

5.3. STAN DYNAMICZNY

5.3.1. Zwarcie udarowe

Zwarcie udarowe jest to nagłe zwarcie zacisków wtórnych transformatora, do którego zacisków pierwotnych jest doprowadzone napięcie. W stanie zwarcia nasycenie obwodu magnetycznego jest bardzo małe, można więc przyjąć, że wszystkie indukcje miały wartości stałe.

Równania więzów można uzyskać z analizy warunków fizycznych na zaciskach transformatora: przyrost napięcia na zaciskach wtórnych przy zwarcu $\Delta u'_2 = -u'_2$, ponieważ po zwarcu napięcie na zaciskach wtórnych jest równe 0. Dla uproszczenia można rozpatrzeć przypadek zwarcia transformatora przy stałej wartości skutecznej napięcia pierwotnego $U_1 = \text{const}$, czyli $\Delta U_1 = 0$. Tym warunkom fizycznym odpowiadają równania więzów w zapisie operatorowym

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_1(s) &= 0 \\ \Delta U'_2(s) &= -U'_2(s) \end{aligned} \right\} \quad (5.85)$$

Z równań (5.18) i (5.85) otrzymuje się

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_1(s) &= +K'_2(s) \frac{U'_2(s)}{Z_1(s)} \\ \Delta I'_2(s) &= -\frac{U'_2(s)}{Z'_2(s)} \end{aligned} \right\} \quad (5.86)$$

Traktując transformatę przyrostu napięcia wtórnego $\Delta U'_2(s)$ jako transformatę wymuszenia, a transformaty przyrostów prądów $\Delta I_1(s)$ oraz $\Delta I'_2(s)$ jako transformaty odpowiedzi otrzyma się transmitancje operatorowe transformatora dla prądu zwarciovego pierwotnego

$$G_1(s) = \frac{\Delta I_1(s)}{\Delta U'_2(s)} = -K'_2(s) \frac{1}{Z_1(s)} \quad (5.87)$$

a dla prądu zwarciovego wtórnego

$$G_2(s) = \frac{\Delta I'_2(s)}{\Delta U'_2(s)} = \frac{1}{Z'_2(s)} \quad (5.88)$$

Po przyjęciu uproszczonych zależności (5.25) i (5.26) otrzymuje się ze wzorów (5.86) zależności

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_1(s) &= \frac{M'}{L'_2} \cdot \frac{U'_2(s)}{Z_1(s)} \\ \Delta I'_2(s) &= -\frac{U'_2(s)}{Z'_2(s)} \end{aligned} \right\} \quad (5.89)$$

Jeśli przyjąć $M' = L'_2$, czyli zgodnie ze wzorem (5.27) i (5.28) $K_1 = K'_2 = 1$, to

$$Z_1(s) = Z'_2(s) = Z_{z1}(s) = R_{z1} + L_{z1} s \quad (5.90)$$

przy czym

$$L_{z1} = L_{11} + L'_{12}$$

Wtedy także

$$U_2'(s) = U_1(s) \quad (5.91)$$

a transformaty przyrostów prądów zwarciovych wynoszą

$$\Delta I_1(s) = -\Delta I_2'(s) = \frac{U_1(s)}{Z_{z1}(s)} \quad (5.92)$$

Z zależności (5.91) i (5.92) wynika ważny wniosek fizyczny: po przyjęciu omówionych uprzednio uproszczeń prąd zwarciovый udarowy jest identyczny zarówno przy zwarciu zacisków wtórnych transformatora z doprowadzonym uprzednio do zacisków pierwotnych napięciem zasilającym, jak i przy doprowadzeniu napięcia zasilającego do zacisków pierwotnych transformatora ze zwartymi uprzednio zaciskami wtórnymi. Po przyjęciu tych uproszczeń można wprowadzić jedno pojęcie transmitancji operatorowej transformatora

$$G(s) = G_1(s) = -G_2(s) \quad (5.93)$$

Znak „minus”, jaki wystąpi przy $I_2'(s)$ oznacza, że rzeczywisty prąd w obwodzie 2 ma zmieniony kierunek w stosunku do kierunku przyjętego na rys. 5.2 i 5.3. Uproszczoną impedancję operatorową zwarciovą określoną wzorem (5.90) można wyrazić w następującej postaci:

$$Z_{z1}(s) = R_{z1}(1 + T_z s) \quad (5.94)$$

przy czym

$$T_z = \frac{L_{z1}}{R_{z1}} \quad (5.95)$$

oznacza stałą czasową elektromagnetyczną transformatora przy zwarciu. Wtedy transmitancja operatorowa transformatora przy zwarciu

$$G(s) = \frac{1}{R_{z1}} \cdot \frac{1}{1 + T_z s} \quad (5.96)$$

a transformata przyrostu prądu transformatora przy zwarciu

$$\Delta I_1(s) = \frac{1}{R_{z1}} \cdot \frac{1}{1 + T_z s} U_1(s) \quad (5.97)$$

Napięcie doprowadzone do transformatora

$$u_1(t) = U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_z)$$

transformata tego napięcia

$$U_1(s) = U_{1m} \frac{s \sin \alpha_z + \omega \cos \alpha_z}{s^2 + \omega^2} \quad (5.98)$$

a transformata przyrostu prądu

$$\Delta I_1(s) = \frac{1}{R_z} U_{1m} \cdot \frac{1}{1 + T_z s} \cdot \frac{s \sin \alpha_z + \omega \cos \alpha_z}{s^2 + \omega^2} \quad (5.99)$$

przy czym α_z – kąt odpowiadający chwili zwarcia.

Przyrost prądu zwarcowego

$$\Delta i_1(t) = \mathcal{L}^{-1} \Delta I_1(s) \quad (5.100)$$

czyli

$$\Delta i_1(t) = \frac{U_{1m}}{R_{z1}} \left[\frac{\sin(\omega t + \alpha_z) - \omega T_z(\omega t + \alpha_z) + (\omega T_z \cos \alpha_z - \sin \alpha_z) e^{-\frac{t}{T_z}}}{1 + (\omega T_z)^2} \right] \quad (5.101)$$

Po wprowadzeniu oznaczenia

$$\operatorname{tg} \varphi_z = \omega T_z$$

skąd

$$\cos \varphi_z = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega T_z)^2}}; \quad \sin \varphi_z = \frac{\omega T_z}{\sqrt{1 + (\omega T_z)^2}}$$

na podstawie wzoru (5.101) otrzymuje się

$$\Delta i_1(t) = \frac{U_{1m}}{R_{z1}[1 + (\omega T_z)^2]} \left[\sin(\omega t + \alpha_z) \cos \varphi_z - \sin \varphi_z \times \right. \\ \left. \times \cos(\omega t + \alpha_z) - (\sin \alpha_z \cos \varphi_z - \sin \varphi_z \cos \alpha_z) e^{-\frac{t}{T_z}} \right]$$

Po zastosowaniu wzorów trygonometrycznych i po przekształceniach otrzymuje się ostatecznie wyrażenie na przyrost prądu przy zwarcu

$$\Delta i_1(t) = \frac{U_{1m}}{\sqrt{R_{z1}^2 + (\omega L_{z1})^2}} \left[\sin(\omega t + \alpha_z - \varphi_z) - \sin(\alpha_z - \varphi_z) e^{-\frac{t}{T_z}} \right] \quad (5.102)$$

Jeśli zwarcie nastąpiło po uprzednim stanie jałowym transformatora, w którym $I'_{02} = 0$ oraz $I_{01} = I_f \approx 0$, to przyrost prądu $\Delta i_1(t)$ jest prawie równy całkowitemu prądowi zwarcowemu udarowemu $i_{z1}(t)$, który oznacza się i_z . Całkowity prąd zwarcowy udarowy i_z jest sumą składowej okresowej (periodycznej) i_{zp} i składowej nieokresowej (aperiodycznej) i_{za} , czyli

$$i_z = i_{zp} + i_{za} \quad (5.103)$$

przy czym

$$i_{zp} = \frac{U_{1m}}{Z_{z1}} \sin(\omega t + \alpha_z - \varphi_z) \quad (5.104)$$

$$i_{za} = -\frac{U_{1m}}{Z_{z1}} \sin(\alpha_z - \varphi_z) e^{-\frac{t}{T_z}} \quad (5.105)$$

a impedancję oblicza się według zależności $Z_{z1} = \sqrt{R_{z1}^2 + (\omega L_{z1})^2}$.

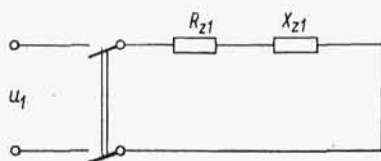
Uproszczony wzór na prąd zwarcowy udarowy może być otrzymany w prostszy sposób z fizycznej analizy zjawiska. Uproszczenia przyjęte przy matematycznym opisie zjawiska odpowiadają pominięciu gałęzi poprzecznej w schemacie zastępczym

transformatora. Schemat załączenia transformatora na zwarcie dla takiego przypadku pokazany jest na rys. 5.15. Równanie napięć dla tego przypadku ma postać

$$u_1 = R_{z1} i_z + \frac{d\Psi_z}{dt} \quad (5.106)$$

albo

$$U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_z) = R_{z1} i_z + L_{z1} \frac{di_z}{dt} \quad (5.107)$$



Rys. 5.15. Załączanie transformatora na zwarcie

Rozwiązaniem równania różniczkowego (5.107) jest wzór (5.103) i odpowiednio wzory (5.104) i (5.105). Analiza stanu zwarcia na podstawie rozwiązania prostego równania różniczkowego (5.107) ma jednak zasadniczą wadę, a mianowicie pozwala na rozpatrywanie zjawiska tylko w sposób przybliżony z narzuconymi z góry uproszczeniami, natomiast omówiona poprzednio metoda analizy matematycznej pozwala także na uzyskanie rozwiązania bez tych uproszczeń. Stosowanie w tej metodzie uproszczeń należy traktować jak ilustrowanie metody szczególnymi przypadkami uproszczonymi.

W chwili początkowej zwarcia (tj. przy $t = 0$) jest $i_{zp}(0) = -i_{za}(0)$ oraz $i_z(0) = i_{zp}(0) + i_{za}(0) = 0$. W chwili zwarcia prąd ma wartość równą zeru i od tej wartości narasta według krzywej ciągłej.

Składowa okresowa prądu zwarciovego udarowego jest równa prądowi zwarciovemu ustalcnemu

$$i_{zp} = i_{zu} \quad (5.108)$$

W dużych transformatorach energetycznych jest zwykle $X_{z1} \gg R_{z1}$ oraz $\varphi_z \approx \pi/2$. Wtedy

$$i_z = i_{zp} + i_{za} = -\frac{U_{1m}}{Z_{z1}} \cos(\omega t + \alpha_z) + \frac{U_{1m}}{Z_{z1}} \cos \alpha_z e^{-\frac{t}{T_z}} \quad (5.109)$$

Składowa nieokresowa jest tłumiona wykładniczo ze stałą czasową T_z . Wartość początkowa składowej nieokresowej

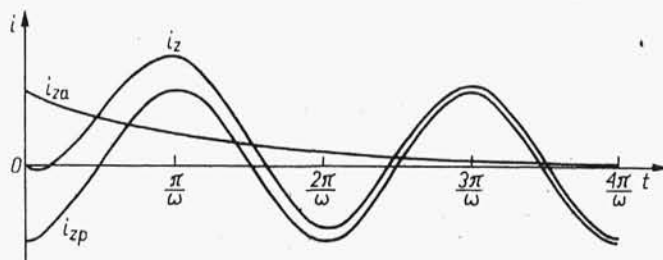
$$i_{za}(0) = \frac{U_{1m}}{Z_{z1}} \cos \alpha_z \quad (5.110)$$

Największą wartość początkową składowa nieokresowa uzyskuje przy $\cos \alpha_z = 1$, $\alpha_z = 0$. Wtedy wartość chwilowa napięcia na początku zwarcia (przy $t = 0$)

$$u_1(t) = U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_z) = 0 \quad (5.111)$$

Jeśli $\alpha_z = 0$, to prąd zwarciový udarowy jest określony wzorem

$$i_z = i_{zp} + i_{za} = -\frac{U_{1m}}{Z_{z1}} \cos(\omega t) + \frac{U_{1m}}{Z_{z1}} e^{-\frac{t}{T_z}} \quad (5.112)$$



Rys. 5.16. Prąd zwarciový udarowy transformatora

a przebieg tego prądu przedstawiono na rys. 5.16. Przy takim zwarciu, po czasie $t = T/2 = \pi/\omega$ wartość chwilowa prądu zwarciového udarowego jest największa

$$i_{z \max} = \sqrt{2} I_z \left(1 + e^{-\frac{\pi}{\omega T_z}}\right) \quad (5.113)$$

przy czym wartość skuteczną prądu zwarciového ustalonego

$$I_z = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{U_{1m}}{Z_{z1}} \quad (5.114)$$

Gdyby rezystancja transformatora R_{z1} była równa zero, czyli $T_z = \infty$, składowa nieokresowa miałaby przebieg nie tłumiony. Wtedy

$$i_{z \max} = \sqrt{2} I_z 2 \quad (5.115)$$

W rzeczywistości

$$i_{z \max} = \sqrt{2} I_z k \quad (5.116)$$

przy czym

$$k = 1 + e^{-\frac{\pi}{\omega T_z}} \quad (5.117)$$

W przypadku transformatorów bardzo małych $k = 1,08 \div 1,3$, a w przypadku bardzo dużych $k = 1,7 \div 1,85$. Wartość prądu zwarciového ustalonego jest około 10 razy większa od wartości prądu znamionowego, więc największa wartość prądu udarowego, mogąca teoretycznie dochodzić do dwukrotnej amplitudy prądu zwarciového ustalonego, może dochodzić do prawie dwudziestokrotnej wartości amplitudy prądu znamionowego. Działania dynamiczne tak dużego prądu mogą być przyczyną powstania uszkodzeń mechanicznych transformatora.

W przypadku zwarcia transformatora przy $\alpha_z = \pi/2$, czyli w chwili, kiedy $u_1 = U_{1m}$, składowa nieokresowa prądu zwarciového udarowego nie pojawia się, a całkowity prąd zwarciový udarowy jest równy prądowi zwarciovemu ustalonemu.

5.3.2. Prąd włączania

Prądem włączania transformatora nazywa się prąd płynący w obwodzie pierwotnym przy dołączeniu do napięcia pierwotnych zacisków transformatora z rozwartym obwodem wtórnym. Równaniami więzów są równania

$$\left. \begin{aligned} i_2' &= 0 \\ u_1 &= U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0) \end{aligned} \right\} \quad (5.118)$$

skąd przyrosty w zapisie operatorowym

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_2'(s) &= 0 \\ \Delta U_1'(s) &= \mathcal{L} U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0) \end{aligned} \right\} \quad (5.119)$$

Pierwsze równanie układu (5.1) po uwzględnieniu równań więzów (5.118) i uwzględnieniu zmienności indukcyjności w czasie (a więc zastąpieniu wyrażenia $L \frac{di}{dt}$ wyrażeniem $\frac{d(Li)}{dt}$) przybiera postać

$$U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0) = R_1 i_1 + \frac{d(L_1 i_1)}{dt} \quad (5.120)$$

Rozwiązanie tego równania względem i_1 przy $L_1 = \text{const}$ dałoby wynik analogiczny do rozwiązania równania (5.107), z czego wynikałby błędny wniosek dotyczący wartości maksymalnej prądu włączania, określonej wtedy jako wartość nie większą od dwukrotnej wartości amplitudy ustalonego prądu w stanie jałowym. Spowodowane to jest bardzo dużą zmiennością indukcyjności L_f (będącej składnikiem indukcyjności L_1) ze zmianą indukcji, a więc strumienia i napięcia. Dlatego równanie (5.120) przekształca się do równania dla strumienia w postaci

$$U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0) = \frac{R_1}{L_1} \Psi_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} \quad (5.121)$$

W równaniu (5.121) wielkość $\frac{R_1}{L_1} \Psi_1$, oznaczająca napięcie na rezystancji uzwojenia pierwotnego, jest bardzo mała w porównaniu z wielkością $\frac{d\Psi_1}{dt}$ oznaczającą napięcie indukowane na indukcyjności $L_1 = L_{11} + L_f$. Błąd popełniony przy rozwiązywaniu tego równania względem Ψ_1 przy założeniu $\frac{R_1}{L_1} = \text{const}$ jest więc niewielki. Wprowadzając pojęcie stałej czasowej elektromagnetycznej w stanie jałowym

$$T_0 = \frac{L_1}{R_1} \quad (5.122)$$

z równania (5.120) otrzymuje się

$$U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0) = \frac{1}{T_0} \Psi_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} \quad (5.123)$$

W zapisie operatorowym równanie (5.123) ma postać

$$\Delta \Psi_1(s) = T_0 \frac{1}{1 + T_0 s} \Delta U_1(s) \quad (5.124)$$

Przy traktowaniu przyrostu napięcia pierwotnego za wymuszenie a przyrostu strumienia skojarzonego za odpowiedź, transmitancja operatorowa

$$G(s) = \frac{\Delta\Psi_1(s)}{\Delta U_1(s)} = T_0 \frac{1}{1 + T_0 s} \quad (5.125)$$

Transformata napięcia wymuszającego (5.119) jest określona wzorem (5.98), a równanie (5.123) ma postać analogiczną do postaci równania (5.107), więc rozwiązanie tego równania analogicznie do wzorów (5.102)÷(5.105) ma postać

$$\Delta\Psi_1(t) = \Delta\Psi_{1p} + \Delta\Psi_{1a} \quad (5.126)$$

$$\Delta\Psi_{1p} = \frac{T_0}{\sqrt{1 + (\omega T_0)^2}} U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi_0) \quad (5.127)$$

$$\Delta\Psi_{1a} = - \frac{T_0}{\sqrt{1 + (\omega T_0)^2}} U_{1m} \sin(\alpha_0 - \varphi_0) e^{-\frac{t}{T_0}} \quad (5.128)$$

przy czym

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{\omega L_1}{R_1} = \frac{X_1}{R_1} \quad (5.129)$$

W chwili włączenia mógł w transformatorze istnieć strumień od remanencji Φ_r dający z uzwojeniem pierwszym strumień skojarzony Ψ_r , powodujący na początku zniekształcenie przebiegu określonego wzorem (5.126).

Ponieważ $X_1 \gg R_1$, zatem $\varphi_0 \approx \pi/2$ oraz

$$\begin{aligned} \Delta\Psi_1 = \Delta\Psi_{1p} + \Delta\Psi_{1a} = & - \frac{T_0}{\sqrt{1 + (\omega T_0)^2}} U_{1m} \cos(\omega t + \alpha_0) + \\ & + \frac{T_0}{\sqrt{1 + (\omega T_0)^2}} U_{1m} \cos \alpha_0 e^{-\frac{t}{T_0}} \end{aligned} \quad (5.130)$$

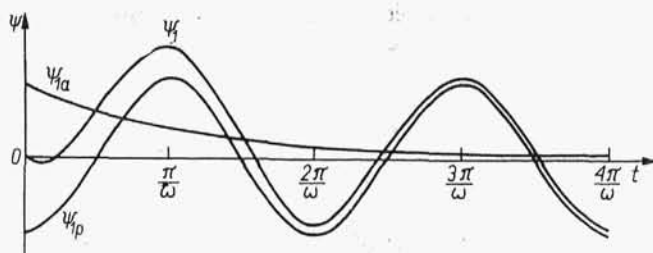
Składowa okresowa strumienia skojarzonego $\Delta\Psi_{1p}$ jest równa strumieniowi skojarzonemu w stanie ustalonym jałowym.

Najniekorzystniejszym przypadkiem włączania jest włączenie przy $\alpha_0 = 0$, tzn. przy chwilowej wartości $u_1 = 0$. Wtedy składowa nieokresowa ma największą wartość początkową, a całkowity strumień skojarzony

$$\begin{aligned} \Delta\Psi_1 = \Delta\Psi_{1p} + \Delta\Psi_{1a} = & - \frac{T_0}{\sqrt{1 + (\omega T_0)^2}} U_{1m} \cos(\omega t) + \\ & + \frac{T_0}{\sqrt{1 + (\omega T_0)^2}} U_{1m} e^{-\frac{t}{T_0}} \end{aligned} \quad (5.131)$$

Wykres tego strumienia skojarzonego pokazano na rys. 5.17. Strumień skojarzony po czasie $t = \pi/\omega$ uzyskuje swoją największą wartość

$$\Psi_{1m} = \Psi_{1p} \left(1 + e^{-\frac{\pi}{\omega T_0}} \right) \quad (5.132)$$



Rys. 5.17. Strumień skojarzony przy włączaniu transformatora

która przy braku tłumienia, czyli przy $R_1 = 0$ oraz $T_0 = \infty$, może mieć dwukrotną wartość w stosunku do amplitudy strumienia skojarzonego w ustalonym stanie jałowym.

Dwukrotny wzrost strumienia może spowodować:

- dwukrotny wzrost napięcia indukowanego w uzwojeniach transformatora, czyli tzw. *przebiecia łączeniowe*, mogące stanowić zagrożenie dla izolacji transformatora i urządzeń z nim współpracujących;
- przy dużym strumieniu i związanym z tym znacznym wzroście nasycenia i znacznym zmniejszeniu przenikalności magnetycznej znaczny wzrost prądu magnesującego, który może przekroczyć wartość znamionową prądu pierwotnego transformatora, co może zakłócać pracę zabezpieczeń transformatora.

Gdyby włączenie nastąpiło przy $\alpha_0 = \pi/2$, czyli przy $u_1 = U_{1m}$, składowa nieokresowa strumienia nie pojawiłaby się, strumień skojarzony i prąd magnesujący uzyskiwałyby wartości takie, jak w ustalonym stanie jałowym. W chwili dowolnej włączenia wartość składowej nieokresowej strumienia skojarzonego jest proporcjonalna do $\cos \alpha_0$.

5.3.3. Przebiecia

W transformatorze mogą powstać przebiecia wywołane przebiegami komutacyjnymi (zwarcie, włączenie, wyłączenie) albo przyczynami zewnętrznymi, najczęściej atmosferycznymi. Przebiecia komutacyjne mają zwykle przebieg podobny do przebiegów przy włączaniu transformatora, w czasie których największa wartość strumienia a więc i napięcia indukowanego może dochodzić do dwukrotnej wartości amplitudy strumienia i napięcia w stanie ustalonym, a częstotliwość napięcia jest równa częstotliwości podstawowej. Przy takiej częstotliwości (zwykle 50 Hz) impedancje elementów pojemnościowych $\frac{1}{\omega C}$ są bardzo duże w stosunku do impedancji elementów indukcyjnych ωL , prądy pojemnościowe są pomijalnie małe w stosunku do prądów indukcyjnych. Wtedy w modelach i w schematach zastępczych transformatora można pomijać pojemności i rozpatrywać model transformatora jak na rys. 5.1 i schematy zastępcze jak na rys. 5.2 i 5.3.

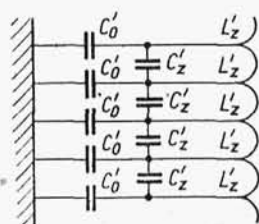
Przy przebieciach atmosferycznych powstają w linii fale przebieciowe o różnej wartości i różnym kształcie czoła. Istotną cechą takiej fali jest bardzo szybka

zmiana wartości napięcia na czole fali. W takim przypadku decydującą rolę w schemacie zastępczym transformatora odgrywają pojemności, a w przybliżonych rozważaniach indukcyjności transformatora mogą być pominięte. Uproszczony schemat zastępczy transformatora dla przebiegów szybkozmiennych, a więc odpowiedni do analizy przepięć atmosferycznych pokazano na rys. 5.18, przy czym:

L'_z – indukcyjność jednego zwoju;

C'_z – pojemność zwojowa (pomiędzy dwoma sąsiednimi zwojami);

C'_0 – pojemność doziemna (jednego zwoju względem ziemi).



Rys. 5.18. Uproszczony schemat zastępczy transformatora dla przebiegów szybkozmiennych

Przyjęcie takiego schematu oznacza przyjęcie bardzo dużych uproszczeń, jak np. równość wszystkich pojemności zwojowych, wszystkich pojemności doziemnych i wszystkich indukcyjności zwojowych. Wtedy:

– całkowita indukcyjność zwojowa

$$L_z = zL'_z \quad (5.133)$$

– całkowita pojemność zwojowa

$$C_z = \frac{1}{z} C'_z \quad (5.134)$$

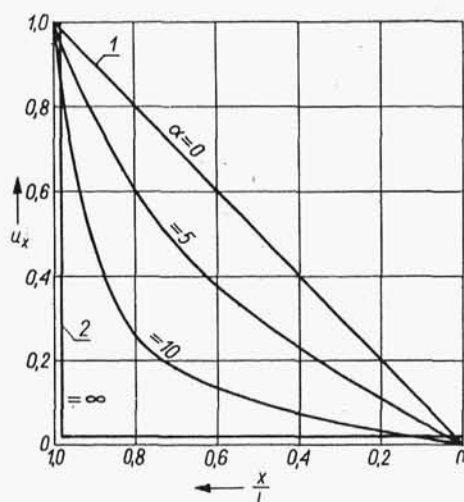
– całkowita pojemność doziemna

$$C_0 = zC'_0 \quad (5.135)$$

– pojemność zastępcza

$$C_e = \sqrt{C_z C_0} \quad (5.136)$$

W transformatorze o uziemionym punkcie gwiazdowym, gdy $C'_0 = 0$, pod wpływem fali przepięciowej zjawiającej się na zaciskach prąd płynie tylko przez pojemności C'_z . Przy jednakowej wartości wszystkich pojemności C'_z napięcia na wszystkich zwojach są jednakowe, podobnie jak w stanie ustalonym. Taki rozkład napięć pokazuje prosta 1 na rys. 5.19, przy czym x oznacza odległość od uziemionego punktu gwiazdowego, l – wysokość uzwojenia, a u_x – wartość względną napięcia w stosunku do napięcia fali przepięciowej. Gdyby $C'_z = 0$ prąd płynąłby tylko przez pierwszą pojemność C'_0 i całe napięcie wystąpiłoby tylko na pierwszym zwoju (krzywa 2), oznaczałoby to niebezpieczne naprężenie izolacji pierwszego zwoju. Rzeczywisty



Rys. 5.19. Początkowy rozkład napięcia w transformatorze o uziemionym punkcie gwiazdowym

rozkład napięcia jest zawarty między granicami wyznaczonymi przez krzywe 1 i 2. Można wykazać, że w transformatorze o uziemionym punkcie gwiazdowym rozkład napięcia wzdłuż uzwojenia wyraża się wzorem

$$u_x = U \frac{\sinh \alpha \frac{x}{l}}{\sinh \alpha} \quad (5.137)$$

w którym: U – wartość napięcia na zaciskach transformatora, l – wysokość uzwojenia

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_0}{C_z}} \quad (5.138)$$

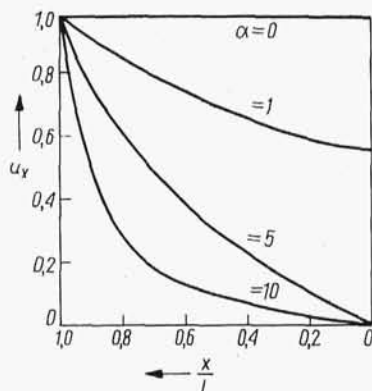
Rozkład napięcia przy przepięciu na zaciskach transformatora o izolowanym punkcie gwiazdowym jest określony wyrażeniem

$$u_x = U \frac{\cosh \alpha \frac{x}{l}}{\cosh \alpha} \quad (5.139)$$

i pokazany na rys. 5.20.

Zwykle $\alpha = 5 \div 20$. Dla takich wartości α rozkład napięcia przy przepięciu jest praktycznie taki sam w transformatorze o uziemionym i o izolowanym punkcie gwiazdowym.

Wielkością określającą naprężenia izolacji jest gradient napięcia du_x/dx . Uwzględniając, że przy $\alpha \geq 5$ jest $\operatorname{ctgh} \alpha \approx 1$ oraz $\operatorname{tgh} \alpha \approx 1$, gradient napięcia na



Rys. 5.20. Początkowy rozkład napięcia w transformatorze o izolowanym punkcie gwiazdowym

początku uzwojenia w transformatorze o uziemionym punkcie gwiazdowym oblicza się według wzoru

$$\left. \frac{du_x}{dx} \right|_{x=1} = \frac{U}{l} \alpha \operatorname{ctgh} \alpha \approx \frac{U}{l} \alpha \quad (5.140)$$

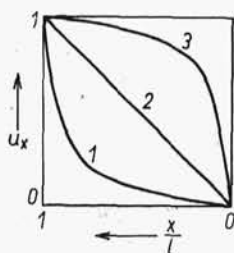
a w transformatorze o izolowanym punkcie gwiazdowym według wzoru

$$\left. \frac{du_x}{dx} \right|_{x=1} = \frac{U}{l} \alpha \operatorname{tgh} \alpha \approx \frac{U}{l} \alpha \quad (5.141)$$

W obydwoch rodzajach transformatorów gradient napięcia w pierwszym zwoju wynosi $\frac{U}{l} \alpha$, czyli izolacja jest naprężana α razy bardziej, niż przy równomiernym rozkładzie napięcia.

Taki rozkład napięcia wzdłuż uzwojenia transformatora odpowiada tylko pierwszej chwili po pojawieniu się przełączenia.

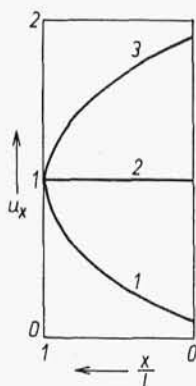
Transformator jest obwodem z pojemnościami i indukcyjnościami, stanowi więc obwód drgający. Czas trwania stanu nieustalonego zależy od tłumienia drgań przez rezystancję R .



Rys. 5.21. Drgania napięcia w transformatorze o uziemionym punkcie gwiazdowym

Zakres drgań napięcia w transformatorze o uziemionym punkcie gwiazdowym odwzorowuje na rys. 5.21 obszar zawarty między krzywą 1 i 3. Prosta 2 na tym rysunku oznacza rozkład napięcia w stanie ustalonym, a krzywa 1 – rozkład napięcia w pierwszej chwili przełączenia. Zjawisko przebiega podobnie do drgań

struny 2 zamocowanej w dwóch końcach. Zakres drgań napięcia w transformatorze o izolowanym punkcie gwiazdowym pokazano na rys. 5.22, przy czym prosta 2 oznacza rozkład napięcia w stanie ustalonym, a krzywe 1 i 3 – granice napięć w dowolnej chwili. Zjawisko przebiega podobnie jak drgania pręta umocowanego w jednym końcu.



Rys. 5.22. Drgania napięcia w transformatorze o izolowanym punkcie gwiazdowym

Z uproszczonych powyższych rozważań widać, że różne punkty uzwojenia transformatora są naprężane w różny sposób w różnych chwilach trwania zjawiska. Takie przebiegi są niebezpieczne dla izolacji transformatora i dlatego transformator powinien być przed nimi odpowiednio chroniony.

Ochrona zewnętrzna polega na zmniejszeniu napięcia fali przepięciowej przez zastosowanie odgromników. Wartość przepięcia zostaje zwykle ograniczona do dwukrotnej wartości napięcia znamionowego transformatora.

Ochrona wewnętrzna polega na zbudowaniu transformatora zdolnego do wytrzymania przepięć. Najlepszym środkiem jest zastosowanie dobrych materiałów izolacyjnych, tzn. materiałów o dużej wytrzymałości elektrycznej przy małej grubości. Zwiększenie grubości izolacji zwojowej zmniejsza pojemność zwojową w stosunku do pojemności doziemnej i zwiększa wartość współczynnika α , co powoduje zwiększenie nierówności rozkładu napięcia.

Można skonstruować transformator odporny na przepięcia przez wyeliminowanie wpływu pojemności doziemnych. Można np. zastosować ekrany o metalizowanych powierzchniach, osłaniające uzwojenia. Metalizowana powierzchnia ekranów jest połączona ze środkiem uzwojenia fazowego, uzyskując odpowiedni potencjał. Dzięki temu przez pojemności między ekranem i zwojami płyną prądy. Przez odpowiednie ukształtowanie uzwojeń i ekranu można uzyskać różne odległości między tymi elementami i takie wartości tych prądów, że kompensują one prądy płynące przez pojemności doziemne transformatora, a przez wszystkie pojemności zwojowe płynie prąd o jednakowej wartości. Dzięki temu rozkład napięcia na zwojach ma charakter liniowy. Transformator o takiej konstrukcji jest jednak drogi i ma małą wytrzymałość na działanie sił mechanicznych.

5.4. TRANSFORMATORY SPECJALNE

5.4.1. Wiadomości ogólne

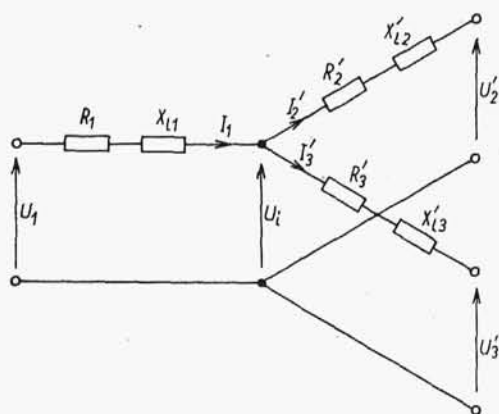
Transformatorem specjalnym nazywa się takie transformator, które budową albo właściwościami szczególnie różnią się od transformatorów zwykłych. Jest to oczywiście definicja nie ścisła, więc w różnych przypadkach ten sam transformator może być zaliczony albo do transformatorów zwykłych, albo do transformatorów specjalnych. Poniżej omówiono zasady działania niektórych, częściej spotykanych transformatorów specjalnych.

5.4.2. Transformator trójzwojeniowy

Transformator trójzwojeniowy ma na każdej kolumnie nawinięte trzy uzwojenia o napięciach U_1 , U_2 , U_3 . Transformatory trójzwojeniowe są budowane dla potrzeb energetyki jako jednostki dużych mocy.

Najczęściej uzwojenie o najwyższym napięciu U_1 jest zasilane z sieci energetycznej, a uzwojenia o różnych, odpowiednio niższych napięciach U_2 i U_3 zasilają odpowiednio odcinki sieci. Uzwojenie najwyższego napięcia stanowi zwykle zewnętrzny cylinder, a uzwojenia o niższych napięciach są osadzone bliżej kolumny.

Na rysunku 5.23 przedstawiono uproszczony schemat zastępczy transformatora trójzwojeniowego (między innymi pominięto gałąź poprzeczną). W stanie



Rys. 5.23. Uproszczony schemat zastępczy transformatora trójzwojeniowego

jałowym występują napięcia U_{10} , U_{20} , U_{30} . Wyróżnia się trzy przypadki stanu zwarcia:

(1) Zasilane uzwojenie 1, zwarte uzwojenie 2, otwarte uzwojenie 3; wtedy

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2' = \underline{Z}_1 + \left(\frac{U_{10}}{U_{20}} \right)^2 \underline{Z}_2 \quad (5.142)$$

(2) Zasilane uzwojenie 1, zwarte uzwojenie 3, otwarte uzwojenie 2; wtedy

$$\underline{Z}_{13} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}'_3 = \underline{Z}_1 + \left(\frac{U_{10}}{U_{30}} \right)^2 \underline{Z}_3 \quad (5.143)$$

(3) Zasilane uzwojenie 2, zwarte uzwojenie 3, otwarte uzwojenie 1; wtedy

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{23} &= \underline{Z}_2 + \underline{Z}''_3 = \underline{Z}_2 + \left(\frac{U_{20}}{U_{30}} \right)^2 \underline{Z}_3 \\ \underline{Z}'_{23} &= \left(\frac{U_{10}}{U_{20}} \right)^2 \underline{Z}_{23} = \left(\frac{U_{10}}{U_{20}} \right)^2 \underline{Z}_2 + \left(\frac{U_{10}}{U_{20}} \right)^2 \left(\frac{U_{20}}{U_{30}} \right)^2 \underline{Z}_3 \\ \underline{Z}'_{23} &= \underline{Z}'_2 + \underline{Z}'_3 = \left(\frac{U_{10}}{U_{20}} \right)^2 \underline{Z}_2 + \left(\frac{U_{10}}{U_{30}} \right)^2 \underline{Z}_3 \end{aligned} \quad (5.144)$$

Z równań (5.142), (5.143) i (5.144) wyznacza się impedancje

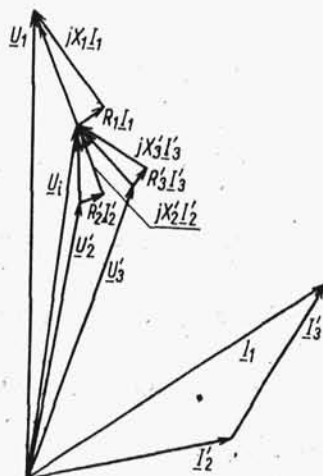
$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_1 &= \frac{1}{2} (\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{13} - \underline{Z}'_{23}) \\ \underline{Z}'_2 &= \frac{1}{2} (\underline{Z}'_{23} + \underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{13}) \\ \underline{Z}'_3 &= \frac{1}{2} (\underline{Z}_{13} + \underline{Z}'_{23} - \underline{Z}_{12}) \end{aligned} \right\} \quad (5.145)$$

Analogicznie można wyznaczyć poszczególne reaktancje

$$X_1 = \frac{1}{2} (X_{12} + X_{13} - X'_{23}) \quad (5.146)$$

oraz rezystancje

$$R_1 = \frac{1}{2} (R_{12} + R_{13} - R'_{23}) \quad (5.147)$$



Rys. 5.24. Uproszczony wykres wektorowy transformatora trójzwojeniowego

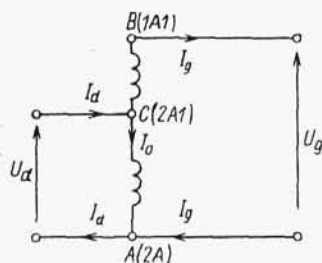
Uproszczony wykres wektorowy transformatora trójzwojeniowego pokazano na rys. 5.24. Napięcie na uzwojeniu drugim (trzecim) jest zależne nie tylko od prądu drugiego (trzeciego), ale także od prądu trzeciego (drugiego), ponieważ od prądu drugiego i trzeciego zależą spadki w uzwojeniu pierwotnym, a więc i napięcie indukowane U_1 . Jest to wada transformatora trójzwojeniowego. Zaletą jego jest to, że kosztuje mniej niż dwa transformatory dwuzwojeniowe.

5.4.3. Autotransformator

Schemat autotransformatora dany jest na rys. 5.25. Część uzwojenia o liczbie zwojów z_{AC} jest wspólna dla strony górnej i dolnej. Całkowita liczba zwojów jest z_{AB} . Słuszna jest zależność

$$U_d = U_{AC} = \frac{U_{AB}}{z_{AB}} z_{AC} = \frac{U_g}{g}$$

w której $g = \frac{z_{AB}}{z_{AC}} = \frac{U_g}{U_d}$ – przekładnia autotransformatora.



Rys. 5.25. Schemat autotransformatora
(w nawiasach podano oznaczenia zacisków
według PN-75/E-81003)

W przybliżeniu słuszny jest związek

$$U_d I_d = U_g I_g$$

czyli

$$I_d = g I_g$$

Równanie bilansu prądów ma postać

$$I_d = I_0 + I_g$$

a w przybliżeniu

$$I_0 = I_d - I_g = I_d \frac{g-1}{g} \quad (5.148)$$

Jeśli przekładnia jest niewiele różna od 1, to prąd I_0 jest bardzo mały, przekrój przewodu na części uzwojenia AC jest bardzo mały, na autotransformator zużywa się mało miedzi, co jest jego zaletą. Dlatego autotransformator nazywa się także transformatorem oszczędnościowym.

Mocą przechodnią nazywa się moc

$$S = U_d I_d = U_g I_g \quad (5.149)$$

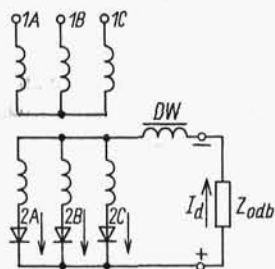
a mocą własną – moc

$$S' = U_d I_0 = S \frac{\vartheta - 1}{\vartheta} \quad (5.150)$$

Budowane są autotransformatory jednofazowe i trójfazowe. Stosuje się je tam, gdzie trzeba zmieniać napięcie w niezbyt wielkim zakresie, np. do $\vartheta \leq 1,5$. W energetyce są stosowane do sprzęgania sieci wysokiego napięcia, np. 400/220 kV, 220/110 kV a nawet 400/110 kV. W stanie zwarcia impedancja zwarciova odpowiada przede wszystkim impedancji części uzwojenia *BC*. Autotransformator ma więc małą impedancję zwarciova, małe napięcie zwarcia i duży prąd zwarciovy, co jest jego wadą.

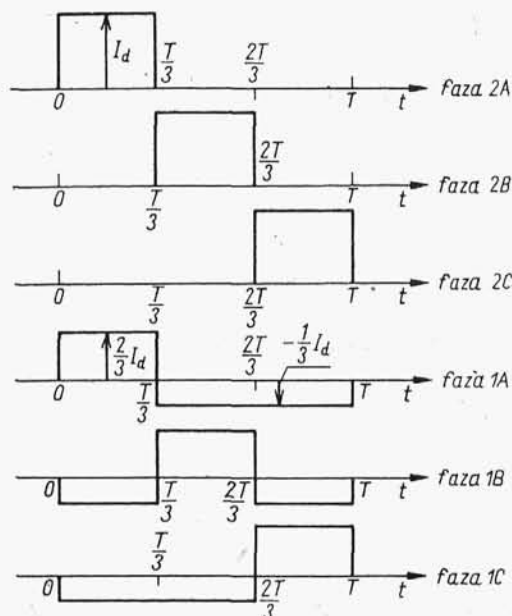
5.4.4. Transformator prostownikowy

Na rysunku 5.26 dany jest przykładowy schemat połączeń transformatora prostownikowego, tzn. transformatora zasilającego układ zaworów prostowniczych, które z kolei zasilają odbiornik prądu stałego. Jest to układ trójfazowy, w którym każdy



Rys. 5.26. Schemat połączeń transformatora prostownikowego

z końców transformatora jest połączony z anodą jednego z zaworów. Prąd płynie od punktu gwiazdowego transformatora do zaworu przez uzwojenie danej fazy (np. fazy 2 A) przez okres, w którym potencjał na końcu uzwojenia fazy połączonym z anodą jest najwyższy ze wszystkich trzech faz. W następnych okresach prąd płynie kolejno przez uzwojenia pozostałych faz (np. 2B, 2C). W obwodzie prądu stałego jest włączona dodatkowa indukcyjność *DW* (dławik wyrównawczy), można więc przyjąć, że wartość prądu wyprostowanego $I_d = \text{const}$. Ogólnie czas, w ciągu którego płynie prąd przez uzwojenie danej fazy wynosi $t = T/m$, (T – okres, m – liczba faz). Wykres prądów w fazach wtórnych dla $m = 3$ dany jest na rys. 5.27. Korzystając z zależności (2.32) rozkłada się prąd I_d na układ prądów zgodnych, przeciwnych i zerowych. Następnie uwzględniając, że w uzwojeniach pierwotnych prądy zerowe nie płyną i po przyjęciu przekładni $\vartheta = 1$ na podstawie zależności (2.32) oblicza się prądy $I_{1A} = \frac{2}{3} I_d$, $I_{1B} = -\frac{1}{3} I_d$, $I_{1C} = -\frac{1}{3} I_d$.



Rys. 5.27. Wykresy prądów w układzie prostownikowym trójfazowym

Wykresy tych prądów w funkcji czasu dane są na rys. 5.27. Skuteczna wartość prądu w uzwojeniu wtórnym przy m fazach wynosi

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_d^2 dt} \quad (5.151)$$

czyli

$$I_2 = \frac{I_d}{\sqrt{m}}$$

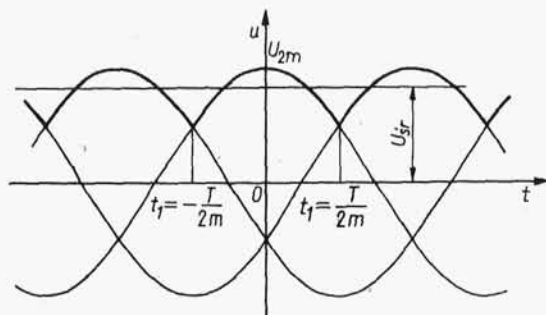
Podobnie obliczona skuteczna wartość prądu w uzwojeniu pierwotnym wynosi

$$I_1 = \frac{\sqrt{2}}{3} I_d \quad (5.152)$$

niezależnie od liczby faz.

Na rysunku 5.28 przedstawiono przebiegi napięć fazowych i napięcia wyprostowanego U_d równego napięciu średniemu U_{sr} , obliczonemu z zależności

$$U_{sr} = U_d = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} u_2 dt = \frac{1}{\frac{T}{2m} - \left(-\frac{T}{2m}\right)} \int_{-\frac{T}{2m}}^{\frac{T}{2m}} \sqrt{2} U_2 \cos \omega t$$



Rys. 5.28. Przebiegi napięciowe w transformatorze prostownikowym

Po wykonaniu całkowania otrzymuje się

$$U_2 = \frac{U_d \frac{\pi}{m}}{\sqrt{2} \sin \frac{\pi}{m}} \quad (5.153)$$

Przebieg napięcia na odbiorniku jest tym bardziej zbliżony do przebiegu prostoliniowego, im większa jest liczba faz, co uzasadnia celowość budowania prostowników na 6 albo 12 faz.

W uproszczeniu moc po stronie prądu stałego

$$S_d = U_d I_d \quad (5.154)$$

Prądy w transformatorze są odkształcone, więc moc traktowana jako iloczyn wartości skutecznych napięcia i prądu nie ma fizycznego sensu. Operuje się jednak takim pojęciem mocy, ponieważ określa ona wymiary transformatora.

Moc uzwojenia pierwotnego transformatora

$$S_1 = 3U_1 I_1$$

a po wyzniesieniu wzorów (5.152) i (5.153) i przyjęciu $g = 1$

$$S_1 = S_d \frac{\frac{\pi}{m}}{\sin \frac{\pi}{m}} \quad (5.155)$$

Moc uzwojenia wtórnego

$$S_2 = mU_2 I_2$$

czyli

$$S_2 = S_d \frac{\pi}{\sqrt{2m} \sin \frac{\pi}{m}} \quad (5.156)$$

Wymiary transformatora zależą od mocy obliczeniowej

$$S_v = \frac{S_1 + S_2}{2}$$

Ze wzrostem liczby faz znacznie zwiększa się moc obliczeniowa transformatora, a więc zwiększają się jego wymiary. Moc uzwojenia wtórnego jest większa od mocy uzwojenia pierwotnego $\sqrt{m/2}$ razy.