97,07 = 1109,6 \text{ kVA}$$

Činný príkon je

$$P_1 = S_1 \cos \varphi_1 = 1109,6 \cdot 0,813 = 902,15 \text{ kW}$$



Obr.1.14. Fázorové diagramy pre rôzne orientácie prúdov podľa náhradnej schémy a) na obr. 1.12a, b) na obr. 1.13a.

Príklad 1.5

Trojfázový, trojvinuťový transformátor s výkonom $S_N = 200 \text{ kVA}$ v zapojení Ddy a napätiami 33000/1100/400 V má na sekundárnej strane záťaž $S_2 = 150 \text{ kVA}$ pri účinníku $\cos \varphi_2 = 0,8 \text{ ind.}$ a na terciárnej strane $S_3 = 50 \text{ kVA}$ pri $\cos \varphi_3 = 0,9 \text{ ind.}$ Magnetizačný prúd je 4% z menovitého prúdu. Straty v železe $\Delta P_{Fe} = 1 \text{ kW}$. Vypočítajte primárny prúd, príkon a účinník pre danú záťaž. Vnútorne impedancie vinutí zanedbajte.

Riešenie:

Menovitý fázový prúd (budeme ho potrebovať pri výpočte zložiek prúdu naprázdno)

$$I_{1Nf} = \frac{S_N}{3U_1} = \frac{200000}{3 \cdot 33000} = 2,02 \text{ A}$$

Združený menovitý prúd možno vypočítať buď pomocou fázového prúdu

$$I_{1N} = \sqrt{3} I_{1Nf} = \sqrt{3} \cdot 2,025 = 3,5 \text{ A}$$

alebo priamo z výkonu a napätia:

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_1} = \frac{200000}{\sqrt{3} \cdot 33000} = 3,5 \text{ A}$$

Magnetizačný prúd (jalová zložka fázového prúdu naprázdno) je podľa zadania:

$$I_{\mu} = 0,04I_{1Nf} = 0,04 \cdot 2,02 = 0,081 \text{ A}$$

Činná zložka prúdu naprázdno je daná stratami v železe

$$I_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{3U_1} = \frac{1000}{3 \cdot 33000} = 0,01 \text{ A}$$

Poznamenávame, že pri výpočtoch pomocou náhradnej schémy sa vždy pracuje s fázovými hodnotami, čiže prúd naprázdno aj jeho zložky sú fázové hodnoty. Fázorový diagram je na obr. 1.15. Náhradná schéma na obr. 1.12a. Vypočítajme teraz prúd naprázdno I_{0f} , fázový sekundárny prúd prepočítaný na primár I'_{2f} a fázový terciárny prúd prepočítaný na primár I'_{3f}

$$I_{0f} = I_{Fe} - jI_{\mu} = (0,01 - j0,081) \text{ A}$$

$$I'_{2f} = \frac{S_2}{3U_1} (\cos \varphi_2 - j \sin \varphi_2) = \frac{150000}{3 \cdot 33000} (0,8 - j0,6) = (1,212 - j0,909) \text{ A}$$

$$I'_{3f} = \frac{S_3}{3U_1} (\cos \varphi_3 - j \sin \varphi_3) = \frac{50000}{3 \cdot 33000} (0,9 - j0,436) = (0,455 - j0,22) \text{ A}$$

$$I_{1f} = I_{0f} + I'_{2f} + I'_{3f} = 1,677 - j1,21 = 2,07 \text{ A} \angle -35,8^\circ$$

Združený primárny prúd je $I_1 = \sqrt{3}I_{1f} = \sqrt{3} \cdot 2,07 = 3,58 \text{ A}$,

pri $\cos \varphi_1 = \frac{1,677}{2,07} = 0,81 \text{ ind.}$

Vstupný príkon pri danej záťaži je

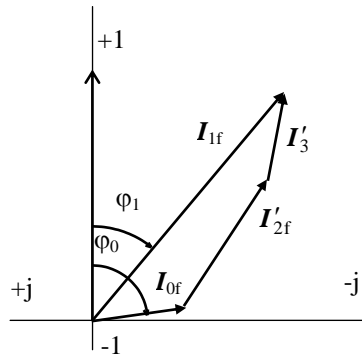
$$S_1 = \sqrt{3}U_1I_1 = \sqrt{3} \cdot 33000 \cdot 3,58 = 204,6 \text{ kVA}$$

alebo pomocou fázových hodnôt:

$$S_1 = 3U_1I_{1f} = 3 \cdot 33000 \cdot 2,07 = 204,6 \text{ kVA}$$

Činný príkon je

$$P_1 = S_1 \cos \varphi_1 = 204,6 \cdot 0,81 = 165,726 \text{ kW}$$



Obr. 1.15 Fázorový diagram k príkladu 1.5.

Príklad 1.6

Jednofázový transformátor má menovitý výkon $S_N = 10 \text{ kVA}$, prevod $3150 \text{ V}/110 \text{ V}$, činné odpory vinutí $R_1 = 10 \text{ } \Omega$, $R_2 = 0,0108 \text{ } \Omega$, rozptylové reaktancie vinutí $X_{\sigma 1} = 12 \text{ } \Omega$, $X_{\sigma 2} = 0,0196 \text{ } \Omega$, $\cos \varphi_0 = 0,12$, $I_0 = 0,15 \text{ A}$.

- Prepočítajte sekundárne hodnoty na primárnu stranu,
- vypočítajte menovité prúdy,
- menovitú impedanciu,
- straty vo vinutí pri menovitom prúde ΔP_{kN} ,
- impedanciu transformátora nakrátko,
- napätie nakrátko u_k a jeho zložky,
- skratový prúd I_k a dynamický skratový prúd $I_{k\text{dyn}}$,
- percentuálny a skutočný úbytok napätia a sekundárne napätie pri menovitej záťaži, ak účinník záťaže je $\cos \varphi_{z1} = 0,8 \text{ ind.}$ a nakreslite príslušnú vonkajšiu charakteristiku pre túto záťaž.
- prvky priečnej vetvy
- prvky náhradnej schémy v pomerných veličinách

Riešenie:

a) Hodnoty napätia a odporov na sekundárnej strane prepočítame na primárnu stranu pomocou prevodu p :

$$p = \frac{3150}{110} = 28,63$$

$$U'_2 = U_2 p = 110 \cdot 28,63 = 3150 \text{ V} = U_1$$

$$R'_2 = R_2 p^2 = 0,0108 \cdot 28,63^2 = 8,85 \ \Omega$$

$$X'_{\sigma 2} = X_{\sigma 2} p^2 = 0,0196 \cdot 28,63^2 = 16,07 \ \Omega$$

b) Výpočet menovitých prúdov, ak predpokladáme, že účinnosť je 100%:

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{10000}{3150} = 3,175 \ \text{A}$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{10000}{110} = 90,9 \ \text{A}$$

Sekundárny menovitý prúd prepočítaný na primárnu stranu je:

$$I'_{2N} = I_{2N} / p = \frac{90,9}{28,63} = 3,175 \ \text{A} = I_{1N}$$

c) Menovitá impedancia, ktorou pôsobí transformátor a jeho menovitá záťaž na sieť na primárnej strane je

$$Z_{1N} = \frac{U_{1N}}{I_{1N}} = \frac{3150}{3,175} = 992,125 \ \Omega$$

Ak by bol transformátor napájaný zo strany nižšieho napätia a zaťažný na strane vyššieho napätia, celý transformátor včítane menovitej záťaže by sa z hľadiska svoriek nižšieho napätia (index 2) javil ako menovitá impedancia:

$$Z_{2N} = \frac{U_{2N}}{I_{2N}} = \frac{110}{90,9} = 1,21 \ \Omega$$

Ak túto hodnotu prepočítame na primárnu stranu, dostaneme hodnotu Z_{1N} , čím sme potvrdili správnosť výsledku:

$$Z_{2N} p^2 = 1,21 \cdot 28,63^2 = 992 \ \Omega$$

d) Straty vo vinutí vypočítame buď po častiach tak, že vypočítame straty na primárnej, potom straty na sekundárnej strane a potom ich sčítame

$$\Delta P_{kN1} = R_1 I_{1N}^2 = 10 \cdot 3,175^2 = 100,8 \ \text{W}$$

$$\Delta P_{kN2} = R_2 I_{2N}^2 = 0,0108 \cdot 90,9^2 = 89,23 \ \text{W}$$

$$\Delta P_{kN} = \Delta P_{kN1} + \Delta P_{kN2} = 100,8 + 89,23 = 190,03 \text{ W}$$

alebo počítame s celkovým činným odporom

$$R_k = R_1 + R'_2 = 10 + 8,85 = 18,85 \text{ } \Omega,$$

ktorým by pretekal menovitý prúd I_{1N} (pretože aj sekundárny odpor je prepočítaný na primárnu stranu):

$$\Delta P_{kN} = R_k I_{1N}^2 = 18,85 \cdot 3,175^2 = 190,02 \text{ W}$$

čo je hodnota totožná s predchádzajúcim spôsobom výpočtu.

e) Impedancia nakrátko sa skladá z celkového činného odporu R_k (pozri vyššie) a celkovej rozptylovej reaktancie transformátora

$$X_{\sigma k} = X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2} = 12 + 16,07 = 28,07 \text{ } \Omega$$

Potom impedancia nakrátko je (pozri obr.1.7c v teoretickej časti tejto kapitoly a vzťah (1.41)):

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_{\sigma k}^2} = \sqrt{18,85^2 + 28,07^2} = 33,81 \text{ } \Omega$$

f) Aby sme mohli vypočítať napätie nakrátko u_k , potrebujeme pomerné, resp. percentuálne hodnoty činného odporu r a rozptylovej reaktancie x , resp. činnú u_R a jalovú zložku u_X napätia nakrátko, čo sú číselne totožné hodnoty. Uvádzame výpočet pre percentuálne hodnoty:

$$u_{R\%} = r_{\%} = \frac{R_k}{Z_{1N}} 100 = \frac{18,85}{992,125} 100 = 1,9 \%$$

$$u_{X\%} = x_{\%} = \frac{X_{\sigma k}}{Z_{1N}} = \frac{28,07}{992,125} = 2,83 \%$$

resp. $r = 0,019$, $x = 0,0283$ v bezrozmerných veličinách.

Percentuálne napätie nakrátko vypočítame pomocou percentuálnych hodnôt jeho zložiek (pomernú hodnotu by sme vypočítali pomocou pomerných hodnôt jeho zložiek). Túto skutočnosť veľmi dôsledne označujeme indexom“%“:

$$u_{k\%} = \sqrt{u_{R\%}^2 + u_{X\%}^2} = \sqrt{r_{\%}^2 + x_{\%}^2} = \sqrt{1,9^2 + 2,83^2} = 3,4 \%$$

Napätie nakrátko v pomerných hodnotách by sme vypočítali takto:

$$u_k = \sqrt{u_R^2 + u_X^2} = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{0,019^2 + 0,0283^2} = 0,034$$

a treba si uvedomiť, že celý výpočet je buď v bezrozmerných, alebo percentuálnych veličinách a taký je aj výsledok.

Tu je namieste uviesť, že pomerná, resp. percentuálna hodnota impedancie nakrátko je zhodná s hodnotou napätia nakrátko. Uvádzame výpočet pre percentuálne hodnoty:

$$z_{k\%} = \frac{Z_k}{Z_N} 100 = \frac{33,81}{992,125} 100 = 3,4\% = u_{k\%}$$

g) Trvalý skratový prúd na primárnej strane

$$I_{1k} = \frac{I_{1N}}{u_{k\%}} 100 = \frac{3,175}{3,4} 100 = 93,38 \text{ A}$$

čo je 29,4-násobok menovitého prúdu. V prvej polperióde pri prechodovom deji by prúd dosiahol ešte vyššiu hodnotu a síce

$$I_{1k\text{dyn}} = \sqrt{2} I_{1k} (1 + e^{-\frac{\pi r}{x}}) = \sqrt{2} \cdot 93,38 (1 + e^{-\frac{\pi 1,9}{2,83}}) = 132,05 (1 + 0,12) = 147,9 \text{ A}$$

Na sekundárnej strane by pretiekol prúd viazaný prevodom, t. j.:

$$I_{2k} = I_{1k} p = 93,38 \cdot 28,63 = 2673,47 \text{ A}$$

alebo tento prúd vypočítame opäť pomocou napätia nakrátko a menovitého prúdu na sekundárnej strane:

$$I_{2k} = \frac{I_{2N}}{u_{k\%}} 100 = \frac{90,9}{3,4} 100 = 2673,5 \text{ A}$$

a opäť je to 29,4-násobok menovitého prúdu. Aj na sekundárnej strane sa vytvorí špička dynamického nárazového prúdu $I_{2k\text{dyn}}$, ktorá je tiež viazaná cez prevod s $I_{1k\text{dyn}}$.

Na obr. 1.7 sú nakreslené zjednodušené náhradné schémy pri *a*) chode nakrátko pri napájaní napätím nakrátko, *b*) chode nakrátko pri napájaní menovitým napätím a *c*) menovitom chode, ktoré použitím Ohmovho zákona sú veľmi užitočné na výpočet menovitej impedancie (obr. 1.7d), impedancie nakrátko (obr. 1.7a,b), trvalého prúdu nakrátko (obr. 1.7b), resp. napätia nakrátko (obr. 1.7a).

Preto už uvedené výpočty možno modifikovať aj takto:

Trvalý prúd nakrátko (podľa obr. 1.7b):

$$I_{1k} = \frac{U_{1N}}{Z_k} = \frac{3150}{33,81} = 93,16 \text{ A}$$

Skutočné napätie nakrátko vo voltoch (podľa obr. 1.7a):

$$U_{1k} = I_{1N} Z_k = 3,175 \cdot 33,81 = 107,346 \text{ V}$$

a percentuálne napätie nakrátko je

$$u_{k\%} = \frac{U_{1k}}{U_{1N}} 100 = \frac{107,346}{3150} 100 = 3,4\%$$

To je hodnota totožná s tou, ktorú sme vypočítali v bode f).

- i) Percentuálny úbytok napätia pre menovité zaťaženie pri danom účinníku, vypočítame zo vzťahu:

$$\Delta u_{\%} = \frac{\Delta U_2}{U_{20}} 100 = \frac{I_1}{I_{1N}} (r_{\%} \cos \varphi_{z1} \pm x_{\%} \sin \varphi_{z1}) = 1(1,9 \cdot 0,8 + 2,83 \cdot 0,6) = 3,218\%$$

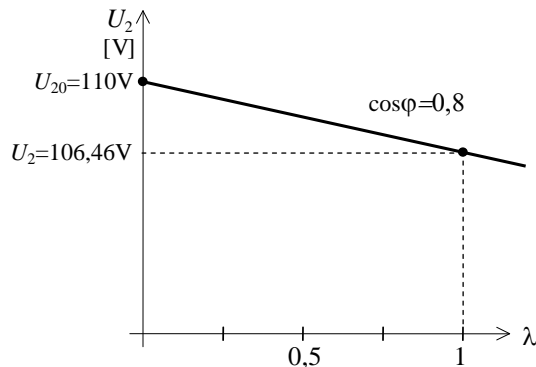
Potom skutočný úbytok napätia na sekundárnej strane ΔU_2 je

$$\Delta U_2 = \frac{\Delta u_{\%} U_{20}}{100} = \frac{3,218 \cdot 110}{100} = 3,54 \text{ V}$$

Skutočné sekundárne napätie pri menovitej záťaži a danom účinníku je

$$U_2 = U_{20} - \Delta U_2 = 110 - 3,54 = 106,46 \text{ V}$$

Týmto výpočtom sme získali druhý bod do vonkajšej charakteristiky. Ako vidno na obr. 1.16, tým prvým bodom je stav naprázdno, čiže napätie 110 V pri nulovom zaťažení.



Obr. 1.16 Vonkajšia charakteristika transformátora podľa príkladu 1.6i.

- j) Ak chceme vypočítať prvky priečnej vetvy, potrebujeme vypočítať magnetizačný prúd I_{μ} a prúd v železe I_{Fe} :

$$I_{\mu} = I_0 \sin \varphi_0 = 0,15 \cdot 0,992 = 0,1488 \text{ A}$$

$$I_{Fe} = I_0 \cos \varphi_0 = 0,15 \cdot 0,12 = 0,018 \text{ A}$$

Potom prvky priečnej vetvy - magnetizačnú reaktanciu a odpor železa vypočítame nasledujúco:

$$X_{\mu} = \frac{U_1}{I_{\mu}} = \frac{3150}{0,148} = 21,283 \text{ k}\Omega$$

$$R_{\text{Fe}} = \frac{U_1}{I_{\text{Fe}}} = \frac{3150}{0,018} = 175 \text{ k}\Omega$$

k) Prvky náhradnej schémy v pomerných veličinách vypočítame pomocou vzťahov uvedených v kap.1.3.4.

$$r_1 = \frac{R_1}{Z_{1N}} = \frac{10}{992,125} = 0,01$$

$$r_2 = \frac{R_2}{Z_{2N}} = \frac{0,0108}{1,21} = 0,0089$$

čiže celkový pomerný činný odpor je:

$$r = r_1 + r_2 = 0,0189 \text{ a rozptylová reaktancia:}$$

$$x_{\sigma 1} = \frac{X_{\sigma 1}}{Z_{1N}} = \frac{12}{992,125} = 0,01209$$

$$x_{\sigma 2} = \frac{X_{\sigma 2}}{Z_{2N}} = \frac{0,0196}{1,21} = 0,01619$$

$x_{\sigma} = x_{\sigma 1} + x_{\sigma 2} = 0,02828$ a celková pomerná impedancia nakrátko z_k , resp. napätie nakrátko je:

$$z_k = u_k = \sqrt{r^2 + x_{\sigma}^2} = \sqrt{0,0189^2 + 0,02828^2} = 0,034$$

ako to bolo vypočítané aj v bode f).

Prvky v priečnej vetve:

$$i_0 = \frac{I_{01}}{I_{1N}} = \frac{I_{02}}{I_{2N}} \quad [-] \quad (1.68)$$

ako to bolo uvedené v (1.58), ale v percentuálnom vyjadrení.

$$r_{Fe} = \frac{R_{Fe1}}{Z_{1N}} = \frac{R_{Fe2}}{Z_{2N}} \quad [-] \quad (1.69)$$

$$x_{\mu} = \frac{X_{\mu1}}{Z_{1N}} = \frac{X_{\mu2}}{Z_{2N}} \quad [-] \quad (1.70)$$

Príklad 1.7

Jednofázový transformátor je daný takto: menovitý výkon $S_N = 12 \text{ kVA}$, prevod $p = 6300 \text{ V}/127 \text{ V}$, straty v železe $\Delta P_{Fe} = 82 \text{ W}$, straty nakrátko $\Delta P_{kN} = 192 \text{ W}$, percentuálne napätie nakrátko $u_{k\%} = 3,5 \%$, a prúd naprázdno $i_0 = 8,3 \%$ I_N . Vypočítajte:

- prevod, menovité prúdy, menovitú impedanciu, prúd nakrátko a parametre náhradnej schémy
- účinnosť pri menovitom a štvrtinovom zaťažení, pri účinníku záťaže $\cos\varphi_{zt} = 0,85$,
- pomerné zaťaženie, pri ktorom je účinnosť najvyššia,
- maximálnu účinnosť pri účinníku $\cos\varphi_{zt} = 0,85$,
- maximálnu možnú účinnosť tohto transformátora.

Riešenie:

Náhradná schéma transformátora je na obr.1.2.

- Prevod je daný pomerom napätí:

$$p = \frac{6300}{127} = 49,6$$

Menovitý prúd primárneho vinutia

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{12000}{6300} = 1,9 \text{ A}$$

a sekundárneho vinutia, ak zatiaľ predpokladáme 100 % účinnosť a zanedbávame úbytok napätia na sekundárnej strane:

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{12000}{127} = 94,5 \text{ A}$$

Menovitá impedancia:

$$Z_N = \frac{U_{1N}}{I_{1N}} = \frac{6300}{1,9} = 3315,8 \text{ } \Omega$$

Prúd nakrátko môžeme vypočítať pomocou napätia nakrátko:

$$I_{1k} = \frac{I_{1N}}{u_k} 100 = \frac{1,9}{3,5} 100 = 54,285 \text{ A}$$

Na sekundárnej strane by bol p -krát väčší (pozri výpočet v príklade 1.6).

Na výpočet parametrov pozdĺžnej vetvy náhradnej schémy potrebujeme zložky napätia nakrátko.

Percentuálny činný odpor vinutia $r_{\%} = u_{R\%}$ určíme zo strát nakrátko:

$$r_{\%} = \frac{R_k}{Z_N} 100 = \frac{\Delta P_{kN}}{S_N} 100 = \frac{192}{12000} 100 = 1,6\%$$

$$R_k = \frac{r_{\%} Z_N}{100} = \frac{1,6 \cdot 3315,8}{100} = 53,05 \text{ } \Omega$$

Je to celkový činný odpor transformátora, vzťahnutý na primárnu stranu a túto hodnotu rozdelíme na polovicu medzi odpor primárneho vinutia a odpor sekundárneho vinutia prepočítaný na primár:

$$R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2} = 26,52 \text{ } \Omega$$

a skutočná hodnota sekundárneho odporu je

$$R_2 = \frac{R_2'}{p^2} = \frac{26,52}{49,6^2} = 0,01078 \text{ } \Omega$$

Rozptylovú reaktanciu vypočítame pomocou napätia nakrátko, ďalší postup je rovnaký ako pri výpočte odporov:

$$x_{\%} = \sqrt{u_{k\%}^2 - r_{\%}^2} = \sqrt{3,5^2 - 1,6^2} = 3,11\%$$

$$X_{\sigma k} = \frac{x_{\%} Z_N}{100} = \frac{3,11 \cdot 3315,8}{100} = 103,125 \text{ } \Omega$$

$$X_{\sigma 1} = X_{\sigma 2}' = \frac{X_{\sigma k}}{2} = 51,56 \text{ } \Omega$$

$$X_{\sigma 2} = \frac{X_{\sigma 2}'}{p^2} = \frac{51,56}{49,6^2} = 0,0209 \text{ } \Omega$$

Hodnotu prúdu nakrátko môžeme vypočítať aj pomocou impedancie nakrátko podľa obr. 1.7b. Impedancia nakrátko je:

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_{\sigma k}^2} = \sqrt{53,05^2 + 103,12^2} = 115,965 \text{ } \Omega$$

Potom trvalý prúd nakrátko na primárnej strane je:

$$I_{1k} = \frac{U_{1N}}{Z_k} = \frac{6300}{115,965} = 54,326 \text{ A}$$

čo je hodnota takmer zhodná s tou, ktorú sme už vypočítali.

Teraz vypočítame parametre priečnej vetvy náhradnej schémy:

Prúd naprázdno

$$I_0 = 8,3\% I_{1N} = 0,083 \cdot 1,9 = 0,1577 \text{ A}$$

Účinník naprázdno

$$\cos \varphi_0 = \frac{\Delta P_0}{S_0} = \frac{\Delta P_0}{U_{1N} I_0} = \frac{82}{6300 \cdot 0,1577} = 0,0825$$

Vypočítame zložky prúdu naprázdno

$$I_{Fe} = I_0 \cos \varphi_0 = 0,1577 \cdot 0,0825 = 0,0130158 \text{ A}$$

$$I_{\mu} = I_0 \sin \varphi_0 = 0,1577 \cdot 0,9966 = 0,1571 \text{ A}$$

Odpor, ktorý reprezentuje straty v železe

$$R_{Fe} = \frac{U_N^2}{\Delta P_{Fe}} = \frac{6300^2}{82} = 484024,3 \text{ } \Omega$$

alebo

$$R_{Fe} = \frac{U_{1N}}{I_{Fe}} = \frac{6300}{0,0130158} = 484024,3 \text{ } \Omega$$

Magnetizačná reaktancia

$$X_{\mu} = \frac{U_N}{I_{\mu}} = \frac{6300}{0,1571} = 40101,845 \text{ } \Omega$$

Tým je ukončený výpočet parametrov náhradnej schémy.

b) Účinnosť vypočítame podľa vzťahu (1.86). Pre menovitú záťaž je pomerné zaťaženie λ rovné 1, preto

$$\eta_{\%} = \frac{\lambda S_N \cos \varphi_{zt}}{\lambda S_N \cos \varphi_{zt} + \Delta P_0 + \lambda^2 \Delta P_{kN}} 100 = \frac{1 \cdot 12000 \cdot 0,85}{1 \cdot 12000 \cdot 0,85 + 82 + 1^2 \cdot 192} 100 = 97,3839 \%$$

Pre štvrtinovú záťaž je $\lambda = 0,25$ a účinnosť pri tom istom účinníku je:

$$\eta_{\%} = \frac{\lambda S_N \cos \varphi_{zt}}{\lambda S_N \cos \varphi_{zt} + \Delta P_0 + \lambda^2 \Delta P_{kN}} 100 =$$

$$= \frac{0,25 \cdot 12000 \cdot 0,85}{0,25 \cdot 12000 \cdot 0,85 + 82 + 0,25^2 \cdot 192} 100 = 96,4447 \%$$

c) Pomerné zaťaženie, pri ktorom je účinnosť tohto transformátora najvyššia je:

$$\lambda_{\eta_{\max}} = \sqrt{\frac{\Delta P_0}{\Delta P_{kN}}} = \sqrt{\frac{82}{192}} = 0,653$$

d) Maximálna účinnosť pri účinníku $\cos \varphi_{zt} = 0,85$ je:

$$\eta_{\max, 0,85\%} = \frac{\lambda_{\eta_{\max}} S_N \cos \varphi_{zt}}{\lambda_{\eta_{\max}} S_N \cos \varphi_{zt} + \Delta P_0 + \lambda_{\eta_{\max}}^2 \Delta P_{kN}} 100 =$$

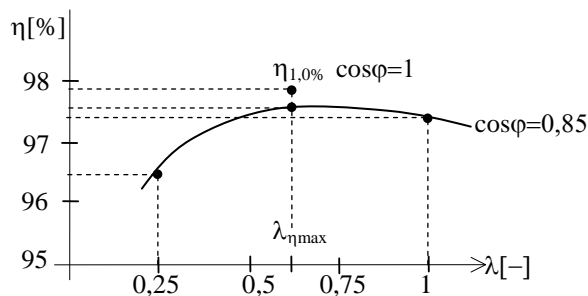
$$= \frac{0,653 \cdot 12000 \cdot 0,85}{0,653 \cdot 12000 \cdot 0,85 + 82 + 0,653^2 \cdot 192} 100 = 97,5987 \%$$

e) Maximálnu možnú účinnosť dosiahne transformátor pri $\cos \varphi = 1,0$ a pomernom zaťažení $\lambda_{\eta_{\max}}$. Vypočítame ju takto:

$$\eta_{1,0\%} = \frac{\lambda_{\eta_{\max}} S_N}{\lambda_{\eta_{\max}} S_N + \Delta P_0 + \lambda_{\eta_{\max}}^2 \Delta P_{kN}} 100 =$$

$$= \frac{0,653 \cdot 12000}{0,653 \cdot 12000 + 82 + 0,653^2 \cdot 192} 100 = 97,951 \%$$

Vypočítané hodnoty účinností sú vynesené do grafu na obr. 1.17



Obr. 1.17 Priebeh účinnosti v závislosti od pomerného zaťaženia s hodnotami vypočítanými v príklade 1.7

Príklad 1.8

Vypočítajte parametre náhradnej schémy trojfázového olejového transformátora, ktorého zdanlivý výkon $S_N = 250\text{kVA}$, prevod $p = 3\text{ kV}/525\text{ V}$, spojenie $Yy0$, straty naprázdno $\Delta P_0 = 1250\text{ W}$, straty nakrátko $\Delta P_{kN} = 4460\text{ W}$, napätie nakrátko $u_k = 4,3\%$ a prúd naprázdno $I_0 = 5,1\%$ I_N .

Riešenie:

S takýmto zadáním sa stretne vtedy, keď máme k dispozícii údaje z katalógov výrobcov transformátorov a potrebujeme vypočítať parametre náhradnej schémy, aby sme mohli simulovať prechodové a ustálené deje v transformátore, poprípade počítať úbytky napätia a získať vonkajšiu charakteristiku transformátora.

Postup riešenia bude podobný ako v príklade 1.7. Uvedomíme si však, že ide o trojfázový transformátor, a preto napätie, ktoré je dané v prevode je združené, výkon a straty sú trojfázové, a pretože náhradnú schému kreslíme pre jednu fázu, všetky jej prvky sa počítajú z fázových hodnôt napätia a prúdu.

Prevod transformátora je daný pomerom združených napätí, alebo fázových napätí, čo dáva pre tento transformátor tú istú hodnotu, lebo na oboch stranách je rovnaké zapojenie do hviezdy:

$$p = \frac{U_{1N}}{U_{20}} = \frac{3000}{525} = 5,714$$

Tú istú hodnotu by sme dostali prevráteným pomerom menovitých prúdov. V oboch prípadoch sú to prúdy fázové:

$$I_{1Nf} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{250000}{\sqrt{3} \cdot 3000} = 48,11\text{ A}$$

$$I_{2Nf} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{20}} = \frac{250000}{\sqrt{3} \cdot 525} = 274,928\text{ A}$$

$$p = \frac{I_{2Nf}}{I_{1Nf}} = \frac{274,928}{48,11} = 5,714$$

Pri výpočte sekundárneho menovitého prúdu sme predpokladali, že účinnosť je 100 % a zanedbali sme úbytky napätí na primárnej aj sekundárnej strane.

Pomerný (percentuálny) činný odpor vypočítame zase zo strát vo vinutí. Máme dané straty nakrátko ΔP_{kN} , ale v stave nakrátko sa takmer celý výkon spotrebuje na krytie strát vo vinutí transformátora, lebo pri skrate sú straty v železe voči stratám vo vinutí zanedbateľne malé. Preto môžeme uvažovať $\Delta P_{kN} = \Delta P_{jN}$. Straty nakrátko sa udávajú pre

všetky tri fázy a menovitý výkon je tiež výkonom všetkých troch fáz, nemusíme ich prepočítavať na jednu fázu:

$$r_{\%} = \frac{\Delta P_{kN}}{S_N} 100 = \frac{4460}{250000} 100 = 1,78 \%$$

Menovitá impedancia (zdôrazníme, že treba dosadiť fázové hodnoty napätia a prúdu)

$$Z_N = \frac{U_{INf}}{I_{INf}} = \frac{3000/\sqrt{3}}{48,11} = 36 \Omega$$

Celkový činný odpor

$$R_k = \frac{r_{\%} \cdot Z_N}{100} = \frac{1,78 \cdot 36}{100} = 0,64 \Omega$$

Straty vo vinutí (nakrátko) sú vytvorené na činnom odpore transformátora prechodom menovitého prúdu I_{INf} (pretože aj sekundárny odpor je prepočítaný na primárnu stranu). Môžeme ich preto pre trojfázový transformátor vyjadriť vzťahom

$$\Delta P_{kN} = 3R_k I_{INf}^2$$

a z neho možno tiež vypočítať činný odpor vinutia

$$R_k = \frac{\Delta P_{kN}}{3I_{IN}^2} = \frac{4460}{3 \cdot 48,11^2} = 0,64 \Omega$$

Rovnakým spôsobom ako v príklade 1.7 dostaneme činné odpory primárneho aj sekundárneho vinutia

$$R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2} = 0,32 \Omega$$

$$R_2 = \frac{R_2'}{p^2} = \frac{0,32}{5,714^2} = 0,0098 \Omega$$

Rozptylovú reaktanciu vypočítame pomocou napätia nakrátko:

$$x_{\%} = \sqrt{u_{k\%}^2 - r_{\%}^2} = \sqrt{4,3^2 - 1,78^2} = 3,91 \%$$

Ďalší postup je rovnaký ako výpočte činných odporov:

$$X_{\sigma k} = \frac{x_{\%} Z_N}{100} = \frac{3,91 \cdot 36}{100} = 1,407 \Omega$$

$$X_{\sigma 1} = X_{\sigma 2}' = \frac{X_{\sigma k}}{2} = 0,7035 \Omega$$

$$X_{\sigma 2} = \frac{X'_{\sigma 2}}{\rho^2} = \frac{0,7035}{5,714^2} = 0,0215 \ \Omega$$

Výpočet parametrov priečnej vetvy náhradnej schémy:

$$I_{01} = 0,051 I_{1N} = 0,051 \cdot 48,11 = 2,453 \text{ A}$$

Účinník naprázdno $\cos \varphi_0$ vypočítame ako pomer činného a zdanlivého príkonu v stave naprázdno. Údaj strát naprázdno je pre celý magnetický obvod, a teda pre všetky tri fázy, preto aj v menovateli musí byť trojfázový zdanlivý príkon naprázdno, daný menovitým napätím a prúdom naprázdno

$$\cos \varphi_0 = \frac{\Delta P_0}{S_0} = \frac{\Delta P_0}{\sqrt{3} U_{1N} I_0} = \frac{1250}{\sqrt{3} \cdot 3000 \cdot 2,453} = 0,0981$$

Zložky prúdu naprázdno:

$$I_{Fe} = I_0 \cos \varphi_0 = 2,453 \cdot 0,0981 = 0,2406 \ \text{A}$$

$$I_{\mu} = I_0 \sin \varphi_0 = 2,453 \cdot 0,995 = 2,441 \ \text{A}$$

Straty v železe reprezentuje odpor

$$R_{Fe} = \frac{U_{1Nf}}{I_{Fe}} = \frac{3000 / \sqrt{3}}{0,2406} = 7199 \ \Omega$$

Tento odpor možno tiež vypočítať priamo zo strát naprázdno. Pre trojfázový transformátor platí každý z týchto vzťahov:

$$\Delta P_0 = 3 R_{Fe} I_{Fe}^2 = 3 U_{1Nf} I_{Fe} = 3 \frac{U_{1Nf}^2}{R_{Fe}}$$

Potom

$$R_{Fe} = \frac{\Delta P_0}{3 I_{Fe}^2} = 3 \frac{U_{1Nf}^2}{\Delta P_0} = 7200 \ \Omega$$

Magnetizačná reaktancia

$$X_{\mu} = \frac{U_{1Nf}}{I_{\mu}} = \frac{3000 / \sqrt{3}}{2,441} = 709,5 \ \Omega$$

Ak by bolo potrebné vypočítať skratové prúdy, alebo účinnosti pre dané zaťaženia, postupovali by sme rovnako ako v predchádzajúcom príklade.

Príklad 1.9

Trojfázový transformátor má zdanlivý výkon $S_N = 100 \text{ kVA}$, prevod $6000 \text{ V}/400 \text{ V}$, spojenie Yy0, prúd naprázdno $I_0 = 0,77 \text{ A}$, účinník naprázdno $\cos\varphi_0 = 0,085$, činné odpory vinutí $R_1 = 4,2 \ \Omega$, $R_2 = 0,0155 \ \Omega$, rozptylové reaktancie $X_{\sigma 1} = 6,6 \ \Omega$, $X_{\sigma 2} = 0,0285 \ \Omega$. Vypočítajte straty vo vinutí ΔP_{kN} , v železe ΔP_{Fe} , napätie nakrátko u_k , trvalý prúd nakrátko a dynamický (nárazový) skratový prúd.

Riešenie:

S takýmto zadáním sa stretne vtedy, keď máme k dispozícii niektoré parametre náhradnej schémy a údaje z merania naprázdno a potrebujeme zistiť straty a napätie nakrátko, alebo prúdy nakrátko.

Menovité prúdy (pri výpočte sekundárneho menovitého prúdu zanedbávame úbytok napätia pri menovitom zaťažení):

$$I_{1Nf} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{100000}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 9,622 \text{ A}$$

$$I_{2Nf} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{20}} = \frac{100000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 144,337 \text{ A}$$

Menovitá impedancia

$$Z_N = \frac{U_{1Nf}}{I_{1Nf}} = \frac{6000/\sqrt{3}}{9,622} = 360 \ \Omega$$

Transformačný prevod

$$p = \frac{U_{1N}}{U_{20}} = \frac{6000}{400} = 15$$

Sekundárne hodnoty prepočítame na primár

$$R'_2 = R_2 p^2 = 0,0155 \cdot 15^2 = 3,4875 \ \Omega$$

$$X'_{\sigma 2} = X_{\sigma 2} p^2 = 0,0285 \cdot 15^2 = 6,4125 \ \Omega$$

Celkový činný odpor

$$R_k = R_1 + R'_2 = 4,2 + 3,4875 = 7,6875 \ \Omega$$

Celková rozptylová reaktancia

$$X_{\sigma k} = X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2} = 6,6 + 6,4125 = 13,0125 \ \Omega$$

Zložky napätia nakrátko (pomerné hodnoty odporov a reaktancií v percentách):

$$r_{\%} = \frac{R_k}{Z_N} 100 = \frac{7,6875}{360} 100 = 2,135 \%$$

$$x_{\%} = \frac{X_{\sigma k}}{Z_N} 100 = \frac{13,0125}{360} 100 = 3,614 \%$$

Napätie nakrátko

$$u_{k\%} = \sqrt{r_{\%}^2 + x_{\%}^2} = \sqrt{2,135^2 + 3,614^2} = 4,197 \%$$

Napätie nakrátko sme mohli vypočítať aj pomocou impedancie nakrátko:

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_{\sigma k}^2} = \sqrt{7,6875^2 + 13,0125^2} = 15,11 \Omega$$

$$u_{k\%} = z_{k\%} = \frac{Z_k}{Z_N} 100 = \frac{15,11}{360} 100 = 4,197 \%$$

resp. pomocou skutočného napätia nakrátko (podľa obr. 1.7a):

$$U_{1k} = Z_k I_{1Nf} = 15,11 \cdot 9,622 = 145,388 \text{ V}$$

$$u_{k\%} = \frac{U_{1k}}{U_{1N}} 100 = \frac{145,388}{6000/\sqrt{3}} 100 = 4,197 \%$$

Na výpočet napätia nakrátko je možné použiť ktorýkoľvek z uvedených postupov. Niekedy rozhodne to, čo budeme potrebovať v ďalšom výpočte. Napríklad, ak sa budú počítať úbytky napätí, tam sú potrebné zložky napätia nakrátko.

Straty nakrátko (vo vinutí) trojfázového transformátora pri menovitom prúde:

$$\Delta P_{kN} = 3R_k I_{1Nf}^2 = 3 \cdot 7,6875 \cdot 9,622^2 = 2135,192 \text{ W}$$

alebo iným spôsobom

$$r_{\%} = \frac{\Delta P_{kN}}{S_N} 100 \Rightarrow \Delta P_{kN} = \frac{r_{\%} S_N}{100} = \frac{2,135 \cdot 100000}{100} = 2135 \text{ W}$$

Straty v železe, čiže straty naprázdno

$$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} = 3U_{1Nf} I_{Fe} = \sqrt{3} U_{1N} I_{Fe} = \sqrt{3} U_{1N} I_0 \cos \varphi_0 = \sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 0,77 \cdot 0,085 = 680,176 \text{ W}$$

Opäť by sme mohli počítať prvky priečnej vetvy náhradnej schémy rovnakým postupom ako v príklade 1.8.

Trvalý prúd nakrátko na primárnej strane

$$I_{1k} = \frac{I_{1Nf}}{u_{k\%}} 100 = \frac{9,622}{4,197} 100 = 229,258 \text{ A}$$

a jeho najväčšia nárazová (dynamická) hodnota:

$$I_{1\text{kdyn}} = \sqrt{2} I_{1\text{k}} \left(1 + e^{-\frac{\pi r}{x}}\right) = \sqrt{2} \cdot 229,258 \left(1 + e^{-\frac{\pi \cdot 2,135}{3,614}}\right) = 324,219(1 + 0,1563) = 374,89 \text{ A}$$

Prúdy na sekundárnej strane sú viazané cez prevod:

$$I_{2\text{k}} = p I_{1\text{k}} = 15 \cdot 229,258 = 3438,87 \text{ A}$$

$$I_{2\text{kdyn}} = p I_{1\text{kdyn}} = 15 \cdot 374,89 = 5623,43 \text{ A}$$

alebo cez vzťah pre dynamickú hodnotu skratového prúdu :

$$I_{2\text{kdyn}} = \sqrt{2} I_{2\text{k}} \left(1 + e^{-\frac{\pi r}{x}}\right) = \sqrt{2} \cdot 3438,87 \left(1 + e^{-\frac{\pi \cdot 2,135}{3,614}}\right) = \sqrt{2} \cdot 3438,87(1 + 0,1563) = 5623,43 \text{ A}$$

Príklad 1.10

Trojfázový transformátor má výkon $S_N = 150 \text{ kVA}$, prevod $6000 \text{ V}/400 \text{ V}$, spojenie Yd , prúd naprázdno $i_0 = 2,1 \%$, straty naprázdno $\Delta P_0 = 430 \text{ W}$, menovité straty nakrátko $\Delta P_{\text{kN}} = 2450 \text{ W}$, napätie nakrátko $u_k = 4,2 \%$.

Vypočítajte

- prvky náhradnej schémy,
- ako sa zmenia prvky náhradnej schémy transformátora z bodu a), ak údaje zostanú rovnaké, ale zapojenie transformátora je Dy .

Riešenie:

Toto zadanie sa líši od predchádzajúceho príkladu tým, že zapojenie nie je rovnaké na primárnej a sekundárnej strane, ale sa strieda hviezda a trojuholník. Preto si treba dobre uvedomiť, kde sa táto skutočnosť v riešení príkladu prejaví. Ide najmä o rôzne hodnoty prevodov. Napätový prevod daný napätiami na svorkách je

$$p = \frac{U_{1N}}{U_{20}} = \frac{6000}{400} = 15$$

Táto hodnota je dôležitá pre používateľa, aby vedel, v akom pomere sa transformuje napätie z primárnych svoriek na sekundárne svorky. Pre prepočet prvkov náhradnej schémy je však dôležitý prevod počtu závitov p_N , čiže prevod fázových napätí, resp. fázových prúdov. Tento prevod bude pre zadanie a) aj b) odlišný.

a) Zapojenie Yd

Pri zapojení do hviezdy (Y) je na primárnom vinutí $U_{1f} = 6000/\sqrt{3} \text{ V}$. Pri zapojení do trojuholníka (d) na sekundárnom vinutí je $U_{2f} = U_2 = 400 \text{ V}$. Tento prevod označíme p_N a vypočítame ho takto:

$$p_N = \frac{N_1}{N_2} = p_{Uf} = \frac{U_{1f}}{U_{2f}} = p_{If} = \frac{I_{2fN}}{I_{1fN}} = \frac{6000/\sqrt{3}}{400} = 8,66$$

S týmto prevodom budeme prepočítavať odpory a rozptylové reaktancie.

Najprv vypočítame parametre pozdĺžnej vetvy. Menovitý primárny prúd je prúdom fázovým, lebo na primárnej strane je zapojenie do hviezdy, ale napätie je napätie združené. Preto:

$$I_{1Nf} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{150000}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 14,433 \text{ A}$$

Menovitá impedancia je

$$Z_N = \frac{U_{1Nf}}{I_{1Nf}} = \frac{6000/\sqrt{3}}{14,433} = 240 \Omega$$

Pomerný činný odpor vypočítame z menovitých strát nakrátko (vo vinutí) podobne ako v príklade 1.8.:

$$r_{\%} = \frac{\Delta P_{kN}}{S_N} 100 = \frac{2450}{150000} 100 = 1,63 \%$$

Celkový činný odpor

$$R_k = \frac{r_{\%} Z_N}{100} = \frac{1,63 \cdot 240}{100} = 3,912 \Omega$$

A jeho primárna a sekundárna časť, prepočítaná na primár je:

$$R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2} = 1,956 \Omega$$

Skutočný odpor transformátora vypočítame pomocou prevodu p_N :

$$R_2 = \frac{R_2'}{p_N^2} = \frac{1,965}{8,66^2} = 0,0262 \Omega$$

Teraz vypočítame rozptylovú reaktanciu na primárnej aj sekundárnej strane:

$$x_{\%} = \sqrt{u_{k\%}^2 - r_{\%}^2} = \sqrt{4,2^2 - 1,63^2} = 3,87 \%$$

$$X_{\sigma k} = \frac{x_{\%} Z_N}{100} = \frac{3,87 \cdot 240}{100} = 9,289 \Omega$$

$$X_{\sigma 1} = X_{\sigma 2}' = \frac{X_{\sigma k}}{2} = 4,644 \Omega$$

$$X_{\sigma 2} = \frac{X'_{\sigma 2}}{p_N^2} = \frac{4,644}{8,66^2} = 0,0619 \Omega$$

Menovitý fázový sekundárny prúd

$$I_{2Nf} = p_N I_{1Nf} = 8,66 \cdot 14,43 = 124,96 \text{ A}$$

a združený (linkový) prúd je

$$I_{2N} = \sqrt{3} I_{2Nf} = \sqrt{3} \cdot 124,96 = 216,43 \text{ A}$$

Ďalej vypočítame parametre priechnej vetvy náhradnej schémy. Účinník naprázdno vypočítame ako podiel strát naprázdno ΔP_0 a výkonu naprázdno S_0 , pričom

$$I_0 = i_0 \cdot I_{1N} = 0,021 \cdot 14,43 = 0,303 \text{ A}$$

$$S_0 = 3 U_{1f} I_0 = 3 \frac{6000}{\sqrt{3}} \cdot 0,303 = \sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 0,303 = 3148,86 \text{ VA}$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{\Delta P_0}{S_0} = \frac{430}{3148,86} = 0,136$$

Straty v železe reprezentuje odpor

$$R_{Fe} = \frac{U_{1f}}{I_{Fe}} = \frac{6000 / \sqrt{3}}{0,0413} = 80,56 \text{ k}\Omega$$

kde činná zložka prúdu naprázdno

$$I_{Fe} = I_0 \cos \varphi_0 = 0,303 \cdot 0,136 = 0,0413 \text{ A}.$$

Magnetizačný prúd

$$I_{\mu} = I_0 \sin \varphi_0 = I_0 \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0} = 0,303 \sqrt{1 - 0,136^2} = 0,303 \cdot 0,981 = 0,297 \text{ A}$$

Magnetizačná reaktancia

$$X_{\mu} = \frac{U_{1f}}{I_{\mu}} = \frac{6000 / \sqrt{3}}{0,297} = 11,663 \text{ k}\Omega$$

Vypočítajme trvalé hodnoty skratových prúdov. V primárnom vinutí, ktoré je zapojené do hviezdy, je len prúd fázový I_{1k} (nemusíme indexom „f“ zdôrazňovať, že je to prúd fázový), ale na sekundárnej strane, kde je vinutie zapojené do trojuholníka, treba rozlíšiť prúd fázový I_{2kf} a združený I_{2k} , ktorý by zaťažoval vývody transformátora

$$I_{1k} = \frac{I_{1N}}{u_k} = \frac{14,43}{4,2} \cdot 100 = 343,57 \text{ A}$$

$$I_{2kf} = p_N I_{1k} = 8,66 \cdot 343,57 = 2975,3 \text{ A}$$

$$I_{2k} = \sqrt{3} I_{2kf} = \sqrt{3} \cdot 2975,3 = 5153,3 \text{ A}$$

Vypočítali sme absolútne hodnoty prúdov nakrátko, ale cennejšie je vedieť, aký násobok menovitého prúdu je prúd nakrátko, čiže počítame pomerný prúd nakrátko:

$$i_{1k} = \frac{I_{1k}}{I_{1N}} = \frac{343,57}{14,43} = 23,81$$

$$i_{2kf} = \frac{I_{2kf}}{I_{2Nf}} = \frac{2975,3}{124,96} = 23,81$$

Ako vidíme, na primárnej aj sekundárnej strane je pomerný prúd nakrátko rovnaký.

Dynamické (nárazové) hodnoty týchto prúdov vypočítame takto (pozri (1.51a,b)):

$$I_{1k\text{dyn}} = \sqrt{2} I_{1k} (1 + e^{-\pi \frac{r}{x}}) = \sqrt{2} \cdot 343,57 (1 + e^{-\pi \frac{1,63}{3,87}}) = 615,26 \text{ A}$$

$$I_{2k\text{dynf}} = \sqrt{2} I_{2kf} (1 + e^{-\pi \frac{r}{x}}) = \sqrt{2} \cdot 2975,3 (1 + e^{-\pi \frac{1,63}{3,87}}) = 5328,14 \text{ A}$$

$$I_{2k\text{dyn}} = \sqrt{3} I_{2k\text{dynf}} = 9228,61 \text{ A}$$

b) Zapojenie Dy

Pri zapojení do trojuholníka (D) na primárnom vinutí je $U_{1f} = U_1 = 6000 \text{ V}$. Pri zapojení do hviezdy (y) na sekundárnom vinutí je $U_{2f} = 400/\sqrt{3} \text{ V}$. Tento prevod označíme p_N a vypočítame ho takto:

$$p_N = \frac{N_1}{N_2} = p_{Uf} = \frac{U_{1f}}{U_{2f}} = p_{If} = \frac{I_{2fN}}{I_{1fN}} = \frac{6000}{400/\sqrt{3}} = 25,98.$$

S týmto prevodom budeme prepočítavať odpory a rozptylové reaktancie. Pritom napäťový prevod transformátora bude stále rovnaký:

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{6000}{400} = 15.$$

Na primárnej strane budeme rozlišovať fázový prúd, ktorý bude pretekať vinutím, a združený prúd, ktorý tečie prípojnícami k svorkám transformátora. Fázový menovitý prúd je

$$I_{1Nf} = \frac{S_N}{3U_1} = \frac{150 \cdot 10^3}{3 \cdot 6000} = 8,33 \text{ A}$$

a združený prúd

$$I_{1N} = \sqrt{3}I_{1Nf} = \sqrt{3} \cdot 8,33 = 14,42 \text{ A}$$

Menovitý sekundárny fázový prúd je:

$$I_{2Nf} = p_N I_{1Nf} = 25,98 \cdot 8,33 = 216,41 \text{ A}.$$

Menovitá impedancia jednej fázy (impedanciu vždy počítame ako fázovú hodnotu, združená impedancia nemá zmysel) je:

$$Z_N = \frac{U_1}{I_{1Nf}} = \frac{6000}{8,33} = 720,33 \Omega.$$

Výpočet prvkov pozdĺžnej vetvy sa bude oproti a) líšiť práve hodnotou menovitej impedancie. Pri rovnakých stratách a menovitom výkone bude totiž činná zložka napätia nakrátko r rovnaká a pri rovnakom zadanom napätí nakrátko u_k bude aj jalová zložka x_σ rovnaká. Možno to interpretovať tak, že transformátor, ktorý by mal ten istý napäťový prevod, a teda rovnaké napätie na primárnej aj sekundárnej strane a mal by zapojenie Dy oproti Yd by musel mať iné odpory vinutí, iné rozptylové reaktancie aj ďalšie prvky náhradnej schémy.

Celkový činný odpor transformátora zapojeného Dy by bol

$$R_k = \frac{rZ_N}{100} = \frac{1,63 \cdot 720,3}{100} = 11,74 \Omega$$

a jeho rozdelením na polovicu dostaneme jeho primárnu a sekundárnu časť prepočítanú na primár:

$$R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2} = \frac{11,74}{2} = 5,87 \Omega$$

Skutočná hodnota odporu sekundárneho vinutia by bola:

$$R_2 = \frac{R_2'}{p_N^2} = \frac{5,87}{25,98^2} = 0,00869 \Omega$$

Podobne ako v prípade a) vypočítame rozptylovú reaktanciu:

$$X_{\sigma k} = \frac{x_{\%} Z_N}{100} = \frac{3,87 \cdot 720,3}{100} = 27,87 \Omega$$

$$X_{\sigma 1} = X_{\sigma 2}' = \frac{X_{\sigma k}}{2} = \frac{27,87}{2} = 13,938 \Omega$$

$$X_{\sigma 2} = \frac{X'_{\sigma 2}}{p_N^2} = \frac{13,93}{25,98^2} = 0,02065 \Omega$$

Pri výpočte prvkov priečnej vetvy je dôležité si uvedomiť, že náhradná schéma platí pre fázové hodnoty a pri zapojení do trojuholníka na primárnej strane meraním v stave naprázdno dostaneme združený prúd. Preto najprv treba vypočítať fázový prúd naprázdno a z neho počítať jeho zložky aj prvky priečnej vetvy. V našom prípade je prúd naprázdno daný percentuálnou hodnotou menovitého prúdu, preto treba určiť jeho skutočnú hodnotu z menovitej fázovej hodnoty prúdu. Ďalší postup je podľa odseku a):

$$I_{0f} = i_0 I_{1Nf} = 0,021 \cdot 8,33 = 0,1749 \text{ A}$$

$$S_0 = 3U_1 I_{0f} = 3 \cdot 6000 \cdot 0,1749 = 3148,2 \text{ VA}$$

Vidíme, že príkon naprázdno aj jeho účinník sú rovnaké

$$\cos \varphi_0 = \frac{\Delta P_0}{S_0} = \frac{430}{3148,2} = 0,136$$

$$I_{Fe} = I_{0f} \cos \varphi_0 = 0,1749 \cdot 0,136 = 0,0237 \text{ A}$$

$$R_{Fe} = \frac{U_1}{I_{Fe}} = \frac{6000}{0,0237} = 253,164 \text{ k}\Omega$$

$$I_{\mu} = I_{0f} \sin \varphi_0 = 0,1749 \cdot 0,99 = 0,1732 \text{ A}$$

$$X_{\mu} = \frac{U_1}{I_{\mu}} = \frac{6000}{0,1732} = 34,642 \text{ k}\Omega$$

Príklad 1.11

Vypočítajte sekundárny prúd trojfázového transformátora podľa príkladu 1.9, ak prístroje na primárnej strane ukazujú združené napätie $U = 6000 \text{ V}$, príkon $P = 21 \text{ kW}$ a vo všetkých fázach rovnaký prúd $I = 3 \text{ A}$.

Riešenie:

Zo zadania príkladu 1.9 budeme potrebovať napäťový prevod $p = 6000 / 400 = 15$, $I_0 = 0,77$ a $\cos \varphi_0 = 0,085$. Pri veľmi približnom výpočte môžeme predpokladať, že účinnosť transformátora $\eta = 100 \%$, t.j. $P_1 = P_2$. To znamená, že pri čisto činnom účinníku ($\cos \varphi = 1$) platí:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

a potom z definície napät'ového prevodu dostaneme vzťah pre prúdy

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

z ktorého možno približne vypočítať sekundárny prúd:

$$I_2 = p I_1 = 15 \cdot 3 = 45 \text{ A}$$

Tento výpočet je veľmi nepresný a predpoklad, že $\eta = 100\%$ je veľmi približný. V stave naprázdno neplatí vôbec, pretože prúd naprázdno sa pri tomto výpočte zanedbáva. Čím je záťaž väčšia, predpoklad je pravdivejší, pretože prúd naprázdno môžeme voči zaťažovaciemu prúdu zanedbať. Pri odľahčeniach, t. j. keď záťaž je menšia ako menovitá, nemôžeme použiť tento približný spôsob výpočtu a musíme brať do úvahy vzťah medzi fázormi prúdu v diagrame včítane prúdu naprázdno (obr. 1.5).

Potom prevod musíme počítať pomocou sekundárneho prúdu prepočítaného na primárnu stranu, ako to vyplýva z teórie rovnováhy magnetických napätí:

$$p = \frac{I_2}{I_2'}$$

čiže sekundárny prúd vypočítame takto:

$$I_2 = p I_2'$$

Pritom prúd I_2' určíme zo súčtu fázorov prúdu transformátora (obr. 1.5)

$$I_1 + I_2' = I_0 \rightarrow I_2' = I_0 - I_1$$

Výpočet urobíme symbolicko-komplexným počtom a napíšeme fázory prúdov v komplexnej rovine pomocou ich činných a imaginárnych zložiek.

Podľa obr. 1.5 platí:

$$I_0 = I_0 (\cos \varphi_0 - j \sin \varphi_0)$$

$$I_1 = I_1 (\cos \varphi_1 - j \sin \varphi_1)$$

$$\text{Ak } \cos \varphi_0 = 0,085$$

potom

$$\sin \varphi_0 = 0,996$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_1 I_1} = \frac{21000}{\sqrt{3} 6000 \cdot 3} = 0,673$$

$$\sin \varphi_1 = 0,793$$

a môžeme napísať výraz pre fázor sekundárneho prúdu prepočítaného na primárnu stranu v tvare komplexného čísla

$$\begin{aligned} I_2' &= I_0 - I_1 = 0,77(0,085 - j0,996) - 3(0,673 - j0,739) = \\ &= -1,955 + j1,457 = 2,43A \angle 143,56^\circ \end{aligned}$$

ktorého absolútna hodnota je 2,43 A a jeho poloha je daná osami $(-1, +j)$ $143,56^\circ$ posunutá od osi napätia, ktoré je v reálnej osi $(+1)$. Polohu tohto fázora môžeme skontrolovať na obr. 1.5, ak ho posunieme do začiatku sústavy.

Potom skutočný sekundárny prúd, ktorý by bolo možné merať ampérmetrom je

$$I_2 = pI_2' = 15 \cdot 2,43 = 36,45 \text{ A}$$

Túto hodnotu porovnajme s hodnotou 45 A, ktorú sme dostali približným výpočtom pri zanedbaní prúdu naprázdno. Vidíme, že rozdiel vo výsledkoch je značný, z čoho vyplýva, že pri odľahčení, keď zaťaženie je napr. len 30 %, ako v tomto príklade, musíme brať do úvahy vzťahy medzi prúdmi vrátane I_0 .

Príklad 1.12

Vypočítajte percentuálny a skutočný úbytok napätia a sekundárne napätie trojfázového transformátora, ak jeho menovitý výkon je $S_N = 250 \text{ kVA}$, prevod $22\,000 / 400 \text{ V}$, $Yy0$, straty nakrátko $\Delta P_k = 4450 \text{ W}$, napätie nakrátko $u_k = 4 \%$ a transformátor je zaťažený

- menovitým výkonom, pri účinníku záťaže $\cos \varphi_{zt} = 0,8$ ind.
- $2/3$ menovitého výkonu pri účinníku záťaže $\cos \varphi_{zt} = 0,8$ ind.

Riešenie:

Pri výpočte budeme používať vzťahy (1.61) až (1.67). Pretože je napätie nakrátko 4%, môžeme použiť vzťah (1.77), ak by bolo väčšie ako 4 %, použili by sme vzťah (1.79). Ak hodnoty r a x dosadíme v %, úbytok napätia dostaneme tiež v %. Najprv potrebujeme vypočítať percentuálne hodnoty činnej a reaktančnej zložky napätia nakrátko:

$$r_{\%} = \frac{\Delta P_k}{S_N} 100 = \frac{4450}{250000} 100 = 1,78 \%$$

$$x_{\%} = \sqrt{u_{k\%}^2 - r_{\%}^2} = \sqrt{4^2 - 1,78^2} = 3,58 \%$$

Výpočet a)

Pomerné zaťaženie je $\lambda=1$, vo vzťahu použijeme znamienko +, pretože ide o indukčnú záťaž a percentuálny úbytok napätia vypočítame takto:

$$\Delta u_{\%} = \lambda(r_{\%} \cos \varphi_{zt} + x_{\%} \sin \varphi_{zt}) = 1(1,78 \cdot 0,8 + 3,58 \cdot 0,6) = 3,572 \%$$

Skutočný úbytok napätia na sekundárnej strane je:

$$\Delta U_2 = \frac{\Delta u_{\%} U_{20}}{100} = \frac{3,572 \cdot 400}{100} = 14,288 \text{ V}$$

Potom sekundárne napätie pri menovitej záťaži je:

$$U_2 = U_{20} - \Delta U_2 = 400 - 14,288 = 385,712 \text{ V}$$

Výpočet b)

Pomerné zaťaženie $\lambda=2/3$, ostatné hodnoty a postup ostávajú rovnaké, takže dostaneme takéto výsledky:

$$\Delta u_{\%} = 2,38 \%$$

$$\Delta U_2 = 9,52 \text{ V}$$

$$U_2 = 390,48 \text{ V}$$

Z týchto hodnôt môžeme nakresliť vonkajšiu charakteristiku transformátora pre $\cos \varphi = 0,8$ ind., t. j. závislosť $U_2 = f(\lambda)$. Máme na to tri body a síce bod pre stav naprázdno ($\lambda = 0$, $U_2 = U_{20} = 400 \text{ V}$), pre $\lambda = 2/3$, ($U_2 = 390,48 \text{ V}$) a pre menovitú záťaž $\lambda = 1$, ($U_2 = 385,712 \text{ V}$).

Príklad 1.13

Trojfázový transformátor 630 kVA, 22 / 0,4 kV, $\Delta P_k = 11870 \text{ W}$, $u_k = 6 \%$ je navrhnutý tak, že dáva sekundárne napätie $U_{2N} = 400 \text{ V}$ pri menovitom zaťažení a účinníku $\cos \varphi_{zt} = 0,8$ ind. Aké bude jeho sekundárne napätie U_{20} pri úplnom odľahčení, t. j. v stave naprázdno? Predpokladajme $U_{1N} = 22 \text{ kV}$.

Riešenie:

Ak je výslovné dané, že v prevode je dané napätie pri menovitom zaťažení, treba to rešpektovať. Preto teraz je neznámou napätie naprázdno. Vzťah medzi sekundárnym napätím naprázdno U_{20} a pri zaťažení U_{2N} udáva výraz pre percentuálny úbytok napätia $\Delta u_{\%}$. Na jeho výpočet potrebujeme hodnoty percentuálnej činnej a reaktančnej zložky napätia nakrátko:

$$r_{\%} = \frac{\Delta P_k}{S_N} 100 = \frac{11870}{630000} 100 = 1,88 \%$$

$$x_{\%} = \sqrt{6^2 - 1,88^2} = 5,69 \%$$

Pretože je dané napätie pri menovitom zaťažení, treba vypočítať, aký úbytok napätia sa v tomto stave vytvoril. Keďže napätie nakrátko je väčšie ako 4 %, na výpočet percentuálneho úbytku napätia použijeme vzťah (1.79):

$$\begin{aligned}\Delta u_{\%} &= \lambda(r_{\%} \cos \varphi_{zt} \pm x_{\%} \sin \varphi_{zt}) + \frac{1}{200}(\lambda)^2(x_{\%} \cos \varphi_{zt} \mp r_{\%} \sin \varphi_{zt})^2 = \\ &= 1(1,88 \cdot 0,8 + 5,69 \cdot 0,6) + 0,005 \cdot 1^2(5,69 \cdot 0,8 - 1,88 \cdot 0,6) = 4,918 + 0,005 \cdot 3,424 = 4,935 \%\end{aligned}$$

Ďalej vypočítame napätie naprázdno, ktoré je v tomto príklade neznámou:

$$\begin{aligned}\Delta U_{2N} &= \frac{\Delta u_{\%} U_{20}}{100} = U_{20} - U_{2N} \\ U_{20} - \frac{\Delta u_{\%} U_{20}}{100} &= U_{20} \left(1 - \frac{\Delta u_{\%}}{100}\right) = U_{2N} \\ U_{20} &= \frac{U_{2N}}{1 - \frac{\Delta u_{\%}}{100}} = \frac{400}{1 - 0,04935} = 420,76 \text{ V}\end{aligned}$$

Príklad 1.14

- Akým spúšťacím prúdom I_k možno zaťažiť transformátor z príkladu 1.12, aby pri spúšťaní veľkého asynchrónneho motora úbytok napätia $\Delta u_{\%}$ nebol väčší ako 12 %? Pri spúšťaní je účinník nakrátko $\cos \varphi_k = 0,4$ ind.
- Aké bude sekundárne napätie transformátora z príkladu 1.12, ak ho zaťažime prekompenzovaným synchrónnym motorom, ktorý predstavuje 3/4 zaťaženie s účinníkom $\cos \varphi_{zt} = 0,8$ kapacitného charakteru?

Riešenie:

- Zo vzťahu pre percentuálny úbytok napätia $\Delta u_{\%}$ potrebujeme vypočítať zaťažovací prúd, ktorý je v tomto prípade prúdom motora nakrátko I_k , pričom úbytok napätia nemá prekročiť 12 %.

$$\Delta u_{\%} = \lambda(r_{\%} \cos \varphi_{zt} \pm x_{\%} \sin \varphi_{zt}) = \frac{I_{k1}}{I_{N1}}(r_{\%} \cos \varphi_k \pm x_{\%} \sin \varphi_k) = 12 \%$$

Menovitý prúd daného trojfázového transformátora je

$$I_{N1} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{N1}} = \frac{250000}{\sqrt{3} \cdot 22000} = 6,56 \text{ A}$$

Pre $\cos\varphi_k = 0,4$ je $\sin\varphi_k = 0,916$. Z príkladu 1.12 máme hodnoty $r_\% = 1,78 \%$ a $x_\% = 3,58 \%$. Vypočítame spúšťací záberový prúd motora, ktorý pretečie primárnym vinutím transformátora:

$$I_{k1} = \frac{\Delta u_\% I_{1N}}{r_\% \cos\varphi_k + x_\% \sin\varphi_k} = \frac{12 \cdot 6,56}{1,78 \cdot 0,4 + 3,58 \cdot 0,916} = 19,72 \text{ A}$$

a sekundárnym vinutím

$$I_{k2} = pI_{k1} = 55 \cdot 19,72 = 1084,6 \text{ A}$$

V tomto prípade stačil výpočet cez prevod, pretože prúd naprázdno pri preťažení možno zanedbať.

- b) Treba si uvedomiť, že záťaž je kapacitného charakteru, a preto vo vzťahu pre Δu je znamienko mínus:

$$\Delta u_\% = \frac{I_1}{I_{N1}} (r_\% \cos\varphi_{z1} - x_\% \sin\varphi_{z1}) = \frac{3}{4} (1,78 \cdot 0,8 - 3,58 \cdot 0,6) = -0,543 \%$$

Záporný úbytok znamená vzrast napätia pri zaťažení. Zo vzťahu pre úbytok napätia (1.62)

$$\Delta u_\% = \frac{\Delta U}{U_{20}} 100 = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} 100 [\%]$$

vypočítame aktuálnu hodnotu sekundárneho napätia U_2 :

$$U_2 = \frac{100 - \Delta u_\%}{100} U_{20} = \frac{100 - (-0,543)}{100} 400 = 402,172 \text{ V}$$

ktorá je vyššia ako hodnota napätia naprázdno.

Príklad 1.15

Trojfázový transformátor má zdanlivý výkon 80 kVA, prevod 10 kV/0,4 kV, spojenie Yy0, straty naprázdno 500 W, straty nakrátko 1850 W, napätie nakrátko $u_{k\%} = 4 \%$. Pri zaťažení menovitým prúdom je napätie na sekundárnych svorkách 386 V. Vypočítajte účinník záťaže, pri ktorom vznikne uvedený úbytok napätia.

Riešenie:

Menovitý prúd je

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_1} = \frac{80000}{\sqrt{3} \cdot 10000} = 4,62 \text{ A}$$

Pretože je dané napätie naprázdno $U_{20} = 400$ V a pri menovitom zaťažení je $U_2 = 386$ V, je výhodné použiť vzťah (1.76) pre úbytok napätia Δu , v ktorom vystupuje aj účinník záťaže $\cos\varphi_{zt}$.

Najprv vypočítame zložky napätia nakrátko v [%]:

$$r_{\%} = \frac{\Delta P_k}{S_N} 100 = \frac{1850}{80000} 100 = 2,31\%$$

$$x_{\%} = \sqrt{u_{k\%}^2 - r_{\%}^2} = \sqrt{4,3^2 - 2,31^2} = 3,26\%$$

Percentuálny úbytok napätia

$$\Delta u_{\%} = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} 100 = \frac{400 - 386}{400} 100 = 3,5\%$$

Pri zaťažení menovitým prúdom platí

$$\Delta u_{\%} = 1 \left(r_{\%} \cos \varphi_{zt} + x_{\%} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{zt}} \right)$$

kde sme dosadili $\sin \varphi_{zt} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{zt}}$

pretože neznámou je účinník $\cos \varphi_{zt}$. Po dosadení hodnôt dostaneme kvadratickú rovnicu:

$$3,5 = 2,31 \cos \varphi_{zt} + 3,26 \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{zt}}$$

Po úprave

$$(3,5 - 2,31 \cos \varphi_{zt})^2 = \left(3,26 \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{zt}} \right)^2$$

$$15,963 \cos^2 \varphi_{zt} - 16,17 \cos \varphi_{zt} - 1,623 = 0$$

Riešením tejto kvadratickej rovnice dostaneme dva korene

$$\cos \varphi_{zt1} = 0,9$$

$$\cos \varphi_{zt2} = 0,113$$

Úlohe vyhovuje riešenie s účinníkom $\cos\varphi_{zt1} = 0,9$. Druhý koreň rovnice, účinník $\cos\varphi_{zt2}=0,113$ zodpovedá zaťaženiu transformátora, ktoré je blízke stavu naprázdno, čo nie je náš prípad.

Príklad 1.16

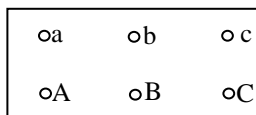
Vypočítajte počet závitov trojfázového transformátora 6000/400 V, $f = 50$ Hz, pri spojení a) Yy0, b) Dyl, c) Yzll. Hrubý prierez jadra $S_j = 96$ cm², koeficient plnenia $k = 92$ %, amplitúda magnetickej indukcie $B_{\max} = 1,36$ T. Nakreslite schému všetkých troch

zapojení a príslušné fázorové diagramy. Pri výpočte zanedbajte úbytky napätí na činných odporoch a rozptylových reaktanciách.

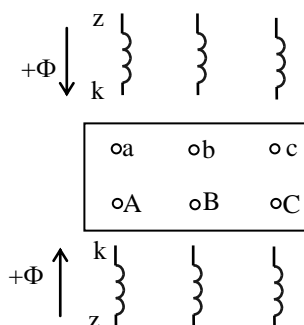
Riešenie:

Kreslenie fázorových diagramov 3-fázových transformátorov pri určovaní hodinových uhlov.

1. Svorkovnica

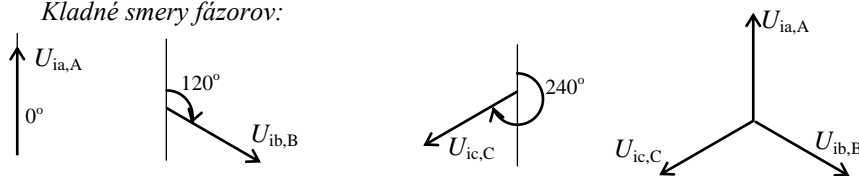


2. Vinutia a svorkovnica



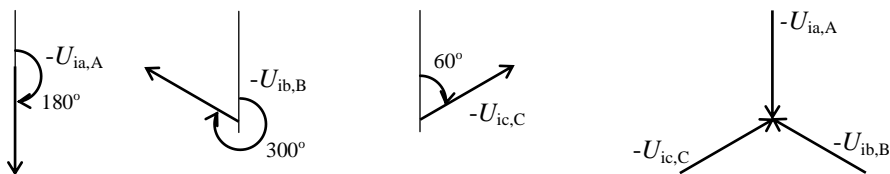
3. Zvolené kladné smery magnetických tokov (smerom k svorkovnici). V pravotočivých cievkach (a za také všetky považujeme) je smer magnetického toku súhlasný so smerom indukovaného napätia (pozri polarita vinutia).
4. Označíme „z“ začiatok a „k“ koniec vinutia – koniec vyvedieme na svorkovnicu.
5. Zvolíme kladné smery fázorov indukovaného napätia jednotlivých fáz a tie budeme dodržiavať pri kreslení fázorových diagramov.

Kladné smery fázorov:



Ak je pohyb po vinutí (po vlnovke) proti kladnému $+\Phi$, fázory napätia kreslíme so zápornou polaritou:

Záporné smery fázorov:



6. Nakreslíme dané zapojenie (Y,D,y,d,z).
7. Pri pohybe od uzla k svorke skúmame, či sa pohybujeme v kladnom smere, t. j. v súlade so zvolenou šípkou $+\Phi \Rightarrow$ aj fázor indukovaného napätia danej fázy je kladný, podľa bodu 5).
8. Kreslíme fázorový diagram, šípka fázora predstavuje koniec vinutia, vyvedený na svorkovnicu.
9. Po nakreslení fázorového diagramu na primárnej aj na sekundárnej strane hľadáme uhol fázového posunu medzi primárnym fázorom a sekundárnym fázorom fázového napätia tej istej fázy, v smere točivosti sústavy, t. j. v tomto prípade (zvolené smery v bode 5) v smere hodinových ručičiek.
10. Pri kombinácii Yd alebo Dy kreslíme v trojuholníku pomocný lúč fázového napätia, voči ktorému hľadáme posun s fázovým napätím iného vinutia. Ak je zapojenie Dd, kreslíme pomocný lúč fázového napätia pre primárne aj sekundárne vinutie – pozri príklady.

Pokyn, aby sme zanedbali úbytky napätí znamená, že svorkové napätie môžeme stotožniť s indukovaným napätím. Príslušný počet závitov N vypočítame zo vzťahu pre indukované napätie (pozri vzťah (1.11) a príklad 1.1.):

$$U_i = \sqrt{2}\pi f \Phi_{\max} N$$

resp. vypočítame najprv indukované napätie na jeden závit

$$U_{iz} = \sqrt{2}\pi f \Phi_{\max} = \sqrt{2}\pi f B_{\max} S_{Fe}$$

Čistý prierez železa S_{Fe} je 92 % hrubého prierezu jadra S_j , t. j. 8 % plochy jadra tvorí izolačný lak, čo je vyjadrené koeficientom plnenia

$$k = \frac{S_{Fe}}{S_j}$$

Potom

$$S_{Fe} = k S_j = 0,92 \cdot 96 \cdot 10^{-4} = 88,32 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$U_{iz} = \sqrt{2}\pi \cdot 50 \cdot 1,36 \cdot 88,32 \cdot 10^{-4} = 2,67 \text{ V}$$

a) Určenie počtu závitov pre spojenie Yy0

Schéma zapojenia vinutí a fázorový diagram je na obr. 1.17-1a). Prevod 6000/400 V je daný pomerom združených napätí, t. j. napätí meranými medzi svorkami transformátora. Na primárnej strane pri tomto zapojení je to združené napätie, na sekundárnej strane tiež. Pre určenie počtu závitov potrebných na indukovanie príslušného napätia potrebujeme fázové hodnoty napätí, t. j. napätí indukovaných vo vinutí na počte závitov N .

Musíme preto navrhnuť taký počet závitov N_1 , na ktorých sa indukuje $U_1 = 6000/\sqrt{3}$ V a taký počet závitov N_2 , na ktorých sa indukuje $U_2 = 400/\sqrt{3}$ V. Podľa pravidiel návrhu vinutia uvedených v príklade 1.1, začíname návrhom počtu závitov nižšieho napätia (výsledok zaokrúhľujeme na párny počet závitov, pretože predpokladáme viacvrstvé vinutie):

$$N_2 = \frac{U_{i2}}{U_{iz}} = \frac{400/\sqrt{3}}{2,67} = 86,49 \cong 88 \text{ závitov}$$

Na primárnej strane určíme počet závitov tak, aby sme dodržali napäťový prevod. Pri zapojení Yy je napäťový prevod daný pomerom svorkových napätí

$$p = \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{6000}{400} = 15$$

zhodný s pomerom fázových napätí, t. j. s pomerom počtu závitov

$$p_N = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{1f}}{U_{2f}} = \frac{6000/\sqrt{3}}{400/\sqrt{3}} = 15$$

Preto počet závitov na primárnej strane môžeme určiť na základe N_2 a prevodu:

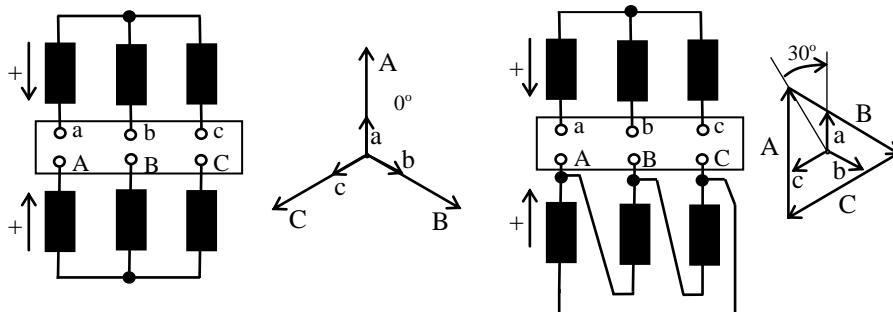
$$N_1 = pN_2 = 15 \cdot 88 = 1320 \text{ závitov}$$

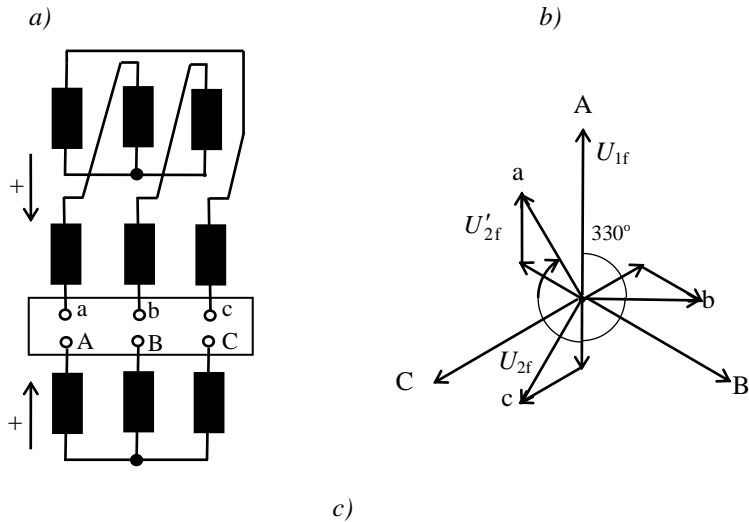
alebo pomocou napätia na závit, ale tak, aby sme dodržali napäťový prevod.

b) Určenie počtu závitov pre spojenie Dy1

Schéma zapojenia vinutí a fázorový diagram je na obr. 1.17-1b).

Návrh počtu závitov začíname od sekundárnej strany, kde je zapojenie do hviezdy, to znamená, že 400 V je napätie združené (medzi svorkami), ale na vinutí fázy (medzi uzlom a svorkou) je napätie fázové $400/\sqrt{3}$. Na toto napätie teda navrhujeme počet závitov sekundárnej strany N_2 . Je to ten istý prípad ako zapojenie a): $N_2 = 88$ závitov.





Obr. 1.17-1 Zapojenie vinutí a) $Yy0$, b) $Dy1$, c) $Yz11$ a príslušné fázorové diagramy trojfázových transformátorov

Na primárnej strane je zapojenie do trojuholníka, čiže 6000 V bude na svorkách aj na vinutí, a teda na počte závitov N_1 sa má indukovať celých 6000 V. Na výpočet N_1 použijeme prevod počtu závitov, ktorý je odlišný od pomeru svorkových napätí:

$$p_N = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{if1}}{U_{if2}} = \frac{6000}{400/\sqrt{3}} = 25,98$$

$$N_1 = p_N N_2 = 25,98 \cdot 88 = 2286,24 \cong 2286 \text{ závitov}$$

resp., aby sme sa vyhli prekročeniu maximálnej hodnoty magnetickej indukcie $B_{\max}=1,36$ T, zaokrúhlime výsledok na najbližšie vyššie párne číslo 2288 závitov.

c) Určenie počtu závitov pre spojenie $Yz11$

Schéma zapojenia a fázorový diagram je na obr. 1.17-1c). Na sekundárnej strane je zapojenie do lomenej hviezdy. Medzi svorkami je napätie združené, t. j. 400 V. Napätie fázové $U_{f2} = 400/\sqrt{3}$ je však tvorené súčtom fázorov U'_{2f} (pozri obr. 1.17-1c), fázovo posunutých o 120° . Aby sa indukovalo napätie U'_{2f} , potrebujeme navinúť N'_2 závitov:

$$N'_2 = \frac{U'_{f2}}{U_{iz}} = \frac{U_{f2}/\sqrt{3}}{U_{iz}} = \frac{400/\sqrt{3}}{\sqrt{3} \cdot 2,67} = 49,93 \cong 50 \text{ závitov}$$

Sekundárne vinutie jednej fázy bude teda tvorené dvoma cievkami po 50 závitoch, každá na inom stĺpe. Celkový počet závitov na sekundárnej strane $N_2 = 100$.

Napätie jednej fázy primárneho vinutia pri spojení do hviezdy je $U_{f1} = 6000/\sqrt{3}$ V. Na toto napätie navrhujeme primárny počet závitov N_1 . Bud' ho určíme na základe fázového napätia a napätia na závit

$$N_1 = \frac{U_{f1}}{U_{iz}} = \frac{6000/\sqrt{3}}{2,67} = 1297,47 \cong 1298 \text{ závitov}$$

alebo pomocou prevodu počtu závitov

$$p_N = \frac{N_1}{N'_2} = \frac{U_{f1}}{U'_{f2}} = \frac{6000/\sqrt{3}}{400/\sqrt{3}/\sqrt{3}} = 25,98 .$$

Potom

$$N_1 = p_N N'_2 = 25,98 \cdot 50 = 1299 \cong 1300 \text{ závitov}$$

lebo sme už rešpektovali zaokrúhlenie sekundárneho počtu závitov na párny počet.

Ako vidíme z uvedených príkladov, prevod svorkových napätí p a prevod počtu závitov p_N v prípade trojfázových transformátorov nie je vždy totožný a závisí od konkrétneho zapojenia vinutí. Ak je zapojenie na primárnej a sekundárnej strane rovnaké, napr. Yy, alebo Dd, tak $p=p_N$. Ale ak je zapojenie kombinované, napr. Yd, Dy, Yz, Dz, tak sa tieto prevody nerovniają a je dôležité si zapamätať, že počty závitov sa určujú na základe fázových napätí, t. j. na základe prevodu počtu závitov.

Príklad 1.17

Trojfázový transformátor 150 kVA, 6600/440 V, v zapojení Dy má tieto hodnoty z merania naprázdno a nakrátko:

Meranie naprázdno (z nízkonapäťovej strany): 1900 W; 440 V; 16,5 A

Meranie nakrátko (z vysokonapäťovej strany): 2700 W; 315 V; 12,5 A

Vypočítajte:

- Menovitý prúd na primárnej a sekundárnej strane.
- Parametre náhradnej schémy jednej fázy, prepočítané na primárnu stranu
- Straty v železe transformátora.
- Napätie nakrátko transformátora a straty nakrátko pri menovitom prúde.
- Sekundárne svorkové napätie, keď pracuje pri A. menovitom prúde a pri účinníku 0,8 ind., B. polovici menovitého prúdu pri účinníku 0,8 ind., C. menovitom prúde a účinníku 0,8 kap.
- Účinnosť vo všetkých troch prípadoch zaťaženia.

Riešenie:

- Transformátor je na primárnej strane zapojený do trojuholníka, preto treba počítať fázový, aj združený prúd. Menovitý fázový prúd na primárnej strane je:

$$I_{1Nf} = \frac{S_N}{3U_1} = \frac{150000}{3 \cdot 6600} = 7,575 \text{ A}$$

Združený prúd na primárnej strane je $\sqrt{3}$ -krát väčší:

$$I_{1N} = \sqrt{3} \cdot 7,575 = 13,1 \text{ A}$$

Všimnime si, že meranie nakrátko z vysokonapäťovej strany nie je vykonané pri menovitom prúde, čo zahrnieme do výpočtu v bode d).

- b) Výpočet parametrov náhradnej schémy začneme priečnou vetvou a údajmi merania naprázdno. Zo štítkových údajov a údajov pri meraní vidno, že meranie bolo vykonané pri menovitom napätí 440 V, preto z tohto hľadiska žiadny prepočet robiť netreba. Meranie naprázdno zo sekundárnej, nízkonapäťovej strany dáva prúd naprázdno 16,5 A. Najprv ho prepočítame na primárnu stranu, čiže zistíme, aký by bol prúd naprázdno, keby bol transformátor napájaný na vysokonapäťovej strane a nízkonapäťová strana by bola rozpojená:

$$I_{0f} = 16,5 \frac{440 / \sqrt{3}}{6600} = 0,635 \text{ A}$$

Účinník naprázdno je stále ten istý, bez ohľadu na to, na ktorej strane výpočet robíme. Výpočet urobíme najprv na sekundárnej strane:

$$\cos \varphi_0 = \frac{1900}{\sqrt{3} \cdot 440 \cdot 16,5} = 0,151 \rightarrow \sin \varphi_0 = 0,9985,$$

ale rovnaká hodnota musí vyjsť aj z primárnych hodnôt (straty v železe transformátora sú rovnaké bez ohľadu na to, z ktorej strany sa merajú)

$$\cos \varphi_0 = \frac{1900}{3 \cdot 6600 \cdot 0,635} = 0,151.$$

Prvky priečnej vetvy náhradnej schémy počítame tak, ako v predchádzajúcich príkladoch:

$$X_{\mu} = \frac{U_1}{I_{\mu}} = \frac{U_1}{I_{0f} \sin \varphi_0} = \frac{6600}{0,635 \cdot 0,9985} = 10,4 \text{ k}\Omega$$

$$R_{Fe} = \frac{U_1}{I_{Fe}} = \frac{U_1}{I_{0f} \cos \varphi_0} = \frac{6600}{0,635 \cdot 0,151} = 68,8 \text{ k}\Omega$$

Z merania nakrátko určíme prvky pozdĺžnej vetvy náhradnej schémy. Ako vidíme z vypočítaného menovitého prúdu, meranie sa neuskutočnilo pri menovitom prúde. Účinník nakrátko a impedancia nakrátko sú však rovnaké, nech ich počítame pri akomkoľvek prúde, len k nemu musíme priradiť správne napätie, pri ktorom sa daný prúd nameral.

Účinník nakrátko (prúd 12,5 A je združený, lebo primárne vinutie je zapojené do trojuholníka)

$$\cos \varphi_k = \frac{\Delta P_{\text{kmer}}}{\sqrt{3} U_{\text{kmer}} I_{\text{kmer}}} = \frac{2700}{\sqrt{3} \cdot 315 \cdot 12,5} = 0,396 \rightarrow \sin \varphi_k = 0,918$$

Indexom „mer“ sme označili merané hodnoty strát, napätia a prúdu.

Impedancia nakrátko

$$\begin{aligned} Z_k &= \frac{U_{\text{kmer}}}{I_{\text{kmer}}} (\cos \varphi_k + j \sin \varphi_k) = \frac{315}{12,5 / \sqrt{3}} (0,396 + j0,918) = \\ &= (17,28 + j40,06) \Omega = 43,62 \angle 66,66^\circ \Omega \end{aligned}$$

Reálna časť Z_k je celkový činný odpor $R_k = 17,28 \Omega$, imaginárna časť celková rozptylová reaktancia $X_{\sigma k} = 40,06 \Omega$. Tieto hodnoty rozdelíme rovnakým dielom na primárnu a sekundárnu stranu:

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_k}{2} = \frac{17,28}{2} = 8,64 \Omega$$

$$X_{\sigma 1} = X'_{\sigma 2} = \frac{X_{\sigma k}}{2} = \frac{40,06}{2} = 20,03 \Omega$$

Výpočet možno urobiť aj na základe absolútnej hodnoty impedancie a účinníka nakrátko:

$$Z_k = \frac{U_{\text{kmer}}}{I_{\text{kmer}}} = \frac{315}{12,5 / \sqrt{3}} = 43,647 \Omega$$

$$R_k = Z_k \cos \varphi_k = 43,647 \cdot 0,396 = 17,28 \Omega$$

$$X_{\sigma k} = Z_k \sin \varphi_k = 43,647 \cdot 0,918 = 40,06 \Omega$$

Skutočný činný odpor, resp. rozptylovú reaktanciu sekundárnej strany určíme pomocou prevodu fázových napätí, resp. prúdov

$$p_N = \frac{6600}{440 / \sqrt{3}} = 25,95$$

Potom

$$R_2 = \frac{R'_2}{p^2} = \frac{8,64}{25,95^2} = 0,0128 \Omega$$

$$X_{\sigma 2} = \frac{X'_{\sigma 2}}{p^2} = \frac{20,03}{25,95^2} = 0,0297 \Omega$$

- c) Straty v železe transformátora dostaneme pomocou vypočítaného prvku náhradnej schémy R_{Fe} a jeho prúdu I_{Fe} :

$$\Delta P_{Fe} = 3R_{Fe}I_{Fe}^2 = 3 \cdot 68,8 \cdot 10^3 \cdot (0,635 \cdot 0,151)^2 = 1897,43 \text{ W}$$

Toto je vlastne skúška správnosti, lebo údaj o stratách naprázdno (1900 W) sme získali z wattmetra pri meraní naprázdno a na jeho základe sme počítali účinník naprázdno, pomocou ktorého sme dostali zložku prúdu reprezentujúcu straty v železe.

- d) Napätie nakrátko vypočítame pomocou percentuálnych hodnôt činného odporu a rozptylovej reaktancie, na výpočet ktorých potrebujeme menovitú impedanciu:

$$Z_N = \frac{U_{INf}}{I_{INf}} = \frac{6600}{7,575} = 871,287 \text{ } \Omega$$

$$r_{\%} = \frac{R_k}{Z_N} 100 = \frac{17,28}{871,287} 100 = 1,98 \%$$

$$x_{\sigma\%} = \frac{X_{\sigma k}}{Z_N} 100 = \frac{40,06}{871,287} 100 = 4,59 \%$$

$$u_{k\%} = \sqrt{r_{\%}^2 + x_{\sigma\%}^2} = \sqrt{1,98^2 + 4,59^2} = 5 \%$$

Teraz určíme menovité straty nakrátko (straty nakrátko pri menovitom prúde):

$$\Delta P_{kN} = 3R_k I_{INf}^2$$

$$\Delta P_k = 3R_k I_{If}^2$$

$$\Delta P_{kN} = \Delta P_k \frac{I_{INf}^2}{I_{If}^2} = 2700 \frac{7,575^2}{(12,5/\sqrt{3})^2} = 2974,6 \text{ W}$$

- e) Stav pri zaťažení menovitým prúdom a polovicou menovitého prúdu pre rôzne hodnoty účinníka, t. j. A:

Výpočet úbytku napätia urobíme podľa vzťahu (1.79) a účinnosti podľa (1.86).

Získané výsledky usporiadame do tabuľky.

Všimnite si, že kapacitný charakter záťaže a získané zvýšené sekundárne napätie nemá na účinnosť vplyv. Je to preto, že účinnosť sme počítali podľa vzťahu (1.86), v ktorom nevystupuje napätie. Ak by sme boli dôslední, tak treba vypočítať výstupný výkon pri tomto zvýšenom napätí U_2 .

	A.	B.	C.	
I_{1f}	7,575	3,787	7,575	[A]
λ	1	0,5	1	[-]
$\cos \varphi$	0,8 ind.	0,8 ind.	0,8 kap.	[-]
$\Delta u_{\%}$	4,37	2,176	-1,052	[%]
ΔU_{2f}	11,13	5,53	-2,56	[V]
Svorkové fázové U_{2f}	242,9	248,5	256,6	[V]
Svorkové združené U_2	420,7	430,4	444,6	[V]
I_2	196,8	98,4	196,8	[A]
$\Delta P_k = \lambda \Delta P_{kN}$	2974,6	1487,3	2974,6	[W]
ΔP_0	1900	1900	1900	[W]
η	96	95,7	96	[%]

Takže ak by sme počítali výkon na sekundárnej strane, dostaneme

$$P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 444,6 \cdot 196,8 \cdot 0,8 = 121239,7 \text{ W}$$

a potom účinnosť bude

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_0 + \Delta P_{kN}} = \frac{121239,7}{121239,7 + 1900 + 2974,6} = 96,13\%$$

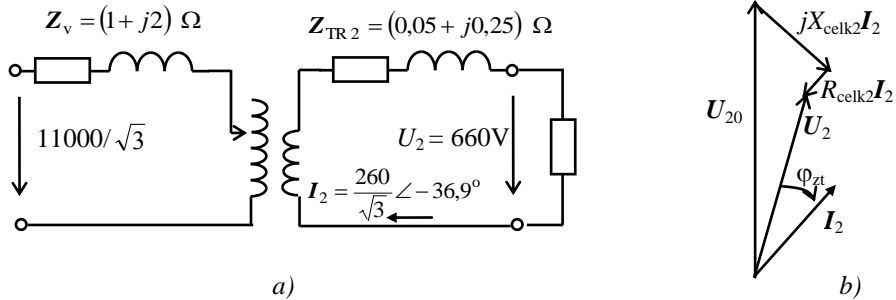
Takže teraz vidíme mierne zvýšenie účinnosti pri kapacitnom charaktere záťaže.

Príklad 1.18

Trojfázový transformátor 11 000 / 660 V v zapojení Yd je pripojený na koniec vedenia VN, na začiatku ktorého sa udržiava 11 kV. Z nízkonapäťovej strany je celkový činný odpor transformátora 0,05 Ω a celková rozptylová reaktancia $j0,25 \Omega$. Impedancia jednej fázy vedenia je $(1 + j2) \Omega$. Je potrebné, aby svorkové napätie na sekundárnej strane bolo 660 V, pri záťaži 260 A (združený prúd) pri $\cos \varphi_{zt} = 0,8$ ind. Vypočítajte v percentách primárnych závitov odbočku na primárnej strane, ktorá je potrebná na splnenie spomínanej požiadavky. Zanedbajte priečnu vetvu náhradnej schémy a zmenu impedancie transformátora vplyvom zmeny závitového prevodu.

Riešenie:

Na obr. 1.18 je náhradná schéma transformátora a vedenia s naznačenou odbočkou na primárnej strane.



Obr. 1.18 a) Náhradná schéma k príkladu 1.18 b) Fázorový diagram k úbytku napätia

Najprv prepočítame impedanciu vedenia Z_v na sekundárnu stranu transformátora (prepočet na sekundárnu stranu označíme indexom „2“):

$$Z_{v2} = \frac{Z_v}{p_N^2}$$

Pritom prevod fázových napätí je

$$p_N = \frac{11000/\sqrt{3}}{660} = 9,622.$$

Potom impedancia vedenia prepočítaná na sekundárnu stranu je:

$$Z_{v2} = (1 + j2) \left(\frac{660}{11000/\sqrt{3}} \right)^2 = 0,0108 + j0,0216 \, \Omega$$

Celková impedancia zo strany sekundárneho vinutia je:

$$Z_{\text{celk}2} = Z_{v2} + Z_{\text{TR}2} = (0,0108 + j0,0216) + (0,05 + j0,25) = (0,0608 + j0,2716) \, \Omega$$

Úbytok napätia na jednej fáze na sekundárnej strane:

$$\begin{aligned} \Delta U_2 &= I_2 (R_{\text{celk}2} \cos \varphi_{zt} + X_{\text{celk}2} \sin \varphi_{zt}) = \frac{260}{\sqrt{3}} (0,0608 \cdot 0,8 + 0,2716 \cdot 0,6) = \\ &= 7,3 + 24,46 = 31,76 \, \text{V} \end{aligned}$$

To znamená, že napätie naprázdno na sekundárnej strane musí byť

$$U_{20} = 660 + 31,76 = 691,76 \, \text{V}$$

a závitový prevod musí byť

$$\frac{11000/\sqrt{3}}{660 + 31,76} = 9,18$$

Namiesto

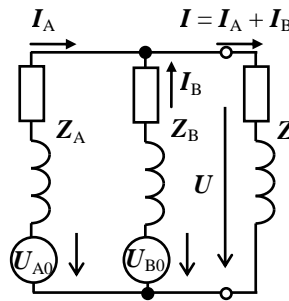
$$\frac{11000/\sqrt{3}}{660} = 9,623$$

Teda odbočka musí byť na

$$\frac{9,18}{9,623}100 = 95,4\% N_1.$$

Príklad 1.19

Dva jednofázové transformátory pracujú paralelne, aby napájali záťaž $Z = (24 + j10) \Omega$. Transformátor A má sekundárne napätie naprázdno $U_{A20} = 440 \text{ V}$ a vnútornú impedanciu prepočítanú na sekundárnu stranu $Z_{A2} = (1 + j3) \Omega$. Údaje pre transformátor B sú: $U_{B20} = 450 \text{ V}$; $Z_{B2} = (1 + j4) \Omega$. Vypočítajte svorkové napätie U , prúd a účinník každého transformátora.



Obr. 1.19 Náhradná schéma k príkladu 1.19

Riešenie:

Podľa náhradnej schémy na obr. 1.9 môžeme písať tieto rovnice

$$U_{A0} - Z_A I_A = U = (I_A + I_B)Z$$

$$U_{B0} - Z_B I_B = U = (I_A + I_B)Z$$

Z týchto rovníc môžeme písať pre fázor prúdu transformátora A:

$$I_A = \frac{U_{A0}Z_B + (U_{A0} - U_{B0})Z}{Z(Z_A + Z_B) + Z_A Z_B}$$

Výraz pre prúd I_B dostaneme tak, že vo výraze pre I_A vzájomne zameníme indexy A a B.

Najvýhodnejšie je, ak fázory napätia položíme do reálnej osi. Potom

$$U_{A0} = 440 + j0 \text{ V}$$

$$U_{B0} = 450 + j0 \text{ V}$$

Dosadením do výrazov pre I_A , I_B a výpočtom dostaneme

$$I_A = \frac{440(1 + j4) + (-10)(24 + j10)}{(24 + j10)(2 + j7) + (1 + j3)(1 + j4)} = 8,1 - j2,4 = 8,45 \angle -16,5^\circ \text{ A}$$

$$I_B = \frac{450(1 + j3) + 10(24 + j10)}{197,8} = 6,65 - j7,06 = 8,12 \angle -35^\circ \text{ A}$$

$$I = I_A + I_B = 8,1 - j2,4 + 6,65 - j7,06 = 14,75 - j7,06 = 16,35 \angle -25,6^\circ \text{ A}$$

$$Z = 24 + j10 = 26 \angle 22,6^\circ \Omega$$

$$U = Z(I_A + I_B) = 425,1 \angle -3^\circ \text{ V}$$

Vo vzťahu k svorkovému napätiu U je prúd

$$I_A = 8,45 \angle -16,5^\circ + 3^\circ = 8,45 \angle -13,5^\circ \text{ A},$$

t. j. pri účinníku, ktorým sa záťaž prejaví na transformátore A: $\cos 13,5^\circ = 0,972 \text{ ind.}$

Vo vzťahu k U je prúd

$$I_B = 8,12 \angle -35^\circ + 3^\circ = 8,12 \angle -32^\circ \text{ A}$$

t. j. pri účinníku, ktorým sa záťaž prejaví na transformátore B: $\cos 32^\circ = 0,848 \text{ ind.}$

Príklad 1.20

Tri trojfázové transformátory A, B a C s nasledujúcimi parametrami pracujú paralelne.

$$\text{A: } S_{NA} = 250 \text{ kVA, } u_{kA} = 3,8 \%$$

$$\text{B: } S_{NB} = 160 \text{ kVA, } u_{kB} = 4,2 \%$$

$$\text{C: } S_{NC} = 100 \text{ kVA, } u_{kC} = 4,0 \%$$

- Akou mierou sa zúčastnia na celkovej záťaži 500 kVA ?
- Aký najväčší možný výkon možno z tejto skupiny odoberať tak, aby nebol ani jeden transformátor preťažený?
- Vypočítajte činiteľ využitia paralelne pracujúcich transformátorov.

Riešenie:

- a) Pre rozdelenie zaťaženia na paralelne pracujúcich transformátoroch S_A , S_B a S_C pri nerovnakých menovitých výkonoch S_{NA} , S_{NB} a S_{NC} a nerovnakých napätiach nakrátko u_{kA} , u_{kB} a u_{kC} platí nasledujúci vzťah (pozri (1.77)):

$$S_A : S_B : S_C = \frac{S_{NA}}{u_{kA}} : \frac{S_{NB}}{u_{kB}} : \frac{S_{NC}}{u_{kC}}$$

Uvedeným vzťahom sme napísali dve lineárne nezávislé rovnice. Keďže máme tri neznáme (S_A , S_B , S_C), potrebujeme tretiu rovnicu. Tou bude rovnica pre celkovú záťaž všetkých troch transformátorov (pozri (1.78)). Takže budeme riešiť sústavu troch rovníc o troch neznámych:

$$S_A + S_B + S_C = 500 \quad \frac{S_A}{S_B} = \frac{S_{NA}u_{kB}}{S_{NB}u_{kA}} \quad \frac{S_B}{S_C} = \frac{S_{NB}u_{kC}}{S_{NC}u_{kB}}$$

$$S_C = 500 - S_A - S_B \quad S_A = S_B \frac{250 \cdot 4,2}{160 \cdot 3,8} = 1,726 S_B \quad S_B = S_C \frac{160 \cdot 4}{100 \cdot 4,2} = 1,523 S_C$$

$$S_B = 1,523(500 - S_A - S_B) = 1,523(500 - 2,726 S_B)$$

$$S_B = 147,86 \text{ kVA}$$

$$S_A = 255,202 \text{ kVA}$$

$$S_C = 96,94 \text{ kVA}$$

Vidíme, že transformátor s najmenším u_k je vzhľadom na svoj menovitý výkon preťažený, transformátor s najväčším u_k zase odľahčený. Ak teda pracujú paralelne transformátory s nerovnakými u_k a nechceme, aby ten s menším u_k bol preťažený, dávame podmienku, aby bol zaťažený nanajvyš svojím menovitým výkonom.

- b) Aby bola splnená podmienka z bodu a), transformátor A môže byť zaťažený iba svojím menovitým výkonom $S_A = S_{NA} = 250 \text{ kVA}$ a neznámou je celý výkon S a aj výkony S_B a S_C .

Pre rozdelenie zaťaženia troch paralelne pracujúcich transformátorov platí

$$\frac{S_A}{S_B} = \frac{S_{NA}u_{kB}}{S_{NB}u_{kA}} \Rightarrow S_B = \frac{S_{NB}u_{kA}S_A}{S_{NA}u_{kB}} = \frac{160 \cdot 10^3 \cdot 3,8 \cdot 250}{250 \cdot 4,2} = 144,76 \text{ kVA}$$

$$\frac{S_B}{S_C} = \frac{S_{NB}u_{kC}}{S_{NC}u_{kB}} \Rightarrow S_C = \frac{S_{NC}u_{kB}S_B}{S_{NB}u_{kC}} = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 4,2 \cdot 144,76 \cdot 10^3}{160 \cdot 10^3 \cdot 4,0} = 95 \text{ kVA}$$

Celkový výkon, ktorý môžeme z tejto skupiny odoberať je

$$S = S_{NA} + S_B + S_C = 489,76 \text{ kVA}.$$

Pritom súčet ich menovitých výkonov je $S_N = 510 \text{ kVA}$. Transformátory nie sú úplne využité.

c) Definujeme činiteľ využitia skupiny paralelne pracujúcich transformátorov (pozri (1.79)):

$$\kappa = \frac{S}{S_N} 100 = \frac{489,76}{510} 100 = 96 \%$$

Z ekonomického hľadiska predpisuje norma minimálnu hodnotu $\kappa = 95 \%$.

Príklad 1.21

Vypočítajte vyrovnávací prúd dvoch trojfázových transformátorov spojených paralelne bez zaťaženia, pripojených na strane VN na napätie 6300 V, ak poznáme tieto ich údaje: $S_{NA} = S_{NB} = 160 \text{ kVA}$; $u_{kA} = u_{kB} = 4 \%$; spojenie Yy0; $p_A = 6150 / 400 \text{ V}$; $p_B = 6300 / 400 \text{ V}$.

Riešenie:

Vyrovňavací prúd je daný rozdielom napätí, ktorý sa vytvorí medzi fázovými napätiami jednotlivých transformátorov na primárnej strane (pripojíme ich na 6300 V, ale transformátor A má prevod 6150 / 400 V) a súčtom ich impedancií nakrátko (pozri (1.80)):

$$I_v = \frac{\Delta U_{AB}}{Z_{kA} + Z_{kB}} = \frac{U_{fB} - U_{fA}}{Z_{kA} + Z_{kB}}$$

Vypočítame fázové napätia

$$U_{fA} = \frac{6150}{\sqrt{3}} = 3550 \text{ V} \qquad U_{fB} = \frac{6300}{\sqrt{3}} = 3637 \text{ V}$$

Menovité prúdy na primárnej strane

$$I_{1NA} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_A} = \frac{160 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6150} = 15 \text{ A} \qquad I_{1NB} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_B} = \frac{160 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6300} = 14,66 \text{ A}$$

Prevody:

$$p_A = \frac{6150}{400} = 15,375 \qquad p_B = \frac{6300}{400} = 15,75$$

Na výpočet vnútorných impedancií nakrátko využijeme poznatok, že pomerná (percentuálna) impedancia nakrátko sa číselne rovná napätiu nakrátko

$$z_{kA\%} = \frac{Z_{kA}}{Z_{NA}} 100 = u_{kA\%}$$

$$Z_{kA} = \frac{u_{kA\%}}{100} Z_{NA} = \frac{u_{kA\%}}{100} \frac{U_{fN}}{I_{1NA}} = \frac{4}{100} \frac{3550}{15} = 9,46 \, \Omega$$

Podobne

$$Z_{kB} = \frac{u_{kB\%}}{100} Z_{NB} = \frac{u_{kB\%}}{100} \frac{U_{fN}}{I_{1NB}} = \frac{4}{100} \frac{3637}{14,66} = 9,92 \, \Omega$$

Vyrovňavací prúd v mierke primárneho prúdu je

$$I_v = \frac{U_{fB} - U_{fA}}{Z_{kA} + Z_{kB}} = \frac{3637 - 3550}{9,46 + 9,92} = 4,5 \, A$$

To je 30 % menovitého prúdu, čo nie je zanedbateľná hodnota z hľadiska strát a oteplenia. Výpočet by sme mohli robiť aj na sekundárnej strane (na rozlíšenie od primárnej strany použijeme index „2“):

Po pripojení transformátora A na 6300 V bude pri danom prevode $p_A = 15,375$ na jeho sekundárnej strane v stave naprázdno napätie $U_{A20} = 409,75 \, V$, čiže $U_{A20f} = 236,5 \, V$. Transformátor B bude mať na sekundárnej strane $U_{B20} = 400 \, V$, čiže $U_{B20f} = 230,9 \, V$. Impedancie nakrátko treba tiež prepočítať na sekundárnu stranu:

$$Z_{kA2} = \frac{Z_{kA}}{p_A^2} = \frac{9,466}{15,375^2} = 0,04 \, \Omega$$

$$Z_{kB2} = \frac{Z_{kB}}{p_B^2} = \frac{9,9236}{15,75^2} = 0,04 \, \Omega$$

Vyrovňavací prúd na sekundárnej strane bude:

$$I_{v2} = \frac{236,5 - 230,9}{0,04 + 0,04} = 70 \, A$$

čo je tiež 30 % menovitých prúdov na sekundárnej strane.

Príklad 1.22

Ako sa rozdelí výkon 600 kVA na dva trojfázové transformátory v spojení Yy0, ak $S_{NA} = 500$ kVA; $S_{NB} = 250$ kVA; $u_{kA} = 5,5$ %; $u_{kB} = 4,0$ %; $p_A = 6150 / 400$ V; $p_B = 6300 / 400$ V. Transformátory pripojíme na primárnej strane na 6300 V.

Riešenie:

Hľadáme výkony S_A a S_B , ktoré transformátory dodávajú pri paralelnej spolupráci. Výpočet robíme na sekundárnej strane. Ak sú transformátory spojené paralelne, musia mať rovnaké svorkové napätie U_2 . Prítom vieme, že svorkové napätie pri určitej záťaži dostaneme, ak od napätia naprázdno odčítame úbytok napätia na vnútornej impedancii prechodom záťažového prúdu. Budeme počítať s takým záťažovým prúdom na sekundárnej strane (index „2“), ktorý tvorí s daným svorkovým napätím na sekundárnej strane hľadaný výkon: $S_A = \sqrt{3}U_2I_{A2}$; $S_B = \sqrt{3}U_2I_{B2}$. Pretože úbytok napätia je tvorený súčinom impedancie a prúdu, a obidve sú fázovými hodnotami, aj úbytok napätia bude fázovou hodnotou, a preto aj svorkové napätie treba vyjadriť fázovou hodnotou. Rovnosť fázových hodnôt svorkových napätí na oboch transformátoroch vyjadríme takto:

$$U_{2f} = U_{A20f} - Z_{A2}I_{A2} = U_{B20f} - Z_{B2}I_{B2}$$

$U_{A20} = U_{B20} = 400$ V sú združené napätia naprázdno na sekundárnej strane, ak na ich primárnych stranách sú pripojené ich menovité napätia. Ak však na primárnu stranu transformátora A pripojíme 6300 V (nie 6150 V), jeho sekundárne napätie v stave naprázdno vypočítame pomocou jeho prevodu (indexom „6,3“ zdôrazníme, že je to pri 6,3 kV):

$$U_{6,3A20} = 400 \frac{6300}{6150} = 409,75 \text{ V}.$$

Na sekundárnej strane transformátora B bude v stave naprázdno 400 V. Preto pri paralelnej spolupráci, keď sú sekundárne strany pripojené na spoločné prípojnice, vzniká aj v stave naprázdno rozdiel napätí:

$$\Delta U_{20} = U_{6,3A20} - U_{B20} = 9,75 \text{ V}$$

A vo vyjadrení fázových hodnôt:

$$\Delta U_{20f} = U_{6,3A20f} - U_{B20f} = 9,75 / \sqrt{3} = 5,629 \text{ V}$$

Teraz rovnicu pre fázové hodnoty svorkového napätia upravíme takto:

$$U_{2f} = U_{6,3A20f} - Z_{A2}I_{A2} = U_{B20f} - Z_{B2}I_{B2}$$

$$U_{6,3A20f} - U_{B20f} = Z_{A2}I_{A2} - Z_{B2}I_{B2},$$

čo je vlastne rovnica pre úbytok napätia na sekundárnej strane v stave naprázdno:

$$U_{6,3A20f} - U_{B20f} = Z_{A2}I_{A2} - Z_{B2}I_{B2} = \Delta U_{20f} = \frac{9,75}{\sqrt{3}} = 5,629 \text{ V}$$

Toto je prvá zo sústavy dvoch rovníc, ktoré treba riešiť. Do tejto rovnice treba dosadiť impedancie nakrátko transformátorov A a B vyjadrené pomocou ich napätí nakrátko (ako v príklade (1.21)). Neznáme veličiny sú prúdy pri paralelnej spolupráci I_{A2} a I_{B2} . Vyjadríme menovité prúdy, menovité impedancie a impedancie nakrátko oboch transformátorov na sekundárnej strane. Pre zjednodušenie v indexoch impedancií nakrátko vynechávame index „k“:

$$Z_{A2} = \frac{u_{kA\%}}{100} Z_{NA2} = \frac{5,5}{100} 0,32 = 0,0176 \Omega$$

$$Z_{NA2} = \frac{U_{AN2f}}{I_{AN2}} = \frac{400/\sqrt{3}}{721,68} = 0,32 \Omega$$

$$I_{NA2} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{A2}} = \frac{500000}{\sqrt{3}400} = 721,68 \text{ A}$$

Podobný výpočet pre transformátor B dáva tieto hodnoty:

$$Z_{B2} = 0,0256 \Omega$$

$$Z_{NB2} = 0,64 \Omega$$

$$I_{NB2} = 360,84 \text{ A}$$

Druhú rovnicu, pomocou ktorej vyriešime neznáme prúdy, dostaneme z celkového výkonu dodávaného pri paralelnej spolupráci:

$$S = S_A + S_B = 3U_{2f}I_{A2} + 3U_{2f}I_{B2} = 600000 \text{ VA}$$

Po úprave:

$$I_{A2} + I_{B2} = \frac{600000}{3U_{2f}} = \frac{200000}{U_{B20f} - Z_{B2}I_{B2}} = \frac{200000}{400/\sqrt{3} - 0,0256I_{B2}}$$

$$I_{A2}(400/\sqrt{3} - 0,0256I_{B2}) + I_{B2}(400/\sqrt{3} - 0,0256I_{B2}) = 200000.$$

Riešenie vedie na kvadratickú rovnicu, pričom len jeden koreň má vzhľadom na celkovú záťaž fyzikálny zmysel.

Hľadané hodnoty fázových prúdov pri danom zaťažení sú nasledujúce :

$$I_{A2} = 657,12 \text{ A}$$

$$I_{B2} = 231,89 \text{ A}$$

Svorkové napätie transformátorov pri danom zaťažení je:

$$U_{2f} = U_{A20f6,3} - Z_{A2} I_{A2} = \frac{409,75}{\sqrt{3}} - 0,0176 \cdot 657,12 = 225 \text{ V}$$

$$U_{2f} = U_{B20f} - Z_{B2} I_{B2} = \frac{400}{\sqrt{3}} - 0,0256 \cdot 231,89 = 225 \text{ V}$$

Týmto výpočtom sme urobili skúšku správnosti a pokračujeme výpočtom výkonov, ktoré jednotlivé transformátory pri paralelnej spolupráci do záťaže dodávajú:

$$S_A = 3U_{2f} I_{A2} = 3 \cdot 225 \cdot 657,12 = 443,556 \text{ kVA}$$

$$S_B = 3U_{2f} I_{B2} = 3 \cdot 225 \cdot 231,89 = 156,525 \text{ kVA}$$

Tým sme splnili zadanie a môžeme ešte urobiť skúšku správnosti pomocou celkového výkonu:

$$S = S_A + S_B = 443,556 + 156,525 = 600,081 \text{ kVA}$$

čo je veľmi dobrá zhoda so zadaným výkonom.

Výpočet možno robiť aj priamo cez výkony, ale výpočet je menej presný, lebo sa predpokladá stotožnenie menovitého napätia transformátorov so svorkovým napätím pri danej záťaži. Rozpíšeme a upravíme vzťah pre úbytok napätia:

$$\Delta U_2 = \frac{u_{kA\%}}{100} \frac{U_{NA}}{I_{NA}} I_{A2} - \frac{u_{kB\%}}{100} \frac{U_{NB}}{I_{NB}} I_{B2} = \frac{u_{kA\%}}{100} \frac{S_A}{I_{NA}} - \frac{u_{kB\%}}{100} \frac{S_B}{I_{NA}}$$

Ukazuje sa, že by bolo výhodné vynásobiť celú rovnicu výrazom $(100/U_{2N})$:

$$\frac{\Delta U_2}{U_{2N}} 100 = \frac{u_{kA\%} S_A}{S_{NA}} - \frac{u_{kB\%} S_B}{S_{NB}}$$

Dostali sme rovnicu, v ktorej už vystupujú neznáme S_A , S_B . Druhá rovnica na ich určenie je daná celkovým výkonom

$$S_A + S_B = 600 \text{ kVA}$$

Dosadíme

$$\frac{9,75}{400} 100 = \frac{5,5 S_A}{500} - \frac{4,0(600 - S_A)}{250}$$

Po úprave dostaneme

$$S_A = 445 \text{ kVA}$$

$$S_B = 155 \text{ kVA}$$

Vo výsledku vidno určitý rozdiel voči hodnotám získaným predchádzajúcim postupom. Výsledok zhodný s tým, ktorý sme dostali cez výpočet prúdov by sme dostali tak, že použijeme hodnotu skutočného svorkového napätia $U_{2f} = 225 \text{ V}$ ($U_2 = 389,7 \text{ V}$), ktorú

sme získali v predchádzajúcom postupe. Po vynásobení všetkých členov rovnice pre úbytok napätia svorkovým napätím U_2 a vydelením U_{2N}^2 dostaneme výraz:

$$\frac{U_2 \Delta U_2}{U_{2N}^2} 100 = \frac{u_{kA\%} S_A}{S_{NA}} - \frac{u_{kB\%} S_B}{S_{NB}}$$

Týmto výpočtom dostaneme tie isté hodnoty ako vyššie:

$$S_A = 443,5 \text{ kVA}$$

$$S_B = 156,5 \text{ kVA}$$

Príklad 1.23

Trojfázový transformátor 100 kVA, 400 / 6600 V v zapojení Yd má tieto hodnoty pri meraní naprázdno a nakrátko:

Meranie naprázdno, napájanie na nízkonapäťovej strane: 400 V; 1250 W

Meranie nakrátko, napájanie na vysokonapäťovej strane: 314 V; 1600 W pri menovitom prúde.

Vypočítajte:

- účinnosť pri menovitej záťaži a účinníku 0,8 ind.
- účinnosť pri polovičnej záťaži a jednotkovom účinníku
- maximálnu účinnosť
- percentuálne napätie nakrátko a jeho činnú a jalovú zložku

Riešenie:

Vzťahy na výpočet účinnosti sú uvedené v kap. 1.5. Pretože meranie naprázdno je uskutočnené pri menovitom napätí, môžeme konštatovať, že $\Delta P_0 = 1250 \text{ W}$, a pretože meranie nakrátko je uskutočnené pri menovitom prúde, môžeme konštatovať, že $\Delta P_{kN} = 1600 \text{ W}$.

- a) Pri menovitom prúde je pomerné zaťaženie $\lambda = 1$ a pri účinníku $\cos \varphi_{zt} = 0,8$ účinnosť je:

$$\eta = \frac{\lambda S_N \cos \varphi_{zt}}{\lambda S_N \cos \varphi_{zt} + \Delta P_0 + \lambda^2 \Delta P_{kN}} = \frac{1 \cdot 100 \cdot 0,8}{1 \cdot 100 \cdot 0,8 + 1,25 + 1^2 \cdot 1,6} = 0,9656$$

- b) Pre polovičnú záťaž $\lambda = 0,5$ a $\cos \varphi_{zt} = 1$ je účinnosť

$$\eta = \frac{\lambda S_N \cos \varphi_{zt}}{\lambda S_N \cos \varphi_{zt} + \Delta P_0 + \lambda^2 \Delta P_{kN}} = \frac{0,5 \cdot 100 \cdot 1}{0,5 \cdot 100 \cdot 1 + 1,25 + 0,5^2 \cdot 1,6} = 0,968$$

- c) Maximálna možná účinnosť nastane, ak pomerné zaťaženie je:

$$\lambda = \sqrt{\Delta P_0 / \Delta P_{kN}} = \sqrt{1,25 / 1,6} = 0,884 \text{ a } \cos \varphi_{zt} = 1 :$$

$$\eta = \frac{\lambda S_N \cos \varphi_{zt}}{\lambda S_N \cos \varphi_{zt} + \Delta P_0 + \lambda^2 \Delta P_{kN}} = \frac{0,884 \cdot 100 \cdot 1}{0,884 \cdot 100 \cdot 1 + 1,25 + 0,884^2 \cdot 1,6} = 0,9725$$

Odporúčame urobiť ďalšie výpočty (napr. pre polovičnú záťaž pri $\cos \varphi_{zt} = 0,8$ a pre záťaž, pri ktorej je účinnosť najvyššia a aj pre ďalšie zaťaženia pri $\cos \varphi_{zt} = 1$) a urobiť grafickú závislosť $\eta = f(\lambda)$ pre jednotlivé účinníky.

d) Pomerné, resp. percentuálne napätie nakrátko (pozri kap. 1.3.3) má dve zložky: činnú a reaktančnú (jalovú).

Výpočet urobíme na sekundárnej strane, pretože z tejto strany máme údaje merania nakrátko. Vypočítajme najprv menovitý fázový prúd na sekundárnej strane, kde je vinutie zapojené do trojuholníka:

$$I_{N2f} = \frac{S_N}{3U_2} = \frac{100000}{3 \cdot 6600} = 5,05 \text{ A}$$

Účinník nakrátko je

$$\cos \varphi_k = \frac{\Delta P_{kN}}{3U_{2k} I_{N2f}} = \frac{1600}{3 \cdot 314 \cdot 5,05} = 0,336$$

Vypočítajme celkovú impedanciu nakrátko prepočítanú na sekundárnu stranu Z_{k2} , pričom použijeme hodnotu menovitého prúdu, pretože pri tomto prúde bolo meranie nakrátko urobené:

$$Z_{k2} = \frac{U_{k2}}{I_{N2f}} (\cos \varphi_k + j \sin \varphi_k) = \frac{314}{5,05} (0,336 + j0,9417) = (20,89 + j58,55) \Omega$$

Takto sme dostali hodnotu celkového činného odporu prepočítaného na sekundárnu stranu $R_{k2} = 20,89 \Omega$ aj hodnotu rozptylovej reaktancie $X_{\sigma 2k} = 58,55 \Omega$.

Menovitá impedancia zo sekundárnej strany je:

$$Z_{N2} = \frac{U_{N2}}{I_{N2f}} = \frac{6600}{5,05} = 1306,9 \Omega$$

a percentuálna impedancia nakrátko $z_k \%$ je rovná napätiu nakrátko $u_k \%$:

$$z_k \% = \frac{Z_{k2}}{Z_{N2}} 100 = \frac{(20,89 + j58,55)}{1306,9} 100 = (1,6 + j4,48) \% = u_k \%$$

kde činná zložka napätia nakrátko $r_{\%} = 1,6 \%$ a jalová zložka $x_{\%} = 4,48 \%$. Potom hľadaná hodnota napätia nakrátko je:

$$u_{k\%} = \sqrt{r_{\%}^2 + x_{\%}^2} = \sqrt{1,6^2 + 4,48^2} = 4,75 \%$$

Mohli by sme pokračovať výpočtom prvkov náhradnej schémy, ako to bolo uvedené v predchádzajúcich príkladoch.

Príklad 1.24

Je daný 3-vinuťový transformátor 60 / 40 / 20 MVA, 10 / 110 / 60 kV, 50 Hz. Hodnoty menovitých impedancií jednotlivých vinutí sú:

$$Z_N = \frac{U_N^2}{S_N} \Rightarrow Z_{N1} = \frac{10^2}{60} = 1,67 \Omega; \quad Z_{N2} = \frac{110^2}{40} = 302,5 \Omega; \quad Z_{N3} = \frac{60^2}{20} = 180 \Omega;$$

Merané ohmické odpory vzťahnuté na príslušné hodnoty Z_N sú takéto: $r_{1,60\%} = 0,15 \%$; $r_{2,40\%} = 0,28 \%$; $r_{3,20\%} = 0,3 \%$. Vzájomné rozptylové reaktancie sú určené z merania nakrátko spôsobom obvyklým pre trojvinuťové transformátory (pozri [2] kap. 2.14.4): $X_{12} = 0,25 \Omega$; $X_{23} = 37,5 \Omega$; $X_{31} = 14,4 \Omega$.

- Vypočítajte prvky náhradnej schémy tohto trojvinuťového transformátora.
- Vypočítajte úbytok napätia, keď je zaťažené len vinutie 2 výkonom 40 MVA, pri $\cos \varphi_{z1} = 0,8$.
- Vypočítajte úbytok napätia, keď je vinutie 2 zaťažené výkonom 40 MVA a vinutie 3 výkonom 20 MVA, čiže vinutie 1 je zaťažené výkonom 60 MVA.

Riešenie:

Najprv merané hodnoty vzájomných rozptylových reaktancií vyjadríme v percentách menovitých impedancií (v indexe je aj príslušný výkon):

$$x_{12,60} = \frac{X_{12}}{Z_{N1}} = \frac{0,25}{1,67} = 0,15 \sim 15 \%$$

$$x_{23,40} = \frac{X_{23}}{Z_{N2}} = \frac{37,5}{312} = 0,12 \sim 12 \%$$

$$x_{31,20} = \frac{X_{31}}{Z_{N3}} = \frac{14,4}{180} = 0,08 \sim 8 \%$$

Aby sme mohli vypočítať prvky náhradnej schémy, musia byť všetky hodnoty x vzťahnuté na rovnaký počet závitov, t. j. na jedno a to isté vinutie. V najjednoduchšom

případe to možno urobiť prepočítaním v pomere výkonov. Prepočítame všetky hodnoty reaktancií na primárne vinutie, t. j. na 60 MVA (zvýrazníme tento fakt indexom „60“) a dostávame

$$x_{1,60} = 15 \% \quad x_{23,60} = 12 \frac{60}{40} = 18 \% \quad x_{31,60} = 8 \frac{60}{20} = 24 \%$$

Z týchto hodnôt dostaneme percentuálne hodnoty reaktancií jednotlivých vinutí vzťahnuté na výkon 60 MVA (t. j. také hodnoty reaktancií by mali jednotlivé vinutia, keby boli navrhnuté na 60 MVA).

$$x_{1,60} = \frac{1}{2}(x_{12} + x_{13} - x_{23}) = \frac{1}{2}(15 + 24 - 18) = 10,5 \%$$

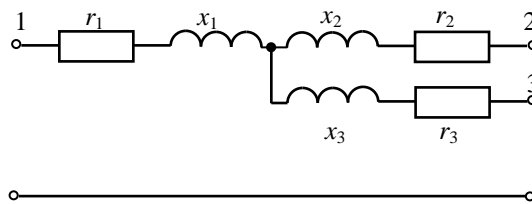
$$x_{2,60} = \frac{1}{2}(x_{12} + x_{23} - x_{13}) = \frac{1}{2}(15 + 18 - 24) = 4,5 \%$$

$$x_{3,60} = \frac{1}{2}(x_{13} + x_{23} - x_{12}) = \frac{1}{2}(24 + 18 - 15) = 13,5 \%$$

Tieto hodnoty nie sú skutočným hodnotami reaktancií jednotlivých vinutí, lebo tie majú iné výkony ako 60 MVA. Preto ich prepočítame späť na príslušné menovité výkony vinutí a dostaneme:

$$x_{1,60} = 10,5 \% \quad x_{2,40} = 4,5 \frac{40}{60} = 3 \% \quad x_{3,20} = 13,5 \frac{20}{60} = 4,5 \%$$

S týmito hodnotami je náhradný obvod znázornený na obr.1.20



Obr. 1.20 Náhradná schéma trojvinutového transformátora, ak zanedbávame prúd naprázdno

b) Keď je zaťažené len vinutie 2 výkonom 40 MVA, pri $\cos \varphi_{z1} = 0,8$, potom úbytok napätia na činnom odpore primárneho a sekundárneho vinutia vypočítame pomocou celkovej činnej zložky napätia nakrátko, pričom obe zložky musia byť opäť na rovnakom výkone. Pretože je zaťažená sekundárna strana, prepočet robíme na výkon sekundárneho vinutia 40 MVA:

$$r_{1+2,40} = r_{1,40} + r_{2,40} = 0,15 \frac{40}{60} + 0,28 = 0,38 \%$$

a na reaktanciách pomocou celkovej x -zložky:

$$x_{1+2,40} = 10,5 \frac{40}{60} + 3 = 10 \%$$

Teda hodnoty primárnych veličín sme prepočítali na výkon sekundárnej strany, aby sme ich mohli spočítať a rešpektovať fakt, že primárne vinutie nie je zaťažené svojím menovitým výkonom 60 MVA.

Pretože napätie nakrátko je

$$u_k \% = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{0,38^2 + 10^2} = 10 \%$$

čo je viac ako 4 %, počítame úbytok napätia na primárnej a sekundárnej impedancii podľa vzťahu (všetky hodnoty prepočítané na menovitý výkon sekundárneho vinutia, t. j. 40 MVA):

$$\begin{aligned} \Delta u_{12\%} &= \lambda(r_{1+2} \cos \varphi_{z1} + x_{1+2} \sin \varphi_{z1}) + \frac{1}{200} \lambda^2 (x_{1+2} \cos \varphi_{z1} - r_{1+2} \sin \varphi_{z1})^2 = \\ &= (0,38 \cdot 0,8 + 10 \cdot 0,6) + \frac{1}{200} (10 \cdot 0,8 - 0,38 \cdot 0,6)^2 = 6,6 \% \end{aligned}$$

a skutočný úbytok napätia pri takejto záťaži bude

$$\Delta U_2 = \frac{\Delta u_{12\%} U_{20}}{100} = \frac{6,6 \cdot 110}{100} = 7,26 \text{ kV}$$

$$U_2 = U_{20} - \Delta U_2 = 110 - 7,26 = 102,74 \text{ kV}$$

c) Vinutie 2 je zaťažené 40 MVA, $\cos \varphi_{z12} = 0,8$, vinutie 3 výkonom 20 MVA, $\cos \varphi_{z13} = 0,8$ a vinutie 1 výkonom 60 MVA. Čiže treba vypočítať zložky napätia nakrátko tak, aby každá časť zodpovedala správneho záťažovému výkonu. Napríklad pri výpočte úbytku napätia na sekundárnej strane vezmeme do úvahy, že primárna časť je zaťažená výkonom 60 MVA a sekundárna 40 MVA, to znamená, na tieto výkony budú musieť byť prepočítané aj prvky náhradnej schémy. Potom pre výpočet úbytku napätia na sekundárnej strane použijeme nasledujúce hodnoty:

$$r_{1,60+2,40} = 0,15 + 0,28 = 0,43 \%$$

$$x_{1,60+2,40} = 10,5 + 3 = 13,5 \%$$

a pre výpočet úbytku napätia na terciárnej strane tieto hodnoty:

$$r_{1,60+3,20} = 0,15 + 0,3 = 0,45 \%$$

$$x_{1,60+3,20} = 10,5 + 4,5 = 15 \%$$

Úbytok napätia z hľadiska svoriek sekundárneho vinutia bude

$$\Delta u_{12\%} = (0,43 \cdot 0,8 + 13,5 \cdot 0,6) + \frac{1}{200} (13,5 \cdot 0,8 - 0,43 \cdot 0,6)^2 = 8,9 \%$$

Skutočný úbytok napätia na sekundárnej strane pri tomto zaťažení bude:

$$\Delta U_2 = \frac{\Delta u_{12\%} U_{20}}{100} = \frac{8,9 \cdot 110}{100} = 9,79 \text{ kV}$$

$$U_2 = U_{20} - \Delta U_2 = 110 - 9,79 = 100,2 \text{ kV}$$

To znamená, že z hľadiska sekundárnych svoriek stúpol úbytok napätia zo 6,6 % na 8,9 % a znížilo sa skutočné napätie na sekundárnej strane pri tom istom zaťažení sekundárneho vinutia. Je to preto, že zaťažením terciárneho vinutia sa zvýšilo zaťaženie primárneho vinutia, ktoré ovplyvňuje aj úbytok napätia na sekundárnej strane. Teda existuje väzba medzi vinutiami 2 a 3 a zmena zaťaženia ktoréhokoľvek z nich spôsobuje zmenu úbytku napätia aj skutočného napätia na oboch vinutiach.

Úbytok napätia z hľadiska svoriek terciárneho vinutia vypočítame takto:

$$\Delta u_{13\%} = 0,45 \cdot 0,8 + 15 \cdot 0,6 + \frac{1}{200} (15 \cdot 0,8 - 0,45 \cdot 0,6)^2 = 10 \%$$

Skutočný úbytok napätia na terciárnej strane bude:

$$\Delta U_3 = \frac{\Delta u_{13\%} U_{30}}{100} = \frac{10 \cdot 60}{100} = 6 \text{ kV}$$

$$U_3 = U_{30} - \Delta U_3 = 60 - 6 = 54 \text{ kV}$$

Keď účinníky $\cos\varphi_{z12}$ a $\cos\varphi_{z13}$ sú rozdielne, musí sa pri výpočte zohľadniť aj fázor prúdu a v každom vinutí sa počíta s jeho zodpovedajúcim účinníkom.

Príklad 1.25

Nakreslite zapojenie vinutí transformátora, v ktorom by sa dosiahla zmena počtu fáz z troch na šesť.

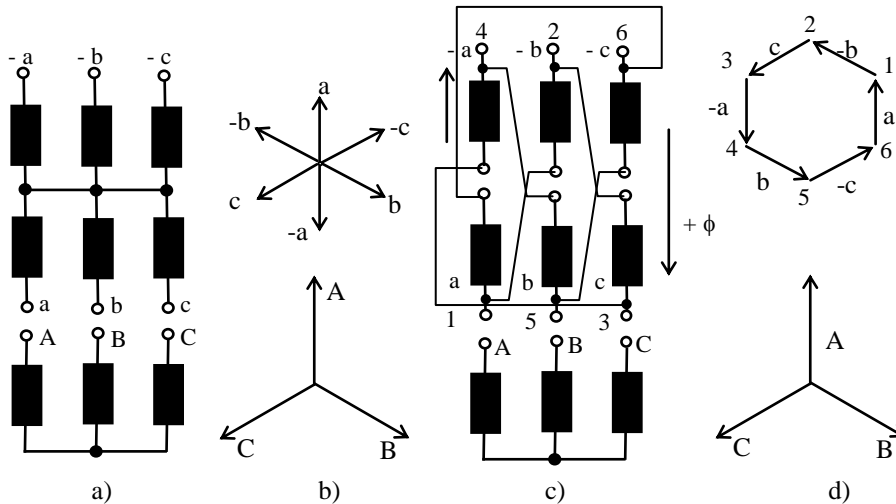
Riešenie:

Táto požiadavka je bežná pri zapojení transformátorov určených pre polovodičové meniče. Existuje veľké množstvo zapojení transformátora podľa konkrétnych požiadaviek na menič, t. j. podľa počtu fáz, pulzov, či sa vyžaduje rovnováha magnetických napätí, či sa sleduje a či je dôležitá tretia harmonická a pod. Pre podrobnejšie štúdium je možné použiť literatúru [119]. Tu uvedieme len jednoduché šesťfázové zapojenie:

- Zapojenie primárneho vinutia do hviezdy. Sekundárna šesťfázová strana má na každom jadre dve rovnaké vinutia, ktorých stredy sú spojené do nulového bodu (obr. 1.21 a, obr.1.21b – fázorový diagram) . Toto zapojenie sa používa v praxi

menej, lebo indukuje do primárneho vinutia zložku tretej harmonickej. Na jej vylúčenie sa používa tzv. vidličkové zapojenie, alebo dvojité hviezda [119].

- b) Zapojenie primárneho vinutia do hviezdy. Sekundárna šesťfázová strana má na každom jadre dve rovnaké vinutia, vzájomne prepojené tak, ako pri zapojení do trojuholníka (obr.1.21c, obr.1.21d – fázorový diagram).



Obr. 1.21 Zmena počtu fáz z troch na šesť a) zapojenie do hviezdy, b) zapojenie do hviezdy – fázorový diagram, c) zapojenie do šesťuholníka, d) zapojenie do šesťuholníka – fázorový diagram

Príklad 1.26

Nakreslite tzv. Scottovo zapojenie transformátorov. a) Zdôvodnite zapojenie jeho vinutí tak, aby sa menil primárny počet fáz tri na sekundárne dve fázy. b) Zanedbajte magnetizačný prúd, vyjadrite vzťah medzi primárnymi a sekundárnymi prúdmi a nakreslite príslušný fázorový diagram.

Riešenie:

a)

Na obr. 1.22a je ilustračný obrázok Scottovho zapojenia transformátorov. Jeden transformátor je hlavný, druhý pomocný. Hlavný transformátor s počtom závitov N_1 má odbočku uprostred vinutia a tá je prepojená s koncom vinutia pomocného transformátora, ktorý má počet závitov 86,6 % N_1 . Sekundárne vinutia sú súmerné, s počtom závitov N_2 . Na obr. 1.22b je fázorový diagram primárnych napätí, kde vidno, že združené napätia všetkých troch fáz sú rovnaké a že výška trojuholníka spustená z vrcholu A3 na základňu

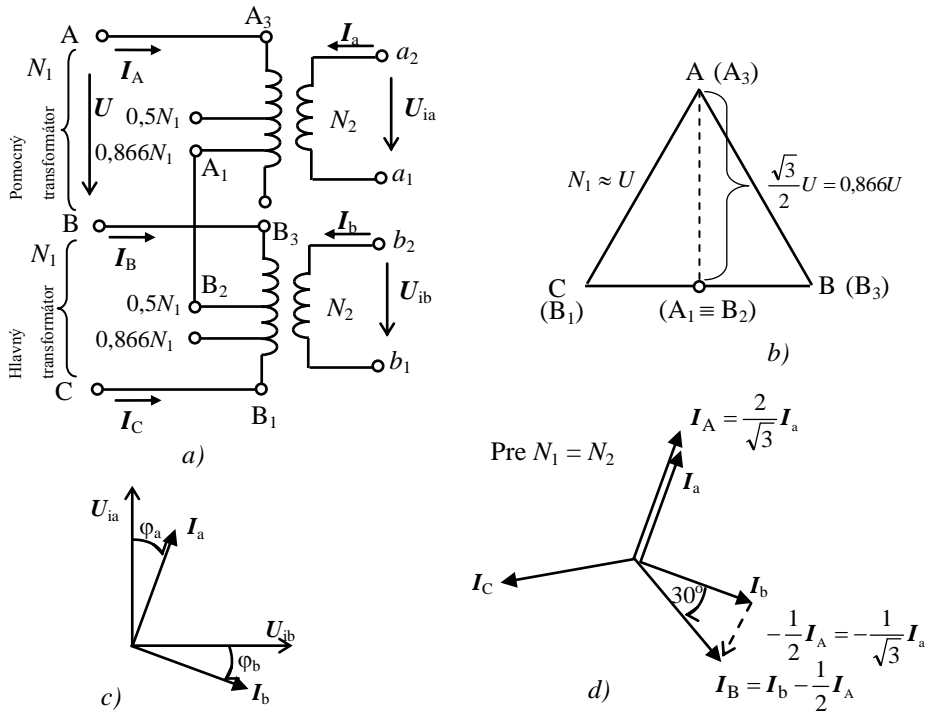
B1-B3 v bode $A_1=B_2$ má hodnotu $\sqrt{3}U/2 = 0,866U$. Preto ak vinutie pomocného transformátora bude mať medzi bodmi A1 a A3 počet závitov $\sqrt{3}N_1/2 = 0,866 N_1$, napätie na závit:

$$U_{iz} = \frac{0,866U}{0,866N_1} = \frac{U}{N_1}$$

a teda aj magnetický tok, bude rovnaký ako v jadre hlavného transformátora, kde na celé združené napätie U je celý počet závitov N_1 a napätie na závit je tiež U/N_1 . Tým sa zabezpečí, že pri rovnakom počte závitov N_2 na sekundárnych stranách sa bude v oboch sekundárnych vinutiach indukovať rovnaké napätie:

$$U_{2a} = U_{2b} = U_{iz}N_2.$$

Je zrejmé, že to, čo je nakreslené na obr. 1.22b, t. j. prepojenie bodov A1 a B2 treba urobiť aj na skutočných vinutiach, ako to vidno na obr. 1.22a.



Obr. 1.22 a) Scottovo zapojenie transformátorov, b) fázorový diagram združených primárnych napätí, c) fázorový diagram napätí a prúdov na sekundárnej strane, d) fázorový diagram prúdov na primárnej strane

b)

Pri zanedbaní magnetizačného prúdu je rozdiel magnetických napätí nulový, a preto možno pre magnetický obvod pomocného transformátora napísať:

$$I_A N_1 \frac{\sqrt{3}}{2} - I_a N_2 = 0$$

Z toho vyplýva, že prúd na sekundárnej strane možno vyjadriť pomocou primárneho prúdu fázy A:

$$I_a = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{N_1}{N_2} I_A \quad (1.26-1)$$

Pre hlavný transformátor platí:

$$I_B \frac{N_1}{2} - I_C \frac{N_1}{2} - I_b N_2 = 0 \quad (1.26-2)$$

a z toho vyplýva prúd v sekundárnej fáze b:

$$I_b = \frac{N_1}{N_2} \frac{(I_B - I_C)}{2} \quad (1.26-3)$$

a pretože pre trojvodičový systém platí

$$I_C = -I_A - I_B = -(I_A + I_B) \quad (1.26-4)$$

dosadením za I_C do (1.26-2) dostávame:

$$I_B \frac{N_1}{2} + (I_A + I_B) \frac{N_1}{2} - I_b N_2 = 0 \quad (1.26-5)$$

Po roznásobení a úprave dostaneme výraz pre prúd fázy B:

$$I_B = -\frac{I_A}{2} + I_b \frac{N_2}{N_1} \quad (1.26-6)$$

Prúd fázy C dostaneme, ak do (1.26-4) dosadíme za I_B vzťah (1.26-6) a upravíme:

$$I_C = -\frac{I_A}{2} - I_b \frac{N_2}{N_1} \quad (1.26-7)$$

Tým máme vyjadrené prúdy pre fázy B a C. Pre fázu A dostaneme prúd z výrazu (1.26-1):

$$I_A = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N_2}{N_1} I_a \quad (1.26-8)$$

Teraz máme vyjadrené prúdy pre všetky tri fázy na primárnej strane pomocou prúdov na sekundárnej strane a môžeme nakresliť fázorový diagram prúdov.

c)

Na obr. 1.22c je fázorový diagram napätí a prúdov na sekundárnej strane. Vidíme, že indukované napätia sú na seba kolmé a prúdy I_a a I_b sú posunuté za napätím o určitý uhol, ktorý závisí od charakteru záťaže.

Na obr. 1.22d je fázorový diagram prúdov na primárnej strane, ktorý je pre jednoduchosť a lepší prehľad kreslený za predpokladu, že $N_1 = N_2$. Prúd I_A je v tom istom smere ako prúd I_a a ostatné dva prúdy sú nakreslené pri rešpektovaní vzťahov (1.26-6) a (1.26-7). To znamená, že napr. prúd I_B nakreslíme tak, že k prúdu I_b pričítame $-I_A/2$, ktorý sa pri rovnosti počtu závitov rovná $I_a/\sqrt{3}$, ako to vyplýva zo vzťahu (1.26-8).

Vidíme, že ak je na sekundárnej strane súmerná záťaž, sú aj primárne strany transformátorov a sieť zaťažené súmerne. Keďže sme nerobili žiadny predpoklad, že sa počet fáz mení z tri na dva, celý výsledok možno aplikovať aj na prípad, že sa počet fáz mení z dva na tri, lebo aj tento spôsob zmeny počtu fáz je možný.

Príklad 1.27

Transformátory v Scottovom zapojení napájajú dve jednofázové záťaže pri 100 V, pričom každá záťaž má výkon 200 kW. Jedna fáza má účinník rovný 1, druhá fáza 0,8 induktívneho charakteru. Napätie trojfázového vstupu je 11 kV. Vypočítajte prúdy na sekundárnej aj na primárnej strane a nakreslite príslušné fázorové diagramy. Magnetizačný prúd zanedbajte.

Riešenie:

Prúdy na sekundárnej strane:

$$I_a = \frac{200\,000}{100} = 2\,000 \text{ A}$$

$$I_b = \frac{200\,000}{100 \cdot 0,8} = 2\,500 \text{ A}$$

Fázory týchto prúdov podľa obr. 1.23a:

$$I_a = j2000 \text{ A}$$

$$I_b = 2500(0,8 - j0,6) = 2000 - j1500 = 2500\angle 36,9^\circ \text{ A}$$

Prevod hlavného transformátora

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{11000}{100} = 110$$

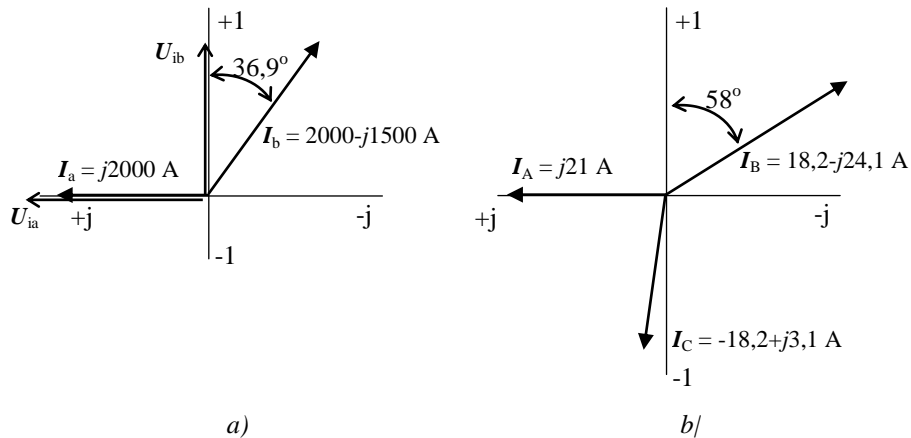
Prúdy na primárnej strane vo fázorovom vyjadrení:

$$I_A = -\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N_2}{N_1} I_a = -\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{110} j2000 = j21 \text{ A}$$

$$I_B = -\frac{I_A}{2} + I_b \frac{N_2}{N_1} = -\frac{j21}{2} + (2000 - j1500) \frac{1}{110} = (18,2 - j24,1) = 28,4\angle 58^\circ \text{ A}$$

$$I_C = -\frac{I_A}{2} - I_b \frac{N_2}{N_1} = -j\frac{21}{2} - (2000 - j1500) \frac{1}{110} = (-18,2 + j3,1) = 20,6\angle 188,6^\circ \text{ A}$$

Príslušné fázorové diagramy prúdov sú na obr. 1.23b.



Obr. 1.23 Fázorové diagramy prúdov a) sekundárnych, b) primárnych

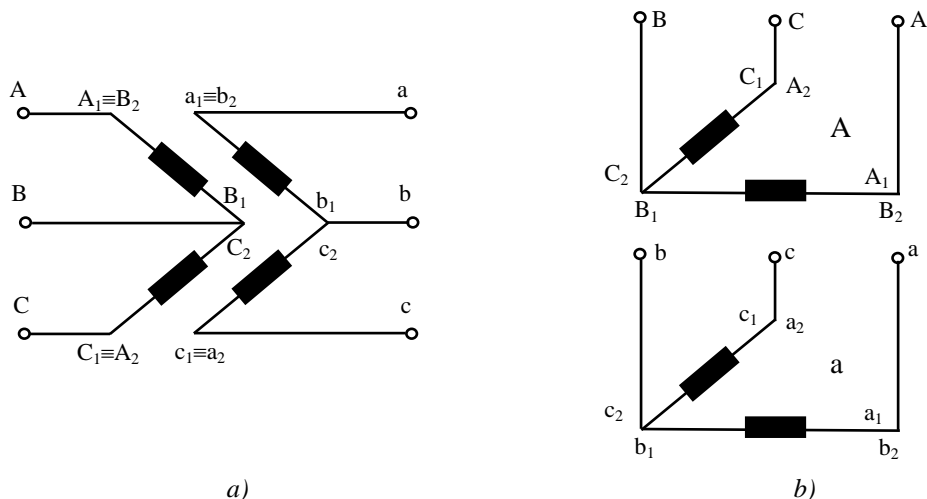
Príklad 1.28

Nakreslite zapojenie dvoch jednofázových transformátorov do V, ilustračný obrázok tohto zapojenia a uveďte príklady jeho aplikácie.

Riešenie:

Na obr. 1.24a je ilustračný obrázok zapojenia dvoch jednofázových transformátorov do V. Obrázok je nakreslený tak, aby bolo vidno, prečo sa zapojenie volá V- zapojenie. Iný názov tohto zapojenia je „zapojenie do otvoreného trojuholníka“ a zdôvodnenie tohto názvu vidno na obr. 1.24b. Napätie fázy A je medzi bodmi A1 a A2, a toto napätie pri zapojení do trojuholníka je totožné s napätím medzi bodmi C1 a B2.

Preto ak sa odstráni fáza A, združené napätia ostávajú nezmenené a súčet napätí dookola trojuholníka je nulový. Zmena je však vo veľkosti prúdov. Kým v normálnom trojuholníku možno rozlíšiť fázové prúdy a združené (líniové) prúdy, ktoré sú $\sqrt{3}$ -krát väčšie ako fázové, v otvorenom trojuholníku sú líniové prúdy zhodné s fázovými, t. j. dovolené líniové prúdy sú $\sqrt{3}$ -krát menšie ako boli v normálnom trojuholníku. To znamená, že využiteľný výkon sa $1/\sqrt{3} = 0,577$ -krát zmenší, t. j. skupina zapojených transformátorov sa môže využiť len na 57,7 % pôvodného zapojenia. Toto je väčšia redukcia výkonu ako by zodpovedalo redukcii počtu zapojených transformátorov, t. j. z troch pôvodných sú teraz zapojené dva, čiže počet transformátorov klesol na $2/3 = 0,666$. Toto zmenšenie využiteľného výkonu je spôsobené nesúmernosťou zapojenia.

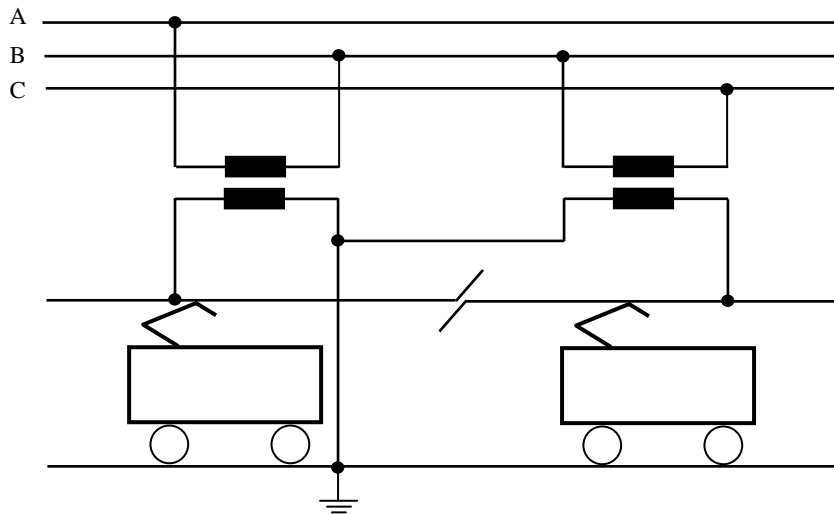


Obr. 1.24 a) Ilustračný obrázok zapojenia dvoch jednofázových transformátorov do V, b) zapojenie do otvoreného trojuholníka

Zapojenie do V, resp. do otvoreného trojuholníka možno využiť dvoma spôsobmi:

1. Ak tri jednofázové transformátory majú zapojenie Dd, tak pri poruche na jednom z nich a jeho nutnom vyradení možno udržiavať núdzový chod vo všetkých troch fázach dvoma transformátormi, ak sa zapoja do V (obr. 1.24a), pri zníženom výkone, ako to bolo už vysvetlené.

2. Toto zapojenie sa používa na napájanie jednofázovej trakcie podľa obr. 1.25, kde vidno zmenu počtu fáz z troch na dve a pri vhodnom zapojení sekundárnych vinutí a trakčného vedenia na napájanie jednofázových obvodov.



Obr. 1.25 Príklad napájania trakčného vedenia dvoma transformátormi zapojenými do V

NERIEŠENÉ PRÍKLADY

Príklad 1.29

Transformátor má v stave naprázdno primárne napätie 3000 V a sekundárne napätie 400 V. V primárnom vinutí má 1300 závitov a je napájané sínusovým napätím s frekvenciou 50 Hz. Prierez jadra je 80 cm^2 . Vypočítajte magnetickú indukciu v jadre transformátora a počet závitov sekundárneho vinutia. Pri riešení zanedbajte úbytky v stave naprázdno.

(1,3 T, 173závitov)

Príklad 1.30

Trojfázový transformátor Yy0 má menovité hodnoty 630 kVA, 3000/525 V. Vypočítajte prúdy oboch vinutí a menovitú impedanciu.

(121,2 A, 692,8 A, 14,3 Ω),

Príklad 1.31

Trojfázový, 50 Hz, 6600/400 V Yz transformátor má prierez jadra $0,04 \text{ m}^2$. Vypočítajte počet závitov, požadovaných pre každú cievku primárneho a sekundárneho vinutia, aby maximálna hodnota indukcie nepresiahla hodnotu 1,1 T. Predpokladajme, že sekundárne fázy sa skladajú z dvoch rovnakých cievok.

(400 závitov, 14 závitov)

Príklad 1.32

Trojfázový, trojvinuťový, 1000 kVA, 50Hz transformátor má nasledujúce parametre: 66 kV/6,6 kV/440 V, Ydy. Maximálna hodnota magnetického toku nesmie prevýšiť 0,1Wb. Vypočítajte:

a) požadovaný počet závitov na fázu pre každé vinutie
b) ak je uvažovaný magnetizačný prúd 5 % z menovitého a straty v železe 10 kW, vypočítajte vstupný prúd, účinník, príkon a výkon ak sekundárne vinutie je zaťažené výkonom 600 kVA, $\cos\varphi_2=0,9$ ind. a terciárne vinutie je zaťažené 400 kVA, $\cos\varphi_3=0,8$ ind.

(a.) 1800 závitov, 312 závitov, 12 závitov, b.) $I_1=9 \text{ A}$, $\cos\varphi=0,845$, 1030 kVA, 870 kW)

Príklad 1.33

Trojfázový transformátor 400 kVA, 35/3,15 kV, dodáva činný výkon 200 kW pri účinníku $\cos\varphi_2=0,6$. Vypočítajte pomerné zaťaženie a veľkosť jalového výkonu transformátora.

(83,3%, 266,66 kVA_r)

Príklad 1.34

Trojfázový transformátor 3300/415 V, Dz je dvojfázovo zaťažený výkonom 20 kW pri $\cos\varphi_2=0,8$. Pri zanedbaní magnetizačného prúdu a strát v železe vypočítajte primárne sieťové prúdy.
(4,37 A, 8,75 A, 4,37 A)

Príklad 1.35

Trojfázový transformátor 800 kVA, Yy, 15000/3150 V, 50 Hz má straty nakrátko 12,2 kW, primárnu rozptylovú indukčnosť 26 mH a sekundárnu rozptylovú indukčnosť 1,08 mH. Vypočítajte skutočné napätie nakrátko a percentuálne napätie nakrátko.
(876 V, 5,84%)

Príklad 1.36

Na trojfázovom transformátore Yy0, 75 kVA, 6000/525 V je pri meraní nakrátko skratovaná strana nižšieho napätia a na strane vyššieho napätia boli namerané hodnoty 160 V, 4,8 A. Vypočítajte percentuálne napätie nakrátko a ustálený skratový prúd.
(4,008 %, 180 A)

Príklad 1.37

Trojfázový transformátor 200 kVA, 6000/400 V, Yy0 má straty nakrátko 3,8 kW a napätie nakrátko 3,8 %. Vypočítajte percentuálny úbytok napätia transformátora pri prúde $1,2I_N$ a pri $\cos\varphi_2=0,8$ ind a sekundárne napätie pri rovnakom prúde a kapacitnom $\cos\varphi_2=0,8$ kap.
(4,2%, 402,18 V)

Príklad 1.38

Tri trojfázové transformátory majú nasledujúce menovité výkony a napätia nakrátko: **A**: 30 kVA, 4,1 %, **B**: 160 kVA, 3,8 %, **C**: 400 kVA, 3,5 %. Vypočítajte maximálny možný percentuálny výkon tejto skupiny pri paralelnej spolupráci za predpokladu, že $\cos\varphi_k$ všetkých transformátorov sú rovnaké.
(97,1%)

Príklad 1.39

Trojfázový transformátor má menovitý výkon 40 MVA, straty naprázdno 72 kW pri menovitom napätí a straty nakrátko 260 kW pri menovitom prúde. Vypočítajte účinnosť transformátora pri menovitom zaťažení a $\cos\varphi = 0,8$ a pri $\cos\varphi = 0,6$.
(98,97 %, 98,64 %)

Príklad 1.40

Trojfázový transformátor Yy0, 1250 kVA, 6000/400 V, má straty naprázdno 4050 W, prúd naprázdno 5 %, straty nakrátko 16,9 kW a napätie nakrátko 6 %. Vypočítajte prvky náhradnej schémy transformátora za predpokladu, že pomerné úbytky na ohmických odporoch a rozptylových reaktanciách primárneho a sekundárneho vinutia sú rovnaké a tiež zanedbajte magnetizačný prúd pri chode nakrátko, úbytky pri chode naprázdno, prídavné straty a vplyv nasýtenia.

(0,195 Ω , 0,000865 Ω , 0,84 Ω , 0,00374 Ω , 8889 Ω , 577 Ω)

Príklad 1.41

Jednofázový, 50 Hz, 500 kVA, 33000/3300 V transformátor má nasledujúce parametre:

$R_1 = 8,6 \Omega$, $R_2 = 0,08 \Omega$, $X_1 = 52 \Omega$, $X_2 = 0,46 \Omega$. V stave naprázdno je primárne napätie 33kV, prúd naprázdno 0,3A a vstupný príkon naprázdno 3,5 kW. Vypočítajte:

- úbytok napätia pri menovitom prúde ak je účinník 0,866 ind., 1, 0,866 kap. charakteru
- účinnosti pri tom istom prúde a účinníkoch (zanedbajte úbytok napätia)
- maximálnu účinnosť
- primárny prúd, účinník a sekundárny prúd, ak sekundárny účinník je 0,8 ind. a účinnosť pre tento účinník je maximálna

(a) 96 V, 25,1 V, -52,5 V; b) 98,2 %, 98,559 % pre účinník=1; c) 98,56 %; d) 14,78 A pre účinník=0,79, $I_2=145,2$ A)

Príklad 1.42

Dva jednofázové transformátory A a B pracujú paralelne. $U_A=200$ V, $U_B=203$ V, $Z_A=Z_B=(0,01+j0,1) \Omega$, všetky údaje zodpovedajú sekundárnej strane. Vypočítajte prúd I_A vo vzťahu k prúdu I_B (vo verzorovom tvare) ak záťažová impedancia má nasledujúce hodnoty:

- $Z = 10+j1 \Omega$
- $Z = 0,1+j1 \Omega$
- $I_A = I_B \cdot 0,827 \angle 112,7^\circ$, b) $I_A = I_B \cdot 0,7 \angle 0^\circ$

Príklad 1.43

Nasledujúce údaje patria dvom trojfázovým transformátorom v zapojení Dy:

A: 600 kVA, 2300/398 V, z merania nakrátko pri menovitom prúde bolo namerané 160 V, 4,2 kW, B: 900 kVA, 2300/390 V, z merania nakrátko pri menovitom prúde bolo namerané 100 V, 5,1 kW. Vypočítajte celkový prúd, ktorý dodávajú dva transformátory A a B pracujúce paralelne do záťaže 0,132 Ω na fázu, ktorá je zapojená do hviezdy s účinníkom 0,8 ind.

($I_{\text{celk}}=1640 \angle -38^\circ$)

Príklad 1.44

Trojfázový transformátor je daný týmito údajmi: menovitý výkon S_N , prevod napätí U_1/U_2 , zapojenie (Yy, Dy, Yd, Dd, Yz, Dz), straty naprázdno ΔP_0 , menovité straty nakrátko ΔP_{kN} , percentuálne napätie nakrátko $u_k\%$, percentuálny prúd naprázdno $i_0\%$

Nakreslite:

1. Dané zapojenie trojfázového transformátora s ľubovoľným hodinovým uhlom a určte hodinový uhol tohto zapojenia
2. Náhradnú schému a fázorový diagram pre stav naprázdno a pri zaťažení

Vypočítajte:

1. Menovité prúdy a menovitú impedanciu, zložky napätia nakrátko, ustálený skratový prúd a jeho I_{dynmax} , na primárnej aj sekundárnej strane.
2. Prvky náhradnej schémy a skutočné hodnoty prvkov sekundárnej strany.
3. a) Aspoň dva body vonkajšej charakteristiky pre $\cos\varphi_1$ induktívneho charakteru, $\cos\varphi_2$ kapacitného charakteru a $\cos\varphi_3$ rovný 1 a nakreslite ju. Vypočítajte percentuálny a skutočný úbytok napätia a sekundárne napätie po zaťažení prúdom I_1 .
b) Akým najväčším možným prúdom možno tento transformátor zaťažiť, aby percentuálny úbytok napätia nepresiahol $a\%$?
c) Napätie naprázdno na sekundárnej strane je U_{20} , pri menovitom zaťažení $U_2 > U_{20}$. Vypočítajte účinník záťaže.
4. a) Aspoň dva body charakteristiky účinnosť ako funkcia zaťaženia ($\eta=f(\lambda)$) pre $\cos\varphi \neq 1$ a nakreslite ju.
b) Záťaž, pri ktorej je účinnosť maximálna.
c) Maximálnu účinnosť pri danom účinníku a nakreslite ju do charakteristiky v bode 4a.
d) Vypočítajte maximálnu možnú účinnosť a zakreslite ju do charakteristiky v bode 4a).
5. Daný transformátor (Tr.A) pracuje paralelne s transformátorom (Tr.B) s rovnakým výkonom, ale s u_k o $x\%$ vyšším (nižším).
a) Ako si rozdelia oba transformátory celkovú záťaž, rovnú súčtu ich menovitých výkonov?
b) Akú maximálnu možnú záťaž možno z tejto skupiny odoberať, aby ani jeden z transformátorov nebol preťažený? Vypočítajte koeficient využitia tejto skupiny paralelne pracujúcich transformátorov.
c) Prevod Tr.A je U_{A1}/U_{A2} , Tr.B má prevod U_{B1}/U_{B2} , odlišný od prevodu Tr.A. Nakreslite príslušnú náhradnú schému a vypočítajte vyrovnávací prúd, ktorý bude pretekať vinutiami oboch transformátorov v stave naprázdno.
6. Transformátor Tr.A je odľahčený na $z\%$ menovitého prúdu a pracuje s $\cos\varphi_1$. Vypočítajte skutočný sekundárny prúd a nakreslite fázorový diagram prúdov.
7. Transformátor Tr.A je trojvinuťový, na terciárnej strane je napätie U_3 , jej zapojenie je y (alebo d). Vypočítajte I_1 , $\cos\varphi_1$, S_1 , P_1 , Q_1 ak je Tr.A zaťažený na sek. strane záťažou S_2 pri účinníku $\cos\varphi_2$ a na terciárnej strane záťažou S_3 pri účinníku $\cos\varphi_3$. Nakreslite fázorový diagram napätí a prúdov.

8. Vypočítajte potrebný počet závitov N_1 , N_2 , N_3 trojvinuťového Tr.A, ak magnetický tok v jadre nemá prekročiť hodnotu Φ_{\max} pri frekvencii 50Hz.

Príklad 1.45

Trojfázový transformátor je daný týmito údajmi: menovitý výkon S_N , prevod napätí U_1/U_2 , zapojenie, hodnoty z merania naprázdno a nakrátko:

meranie naprázdno (z nízkonapäťovej strany pri menovítom napätí) P_0 , U_0 , I_0

meranie nakrátko (z vysokonapäťovej strany, ľubovoľný riadok z tabuľky) P_{kmer} , U_{kmer} , I_{kmer}

Nakreslite:

1. Dané zapojenie trojfázového transformátora s ľubovoľným hodinovým uhlom a určte hodinový uhol tohto zapojenia

2. Náhradnú schému a fázorový diagram pre stav naprázdno a pri zaťažení

Vypočítajte:

1. Menovité prúdy a menovitú impedanciu, zložky napätia nakrátko, ustálený skratový prúd a jeho I_{dynmax} na primárnej aj sekundárnej strane.

2. Prvky náhradnej schémy a skutočné hodnoty prvkov sekundárnej strany.

Zadanie pokračuje bodmi 3) až 8) z príkladu 1.40.

Príklad 1.46

Trojfázový transformátor je daný týmito údajmi: menovitý výkon S_N , prevod napätí U_1/U_2 , zapojenie, percentuálny prúd naprázdno $i_{0\%}$, účinník naprázdno $\cos\varphi_0$, skutočné prvky pozdĺžnej vetvy náhradnej schémy R_1 , R_2 , $X_{\sigma 1}$, $X_{\sigma 2}$.

Nakreslite:

1. Dané zapojenie trojfázového transformátora s ľubovoľným hodinovým uhlom a určte hodinový uhol tohto zapojenia.

2. Náhradnú schému a fázorový diagram pre stav naprázdno a pri zaťažení.

Vypočítajte:

1. Menovité prúdy a menovitú impedanciu, sekundárne hodnoty parametrov prepočítané na primár.

2. vky priečnej vetvy, straty naprázdno a zložky prúdu naprázdno.

3. Zložky napätia nakrátko, straty nakrátko, ustálený skratový prúd primárny aj sekundárny a jeho I_{dynmax} na primárnej aj sekundárnej strane.

Zadanie pokračuje bodmi 3) až 8) z príkladu 1.40.