

2. TRANSFORMATORY

2.1. Zasada działania

Najprostszym urządzeniem, w którym wykorzystano zjawisko indukcji elektromagnetycznej jest transformator jednofazowy. Składa się on z dwóch uzwojeń (o liczbie zwojów N_1 i N_2) nawiniętych na wspólnym obwodzie magnetycznym. Na rys. 2.1 przedstawiono ideę działania transformatora dwuuzwojeniowego. Oba uzwojenia transformatora nawinięte są w tym samym kierunku.

Jeżeli do uzwojenia pierwotnego przyłożone zostanie napięcie przemienne U_1 , to w obwodzie popłynie prąd, który wzbudzi strumień magnetyczny Φ . Zastosowanie obwodu magnetycznego w postaci rdzenia z blach, których przenikalność magnetyczna jest znacznie większa niż powietrza powoduje, że strumień ten zamknie się przede wszystkim w rdzeniu. W idealnych warunkach strumień magnetyczny Φ jest sprzężony całkowicie z obiema cewkami. Zmienny w czasie strumień zaindukuje w uzwojeniach napięcia nazywane sem (siła elektromotoryczna) transformacji (1.7), czyli odpowiednio

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{oraz} \quad e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Sem transformacji, które zostały zaindukowane przez ten sam strumień są ze sobą w fazie czyli $\angle(e_1, e_2) = 0$. Stosunek tych napięć wynosi

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = n_{12}, \quad (2.1)$$

i nazywany jest przekładnią zwojową transformatora.

Przyjmując, że przebieg strumienia jest sinusoidalny

$$\Phi(t) = \Phi_m \sin(\omega t), \quad (2.2)$$

można obliczyć, że wskutek zmiany wartości strumienia indukowane jest napięcie

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d}{dt} [\Phi_m \sin(\omega t)] = -N \omega \Phi_m \cos(\omega t). \quad (2.3)$$

Skuteczna wartość przebiegu sinusoidalnego określonego wzorem (2.3) jest równa

$$E = N \frac{1}{\sqrt{2}} \omega \Phi_m = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N \Phi_m = 4,44 f N \Phi_m; \quad (2.4)$$

gdzie: N - liczba zwojów uzwojenia;

ω - pulsacja napięcia zasilającego;

Φ_m - maksymalna wartość strumienia sprzężonego z uzwojeniem;

stąd skuteczna wartość napięcia indukowanego w uzwojeniu pierwotnym jest określona zależnością:

$$E_1 = 4,44 f N_1 \Phi_m. \quad (2.5)$$

Ten sam strumień obejmuje również uzwojenie wtórne o z_2 zwojach, zatem w tym uzwojeniu indukowane jest napięcie o wartości

$$E_2 = 4,44 f N_2 \Phi_m. \quad (2.6)$$

W przypadku wielkości magnetycznych wartości podawane są jako maksymalne, zatem nie używa się dodatkowego indeksu m. W dalszej części skryptu indeksowi temu przypisano określenie - magnesujący.

Przy sinusoidalnym przebiegu strumienia w transformatorze, stosunek napięć indukowanych jest równy:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = n_{12}. \quad (2.7)$$

Przy pominięciu spadków napięć spowodowanych przepływem prądu przez uzwojenie pierwotne, napięcia indukowane są praktycznie równe napięciom na zaciskach uzwojeń przy braku obciążenia strony wtórnej. Można określić przekładnię napięciową transformatora, która jest stosunkiem napięć

$$K = \frac{U_1}{U_2} \approx n_{12}. \quad (2.8)$$

Przekładnia napięciowa transformatora jednofazowego jest w przybliżeniu równa przekładni zwojowej. W praktyce przez przekładnię rozumie się zawsze stosunek znamionowego napięcia uzwojenia o wyższym napięciu znamionowym do znamionowego napięcia uzwojenia o niższym napięciu znamionowym.

Transformator jest zatem statycznym urządzeniem elektromagnetycznym, którego zadaniem jest przemiana energii elektrycznej o jednym napięciu, na energię elektryczną o innym (lub takim samym) napięciu. Przemiana energii odbywa się za pośrednictwem pola elektromagnetycznego - częstotliwość przetworzonego napięcia jest taka sama jak częstotliwość napięcia zasilania.

2.2. Prawo równości przepływów

W idealnym transformatorze, w którym nie występują straty i cały strumień sprzężony jest z uzwojeniami, zasada zachowania energii sprowadza się do równości mocy chwilowych obu uzwojeń, czyli

$$p_1 = u_1 i_1 = u_2 i_2 = p_2. \quad (2.9)$$

Ponieważ stosunek napięć jest równy przekładni zwojowej (2.8), to równość (2.9) można przekształcić do postaci:

$$\frac{u_1}{u_2} i_1 = \frac{N_1}{N_2} i_1 = i_2, \quad (2.10)$$

czyli

$$N_1 i_1 = N_2 i_2. \quad (2.11)$$

Równanie (2.11) przedstawia prawo równości przepływów w transformatorze

$$\underline{\Theta}_1 + \underline{\Theta}_2 = 0. \quad (2.12)$$

W transformatorze, pomijając niewielki przepływ wynikający z prądu magnesującego, każdej zmianie przepływu po stronie wtórnej odpowiada identyczna zmiana przepływu po stronie pierwotnej. Równanie (2.11) można zapisać w postaci:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{n_{12}}, \quad (2.13)$$

to znaczy stosunek wartości prądów transformowanych jest odwrotnie proporcjonalny do przekładni zwojowej transformatora.

Zasadę równowagi przepływów przedstawiono na rys. 2.2. W transformatorach uzwojenia pierwotne i wtórne umieszczane są najczęściej współśrodkowo na kolumnie rdzenia. Kierunek nawinięcia obu uzwojeń jest taki sam. Przyjęto, że wskutek przepływu prądu magnesującego I_μ w rdzeniu wytworzona zostaje indukcja B_m . W rdzeniu, zgodnie ze zależnością (1.6), występuje strumień. W idealnych warunkach jest on obejmowany całkowicie przez oba uzwojenia (por. rys. 2.2a) - jest to strumień wzajemny (zwany też magnesującym lub głównym Φ_m).

Jeżeli do zacisków uzwojenia wtórnego przyłączony zostanie odbiornik o impedancji Z_{ex} (rys. 2.2b), to wokół uzwojenia (przewodów z prądem obciążenia I_2) powstanie przepływ o wartości $\Theta_2 = N_2 I_2$. Kierunek prądu w uzwojeniu wtórnym jest przeciwny przyczynie jego powstania, czyli strumień wywołany przepływem prądu I_2 jest skierowany przeciwnie w stosunku do strumienia magnesującego. Jako natychmiastowa reakcja w uzwojeniu pierwotnym przepływnie prąd dodatkowy I_1 przeciwdziałający zmianie poprzednio występującego strumienia - powstanie przepływ kompensujący obciążenie, czyli przepływ

$N_1 I_1 = \Theta_1$ (por. rys. 2.2b). Jakkolwiek wzrośnie przepływ obciążenia, równocześnie wzrasta przepływ po stronie zasilanej, to znaczy wzrasta obciążenie źródła zasilania.

2.3. Schemat zastępczy transformatora

Na rys. 2.3a przedstawiono obwody idealnie sprzężone magnetycznie oraz ich charakterystyczne wielkości. Dla obwodów tych można określić schemat fizyczny (rys. 2.3b). W celu przedstawienia elektrycznego schematu zastępczego transformatora konieczne jest zastąpienie sprzężenia magnetycznego przez połączenie galwaniczne obu uzwojeń. Konieczne jest zatem sprowadzenie jednej strony (np. wtórnej) do drugiej. Po sprowadzeniu strony wtórnej do pierwotnej potencjały a-b i a'-b' powinny być sobie równe. Moc po sprowadzeniu musi być równa mocy rzeczywistej. Równość napięć indukowanych w uzwojeniu pierwotnym E_1 i w uzwojeniu wtórnym po sprowadzeniu E'_2 zachodzi wówczas, gdy po sprowadzeniu liczba zwojów strony wtórnej jest równa liczbie zwojów uzwojenia pierwotnego.

Sprowadzenie wielkości elektrycznych obwodu wtórnego na stronę uzwojenia pierwotnego określone jest zależnościami:

$$\text{dla napięć } E_2 n_{12} = E'_2 ; \quad (2.14)$$

$$\text{dla prądu } I_2 \frac{1}{n_{12}} = I'_2 ; \quad (2.15)$$

$$\text{dla impedancji, rezystancji i reaktancji } Z_2 n_{12}^2 = Z'_2 . \quad (2.16)$$

Po sprowadzeniu strony wtórnej do pierwotnej, przy uwzględnieniu powyższych uwag, schemat zastępczy idealnego transformatora ma postać przedstawioną na rys. 2.3c. Wszystkie wielkości sprowadzone oznaczono „prim”.

W rzeczywistym transformatorze wytworzony przez zasilaną cewkę strumień nie jest w pełni skojarzony z uzwojeniem wtórnym, gdyż część wytworzonego strumienia to strumień rozproszenia. Jest to taki strumień, który jest skojarzony wyłącznie z uzwojeniem, które go wytwarza ($\Phi_{\sigma 1}$). Strumień wytworzony w uzwojeniu zasilanym, a sprzężony z uzwojeniem wtórnym, jest strumieniem magnesującym (Φ_m). Wokół uzwojenia wtórnego również występuje strumień rozproszenia ($\Phi_{\sigma 2}$), o ile przez to uzwojenie przepływa prąd (rys. 2.4b).

Uzwojenia o liczbach zwojów N_1 i N_2 cechują się przekrojem przewodu (np. A_{w1}), konkretną wartością rezystywności materiału i konkretną długością zwoju (l_1). Uzwojenia mają rezystancje wynoszące odpowiednio R_1 i R_2 [Ω].

Strumienie rozproszenia odwzorowuje się indukcyjnościami rozproszenia odpowiednio: uzwojenia pierwotnego $L_{\sigma 1}$ oraz uzwojenia wtórnego $L_{\sigma 2}$ [H].

W nieobciążonym transformatorze wytwarzany jest strumień wzajemny, któremu w danych warunkach nasycenia odpowiada indukcyjność magnesująca L_{μ} .

W rdzeniu wydzielają się straty (por. wzory 1.16 i 1.17), które odwzorowuje się rezystancją zastępczą

$$R_{Fe} = \frac{P_{Hy} + P_{Ft}}{I_{Fe}^2}. \quad (2.17)$$

Jest to rezystancja odwzorowująca efekt strat na prądy wirowe oraz histerezę w żelazie rdzenia - straty spowodowane przepływem prądu I_{Fe} przez rezystancję R_{Fe} są równe liczbowo rzeczywistym stratom w rdzeniu. Wartość rezystancji R_{Fe} w transformatorach energetycznych wynosi od kilku do kilkudziesięciu $k\Omega$ lub w jednostkach względnych do 500.

Schemat zastępczy obwodów sprzężonych magnetycznie z uwzględnieniem wymienionych zjawisk można przedstawić w postaci podanej na rys. 2.5.

Częstotliwość napięć i prądów w obu obwodach (pierwotnym i wtórnym) magnetycznie sprzężonych są sobie równe. Schemat zastępczy odpowiada zatem takiemu transformatorowi sprowadzonemu, w którym przekładnia jest równa jedności, przy zachowaniu takich samych strat i energii magnetycznej.

2.4. Stan jałowy

Stanem jałowym transformatora nazywamy taki stan, gdy strona pierwotna jest zasilana napięciem przemiennym, a strona wtórna pozostaje nieobciążona - obwód wtórny jest otwarty. Obraz rozplywu strumienia przedstawiono na rys. 2.4a. Schemat zastępczy transformatora odpowiadający stanowi jałowemu przedstawiono na rys. 2.6a.

Równanie napięciowe transformatora opisujące stan jałowy ustalony ma postać:

$$\underline{U}_1 + \underline{E}_1 = R_1 \underline{I}_0 + j X_{\sigma 1} \underline{I}_0, \quad (2.18)$$

natomiast równanie prądowe

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_{\mu} + \underline{I}_{Fe}. \quad (2.19)$$

Wartość prądu stanu jałowego zależy od konstrukcji rdzenia - czyli pośrednio od mocy znamionowej transformatora. W przypadku transformatorów zasilających urządzenia elektroniczne użytku domowego wynosi on do 50% wartości znamionowego prądu (z powodu znacznej szczeliny powietrznej na drodze strumienia). W przypadku współczesnych

transformatorów energetycznych jest rzędu 1% wartości znamionowego prądu. Składowa czynna prądu stanu jałowego (I_{Fe}) w tych transformatorach wynosi ok. 0,1% I_{μ} .

Straty stanu jałowego w małych transformatorach niskonapięciowych dopuszcza się równe liczbowo nawet do 33% S_N . W przypadku transformatorów energetycznych są to najczęściej ułamki procenta mocy znamionowej.

Moc czynna pobierana przez transformator w stanie jałowym składa się ze strat w rdzeniu P_{Fe} , strat w uzwojeniu pierwotnym spowodowanych przepływem prądu stanu jałowego oraz strat dodatkowych. Ponieważ prąd stanu jałowego jest bardzo mały, to straty w uzwojeniu pierwotnym nim spowodowane są również bardzo małe, gdyż zależą od kwadratu prądu. Pomijalnie małe są również dodatkowe straty spowodowane przepływem strumienia rozproszenia w elementach metalowych konstrukcji transformatora. Można uważać, że straty w stanie jałowym spowodowane są wyłącznie przemagnesowywaniem rdzenia.

Wartość reaktancji magnesowania X_{μ} , przy znamionowym napięciu, w transformatorach zawiera się w przedziale od kilkunastu do ok. 200 k Ω (lub w jednostkach względnych do 2000). Podobnie, jak w przypadku rezystancji zastępczej R_{Fe} , większe wartości dotyczą transformatorów o większych mocach znamionowych.

2.5. Prąd magnesujący w transformatorze

Zależność strumienia od prądu magnesującego w przypadku rdzeni transformatorów ma postać znaną jako charakterystyka magnesowania (por. rys. 1.5). Ponieważ jest to charakterystyka nieliniowa (występuje nasycenie), to kształty przebiegów strumienia i prądu magnesującego nie mogą być równocześnie sinusoidalne. Na rys. 2.7 przedstawiono graficzny sposób wyznaczenia przebiegu strumienia w funkcji czasu, jeżeli przebieg prądu jest sinusoidalny.

Strumień magnetyczny jest silnie odkształcony, z tego powodu również indukowane napięcie nie jest sinusoidalne - zawiera wyższe harmoniczne. Przebieg napięcia indukowanego przedstawiono jako krzywą $e_1(t)$ na rys. 2.7.

W przypadku sinusoidalnego przebiegu strumienia - przebieg prądu magnesującego jest odkształcony. Wyznaczenie tego przebiegu przedstawiono na rys. 2.8.

Przebieg prądu jest symetryczny względem wartości ekstremalnej, zawiera widmo harmonicznym nieparzystych, z których największą amplitudę najczęściej ma trzecia. Odkształcenie prądu magnesującego od sinusoidy - czyli wzrost wartości amplitud składowych sinusoidalnych o częstotliwości wyższych niż pierwsza - jest tym większe im

strumień ma wyższą wartość. W rzeczywistym przebiegu można zaobserwować jeszcze składową prądu, która wynika ze zjawiska histerezy. Narastanie strumienia i jego zmniejszanie nie zachodzi według tej samej krzywej charakterystyki magnesowania. Im szersza jest pętla histerezy magnetycznej materiału rdzenia, tym większą wartość ma amplituda cosinusoidalnej składowej prądu.

2.6. Prąd łączeniowy

Prądem łączeniowym w transformatorze nazywa się przebieg nieustalony prądu spowodowany włączeniem nieobciążonego transformatora do sieci. Poniżej przedstawiono to zjawisko na przykładzie transformatora jednofazowego. Jeżeli w chwili włączenia napięcie ma wartość maksymalną, to strumień magnetyczny spowodowany przez to napięcie ma wartość zerową. Początkowa wartość prądu jest również zerowa. Strumień w rdzeniu rośnie wraz ze zmniejszaniem się napięcia źródła. Przebieg strumienia jest sinusoidalny, natomiast przebieg prądu uwarunkowany jest charakterystyką magnesowania - zawiera wyższe harmoniczne.

Inaczej jest w drugim skrajnym przypadku, tzn. gdy napięcie źródła w chwili włączenia transformatora przechodzi przez zero. Wówczas strumień wymuszony powinien w sposób nagły osiągnąć wartość maksymalną. Jest to niemożliwe. Powstający strumień zawiera zatem, oprócz składowej wymuszonej (o przebiegu sinusoidalnym), również składową o takiej wartości początkowej, by w chwili $t=0_+$ strumień wypadkowy był równy zero. Składowa swobodna strumienia zanika ze stałą czasową wynikającą z parametrów transformatora w stanie jałowym, lecz nie zmienia znaku. Z tego powodu po czasie równym $1/2$ okresu napięcia zasilającego w rdzeniu transformatora występuje maksymalny strumień, w przybliżeniu równy podwójnej wartości strumienia maksymalnego ustalonego stanu jałowego. Jest to strumień powodujący bardzo duże nasycenie rdzenia, zatem odpowiadający mu prąd osiąga bardzo duże wartości. Przebieg prądu łączeniowego można wyznaczyć, jeżeli znany jest przebieg strumienia wzajemnego oraz charakterystyka magnesowania rdzenia.

Czynnikiem, który dodatkowo ma wpływ na nasycenie rdzenia, jest strumień magnetyzmu szczątkowego. Przy czym wartość i kierunek tego strumienia zależy od rodzaju blachy, z jakiej wykonany jest rdzeń transformatora, gabarytów rdzenia, jakości jego złożenia, wartości strumienia w chwili poprzedniego wyłączenia transformatora oraz czasu, który upłynął od ostatniego wyłączenia.

Udarowa wartość prądu łączeniowego może być nawet 300 razy większa od amplitudy prądu stanu jałowego. Prąd ten na ogół nie powoduje uszkodzeń transformatora, może natomiast spowodować zadziałanie urządzeń zabezpieczających transformator, czyli spowodować jego wyłączenie.

Na rys. 2.9 przedstawiono przykład prądu łączeniowego w przypadku bardzo krótkiej stałej czasowej.

Należy pamiętać, że istotą występowania dużych wartości prądu łączeniowego jest występowanie nasycenia magnetycznego w rdzeniu, czyli dużych wartości natężenia pola magnetycznego w rdzeniu.

Włączenie do sieci transformatora obciążonego również powoduje powstanie stanu nieustalonego. W tym przypadku wartość prądu udarowego zależy od charakteru obciążenia. Prąd łączeniowy obciążonego transformatora w najbardziej niekorzystnym przypadku, osiąga wartość podwójną wartości maksymalnej prądu ustalonego wynikającego z obciążenia. Inna jest istota powstawania wartości udarowej prądu, ponieważ stała czasowa tego zjawiska zależy od parametrów obciążenia i zwarciovych parametrów transformatora.

2.7. Wykres wskazowy transformatora obciążonego

Po przyłożeniu napięcia przemiennego do uzwojenia pierwotnego, w uzwojeniu wtórnym zaindukuje się napięcie. Przyłączenie odbiornika o impedancji Z_{ex} spowoduje przepływ prądu wtórnego co wymusza przepływ prądu po stronie pierwotnej o odpowiedniej wartości (por. rys. 2.2). Równania napięciowe transformatora obciążonego w stanie ustalonym (uwzględniając schemat zastępczy przedstawiony na rys. 2.5) można zapisać w postaci:

$$\underline{U}_1 + \underline{E}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \underline{I}_1, \quad (2.20)$$

$$\underline{U}'_2 + \underline{E}_1 = -R'_2 \underline{I}'_2 - jX'_{\sigma 2} \underline{I}'_2, \quad (2.21)$$

równanie prądów

$$\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_0. \quad (2.22)$$

Tym związkom odpowiada wykres wskazowy przedstawiony na rys. 2.10a, na którym narysowano także wskaźy prądów i strumienia magnesującego Φ_m . Pamiętać należy, że dla przejrzystości wykresu, nie zachowano proporcji pomiędzy wielkościami pokazanymi na nim. Wykres przy zachowaniu proporcji na przykładzie parametrów transformatora o mocy $S_N = 250 \text{ kV} \cdot \text{A}$ ($U_1/U_2 = 15\text{kV}/0,4\text{kV}$) podano na rys. 2.10b.

W rzeczywistym transformatorze energetycznym zmiana strumienia głównego w rdzeniu przy przejściu od stanu jałowego do obciążenia znamionowego wynosi kilka procent. Jest to uwarunkowane spadkiem napięcia na impedancji uzwojenia pierwotnego.

2.8. Próba zwarcia

Próba zwarcia odpowiada takiemu zasilaniu strony pierwotnej [22], przy którym po stronie wtórnej transformatora zwartego płynie prąd o znamionowej wartości. W czasie próby napięcie pierwotne zmienia się od zera do wartości, przy której prąd wtórny jest równy znamionowemu.

W próbie zwarcia moc czynna pobierana przez transformator jest sumą strat mocy w uzwojeniach, gdyż w porównaniu z nią straty w rdzeniu są pomijalnie małe. Straty w rdzeniu zależne są od kwadratu indukcji magnetycznej (wzory 1.16 i 1.17), która zależy od napięcia. W przypadku transformatorów energetycznych uważa się, że tak pomierzone straty są równe

$$P_u = I_{1N}^2 R_1 + I_{2N}^2 R_2 + P_{du}, \quad (2.23)$$

gdzie: P_u - pomierzone w próbie zwarcia straty czynne przy prądzie znamionowym, nazywane stratami obciążeniowymi,

P_{du} - dodatkowe straty obciążeniowe.

Dodatkowe straty obciążeniowe, są to straty powstające poza uzwojeniami wskutek przepływu prądu w uzwojeniach. Przede wszystkim są to straty od prądów wirowych w elementach konstrukcyjnych transformatora spowodowanych strumieniami rozproszenia. Na podstawie przeprowadzonej próby można wyznaczyć następujące parametry transformatora:

- napięcie zwarcia U_z [V]; jest to taka wartość napięcia po stronie pierwotnej, przy której po stronie wtórnej płynie prąd znamionowy. Parametr ten jest najczęściej podawany w procentach napięcia znamionowego, czyli:

$$u_z = \frac{U_z}{U_{1N}} \cdot 100 [\%]; \quad (2.24)$$

- rezystancję zwarciovą

$$R_z = R_1 + R'_2 = \frac{P_u}{I_{1N}^2}; \quad (2.25)$$

- impedancję zwarciovą

$$Z_z = \frac{U_z}{I_{1N}}; \quad (2.26)$$

- reaktancję zwarcia

$$X_Z = X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2} = \sqrt{Z_Z^2 - R_Z^2} \quad (2.27)$$

Reaktancję i rezystancję zwarcia przedstawić można również w procentach (są to równocześnie odpowiednie spadki napięć liczone w procentach - por. rozdz.1.9):

$$u_R = \frac{R_Z I_N}{U_N} 100 [\%], \quad (2.28)$$

$$u_X = \frac{X_Z I_N}{U_N} 100 [\%]. \quad (2.29)$$

Napięcie zwarcia transformatorów energetycznych zawiera się w przedziale $(4,5 \div 18)\%U_N$. Jeżeli nie wykonano pomiaru rezystancji uzwojeń metodą techniczną, to można przyjąć, że:

$$R_1 = R'_2 = R_Z/2.$$

Jest to przyjęcie idealnie wykonanego transformatora, w którym: gęstości prądów w obu uzwojeniach, a także długości przewodów z których wykonane są uzwojenia są identyczne.

Najczęściej przyjmuje się również równość reaktancji rozproszenia:

$$X_{\sigma 1} = X'_{\sigma 2} = X_Z/2.$$

Obwód magnetyczny transformatora w stanie próby zwarcia jest nienasycony, z tego powodu współczynnik mocy ma wartość praktycznie stałą. Otrzymane w próbie charakterystyki przedstawiono na rys. 2.11.

2.9. Zwarcie ustalone transformatora

Stanem zwarcia ustalonego nazywa się taki stan elektromagnetyczny transformatora, który spowodowany jest zasilaniem uzwojenia pierwotnego napięciem znamionowym, przy równoczesnym zwartym uzwojeniu strony wtórnej przez impedancję o zerowej wartości. W takim stanie napięcie na zaciskach wtórnych jest równe zero, to znaczy napięcie przyłożone równe jest spadkom napięć na rezystancjach i reaktancjach rozproszenia uzwojeń transformatora. Schemat zastępczy odpowiadający stanowi zwarcia przedstawiono na rys. 2.12a.

Stwierdzono poprzednio, że względna wartość rezystancji uzwojenia transformatora jest bardzo mała. Ponadto strumień rozproszenia stanowi co najwyżej kilka do kilkunastu procent strumienia wytworzonego przez uzwojenie pierwotne. To oznacza, że również reaktancje rozproszenia mają małą wartość w stosunku do reaktancji magnesowania. Oba te

elementy strony wtórnej w stanie zwarcia są połączone równoległe z reaktancją magnesowania i rezystancją odwzorowującą straty w rdzeniu. Można zatem stwierdzić, że te dwa ostatnie parametry przy rozważaniu stanu zwarcia mogą być pominięte. Prąd zwarciový oblicza się więc z zależności

$$I_z = \frac{U_1}{Z_z} \cong \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2})^2}} \quad (2.30a)$$

lub

$$I_z = I_N \frac{U_N}{U_z} \quad (2.30b)$$

Uwzględniając wartości napięć zwarcia podane w poprzednim rozdziale, należy pamiętać, że wartość prądu zwarciový transformatorów jest bardzo duża. Stan zwarciový transformatora uważa się za stan awaryjny, gdyż cieplne oddziaływanie prądu zwarciový może spowodować zniszczenie izolacji uzwojeń.

Wykresy wskazowe (o różnych stopniach uproszczenia) transformatora w stanie zwarcia przedstawiono na rys. 2.13.

Podstawowy wniosek, który wynika z przedstawionego wykresu (rys. 2.13a) to: strumień główny w transformatorze zwartym jest równy około połowie wartości odpowiadającej stanowi jałowemu. Skoro strumień ma wartość mniejszą niż w stanie jałowemu to znaczy, że w rdzeniu transformatora zwartego **nie** występuje stan nasycenia.

2.10. Zwarcie udarowe

Jeżeli zaciski wtórne transformatora zostaną zwarte impedancją o zerowej wartości, a napięcie przyłożone do zacisków pierwotnych będzie zmieniane od zera do wartości znamionowej, to zmieniająca się wartość prądu przepływającego przez uzwojenie pierwotne jest ustalonym prądem zwarcia odpowiadającym wartości napięcia przyłożonego zgodnie z charakterystyką zwarcia. Innym zagadnieniem jest fakt zwarcia zacisków wtórnych przy zasilaniu znamionowym strony pierwotnej. Udarowa wartość prądu zwarciový zależy od wartości strumienia magnetycznego w chwili zwarcia oraz od parametrów obwodu wtórnego.

Przebieg prądu zwarciový zawiera składową zwarcia ustalonego (składową wymuszoną), której amplitudę określa stosunek U_m/Z_z oraz składową przejściową (składową swobodną) o identycznej lecz przeciwnie skierowanej wartości, która zanika ze stałą czasową obwodu, czyli $T_z = L_z/R_z$. Przez L_z oznaczono indukcyjność, która jest równa sumie

indukcyjności rozproszonych uzwojenia pierwotnego $L_{\sigma 1}$ i wtórnego sprowadzonego na stronę pierwotną $L'_{\sigma 2}$.

Składowa swobodna osiąga największą wartość, gdy w chwili zwarcia wartość napięcia jest równa zero. W tym przypadku prąd zwarciovowy, który jest sumą dwóch składowych osiąga wartość ekstremalną po czasie π/ω .

Istotą powstawania udarowej wartości prądu zwarciovowego w transformatorze jest wystąpienie aperiodycznej składowej prądu. Przebieg przykładowego prądu zwarciovowego przedstawiono na rys. 2.14.

W obliczeniach inżynierskich udarową wartość prądu zwarciovowego oblicza się z zależności:

$$i_{ud} = k_u \sqrt{2} I_z, \quad (2.31)$$

gdzie: k_u - współczynnik udaru, w transformatorach o małej mocy znamionowej ($1,08 \div 1,3$), w transformatorach energetycznych ($1,7 \div 1,85$); I_z - skuteczna wartość prądu zwarcia ustalonego.

Skutki zwarcia udarowego w transformatorze są dwojakiego rodzaju:

dynamiczne - skutek działania prądu udarowego,

cieplne - skutek działania prądu ustalonego.

Prąd udarowy decyduje o wielkości sił dynamicznych działających na uzwojenia transformatora. Siły działające w uzwojeniach cylindrycznych powodują zgniatanie uzwojeń wewnętrznych oraz rozrywanie uzwojeń zewnętrznych. Zatem przy wykonywaniu transformatorów, szczególnie o dużych mocach znamionowych, bardzo istotnym problemem jest poprawne umocowanie uzwojeń na rdzeniu.

Wzdłuż osi mogą działać siły poosiowe. Przy prawidłowym rozmieszczeniu uzwojeń pierwotnego i wtórnego względem siebie, wszystkie siły promieniowe F_p znoszą się. Jeżeli uzwojenia są względem siebie przesunięte (rys. 2.15), to siły poosiowe F_o mogą spowodować zniszczenie transformatora mimo, że mają wartości mniejsze niż siły promieniowe.

2.11. Zmienność napięcia

Wraz ze zmianą obciążenia, zarówno co do wartości, jak i charakteru, napięcie na zaciskach uzwojenia wtórnego zmienia swoją wartość. Spowodowane jest to spadkami napięcia na rezystancjach oraz reaktancjach rozproszenia uzwojeń wywołanych przez przepływ prądów.

Zmiana napięcia jest różnicą między napięciem wtórnym w stanie jałowym i napięciem w stanie obciążenia odniesioną do napięcia w stanie jałowym, czyli

$$\Delta u = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} 100 [\%]. \quad (2.32)$$

Zakłada się, że parametry gałęzi poprzecznej schematu zastępczego w stanach obciążenia można pominąć. Wówczas schemat zastępczy po sprowadzeniu na stronę wtórną można uprościć do postaci przedstawionej na rys. 2.16a. Odpowiadający temu schematowi wykres wektorowy przedstawiono na rys. 2.16b.

Zmienność napięcia jest równa odcinkowi \overline{AB} na rys. 2.16b. W przybliżeniu można określić ten odcinek zależnością

$$\Delta U = I_2 R'_Z \cos\varphi_2 + I_2 X'_Z \sin\varphi_2. \quad (2.33)$$

W wartościach względnych odniesionych do znamionowej wartości napięcia i prądu strony wtórnej, zależność ta ma postać

$$\Delta u = k_i (u_R \cos\varphi_2 + u_X \sin\varphi_2), \quad (2.34)$$

gdzie: u_R , u_X - względne spadki napięć wyznaczone ze wzorów (2.28) i (2.29),

k_i - względna wartość prądu obciążenia, czyli

$$k_i = \frac{I_2}{I_{2N}}. \quad (2.35)$$

Dla danego transformatora zmiana napięcia wtórnego jest funkcją charakteru obciążenia oraz zależy proporcjonalnie od stopnia obciążenia. Charakterystyki wynikające z zależności (2.34) przedstawiono na rys. 2.17.

Zerowa zmiana napięcia transformatora, przy dowolnej wartości obciążenia różnej od zera, wystąpi wówczas, gdy

$$\Delta u = u_R \cos\varphi_2 + u_X \sin\varphi_2 = 0,$$

a zatem przy kącie (pkt. A na rys. 2.17b)

$$\varphi_2 (\Delta u = 0) = - \arctg \frac{u_R}{u_X}. \quad (2.36)$$

Jeżeli transformator jest obciążony, to napięcie na zaciskach wtórnych jest równe napięciu stanu jałowego przy obciążeniu o charakterze pojemnościowym.

Największa możliwa zmiana napięcia przy obciążeniu prądem o znamionowej wartości, jest równa napięciu zwarcia, a występuje przy obciążeniu o charakterze określonym kątem fazowym obliczonym na podstawie:

$$\frac{d}{d\varphi_2} \Delta u = 0 = \frac{d}{d\varphi_2} (u_R \cos\varphi_2 + u_X \sin\varphi_2), \quad (2.37)$$

czyli

$$\varphi_2 (\Delta u = u_Z) = \text{arc ctg} \frac{u_R}{u_X}. \quad (2.38)$$

Jest to kąt fazowy prądu zwarciego określonego na rys. 2.13b.

2.12. Sprawność transformatora

W przypadku każdego urządzenia sprawność jest stosunkiem całkowitej mocy na wyjściu do całkowitej mocy na wejściu powiększonej o straty urządzenia. W przypadku transformatora mocą na wyjściu jest moc pozorna (S) pomnożona przez współczynnik mocy ($\cos\varphi$). Można zdefiniować współczynnik obciążenia transformatora jako stosunek bieżącej wartości mocy pobieranej do wartości znamionowej, czyli

$$x = \frac{P_2}{P_{2N}}. \quad (2.39)$$

Istotnymi stratami w transformatorze są straty stanu jałowego (P_{0N} przy U_N, f_N) oraz straty obciążeniowe (P_{uN} przy U_N, I_N, f_N). Obie te wartości podawane są jako dane techniczne transformatora w warunkach znamionowych (przy czym straty obciążeniowe podawane są przy temperaturze uzwojenia równej 75°C). Straty stanu jałowego są niezależne od wartości obciążenia, z tego powodu nazywa się je stratami stałymi. Straty obciążeniowe zależą od kwadratu współczynnika obciążenia - nazywane są stratami zmiennymi. Uwzględniając powyższe można zapisać, że sprawność transformatora jest równa

$$\eta = \frac{x P_N}{x P_N + P_{0N} + x^2 P_{uN}}. \quad (2.40)$$

Bardzo istotne jest zagadnienie:

przy jakim obciążeniu sprawność transformatora jest największa.

Przez podzielenie licznika i mianownika zależności (2.40) przez xP_N otrzyma się wzór

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{P_{oN}}{xP_N} + \frac{x^2 P_{uN}}{xP_N}} \quad (2.41)$$

Sprawność transformatora jest największa, gdy suma

$$\varepsilon = \frac{P_{oN}}{xP_N} + \frac{x^2 P_{uN}}{xP_N} = \min. \quad (2.42)$$

Graficzne znalezienie wartości minimalnej przedstawiono na rys. 2.18.

Przy założeniu, że znamionowa moc P_N zawsze jest różna od zera optimum można znaleźć z warunku

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P_{oN}}{xP_N} + \frac{x^2 P_{uN}}{xP_N} \right) = 0, \quad (2.43)$$

z którego otrzymuje się: sprawność jest maksymalna, gdy współczynnik obciążenia spełnia warunek

$$x = \sqrt{\frac{P_{oN}}{P_{uN}}}. \quad (2.44)$$

Maksymalna sprawność transformatora zawsze jest osiągana, gdy

straty zmienne = straty stałe.

Warto zauważyć, że im moc znamionowa transformatora jest większa tym sprawność jest większa. Przykładowe charakterystyki przedstawiono na rys. 2.19.

2.13. Transformator trójfazowy

Najczęstszym zastosowaniem transformatora jest zmiana wartości napięć trójfazowych. Oprócz transformatorów jednofazowych i trójfazowych, wykonywane są również transformatory zmieniające trójfazowy układ napięć na sześciofazowy.

Najprostszym przypadkiem transformowania napięcia trójfazowego jest połączenie trzech identycznych transformatorów jednofazowych w układ trójfazowy. Schemat ideowy takiego układu przedstawiono na rys. 2.20. Transformator trójfazowy zestawiony z trzech jednostek jednofazowych nazywa się transformatorem grupowym.

Ponieważ w układach trójfazowych transformatory stosowane są do zmiany poziomu napięcia, stąd najczęściej podawana jest strona górnego napięcia (GN) i dolnego napięcia (DN). Mniej istotną cechą jest, które z tych napięć jest pierwotne (uzwojenie zasilane), a które

wtórne (uzwojenie do którego przyłączony jest odbiór), gdyż te funkcje mogą ulegać zmianom nawet bez zmiany łączeniowej.

Uzwojenia górnego napięcia mogą być połączone w:

- gwiazdę, oznacza się takie uzwojenie jako - Y;
- gwiazdę z wyprowadzonym punktem zerowym (gwiazdowym), oznaczenie - YN;
- trójkąt, oznaczenie - D.

Uzwojenia dolnego napięcia mogą być połączone w:

- gwiazdę, oznacza się takie uzwojenie jako - y;
- gwiazdę z wyprowadzonym punktem zerowym (gwiazdowym), oznaczenie - yn;
- trójkąt, oznaczenie - d;
- zygzak, oznaczenie - zn (wykonywanie układu zygzak bez wyprowadzonego przewodu zerowego nie ma uzasadnienia ekonomicznego).

Najczęstszym wykonaniem rdzenia transformatora trójfazowego jest rdzeń trójkolumnowy płaski. Ideę transformatora o rdzeniu trójkolumnowym przedstawiono na rys. 2.21. W przypadku transformatorów o najwyższych mocach znamionowych wykonuje się rdzeń pięciokolumnowy, w którym na dodatkowych dwóch zewnętrznych kolumnach nie ma uzwojeń. W ten sposób zmniejsza się wysokość rdzenia.

Wszystkie uzwojenia muszą być tak nawinięte, by strumienie miały jednakowy zwrot. Jeżeli uzwojenie dolnego napięcia ma być połączone w zygzak, to uzwojenie takie musi być nawinięte w postaci dwóch cewek o $z_2/2$ zwojach każda.

W przypadku rdzenia trójkolumnowego, drogi strumieni magnetycznych od poszczególnych uzwojeń fazowych mają różne reluktancje. Jest to powód, dla którego prądy magnesujące faz umieszczonych na kolumnach skrajnych są sobie równe, i mają większą wartość niż prąd magnesujący fazy nawiniętej na kolumnie środkowej. Rdzeń trójkolumnowy jest więc magnetycznie niesymetryczny. Transformator grupowy uważa się za symetryczny magnetycznie, podobnie jak rdzeń pięciokolumnowy. Symetryczność magnetyczna rdzenia wpływa na cechy elektromagnetyczne transformatora w przypadku rozpatrywania wyższych harmonicznych strumienia oraz skutków obciążeń niesymetrycznych.

Spośród wszystkich możliwych układów połączeń uzwojeń zarówno górnego, jak i dolnego napięcia, w praktyce nie stosowane są układy Dd oraz Dz. Zastosowanie tych układów połączeń nie ma uzasadnienia ekonomicznego.

Zwrócić należy uwagę, że zależnie od układu połączeń uzwojeń transformatora zmienia się przekładnia napięciowa. Przy tej samej liczbie zwojów uzwojeń, odpowiednio

strony GN i DN, w dwóch transformatorach o różniących się układach (np. Yy oraz Yd) napięcia strony DN będą się różniły.

2.14. Grupy połączeń transformatorów trójfazowych

Najprostszą grupą połączeń jest Yy0. Cyfra po układzie połączeń wskazuje, o ile godzin (kąto) przesunięte są względem siebie wektory napięć jednoimiennych strony GN i DN. Przyjęto zatem, że jednej godzinie przesunięcia odpowiada kąt 30° . W przypadku grupy połączeń Yy0, symbol 0 wskazuje, że brak jest przesunięcia kątoowego pomiędzy wektorem fazowym napięcia strony GN i DN. Napięcia tej grupy przedstawiono na rys. 2.22.

Wyprowadzenie fazy A strony GN oznaczono przez 1A, wyprowadzenie fazy a strony DN przez 2A. Wektory napięć pokrywają się, czyli nie ma przesunięcia godzinowego pomiędzy napięciami obu stron transformatora. Odpowiedni układ połączeń uzwojeń przedstawiono na rys. 2.23. Po stronie DN uzwojenia można połączyć jeszcze w jeden sposób, mianowicie punkt gwiazdowy otrzymać z połączenia nie końców, ale początków uzwojeń. Układ połączeń strony dolnego napięcia i odpowiadający mu wykres wektorowy napięć przedstawiono na rys. 2.24.

Uzwojenia obu stron rozpatrywanego transformatora nawinięte były zgodnie - w tym samym kierunku. Przez fakt połączenia w punkt gwiazdowy początków, a nie końców uzwojenia DN, zmienione zostało przesunięcie pomiędzy wektorem napięcia GN i wektorem strony DN tej samej fazy. Powstała grupa połączeń Yy6. Zwrócić należy uwagę, że nie zmieniły się zwroty wektorów napięć uzwojeń strony DN. Wynika to z jednakowego kierunku nawinięcia uzwojeń.

Przekładnia napięciowa transformatora połączonego jako Yy0, i również w grupę połączeń Yy6, jest taka sama. W przypadku układu połączeń Yy przekładnia napięciowa (stosunek napięć międzyprzewodowych strony GN do napięcia międzyprzewodowego strony DN) jest równa przekładni zwojowej

$$K = n_{12} . \quad (2.45)$$

Na rys. 2.25 przedstawiono kolejne fazy powstawania grupy połączeń Yd5. Wykres wektorowy napięć uzwojenia GN pozostaje taki sam, jak w poprzednim przypadku (rys. 2.22a). Schemat ideowy połączeń tego uzwojenia przedstawiono na rys. 2.25f. Ponieważ przesunięcie napięć stron GN i DN wynosi 5 godzin, to na rys. 2.25b określono kierunek osi na której musi się znaleźć jeden z końców uzwojenia fazy a DN (jest to wyprowadzenie uzwojenia DN - 2A).

Transformator nie wprowadza zmian w kierunkach wektorów indukowanych napięć. Uwzględniając powyższy fakt na rys. 2.25c przedstawiono wektory napięć strony DN w jedyny możliwy sposób, by jeden z końców uzwojenia fazy a znalazł się na kierunku - godzina 5. - a jednocześnie możliwe było zamknięcie trójkąta wektorami napięć pozostałych faz. Z tego układu wynika jedyny możliwy sposób oznaczenia połączeń - przedstawiony na rys. 2.25d. Na rys. 2.25e podano schemat ideowy układu połączeń uzwojeń DN.

W przypadku układu połączeń Yd przekładnię napięciową określa się następująco:

- do z_1 zwojów uzwojenia GN przyłożone jest fazowe napięcie górne, czyli $U_{1f} = U_1/\sqrt{3}$;
- w uzwojeniu jednej fazy DN indukuje się napięcie wynikające z przekładni zwojowej, ale liczone względem napięcia panującego na fazie strony GN, czyli $U_{2f} = U_{1f}/n_{12}$;
- napięcie międzyprzewodowe w układzie trójkąta (DN) jest równe napięciu na uzwojeniu fazowym, a zatem

$$\frac{U_{1f}}{U_{2f}} = n_{12} = \frac{U_1/\sqrt{3}}{U_{2f}} ; \text{ ale } U_{2f} = U_2$$

zatem w układach Yd przekładnia napięciowa jest równa

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \sqrt{3} n_{12} \quad (2.46)$$

W przypadku grupy połączeń Yz5, na każdej kolumnie nawinięte są trzy uzwojenia: uzwojenie GN i dwie połowki uzwojenia DN. Wszystkie są nawinięte w tym samym kierunku, zatem wektory indukowanych w nich napięć (na każdej kolumnie) mają identycznie zwroty. Etapy tworzenia grupy przedstawione na rys. 2.25 a i b pozostają takie same. Do kierunku wyznaczonego przez godzinę 5., musi dochodzić jeden z wektorów napięcia indukowanego w połowce uzwojenia DN. Przedstawiono to na rys. 2.26a.

Jeżeli już przyjęto, które uzwojenie DN ma być przyłączone do zacisków zewnętrznych, to tę samą regułę należy zastosować do pozostałych faz. Połączenie gwiazdy wewnętrznej w zygzaku (w tym przypadku) musi być takie same jak połączenie gwiazdy strony GN. Kąt między cząstkowymi napięciami zygzaku musi być równy 120° .

W przypadku układu połączeń Yz przekładnię napięciową określa się następująco:

- do z_1 zwojów uzwojenia GN przyłożone jest fazowe napięcie górne, czyli $U_{1f} = U_1/\sqrt{3}$;
- w uzwojeniu jednej fazy DN, gdyby była złożona z dwóch połówek (o sumarycznej liczbie zwojów z_2), indukowałoby się napięcie wynikające z przekładni zwojowej, ale liczone względem napięcia na fazie strony GN, czyli $U_{2f2} = U_{1f}/n_{12}$;

- to znaczy na połówkowym uzwojeniu zygzaka indukuje się napięcie $U_{2fl} = U_{1f}/(2n_{12})$;
- napięcie międzyprzewodowe w układzie zygzaka jest równe trzem napięciom połówkowym,

zatem w układach Yz przekładnia napięciowa jest równa

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{2}{\sqrt{3}} n_{12} \quad (2.47)$$

W podobny sposób można tworzyć pozostałe grupy połączeń transformatorów, których jest w sumie 26. Należy pamiętać, że każdy układ połączeń cechuje się swoją przekładnią napięciową. Oprócz już określonych przekładni:

w układach Dy przekładnia napięciowa jest równa

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{1}{\sqrt{3}} n_{12}; \quad (2.48)$$

w układach Dz przekładnia napięciowa jest równa

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{2}{3} n_{12}; \quad (2.49)$$

dla układów Dd, tak samo jak Yy

$$K = \frac{U_1}{U_2} = n_{12}. \quad (2.50)$$

2.15. Trzecia harmoniczna strumienia w transformatorach trójfazowych

W przypadku transformatorów trójfazowych kształt przebiegu prądu magnesującego i skutki jego przepływu zależą od typu rdzenia transformatora oraz układu połączeń uzwojeń. Jeżeli uzwojenie pierwotne połączone jest w gwiazdę z wyprowadzonym punktem zerowym, to przebieg prądu zawiera harmoniczne nieparzyste. Cechą wyróżniającą tych harmonicznych jest to, że jej prądy we wszystkich uzwojeniach fazowych są równe i zgodnie skierowane, zatem np. dopływają przewodami fazowymi, a odpływają przewodem zerowym. Przez przewód zerowy przepływa suma prądów trzeciej harmonicznej oraz jej nieparzystych krotności.

Przy połączeniu uzwojenia pierwotnego w gwiazdę bez przewodu zerowego, prądy trzeciej (oraz 9, 15, ...) harmonicznej nie mogą dopłynąć ze źródła. Z tego powodu strumień zawiera trzecią harmoniczną. W uzwojeniach indukowane jest zatem napięcie tej harmonicznej. Na rys. 2.27 przedstawiono sposób określenia fazowych wartości napięć.

Warto zauważyć, że w tym przypadku bez względu na odkształcenie napięcia fazowego napięcia międzyprzewodowe nie ulegną zmianie.

Jeżeli uzwojenie pierwotne połączone jest w trójkąt to ze źródła napięcia nie mogą dopłynąć prądy trzeciej harmonicznej. W rdzeniu wystąpi trzecia harmoniczna strumienia - w uzwojeniach każdej z faz zaindukowane zostanie napięcie trzeciej harmonicznej. Z istoty połączenia tego uzwojenia wynika, że pod wpływem zaindukowanych napięć w obrębie trójkąta popłynie prąd trzeciej harmonicznej o takim zwrocie, by przeciwdziałać przyczynie - strumieniowi trzeciej harmonicznej powstającemu w uzwojeniu pierwotnym. Strumień ten zostanie praktycznie skompensowany. Podobne zjawisko ma miejsce w przypadku, gdy strona pierwotna połączona jest w gwiazdę bez przewodu zerowego, a strona wtórna w trójkąt.

W przypadku połączenia uzwojenia wtórnego w zygzak bez względu na układ połączeń strony pierwotnej, napięcia trzeciej harmonicznej w każdej połowce uzwojeń wtórnych skierowane są jednocześnie w tę samą stronę (por. rys. 2.26). Nie występują więc w napięciu fazowym, gdyż w uzwojeniach połówkowych są skierowane przeciwnie i odejmują się.

Strumienie trzeciej harmonicznej w każdej kolumnie transformatora (o rdzeniu trójkolumnowym) są ze sobą w fazie. Droga tego strumienia przebiegać musi zatem przez kolumnę do jarzma i dalej przez olej do kadzi (rys. 2.28). Wskutek przepływania strumienia przez kadź, występują w niej dodatkowe straty na prądy wirowe i histerezę.

Skutki magnesowania (występowania wyższych harmonicznych nieparzystych) zależą również od tego, czy rdzeń transformatora jest symetryczny (transformator grupowy, pięciokolumnowy), czy też niesymetryczny (trójkolumnowy), gdyż od budowy rdzenia zależy przewodność magnetyczna. W tym drugim przypadku z istoty nierównych dróg magnetycznych strumienia w poszczególnych fazach wynikają także różne wartości prądu magnesującego w kolumnie środkowej i skrajnych.

2.16. Praca równoległa transformatorów

W celu przesyłu większej mocy oraz zwiększenia niezawodności zasilania, transformatory łączy się do pracy równoległej. Jest to możliwe i najkorzystniejsze wtedy, jeżeli po włączeniu do pracy równoległej:

- przy braku obciążenia nie płyną prądy po stronie wtórnej,
- transformatory obciążają się proporcjonalnie do mocy znamionowych,
- prądy obciążenia transformatorów są ze sobą w fazie.

Powyższe cechy idealnej pracy równoległej można uzyskać jeżeli transformatory spełniają następujące warunki pracy równoległej:

- przekładnie łączonych transformatorów powinny być jednakowe z tolerancją $\pm 0,5\%$ (oczywiste jest, że znamionowe napięcia transformatorów powinny sobie odpowiadać. Włączenie do pracy równoległej transformatora o identycznej przekładni, ale o innych napięciach znamionowych jest równoznaczne ze zniszczeniem jednego z nich);
- napięcia zwarcia łączonych transformatorów powinny być jednakowe z tolerancją $\pm 10\%$;
- transformatory powinny mieć te same stosunki parametrów zwarcia, tzn. reaktancji do rezystancji X_z/R_z (warunek ten podawany jest najczęściej jako wymóg stosunku znamionowych mocy łączonych transformatorów - nie powinien być on większy niż 1:3. We współczesnych transformatorach włączenie jednostek o stosunku mocy 1:5 nie musi powodować negatywnych skutków);
- łączone transformatory trójfazowe powinny mieć odpowiednie grupy połączeń (w najprostszym przypadku grupy identyczne, czyli zarówno układ połączeń jest jednakowy, jaki i przesunięcia godzinowe);
- kolejność następstwa faz w obu łączonych transformatorach trójfazowych jest taka sama (nie spełnienie tego warunku prowadzi do poważnej awarii wskutek przepływu prądów o bardzo dużych wartościach).

Poniżej rozważono skutki niespełnienia każdego warunku oddzielnie, tzn. założono, że wszystkie pozostałe warunki oprócz rozpatrywanego są spełnione. Schemat ideowy włączenia transformatora do pracy równoległej przedstawiono na rys. 2.29.

Transformator (Tr I) pracuje przetwarzając napięcie U_1 na U_2 . Wyłączniki (W1 i W2) są zamknięte. Włączenie drugiego transformatora (Tr II) do pracy równoległej polega na włączeniu jednego z jego wyłączników, np. W3, a następnie o ile są spełnione warunki pracy równoległej załączenie wyłącznika W4. Jak widać zawsze jedno z napięć na zaciskach obu transformatorów jest jednakowe - przyjęto w rozważaniach, że jest to napięcie pierwotne.

Skutki włączenia do pracy równoległej przy niespełnieniu warunku równych przekładni przedstawiono na rys. 2.30. Na rys. 2.30a przedstawiono wykres wektorowy napięć indukowanych w uzwojeniach wtórnych w stanie jałowym. Po załączeniu wyłącznika W4 (rys. 2.29) napięcia po stronie wtórnej obu transformatorów będą sobie równe, a pod wpływem różnicy potencjałów ΔU popłyną prądy wyrównawcze. Przykład (rys. 2.30b) dotyczy transformatorów o napięciu zwarcia równym 10%. Założono, że przy spełnionych pozostałych warunkach przekładnie różnią się o 5 %, tzn. napięcie strony wtórnej

transformatora II wynosi $U_2^{\text{II}} = U_x$, a transformatora I $U_2^{\text{I}} = 0,95U_x$. Prąd wyrównawczy płynący wyłącznie pomiędzy włączonymi transformatorami wynosi $25 \% I_N$. Wartość prądu wyrównawczego w jednostkach względnych można obliczyć następująco:

$$I_w = \frac{\Delta U}{Z_Z^{\text{I}} + Z_Z^{\text{II}}} = \frac{U_2^{\text{II}} - U_2^{\text{I}}}{Z_Z^{\text{I}} + Z_Z^{\text{II}}} = \frac{0,05}{0,2} = 0,25 \quad (2.51)$$

gdzie: $Z_Z = u_Z$ w jednostkach względnych.

Tak znaczna wartość prądu wyrównawczego jest przyczyną ustalenia bardzo małego dopuszczalnego przedziału niezgodności przekładni włączanych transformatorów. Należy jednak pamiętać, że przy dopuszczalnej tolerancji przekładni w transformatorach o parametrach z powyższego przykładu (rys. 2.30), prąd wyrównawczy wynosi $2,5\% I_N$. Jest więc źródłem dodatkowego nagrzewania się transformatorów bez korzyści eksploatacyjnych.

Jak wynika z rys. 2.30b, jeden z transformatorów stanowi obciążenie drugiego transformatora. Przepływający prąd wyrównawczy powoduje takie spadki napięć na impedancjach zwarciovych, że napięcia na zaciskach wtórnych obu transformatorów są sobie równe.

W przypadku, gdy transformatory mają różne napięcia zwarcia ich wykresy wektorowe, a przede wszystkim spadki napięć na impedancji zwarcia, są różne. Przedstawiono to na rys. 2.31a i b. Po włączeniu do pracy równoległej napięcia na zaciskach wtórnych obu transformatorów są sobie równe (rys. 2.31c). Na zaciskach pierwotnych, napięcia też są sobie równe, zatem przepływający prąd obciążenia musi powodować identyczne spadki napięcia na impedancjach zwarcia transformatorów. Jest to możliwe jedynie wówczas, gdy prądy obciążenia płynące w transformatorach będą różne.

Na rys. 2.31d przedstawiono przypadek, gdy jeden z transformatorów (tr. II) ma napięcie zwarcia równe 10% , natomiast transformator I - 12% . Bardzo wyraźnie widoczne jest, że jeżeli transformator II o mniejszym napięciu zwarcia jest obciążony znamionowo, to transformator I - o większym napięciu zwarcia - obciążony jest prądem ok. $83 \% I_N$. Z zasady równego spadku napięcia na impedancji zwarciowej wynika następująca zależność:

$$u_Z^{\text{I}} k_i^{\text{I}} = u_Z^{\text{II}} k_i^{\text{II}}, \text{ stąd } \frac{u_Z^{\text{I}}}{u_Z^{\text{II}}} = \frac{k_i^{\text{II}}}{k_i^{\text{I}}}, \quad (2.52)$$

gdzie:

$u_Z^{\text{I}}, u_Z^{\text{II}}$ - napięcia zwarcia transformatorów,

k_i^I, k_i^{II} - względna wartość prądu obciążenia transformatorów (2.35).

Ze stosunku (2.52) wynika, że przy dowolnym obciążeniu transformatorów pracujących równolegle ich obciążenia własne zawsze będą odwrotnie proporcjonalne do wartości napięć zwarcia.

Przed włączeniem transformatora do pracy równoległej należy również sprawdzić warunek równości parametrów zwarciovych. Porównać należy dane otrzymane w próbach wyrobu (podane na tabliczce znamionowej lub w karcie prób fabrycznych) korzystając z następujących zależności:

$$R_Z = \frac{P_u}{3 I_N^2}, \quad (2.53)$$

$$Z_Z = \frac{u_Z}{100} \frac{U_N}{\sqrt{3} I_N}, \quad (2.54)$$

$$X_Z = \sqrt{Z_Z^2 - R_Z^2}. \quad (2.55)$$

Na rys. 2.32 przedstawiono skutki niespełnienia warunku równości parametrów zwarciovych, przy spełnieniu pozostałych warunków pracy równoległej. Na rysunku tym nie zostały zachowane proporcje między napięciami i spadkami napięć. Punktem wyjścia analizy takiej pracy transformatorów jest równość spadku napięcia na impedancji zwarciowej. W konsekwencji włączenia ich do pracy równoległej, występuje kąt fazowy pomiędzy prądami płynącymi przez te transformatory. Prąd wypadkowy jest mniejszy od sumy algebraicznej prądów poszczególnych transformatorów.

Jeden wśród warunków połączenia równoległego transformatorów trójfazowych dotyczy grup połączeń. Technicznie istnieje możliwość połączenia uzwojeń transformatora trójfazowego w 26 grup. Przy założeniu, że transformatory przeznaczone do pracy równoległej mają: jednakowe przekładnie, jednakowe napięcia znamionowe i zwarcia oraz jednakowe stosunki parametrów zwarcia X_Z/R_Z , praca równoległa możliwa jest tylko wówczas, gdy napięcia pomiędzy parami zacisków strony wtórnej każdego z transformatorów przyłączonych do tej samej pary szyn wtórnych są ze sobą w fazie. Jeżeli warunek nie zostanie spełniony, to między parami uzwojeń będą płynęły prądy wyrównawcze o znacznych wartościach.

Na rys. 2.33, na przykładzie włączenia do pracy równoległej transformatorów połączonych w grupę Yd5 i Yd7, przedstawiono skutki takiego włączenia jeżeli wstępnie

połączono zaciski 2A obu transformatorów. Pomiędzy zaciskami 2B oraz 2C transformatorów występuje różnica potencjału ΔU równa napięciu międzyprzewodowemu. Włączenie pozostałych faz spowodowałoby przepływ prądów wyrównawczych, których wartości można obliczyć na podstawie wzoru

$$I_w = \frac{\Delta U}{Z_Z^I + Z_Z^{II}} = \frac{U_2}{Z_Z^I + Z_Z^{II}}. \quad (2.56)$$

W przypadku niektórych grup połączeń, warunek włączenia do pracy równoległej można spełnić w przypadku różnych godzin przesunięcia fazowego połączeń uzwojeń wewnątrz transformatora, przez odpowiednią zmianę zacisków przyłączanych do szyn sieci. Niektóre układy połączeń w ogóle nie mogą być włączone do pracy równoległej ze sobą, np. Yy i Dy.

2.17. Obciążenie niesymetryczne transformatorów trójfazowych

Każda z grup połączeń transformatorów trójfazowych ma pewne specyficzne cechy przy obciążeniu niesymetrycznym. Jest to jedna z przyczyn różnego zakresu zastosowania tych grup. Właściwości układów połączeń przy niesymetrycznym obciążeniu łatwo jest rozważyć przy zastosowaniu metody składowych symetrycznych. Podstawowe cechy tych składowych przy rozpatrywaniu transformatorów trójfazowych są następujące:

- układy zgodny i przeciwny stanowią normalne układy trójfazowe, występują zatem zawsze jednocześnie w uzwojeniach obu stron bez względu na grupę połączeń,
- impedancje dla składowej zgodnej i przeciwnej są równe impedancji zwarcia,
- składowa zerowa prądu występuje tylko wówczas, gdy co najmniej jedno z uzwojeń ma wyprowadzony punkt zerowy i gdy przez przewód zerowy przepływa prąd,
- wartość składowej zerowej jest równa 1/3 wartości prądu przepływającego przez przewód zerowy,
- składowa zerowa prądu występująca w jednym uzwojeniu, może mieć swój odpowiednik w drugim uzwojeniu jedynie wówczas, gdy to drugie uzwojenie połączone jest w trójkąt lub gwiazdę z przewodem zerowym,
- wartość impedancji dla składowej zerowej zależy od typu rdzenia i układu połączeń transformatora.

Układ składowych symetrycznych przedstawiono na rys. 2.34 na przykładzie jednofazowego obciążenia układu trójfazowego. Obciążenie niesymetryczne określa się jako

sumę wektorową składowych symetrycznych w poszczególnych fazach. Prądy składowe kolejności zerowej mogą przepływać przez uzwojenia pierwotne nie w każdym przypadku układu połączeń transformatora. Z tego powodu w przypadku niektórych układów połączeń transformatorów trójfazowych nie może nastąpić całkowita kompensacja przepływu spowodowanego obciążeniem.

Skutki nieskompensowanego przepływu składowej zerowej zależą od konstrukcji rdzenia, gdyż ma ona decydujący wpływ na impedancję dla składowej zerowej Z_0 . Przyjmuje się, że transformatorów o rdzeniu symetrycznym nie wolno obciążać niesymetrycznie, jeżeli w transformatorze nie ma uzwojenia kompensacyjnego. W transformatorze trójkolumnowym droga strumienia składowej zerowej jest taka sama jak pokazano na rys. 2.28. W przypadku grupy połączeń Y_{yn} ograniczona jest wartość prądu, który może przepływać przez przewód zerowy.

Jeżeli po stronie pierwotnej uzwojenie połączone jest w trójkąt, to kompensacja przepływu zerowego następuje w jego obrębie. Transformator o grupie D_{yn} można obciążyć dowolnie niesymetrycznie. W grupie Y_{zn} , kompensacja przepływu zerowego następuje w każdej kolumnie, gdyż przepływ zerowy w uzwojeniach połówkowych na kolumnie skierowany jest przeciwnie.

Należy pamiętać o tym, że trzecia harmoniczna prądu ($f_3 = 3f_1$) przepływa (jeżeli ma warunki) po włączeniu transformatora do sieci i wynika z procesu magnesowania rdzenia, natomiast składowa zerowa ($f_0 = f_1$) powstać może jedynie wskutek niesymetrii obciążenia. Odkształcenia napięć fazowych spowodowane nieskompensowanym przepływem składowej zerowej mają inny jakościowo charakter niż odkształcenia spowodowane trzecią harmoniczną, gdyż częstotliwości napięcia sieci i składowej zerowej są takie same.

W tabeli poniżej przedstawiono zalety i zakres zastosowań transformatorów o stosowanych w elektroenergetyce układach połączeń.

Tabela 2.1.

Zalety i zastosowania transformatorów trójfazowych ze względu na ich układ połączeń

Lp.	Układ	Zalety	Zastosowania
1	Yy	Układ najtańszy. Napięcia fazowe i międzyprzewodowe	Transformatory przesyłowe najwyższych napięć, zawsze z uzwojeniem wyrównawczym.
2	Dy	Nadaje się do obciążeń dowolnie niesymetrycznych. Napięcia fazowe i międzyprzewodowe	Transformatory obniżające wysokich napięć oraz transformatory rozdzielcze niskiego napięcia.

3	Yd	Nadaje się do obciążeń niesymetrycznych.	Transformatory blokowe oraz obniżające najwyższe napięcia na wysokie napięcia.
4	Yz	Nadaje się do obciążeń dowolnie niesymetrycznych. Napięcia fazowe i międzyprzewodowe	Transformatory rozdzielcze niskiego napięcia do mocy 260 kVA.

2.18. Autotransformatory

Autotransformator jednofazowy ma tylko jedno uzwojenie umieszczone na rdzeniu magnetycznym. Jest to podstawowa różnica w stosunku do zwykłego transformatora dwuuzwojeniowego. Obwód wtórny jest zatem połączony galwanicznie z obwodem pierwotnym.

Jeżeli rozważany autotransformator obniża napięcie, to do zacisków 1.1 - 2 (rys. 2.35) przyłączone jest napięcie pierwotne (sieci) U_1 . Natomiast napięcie wyjściowe (obniżone) otrzymuje się między zaciskami jednego końca uzwojenia 2 i zaczepem 2.1. Część uzwojenia pomiędzy zaciskami 1.1 i 2.1 nazywa się uzwojeniem szeregowym. Przepływa przez nie prąd pierwotny I_1 .

Należy zwrócić uwagę na różnice między autotransformatorem laboratoryjnym a energetycznym. Zadaniem autotransformatora laboratoryjnego jest w miarę płynna zmiana napięcia na wyjściu. Z tego powodu całe uzwojenie wymiarowane jest na znamionowy prąd pierwotny, ponieważ całe uzwojenie może spełniać rolę uzwojenia szeregowego. Autotransformator energetyczny jest przystosowany do zmiany poziomu napięcia przy stałej przekładni, ewentualna regulacja napięcia odbywa się w niewielkim zakresie za pomocą np. podobciążeniowego przełącznika zaczepów.

Moc uzwojenia szeregowego (zaciski 1.1 - 2.1) autotransformatora jest równa

$$S_{sz} = (U_1 - U_2)I_1 = (U_1 - U_2)I_2 \frac{U_2}{U_1} = U_2 I_2 \frac{U_1 - U_2}{U_1}. \quad (2.57)$$

Uzwojenie szeregowe wykonane jest z przewodu o takim samym przekroju jak uzwojenie pierwotne transformatora dwuuzwojeniowego tej samej mocy, lecz liczba zwojów szeregowego uzwojenia autotransformatora jest mniejsza.

Część uzwojenia pomiędzy zaciskami 2.1 i 2 (rys. 2.35) nazywa się uzwojeniem wspólnym. Przy pominięciu prądu stanu jałowego przez uzwojenie to przepływa prąd

$$I_3 = I_2 - I_1. \quad (2.58)$$

Moc uzwojenia wspólnego (zaciski 2.1 - 2) jest równa

$$S_{ws} = U_2 I_3 = U_2 I_2 \frac{U_1 - U_2}{U_1}. \quad (2.59)$$

Z porównania (2.57) i (2.59) wynika, że przy równości mocy pierwotnej i wtórnej, moc każdej z dwóch części uzwojenia autotransformatora jest jednakowa i mniejsza od mocy uzwojeń transformatora dwuuzwojeniowego

$$\frac{U_1 - U_2}{U_1} = r \text{ razy}. \quad (2.60)$$

Współczynnik r jest współczynnikiem redukcji.

Z równania (2.58) wynika bardzo istotny wniosek - uzwojenie wspólne może być wykonane przewodem o przekroju mniejszym od przekroju uzwojenia szeregowego w stosunku I_3/I_2 . Autotransformator jest mniejszy od transformatora dwuuzwojeniowego o takiej samej mocy znamionowej, gdyż na jego zbudowanie zużywa się znacznie mniejszej ilości miedzi. Przekrój kolumny pozostaje taki sam, ale mniejsza ilość miedzi mieści się w oknie o mniejszej powierzchni. Z tego powodu ciężar zużytej blachy jest również mniejszy w autotransformatorze.

Wadami autotransformatora są:

- bezpośrednie połączenie uzwojeń obu stron,
- małe napięcie zwarcia.

W elektroenergetyce autotransformatory stosowane są jako autotransformatory sprzęgające lub jako regulacyjne.

Autotransformatory o dużej mocy przechodniej ($S_p = I_1 U_1 = U_2 I_2$) przeznaczone są do łączenia ze sobą sieci o różnych bardzo wysokich napięciach. Tak zastosowane autotransformatory nazywa się często transformatorami sprzęgłowymi. Najczęściej stosowane są przekładnie 220/110 lub 400/220 kV/kV, produkowane są również autotransformatory sprzęgające o przekładni 400/110 kV/kV. Punkt zerowy sieci o takich napięciach znamionowych jest z zasady uziemiony, nie zachodzi więc niebezpieczeństwo przerzucenia się wysokiego napięcia na stronę dolnego napięcia przy doziemnym zwarciu strony GN.

W produkowanych autotransformatorach zwiększenie napięcia zwarcia (czyli obniżenie możliwych wartości prądu zwarciovego) otrzymuje się przez zastosowanie konstrukcji zwiększających odległości między uzwojeniami. Z zasady autotransformatory sprzęgające wyposażone są w dodatkowe uzwojenie połączone w trójkąt - uzwojenie wyrównawcze.

Zastosowanie autotransformatora do regulacji napięcia obecnie jest wyjątkowo rzadkie. Może się jednak zdarzyć, że przekroczenie skrajni kolejowej (brak możliwości transportu gotowego urządzenia) w transformatorze o bardzo dużej mocy, spowoduje konieczność wydzielenia części służącej regulacji napięcia (uzwojenie regulacyjne, podobciążeniowy przełącznik zaczepów) jako oddzielnego autotransformatora o znamionowej przekładni równej jeden.

Wskutek mniejszego ciężaru użytych materiałów czynnych sprawność autotransformatora jest większa niż transformatora o tej samej mocy. Mniejsze napięcie zwarcia powoduje, że zmienność napięcia jest również mniejsza.

2.19. Transformator trójuzwojeniowy

Produkowane są transformatory o trzech uzwojeniach na każdej kolumnie, w których trzecie uzwojenie połączone w trójkąt traktowane jest jako uzwojenie wyrównawcze - zapobiegające skutkom występowania nieskompensowanego przepływu składowej zerowej przy obciążeniu niesymetrycznym oraz do wytworzenia trzeciej harmonicznej prądu magnesującego. Jeżeli celem umieszczenia trzeciego uzwojenia są funkcje wyrównawcze, to uzwojenie takie wyprowadzone jest jedynie przez dwa izolatory przepustowe, do których przyłączony jest przekładnik prądowy. Kontroluje się w ten sposób wartość i charakter prądu wyrównawczego.

Wytwarzane są również transformatory trójuzwojeniowe do sprzęgania sieci o trzech różnych napięciach. Stosowane układy połączeń to: $Yy0d11$, $Yd11d11$ oraz $Yd11y0$. Najczęściej uzwojenia umieszczane są współśrodkowo (rys. 2.36). Z powodu różnych dróg strumienia rozproszenia każdej z cewek, reaktancje rozproszenia są również zróżnicowane. Jest to wada, gdyż na pracę transformatora (jego charakterystyki) wpływ ma wybór uzwojenia zasilanego (pierwotnego), tzn. czy jest to uzwojenie skrajne, czy środkowe. Jeżeli uzwojeniem pierwotnym jest jedno z uzwojeń skrajnych (zewewnętrzne lub przykolumnowe), to wpływ obciążenia uzwojenia środkowego na drugie z uzwojeń skrajnych jest znaczny. W celu wyznaczenia parametrów zwarciovych konieczne jest przeprowadzenie prób zwarcia dla każdej pary uzwojeń oddzielnie. Jeżeli moce znamionowe uzwojeń są zróżnicowane, to umownie otrzymane napięcia zwarcia przelicza się do poziomu największej mocy znamionowej.

Prawo przepływu w transformatorze trójuzwojeniowym ma postać (pominięto prąd stanu jałowego)

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0. \quad (2. 61)$$

Praca równoległa dwóch transformatorów trójuzwojeniowych możliwa jest przy jednakowym podziale mocy znamionowych na poszczególne uzwojenia obu transformatorów, jednakowych napięciach zwarcia poszczególnych par uzwojeń oraz przy spełnieniu pozostałych warunków pracy równoległej podanych dla trójfazowych transformatorów dwuuzwojeniowych.

Przy pracy równoległej transformatora trójuzwojeniowego z transformatorem dwuuzwojeniowym, w przypadku pracy trzech uzwojeń, warunki pracy równoległej należy przeanalizować w każdym przypadku oddzielnie. Podstawą takiej analizy jest pobór mocy z szyn poszczególnych napięć oraz mocy poszczególnych uzwojeń transformatorów.

W celu ograniczenia prądów i mocy zwarciowej stosowany bywa transformator z dzielonym uzwojeniem napięcia wtórnego. Można traktować taki transformator jako jeden z przypadków zastosowania transformatora trójuzwojeniowego. Parametry transformatora z dzielonym uzwojeniem podawane są również jako wielkości między każdą parą uzwojeń. Takie transformatory służą do zasilania dużych obiektów przemysłowych, np. transformator o mocy 40/20/20 MVA o napięciu górnym 115 kV, ma napięcia zwarcia 18/18/34 %. Napięcie zwarcia 34% występuje pomiędzy uzwojeniami DN. W układzie Yd11d11 otrzymuje się w ten sposób zmniejszony wpływ obu obwodów DN na siebie. Transformatory z dzielonym uzwojeniem, ale o grupie połączeń Yy0y0 stosowane są również do zasilania potrzeb własnych w elektrowni. Zasilanie (GN) przyłączone jest do zacisków generatora przed transformatorem blokowym.