

## TRANSFORMATOR TRÓJFAZOWY

W energetyce często używa się rozwiązań polegających na wykorzystaniu kilku transformatorów energetycznych pracujących równolegle. Wiąże się z tym kilka ważnych warunków zapewniających poprawną pracę:

- 1) Przy nieobciążonej stronie wtórnej, w uzwojeniach transformatorów nie płyną żadne prądy poza prądami jałowymi.
- 2) Ze wzrostem prądu obciążenia transformatory obciążają się równomiernie i osiągają swe prądy znamionowe jednocześnie.
- 3) Prądy transformatorów są ze sobą w fazie (prąd obciążenia jest równy sumie algebraicznej prądów transformatorów).

Warunek 1 jest spełniony, gdy przekładnie transformatorów są sobie równe oraz gdy przesunięcia godzinowe są identyczne co jest równoważne warunkowi żeby wartości chwilowe odpowiednich napięć były w każdej chwili sobie równe. Nierówność przekładni pociąga za sobą istnienie prądów wyrównawczych, ograniczonych tylko impedancją transformatorów. Dopuszcza się odchyłkę przekładni, z tym, że nie może być ona większa niż 0.5%.

Warunek 2 będzie spełniony, gdy wartości względne prądów względem ich prądów znamionowych są sobie równe:

$$\frac{I^{(1)}}{I_n^{(1)}} = \frac{I^{(2)}}{I_n^{(2)}} = \frac{I^{(3)}}{I_n^{(3)}} = \dots \quad (1)$$

Dla uproszczonego schematu zastępczego warunek ten będzie równoważny:

$$\underline{I}^{(1)} \underline{Z}_z^{(1)} = \underline{I}^{(2)} \underline{Z}_z^{(2)} = \underline{I}^{(3)} \underline{Z}_z^{(3)} = \dots \quad (2)$$

Biorąc pod uwagę, że napięcie zwarcia jest równe:

$$u_{z\%}^{(i)} = \frac{I_n^{(i)} Z_z^{(i)}}{U_n} \quad (3)$$

Otrzymamy dla wartości bezwzględnych:

$$\frac{I^{(1)}}{I_n^{(1)}} u_z^{(1)} = \frac{I^{(2)}}{I_n^{(2)}} u_z^{(2)} = \frac{I^{(3)}}{I_n^{(3)}} u_z^{(3)} = \dots \quad (4)$$

Warunek 2 będzie zatem spełniony, gdy napięcia zwarcia transformatorów przeznaczonych do pracy równoległej będą jednakowe. Przepisy polskie dopuszczają odchyłkę  $\pm 10\%$  napięcia zwarcia.

Warunek 3 będzie spełniony, gdy pokrywają się trójkąty zwarcia poszczególnych transformatorów, w praktyce spełnione jedynie dla nieznacznych różnic mocy znamionowych transformatorów, więc stosunek mocy znamionowych nie może przekraczać proporcji 1:3.

W praktyce elektroenergetyki dążymy do symetrycznej pracy w układach trójfazowych. Niestety, symetryczne obciążenia transformatorów nie zawsze jest możliwe do uzyskania, stąd ważnym jest umiejętność analizy ich pracy przy niesymetrycznym obciążeniu. Od wielu lat do analizy pracy w stanach ustalonych używana jest metoda składowych symetrycznych. Istota tej metody polega na tym, że każdy trójfazowy układ liniowy napięć, prądów czy strumieni skojarzonych, można matematycznie przekształcić do trzech składników symetrycznych nazywanych składową zgodną, przeciwną i zerową. Składowa zgodna wektorów jest składnikiem w którym wielkości w fazach UVW te są przesunięte względem siebie o kąt  $120^\circ$  w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara. Dla składowej przeciwnej wielkości w poszczególnych fazach są przesunięte także o kąt  $120^\circ$  lecz w kierunku przeciwnym. Składowa zerowa to składnik którego wartość, kierunek i zwrot jest w każdej fazie identyczny. Matematycznie można dokonać przeliczenia wielkości zespolonych w układzie trójfazowym (np. prądów  $\underline{I}_U$ ,  $\underline{I}_V$ ,  $\underline{I}_W$ ), na poszczególne składowe symetryczne (zgodną  $\underline{I}_1$ , przeciwną  $\underline{I}_2$  i zerową  $\underline{I}_0$ ) wg. zależności:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_U \\ \underline{I}_V \\ \underline{I}_W \end{bmatrix} \quad (5)$$

Po analizie obwodu niezależnie dla każdej ze składowych możemy przeliczyć wielkości rzeczywiste:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_U \\ \underline{I}_V \\ \underline{I}_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Gdzie:

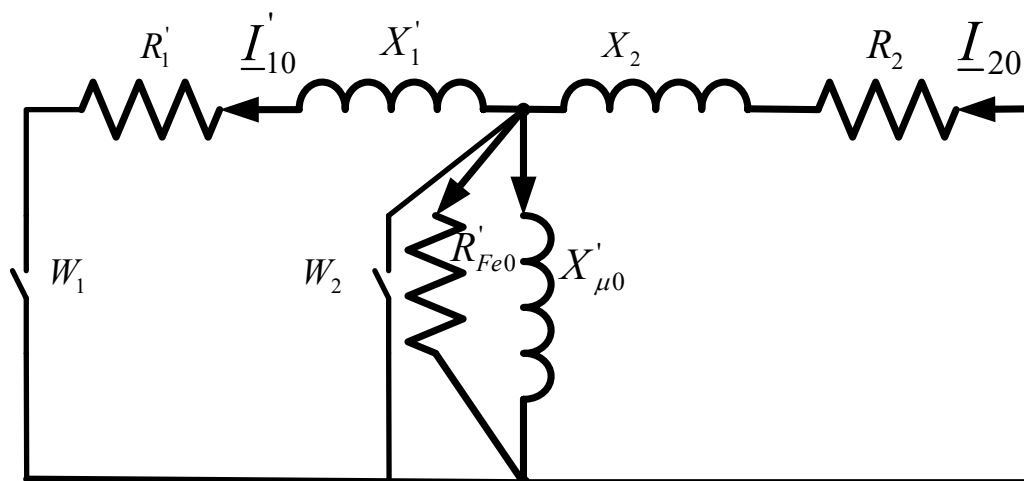
$$a = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (7)$$

$$a^2 = e^{j4\pi/3} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (8)$$

$$a + a^2 = -1 \quad (9)$$

$$1 + a + a^2 = 0 \quad (10)$$

Dla składowej zgodnej i przeciwnej schemat zastępczy transformatora jest identyczny. Wyróżnić należy schemat zastępczy dla składowej zerowej. Jego postać oraz wartość jego parametrów zależy od grupy połączeń transformatora. Składowa zerowa może płynąć jedynie wówczas, gdy w układzie połączeń wyprowadzono przewód zerowy. Składowa zerowa może także pojawić się wewnątrz trójkąta i występuje tam tylko w prądach fazowych (zamyka się wewnątrz trójkąta). Zachowanie się transformatora dla tej składowej zależy jest od układu połączeń oraz od budowy rdzenia transformatora.



Rys. 1 Schemat zastępczy transformatora dla składowej zerowej.

Schemat zastępczy dla składowej zerowej możemy pokazać na Rys. 1. Wartości parametrów zostały sprowadzone tu do strony wtórnej. Rezystancje uzwojeń oraz reaktancje rozproszenia są tu identyczne jak dla składowej zgodnej i przeciwnej. Wyłączniki  $W_1$  i  $W_2$  są załączone w zależności od grupy połączeń. Wyłącznik  $W_1$  jest włączony w przypadku, gdy po stronie pierwotnej uzwojenia są połączone w trójkąt. Wyłącznik  $W_2$  jest włączony dla zygzaka po stronie wtórnej (brak strumienia składowej zerowej). Wartość rezystancji związanej ze stratami w żelazie jest związana z faktem, że przy istnieniu strumienia składowej zerowej pole magnetyczne obejmuje swoim zasięgiem m.in. każdy transformator, w której z uwagi na fakt że jest to lity materiał występują duże straty. Istotnym

problemem, który może spowodować problemy w praktyce jest możliwość wzrostu napięcia po w fazach mniej obciążonych, stąd przy niesymetrii obciążenia najlepszym rozwiązaniem jest dążność do minimalizacji impedancji dla składowej zerowej prądu po stronie wtórnej. Najmniejsza wartość impedancji jest dla połączenia w zygzak.

W układach połączeń z wyprowadzonym punktem zerowym po stronie wtórnej ( $Y_{yn}$ ,  $Y_z$ ) prądy składowej zerowej płyną jedynie po stronie wtórnej, przy czym prądy te w rdzeniu strumień składowej zerowej (tylko przy połączeniu w gwiazdę), który zamyka się w transformatorach 3-kolumnowych przez powietrze (oraz każdą i elementy konstrukcyjne zwiększając straty transformatora), natomiast w transformatorach 5-kolumnowych przez kolumny skrajne. Dla układów połączonych po stronie pierwotnej w trójkąt ( $D_{y0}$ ) strumień składowej zerowej wytwarza w trójkącie napięcia, które powodują przepływ prądu wewnątrz trójkąta, wyłumiając w ten sposób strumień tej składowej. Daje to możliwość pracy takiego układu dla niewielkich obciążeń niesymetrycznych. W dużych transformatorach  $Y_{y0}$  – dodatkowo nawija się uzwojenie połączone w trójkąt bez wyprowadzania jego końcówek na zewnątrz jedynie po to, by wyłumić składową zerową strumienia.

W połączeniach strony wtórnej w zygzak strumienie składowej zerowej znoszą się, co umożliwia pracę w pełnym zakresie niesymetrycznego obciążenia. Jako przykład analizy obciążenia niesymetrycznego rozważmy stan obciążenia jednofazowego w układzie  $Y_{yn}$ . Pomińmy w schemacie zastępczym prąd stanu jałowego. Prąd po stronie wtórnej występuje tylko w fazie U, więc  $I_U=I$ ,  $I_V=I_W=0$ .

Składowe symetryczne prądów po stronie wtórnej dla tego przypadku są równe:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{w1} \\ \underline{I}_{w2} \\ \underline{I}_{w0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Składowa zgodna, przeciwna i zerowa są sobie równe:

$$\underline{I}_{w1} = \underline{I}_{w2} = \underline{I}_{w0} = \frac{1}{3} \underline{I} \quad (12)$$

Odpowiednie wartości składowych po stronie pierwotnej są równe:

$$\underline{I}_{p1} = \frac{\underline{I}_{w1}}{k} = \frac{\underline{I}}{3k} \quad (13)$$

$$\underline{I}_{p2} = \frac{\underline{I}_{w2}}{k} = \frac{\underline{I}}{3k} \quad (14)$$

Prąd składowej zerowej po stronie pierwotnej nie płynie (brak przewodu neutralnego):

$$\underline{I}_p^{(0)} = 0 \quad (15)$$

Odpowiednie prądy fazowe po stronie pierwotnej są równe:

$$\underline{I}_{pU} = \underline{I}_{p0} + \underline{I}_{p1} + \underline{I}_{p2} = \frac{\underline{I}}{3k} + \frac{\underline{I}}{3k} = \frac{2}{3} \frac{1}{\mathcal{G}} \underline{I} \quad (16)$$

$$\underline{I}_{pV} = \underline{I}_{p0} + a^2 \underline{I}_{p1} + a \underline{I}_{p2} = \frac{\underline{I}}{3k} (a^2 + a) = -\frac{\underline{I}}{3k} \quad (17)$$

$$\underline{I}_{pW} = \underline{I}_{p0} + a \underline{I}_{p1} + a^2 \underline{I}_{p2} = \frac{\underline{I}}{3k} (a^2 + a) = -\frac{\underline{I}}{3k} \quad (18)$$

W energetyce występuje wiele rodzajów pracy transformatorów:

- Transformatory podwyższające napięcie ( blokowe- moc rzędu setek MVA, przy wysokim napięciu wtórnym do 400kV).
- Transformatory obniżające napięcie (zwykle dwustopniowo: np. 220/15kV (sieciowe - moce rzędu dziesiątek i setek MVA); 15/0.4 kV – rozdzielcze 63..1600kVA).
- Transformatory przekazujące energię w kierunku zależnym od pracy układu energetycznego (np. sprzęgające – dołączenia sieci o różnych wartościach wysokich napięć np. 220/400kV).

Jednym z parametrów opisujących transformator jest informacja o rodzaju zastosowanej izolacji. O jakości decyduje tu tzw. klasa ciepłoodporności izolacji dla której w starszych normach definiowano dopuszczalne przyrosty temperatur względem znamionowej temperatury otoczenia (40°C w Europie) i oznaczano:

Klasa A - 60°

Klasa E - 65°÷75°

Klasa B - 70°÷80°

Klasa F - 85°÷100°

Klasa H - 105°÷125°

Aktualne normy podają maksymalne dopuszczalne wartości temperatur w najcieplejszym miejscu transformatora:

Klasa A - 105°

Klasa B - 130°

Klasa F - 155°

Klasa H - 180°

Klasa N - 200°

Klasa R - 220°

Klasa S - 240°

Klasa C > 240°

Poza rdzeniem i uzwojeniami transformatory są wyposażone w wiele urządzeń wspomagających ich eksploatację. Są o np.:

- konserwator oleju – ograniczenie styku oleju z powietrzem (w starszych konstrukcjach),
- radiatory,
- wentylatory,
- chłodnice powietrzne i wodne,
- rura wybuchowa (>2MVA) –zawór bezpieczeństwa, który ma zapobiegać możliwości rozsadzenia kadzi wskutek zbyt dużego ciśnienia wewnętrznego,
- przekaźnik gazowo – podmuchowy (w starszych konstrukcjach przekaźnik Buchholtza z 1921r),
- wskaźniki temperatury i poziomu oleju,
- przekładniki prądowe i napięciowe,
- szafy sterownicze,
- przepusty transformatorowe,
- zawory,
- układy pomiarowo – diagnostyczne,
- itp...

W energetyce istotne znaczenie ma parametr związany z oceną jakości urządzeń elektrycznych, jest to sprawność definiowana jako iloraz wartości mocy czynnej oddawanej przez transformator do mocy pobranej:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_j + \Delta P_{obc}} \quad (19)$$

Występuje to moc po stronie wtórnej równa:

$$P_2 = 3U_2 I_2 \cos \varphi_2 \quad (20)$$

Oraz straty jałowe  $\Delta P_j$  i obciążeniowe  $\Delta P_{obc}$ . Straty jałowe są to głównie straty w żelazie, natomiast straty obciążeniowe to straty mocy na rezystancji zwarcia:

$$\Delta P_{obc} = 3I_1^2 R_z = 3I_2^2 \frac{1}{g^2} R_z \quad (21)$$

$$\eta = \frac{3U_2 I_2 \cos \varphi_2}{3U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \Delta P_j + 3I_2^2 \frac{1}{g^2} R_z} \quad (22)$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\Delta P_j}{3U_2 I_2 \cos \varphi_2} + \frac{I_2}{U_2 \cos \varphi_2} \frac{1}{g^2} R_z} \quad (23)$$

Przy danej wartości prądu obciążenia  $I_2$  sprawność maleje ze zmniejszaniem się współczynnika mocy strony wtórnej. Przy stałym współczynniku mocy sprawność zależy jedynie od  $I_2$ . Wartość maksymalna sprawności występuje gdy:

$$\frac{d\eta}{dI_2} = 0 \quad (24)$$

$$\frac{d}{dI_2} \left( 1 + \frac{\Delta P_j}{3U_2 I_2 \cos \varphi_2} + \frac{I_2}{U_2 \cos \varphi_2} \frac{1}{g^2} R_z \right) = 0 \quad (25)$$

$$-\frac{\Delta P_j}{3U_2 I_2^2 \cos \varphi_2} + \frac{1}{U_2 \cos \varphi_2} \frac{1}{g^2} R_z = 0 \quad (26)$$

Czyli występuje w sytuacji, gdy starty obciążeniowe są równe stratom jałowym.

$$\Delta P_j = \frac{1}{g^2} R_z m I_2^2 = \Delta P_{obc} \quad (27)$$

W praktyce sprawność definiowana przez moce nie jest najlepszym wskaźnikiem efektywności przetwarzania energii. Znacznie lepszym wskaźnikiem jest tzw. sprawność energetyczna, definiowana jako iloraz odpowiednich energii przetwarzanych w dłuższym okresie czasu (doba, tydzień, miesiąc itd...):

$$\eta_e = \frac{\sum_1^k t_i P_{2i}}{\sum_1^k t_i P_{2i} + \Delta P_j \sum_1^k t_i + \sum_1^k t_i \Delta P_{(obc)i}} \quad (28)$$



