

Lesław ŁADNIAK¹

TRANSFORMACJA NAPIĘĆ I PRĄDÓW W UKŁADACH ZASILANIA TRAKCJI KOLEI DUŻYCH PRĘDKOŚCI

W artykule przedstawiono układy połączeń uzwojeń transformatorów stosowanych do zasilania trakcji kolei dużych prędkości oraz równania opisujące chwilowe zmiany napięć i prądów na zaciskach tych transformatorów. Prezentowane równania umożliwiają wyznaczenie współczynników szybkości przekazywania energii dla poszczególnych układów połączeń uzwojeń transformatorów. Współczynniki te są pomocne przy podejmowaniu decyzji o wyborze odpowiedniego transformatora do danych warunków zasilania.

VOLTAGE AND CURRENT TRANSFORMATION FOR FEEDING HIGH SPEED RAILWAY TRACTION

This paper presents the specially connected transformers used for feeding the centenary of high speed railway and equations describing voltages and currents changes on the transformer terminals. Equations discussed in this paper enable calculation of the energy transmission speed coefficients for the transformers with specially connected windings. These factors may support the decision making process for selecting a specially connected transformer appropriate in given supplying conditions.

1. WSTĘP

Wzrost mocy kolejowych układów napędowych oraz konieczność ograniczania strat mocy w układach przesyłowych powoduje potrzebę zasilania sieci trakcji kolejowej napięciem przemiennym o wartości 25 kV lub $2 \times 25\text{ kV}$. Częstotliwość napięcia zasilającego trakcję kolejową oraz wartość i częstotliwość napięcia trójfazowego systemu energetycznego zasilającego podstację trakcyjną zależą głównie od uwarunkowań historycznych. Nie mniej jednak w każdym takim układzie zasilania istnieje potrzeba transformacji napięć układu trójfazowego na dwufazowy układ napięć. Takim powszechnie znanym i od dawna stosowanym transformatorem służącym do tego celu jest transformator Scotta [1]. Nowszymi analogicznymi rozwiązaniami transformatorów o specjalnych

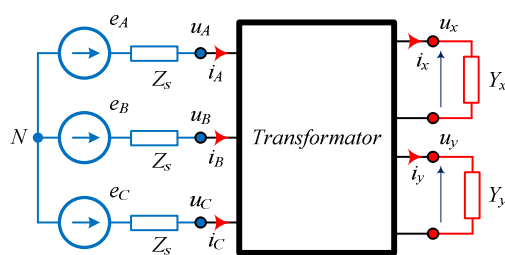
¹Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii,
50–370 Wrocław, Wybrzeże St. Wyspiańskiego 27, e-mail: l.ladniak@pwr.wroc.pl

układach połączeń uzwojeń są transformatory Le Blanc'a i Woodbridge'a [2]. W celu uzyskania dwóch przesuniętych w fazie napięć stosowane są też transformatory z uzwojeniami połączonymi w otwarty trójkąt lub o połączeniu gwiazda-trójkąt. W skrajnym przypadku układy trakcji kolejowej można zasilić poprzez dwa transformatory jednofazowe. Każdy z tych układów zasilających ma swoje wady i zalety. Różne są też właściwości i charakterystyki tych rozwiązań. To wszystko powoduje, że w różnym stopniu przenoszone są do zasilającej sieci energetycznej wszelkiego rodzaju zakłócenia i niesymetrie obciążeń występujące w sieci trakcji kolejowej [3]. Istotnym aspektem przy wyborze sposobu zasilania trakcji kolejowej są koszty produkcji, instalacji i eksploatacji poszczególnych transformatorów. Najistotniejsze jest jednak zapewnienie maksymalnej szybkości przekazywania energii przy zadanych warunkach zasilania.

W artykule opisano podstawowe własności elektryczne stosowanych obecnie układów połączeń transformatorów zasilających sieć trakcją kolei dużych prędkości oraz dokonano klasyfikacji tych układów w zależności od wartości współczynnika szybkości przekazywania energii.

2. SCHEMAT ZASTĘPCZY UKŁADU ZASILANIA

Klasyczny układ zasilania trakcji kolei dużych prędkości jest przyłączony do trójfazowego systemu energetycznego o napięciu co najmniej 110 kV poprzez transformator o specjalnym układzie połączeń. Zgodnie z twierdzeniem Thevenina system zasilający taki transformator można zastąpić trójfazowym symetrycznym źródłem napięcia o odpowiednio dobranych parametrach. Impedancja wewnętrzna Z_s zastępczego źródła napięcia wyznaczona jest z mocy zwarciowej systemu energetycznego S_s , a wartość siły elektromotorycznej E trójfazowego źródła przyjmuje się równą napięciu znamionowemu zasilającej sieci energetycznej.



Rys. 1. Schemat zastępczy układu zasilania trakcji KDP

Na rys. 1 przedstawiono uproszczony schemat układu zasilania trakcji kolejowej, w którym zasadniczym elementem jest transformator umożliwiający uzyskanie dwóch sinusoidalnie zmiennych przesuniętych w fazie napięć U_x oraz U_y . Admitancje Y_x oraz Y_y przyłączone do strony wtórnej transformatora odwzorowują obciążenie transformatora wynikające z zapotrzebowania na moc układów napędowych pociągów. Ponieważ współczynnik mocy pociągów dużych prędkości jest w przybliżeniu równy jedności, to

wartość współczynnika mocy dla planowanych obciążeń S_x oraz S_y strony wtórnej transformatora też można przyjąć, że jest równy jedności.

3. RÓWNANIE MOCY TRANSFORMATORA

Dla stanu ustalonego przy sinusoidalnym wymuszeniu można zdefiniować moc pozorną S_T maksymalnego obciążenia transformatora. Moc S_T transformatora zasilającego obwody trakcji kolejowej jest sumą maksymalnych mocy pozornych S_x oraz S_y poszczególnych uzwojeń wtórnych tego transformatora. Oczywiście maksymalna moc pozorna obciążenia transformatora S_T nie powinna przekraczać znamionowej mocy pozornej transformatora S_N . W związku z tym, moc poszczególnych uzwojeń wtórnych transformatora można opisać korzystając ze współczynnika K określającego stopień obciążenia jednego z tych uzwojeń:

$$S_x = K S_T \quad \text{oraz} \quad S_y = S_T - S_x = (1 - K) S_T \quad (1)$$

Stopień obciążenia mocą uzwojeń wtórnych transformatora K zależy bezpośrednio od rozkładu jazdy pociągów. To rozkład jazdy decyduje o liczbie pociągów na trasie, odległości między pociągami, a także o tym, czy w danej chwili czasu pociąg jest w ruchu, hamuje, czy stoi. Ponieważ czas rozruchu i hamowania pociągu w porównaniu do czasu jazdy tego pociągu jest relatywnie krótki, to można przyjąć, że współczynnik K niezależny od czasu i jest liczbą rzeczywistą należącą do przedziału $[0, 1]$.

Przy pominięciu strat mocy w transformatorze, moc pozorna transformatora S przy zadanym obciążeniu jest sumą mocy pozornej uzwojenia x oraz uzwojenia y :

$$\underline{S} = \underline{S}_x + \underline{S}_y \quad (2)$$

Ponieważ moc pozorną poszczególnych uzwojeń strony wtórnej transformatora można wyrazić w zależności od wartości admitancji obciążenia Y_x , Y_y oraz wartości napięć U_x , U_y , to przy założeniu równości modułów napięć strony wtórnej transformatora możemy napisać:

$$\underline{S} = \underline{Y}_x U_x^2 + \underline{Y}_y U_y^2 = \underline{Y}_x U_x^2 + \underline{Y}_y U_x^2 e^{j2\phi} = (\underline{Y}_x + \underline{Y}_y e^{j2\phi}) U_x^2 \quad (3)$$

gdzie ϕ jest kątem przesunięcia między napięciami strony wtórnej transformatora.

Jeżeli przyjmiemy wskaz napięcia \underline{U}_x za kierunek odniesienia, to moc pozorną transformatora S w zależności od modułów mocy pozornej poszczególnych uzwojeń strony wtórnej S_x oraz S_y opisuje następujące równanie:

$$\underline{S} = S_x + S_y e^{j2\phi} \quad (4)$$

Ponieważ stopień obciążenia uzwojeń wtórnych transformatora charakteryzuje współczynnik K , to równanie opisujące moc pozorną transformatora przyjmuje postać:

$$\underline{S} = K S_T + (1 - K) S_T e^{j2\phi} = S_T (K - K e^{j2\phi} + e^{j2\phi}) \quad (5)$$

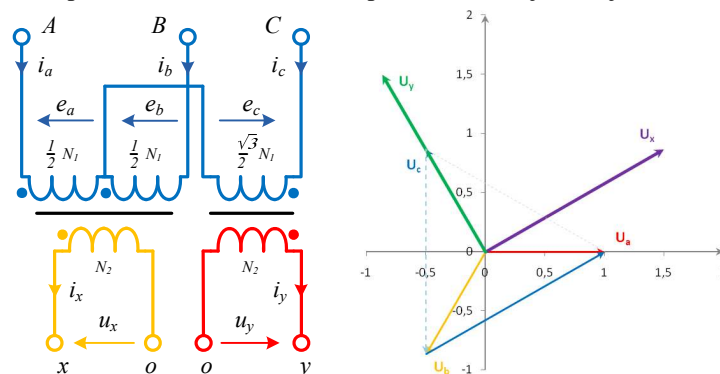
Jak wynika z zależności (5) o szybkości przekazywania energii przez transformator zasilający trakcję kolei dużych prędkości decyduje nie tylko stopień obciążenia poszczególnych faz strony wtórnej tego transformatora, ale przede wszystkim kąt przesunięcia między napięciami fazowymi strony wtórnej transformatora. W związku z tym w dalszej części pracy zostaną pokrótce przedstawione i omówione podstawowe własności transformatorów stosowanych do zasilania układów trakcji kolei dużych prędkości.

4. UKŁADY POŁĄCZEŃ TRANSFORMATORÓW

W celu uproszczenia rozważań przyjęto, że rozpatrywane transformatory są idealne, a współczynnik mocy poszczególnych uzwojeń wtórnych jest równy jedności. Bazując na tych założeniach dla każdego z rozpatrywanych transformatorów podano podstawowe zależności między napięciami i prądami na zaciskach tych transformatorów. Równania opisujące napięcia strony wtórnej transformatorów w stanie ustalonym przy wymuszeniu sinusoidalnym zostały zapisane w relacji do napięcia fazy A trójfazowego układu zasilania. Układy napięć oraz przesunięcia fazowe między poszczególnymi napięciami na zaciskach transformatorów zostały pokazane na wykresach wskazowych.

4.1 Połączenie Scotta

Transformator Scotta, którego układ połączeń uzwojeń pokazano na rys. 2 jest znany i wykorzystywany od wielu lat do przekształcenia trójfazowego źródła napięcia na dwufazowe źródło napięć lub odwrotnie. Budowa transformatora Scotta jest dość złożona, ponieważ są to de facto dwa izolowane od siebie jednofazowe transformatory, z których jeden ma dzielone po stronie pierwotnej uzwojenia. Te rozdzielone po połowie uzwojenia muszą być nawinięte z przeplotem w celu minimalizacji reaktancji upływu transformatora. Taki sposób wykonania uzwojeń zapewnia zrównoważenie napięć po stronie pierwotnej. Zaletą tego rozwiązania jest dostępność neutralnego zacisku po stronie wtórnej transformatora, co pozwala także na obniżenie poziomu izolacji uzwojeń transformatora.



Rys. 2. Układ połączeń transformatora Scotta i wykres wskazowy napięć

Jak wynika z układu połączeń uzwojeń transformatora Scotta (rys. 2), w jego uzwojeniach pierwotnych indukowane są następujące siły elektromotoryczne:

$$e_a(t) = \frac{1}{2} n u_x(t) \quad e_b(t) = \frac{1}{2} n u_x(t) \quad e_c(t) = \frac{\sqrt{3}}{2} n u_y(t) \quad (6)$$

gdzie n jest stosunkiem liczby zwojów strony pierwotnej transformatora N_1 do liczby zwojów N_2 strony wtórnej transformatora.

Napięcie u_x w uzwojeniu wtórnym transformatora x jest sumą transformowanych na stronę wtórną sił elektromotorycznych e_b oraz e_a . Ponieważ suma tych sił elektromotorycznych jest równa napięciu u_{ab} , to napięcie u_x jest opisane równaniem:

$$u_x(t) = \frac{1}{n} (e_b(t) + e_a(t)) = \frac{1}{n} u_{ab}(t) \quad (7)$$

W celu wyznaczenia napięcia u_y po stronie wtórnej transformatora, należy zauważyć, że napięcie między zaciskami BC jest równe ze znakiem minus sumie sił elektromotorycznych e_c oraz e_b . Ponadto, siła elektromotoryczna e_b jest równa połowie napięcia u_{ab} , ponieważ uzwojenie pierwotne AB transformatora Scotta jest podzielone na pół.

$$u_{bc}(t) = -e_c(t) - e_b(t) = -e_c(t) - \frac{1}{2} u_{ab}(t) \quad (8)$$

Po uwzględnieniu w równaniu (8) relacji (6) między napięciem u_y , a siłą elektromotoryczną e_c , otrzymujemy równanie na napięcie u_y :

$$u_y(t) = -\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{n} (u_{bc}(t) + \frac{1}{2} u_{ab}(t)) \quad (9)$$

Prąd w uzwojeniu y wyznaczamy korzystając z bilansu mocy dla tego uzwojenia:

$$i_y(t) = \frac{\sqrt{3}}{2} n i_c(t) \quad (10)$$

W przypadku uzwojenia x , jego moc jest sumą mocy uzwojeń gałęzi AB :

$$e_a(t) i_a(t) + e_b(t) (-i_b(t)) = u_x(t) i_x(t) \quad (11)$$

Korzystając ponownie z zależności (6) opisujących relację między siłami elektromotorycznymi e_a i e_b , a napięciem u_x otrzymujemy:

$$i_x(t) = \frac{1}{2} n (i_a(t) - i_b(t)) \quad (12)$$

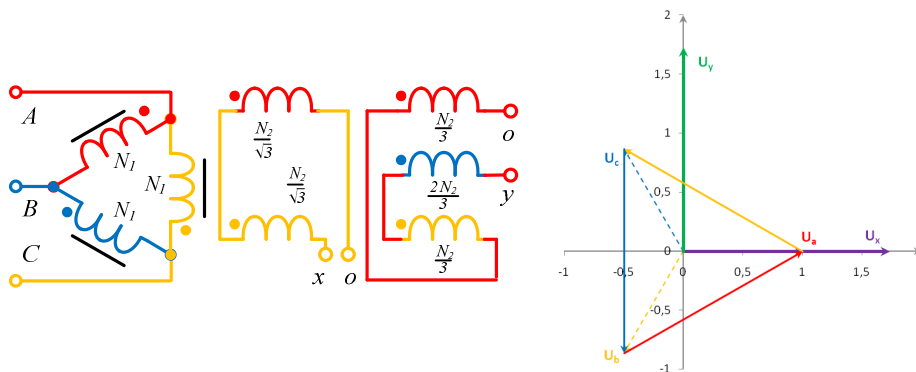
W stanie ustalonym przy wymuszeniu sinusoidalnie zmiennym równania opisujące zmiany napięcia na wyjściu transformatora Scotta przyjmują postać:

$$\underline{U}_x = \frac{1}{n} \underline{U}_{AB} = \frac{1}{n} \sqrt{3} \underline{U}_A e^{j\pi/3} \quad \underline{U}_y = -\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{n} (\underline{U}_{BC} + \frac{1}{2} (\underline{U}_{AB})) = \frac{1}{n} \sqrt{3} \underline{U}_A e^{j2\pi/3} \quad (13)$$

Z powyższych równań wynika, że napięcia na wyjściu transformatora są przesunięte względem siebie o kąt $\pi/2$ (rys. 2).

4.2 Połączenie Le Blanc'a

Na rys. 3 pokazano schemat połączeń uzwojeń transformatora Le Blanc'a. W tym przypadku zacisk neutralny po stronie wtórnej transformatora jest niedostępny. Relatywnie prosta konstrukcja tego transformatora decyduje o tym, że koszty produkcji i eksploatacja takiego transformatora są stosunkowo niskie.



Rys. 3. Układ połączeń transformatora Le Blanc'a i wykres wskazowy napięć

Analizując układ połączeń przedstawiony na rys. 3 zauważamy, że napięcia strony wtórnej transformatora są opisane następującymi równaniami:

$$u_x(t) = \frac{1}{n} \frac{\sqrt{3}}{3} (u_{AB}(t) - u_{CA}(t)) \quad u_y(t) = \frac{1}{n} \frac{1}{3} (u_{AB}(t) + u_{CA}(t) - 2 u_{BC}(t)) \quad (14)$$

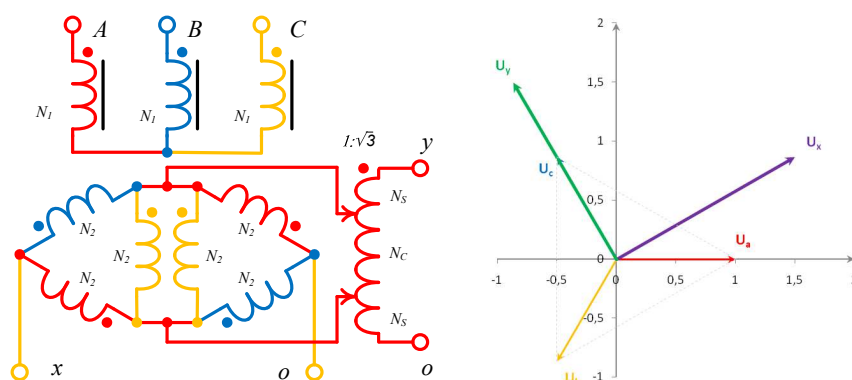
Przy zasilaniu z symetrycznego trójfazowego źródła napięć otrzymujemy dwa sinusoidalnie zmienne napięcia przesunięte względem siebie o kąt $\pi/2$:

$$\underline{U}_x = \frac{1}{n} \frac{\sqrt{3}}{3} (\underline{U}_{AB} - \underline{U}_{CA}) = \frac{1}{n} \sqrt{3} \underline{U}_A \quad \underline{U}_y = \frac{1}{n} \frac{1}{3} (\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{CA} - 2 \underline{U}_{BC}) = \frac{1}{n} \sqrt{3} \underline{U}_A e^{j\pi/2} \quad (15)$$

Wykres wskazowy napięć na zaciskach transformatora Le Blanc'a pokazano na rys. 3.

4.3 Połączenie Woodbridge'a

Tak zwane zmodyfikowane połączenie Woodbridge'a, pokazano na rys. 4. Istotnym wyróżnikiem tego połączenia jest fakt, że po stronie pierwotnej transformatora jest dostępny punkt neutralny. Pozwala to na efektywne uziemienie układu i pracę w sieciach ze skutecznie uziemionym punktem neutralnym. Po stronie wtórnej transformator posiada dwa połączone w trójkąt uzwojenia, co uniemożliwia przepływ prądów składowej zerowej. W celu wyrównania modułów napięć strony wtórnej do jednego z uzwojeń transformatora jest przyłączony autotransformator o przekładni równej $\sqrt{3}$.



Rys. 4. Układ połączeń transformatora Woodbridge'a i wykres wskazowy napięć

Korzystając z przedstawionego na rys. 4 układu połączeń strony wtórnej transformatora Woodbridge'a napięcie fazy x możemy wyznaczyć z poniższego równania:

$$u_x(t) = u_{Aw(t)} - u_{Bw(t)} = \frac{1}{n} [u_A(t) - u_B(t)] \quad (16)$$

Napięcie fazy y wyznaczamy wykorzystując fakt, że przekładnia autotransformatora $(2N_S + N_C)/N_C$ jest równa $\sqrt{3}$:

$$u_y(t) = u_{Cw(t)} \frac{2N_S + N_C}{N_C} = \sqrt{3} u_{Cw(t)} = \frac{1}{n} \sqrt{3} u_C(t) \quad (17)$$

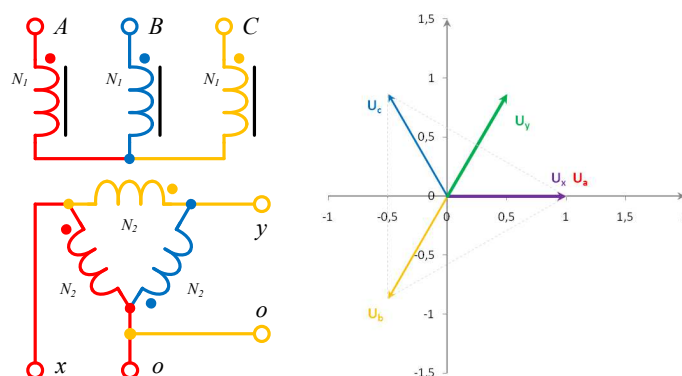
Dla napięć sinusoidalnie zmiennych w stanie ustalonym możemy napisać:

$$\underline{U}_x = \frac{1}{n} (\underline{U}_A - \underline{U}_B) = \frac{1}{n} \sqrt{3} \underline{U}_A e^{j\pi/3} \quad \underline{U}_y = \frac{1}{n} \sqrt{3} \underline{U}_A e^{j2/3\pi} \quad (18)$$

Jak wynika z przedstawionego na rys. 4 wykresu wskazowego, napięcia strony wtórnej transformatora Woodbridge'a są przesunięte względem siebie o kąt $\pi/2$.

5. POŁĄCZENIE GWIAZDA-TRÓJKĄT

Na rys. 6 pokazano sposób transformacji napięć układu trójfazowego na układ dwufazowy przy wykorzystaniu transformatora, którego uzwojenia pierwotne są połączone w gwiazdę, a uzwojenia wtórne w trójkąt (Y-D). Tego typu transformator nie wymaga specjalnego projektowania lub produkcji. Transformator ten z racji sposobu przyłączenia obciążenia ma nadwyżkę mocy, co tym bardziej predysponuje go do zasilania układów trakcji kolejowej. Po stronie wtórnej transformatora, jest dostępny zacisk neutralny, co pozwala na redukcję izolacji transformatora.



Rys. 5. Połączenie gwiazda-trójkąt i wykres wskazowy napięć

Jak wynika z rys. 5 relacje między napięciami i prądami na wyjściu i wejściu transformatora o układzie połączeń uzwojeń gwiazda-trójkąt są opisane następującymi równaniami:

$$u_x(t) = \frac{1}{n} u_a(t) \quad i_x(t) = n i_a(t) \quad (19)$$

$$u_y(t) = -\frac{1}{n} u_b(t) \quad i_y(t) = -n i_b(t) \quad (20)$$

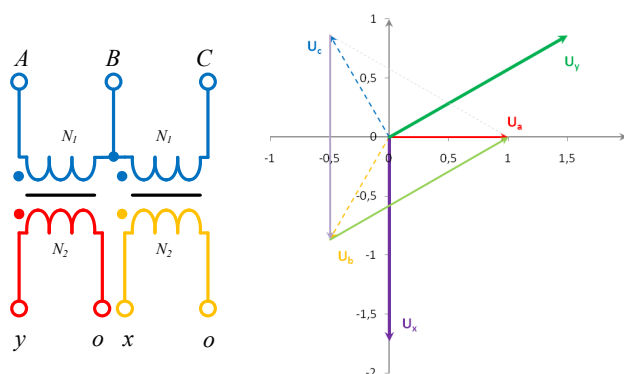
Napięcia na wyjściu transformatora przy wymuszeniu sinusoidalnym oraz symetrii trójfazowych napięć zasilających opisują poniższe równania:

$$\underline{U}_x = \frac{1}{n} \underline{U}_A \quad \underline{U}_y = \frac{1}{n} (-\underline{U}_B) = \frac{1}{n} \underline{U}_A e^{j\pi/3} \quad (21)$$

Wykres wskazowy napięć na wejściu i wyjściu transformatora ilustrujący przesunięcia fazowe między napięciami na zaciskach transformatora pokazano na rys. 5. W rozpatrywanym przypadku napięcia strony wtórnej transformatora służące do zasilania trakcji kolejowej są przesunięte względem siebie o kąt $\pi/3$.

6. POŁĄCZENIE W OTWARTY TRÓJKĄT

Schemat układu połączeń uzwojeń transformatora w otwarty trójkąt (V-V) przedstawiono rys. 6. Transformator o takim układzie połączeń uzwojeń ma bardzo prostą konstrukcję, dużą wytrzymałość mechaniczną i relatywnie małą impedancję wewnętrzną. Z tych powodów jest on powszechnie stosowany do zasilania bardzo mocno obciążonych trakcji kolei dużych prędkości oraz tam, gdzie zasilający trójfazowy system energetyczny ma małą relatywnie moc zwarciovą. Należy zauważyć, że przy połączeniu uzwojeń transformatora w otwarty trójkąt nie ma neutralnego zacisku po stronie pierwotnej transformatora.



Rys. 6. Układ połączeń V-V i wykres wskazowy napięć

Jak wynika z rys. 6 napięcia i prądy na zaciskach wyjściowych transformatora z uzwojeniami połączonymi w otwarty trójkąt są opisane zależnościami:

$$u_x(t) = \frac{1}{n} u_{bc}(t) \qquad i_x(t) = n (i_b(t) - i_c(t)) \qquad (22)$$

$$u_y(t) = \frac{1}{n} u_{ab}(t) \qquad i_y(t) = n (i_a(t) - i_b(t)) \qquad (23)$$

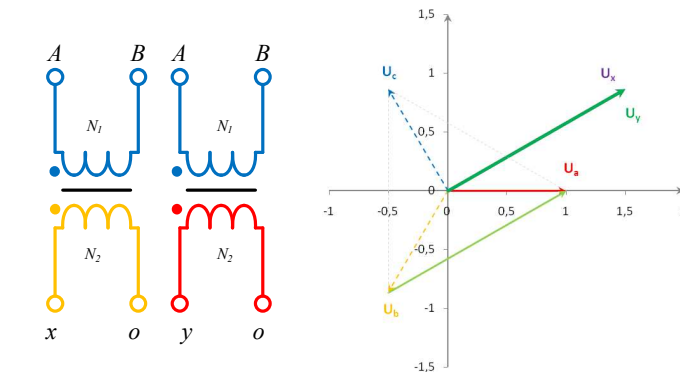
Korzystając z relacji między napięciami w symetrycznym układzie trójfazowym możemy napisać:

$$\underline{U}_x = \frac{1}{n} \underline{U}_{BC} = \frac{1}{n} \sqrt{3} \underline{U}_A e^{-j\pi/2} \qquad \underline{U}_y = \frac{1}{n} \underline{U}_{AB} = \frac{1}{n} \sqrt{3} \underline{U}_A e^{j\pi/6} \qquad (24)$$

Stwierdzamy, że napięcia wyjściowe w stanie ustalonym przy wymuszeniu sinusoidalnym w transformatorze o uzwojeniach połączonych w otwarty trójkąt są pierwiastek z trzech większe od napięcia fazy odniesienia i przesunięte względem siebie o kąt $2/3\pi$ (rys. 6).

7. PODWÓJNE ZASILANIE JEDNOFAZOWE

Prosta i tania konstrukcja transformatorów jednofazowych powoduje, że są one obecnie często stosowane do zasilania trakcji kolei dużych prędkości. W przypadku zasilania uzwojeń pierwotnych z tej samej fazy systemu zasilania, napięcia wtórne obu wyjść są w fazie i z tego powodu izolowanie sekcji w podstacji trakcyjnej nie jest wymagane. Główną niedogodnością takiego sposobu zasilania jest mało efektywna redukcja wahań napięcia w systemie zasilającym.



Rys. 7. Jednofazowy układ połączeń i wykres wskazowy napięć

Jak wynika z rys. 7 napięcia i prądy strony wtórnej transformatorów takiego podwójnego jednofazowego układu zasilania są opisane następującymi równaniami:

$$u_x(t) = u_y(t) = \frac{1}{n} u_{ab}(t) \quad i_x(t) = i_y(t) = n (i_a(t) - i_b(t)) \quad (25)$$

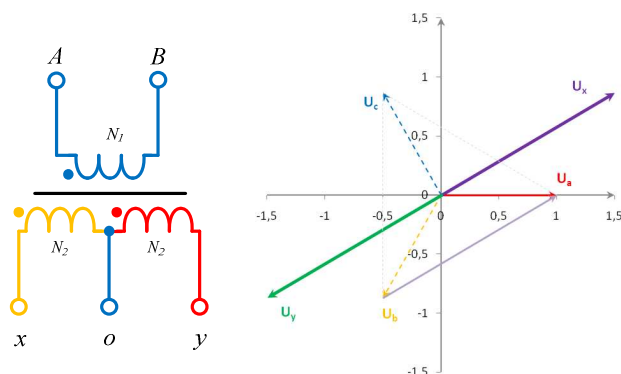
W stanie ustalonym przy wymuszeniu sinusoidalnym napięcia strony wtórnej są równe i przesunięte względem napięcia odniesienia o kąt $\pi/6$:

$$\underline{U}_x = \underline{U}_y = \frac{1}{n} \underline{U}_{AB} = \frac{1}{n} \sqrt{3} \underline{U}_A e^{j\pi/6} \quad (26)$$

Wykres wskazowy napięć dla transformatora jednofazowego przedstawiono na rys. 7.

8. POJEDYNCZE DZIELONE POŁĄCZENIE

Schemat połączenia uzwojeń transformatora z pojedynczym uzwojeniem pierwotnym i dzielonym uzwojeniem po stronie wtórnej jest pokazany na rys. 8. Generalnie ten typ transformatora ma podobne zalety i wady jak transformator o połączeniu w otwarty trójkąt. Jednak w tym przypadku koszt produkcji transformatora jest wyższy, ponieważ wymagany jest tutaj wyższy poziom izolacji.



Rys. 8. Pojedynczy dzielony układ połączeń i wykres wskazowy napięć

Zgodnie z rys. 8 napięcia strony wtórnej transformatora są opisane równaniami:

$$u_x(t) = \frac{1}{n} u_{AB}(t) \qquad u_y(t) = -\frac{1}{n} u_{AB}(t) \qquad (27)$$

Ponieważ moc każdego z uzwojeń wtórnych jest równa połowie mocy strony pierwotnej transformatora to korzystając z bilansu mocy otrzymujemy:

$$i_x(t) = \frac{n}{2} (i_A(t) - i_B(t)) \qquad i_y(t) = \frac{n}{2} (i_B(t) - i_A(t)) \qquad (28)$$

W przypadku sinusoidalnie zmiennych napięć na zaciskach wejściowych transformatora napięcia strony wtórnej można opisać równaniami:

$$\underline{U}_x = \frac{1}{n} \underline{U}_{AB} = \underline{U}_A e^{j\pi/6} \qquad \underline{U}_y = \frac{1}{n} \underline{U}_{BA} = \underline{U}_A e^{-j2/3\pi} \qquad (29)$$

Wykres wskazowy napięć dla rozpatrywanego transformatora przedstawiono na rys. 8.

9. WNIOSKI

Jak wynika z wykresów wskazowych napięć przedstawionych na rys. 2 - 8 kąty przesunięcia fazowego ϕ między napięciami strony wtórnej transformatorów wynoszą 0 , $\pi/3$, $\pi/2$, $2/3\pi$ lub π w zależności od zastosowanego układu połączeń uzwojeń transformatora. Zgodnie z równaniem (5) znajomość kąta przesunięcia ϕ umożliwia wyznaczenie współczynnika szybkości przekazywania energii przez transformator o specjalnym układzie połączeń. Wartości kąta przesunięcia napięć wtórnych oraz równania opisujące współczynniki szybkości przekazywania energii dla poszczególnych transformatorów zawiera tabela 1.

Tabela 1. Wartości współczynnika szybkości przekazywania energii

Układ połączeń uzwojeń transformatora	Kąt przesunięcia napięć wtórnych	Współczynnik szybkości przekazywania energii
Jednofazowy	0	1
Gwiazda-trójkąt	$\pi/3$	$\sqrt{3K^2 - 3K + 1}$
Scott, Le Blanc, Woodbridge	$\pi/2$	$2K - 1$
Otwarty trójkąt	$2/3\pi$	$\sqrt{3K^2 - 3K + 1}$
Pojedyncze dzielone	π	1

W zależności od kąta przesunięcia fazowego napięć strony wtórnej oraz funkcji opisującej zmiany współczynnika szybkości przekazywania energii układy połączeń uzwojeń transformatorów stosowanych do zasilania układów trakcji kolei dużych prędkości można podzielić na trzy klasy. Do pierwszej klasy należą transformatory o przesunięciu fazowym napięć równym 0 lub π . W tym przypadku stopień obciążenia poszczególnych uzwojeń wtórnych K nie wpływa na wartość współczynnika szybkości przekazywania energii. Do klasy drugiej zaliczamy transformatory, w których kąt przesunięcia między napięciami strony wtórnej jest wielokrotnością kąta $\pi/3$. Do klasy trzeciej należą transformatory o kącie przesunięcia faz strony wtórnej równym $\pi/2$. Współczynnik szybkości przekazywania energii dla tej klasy transformatorów ma największą wartość w całym zakresie zmienności obciążenia, co świadczy o dużej zdolności tłumienia niesymetrii obciążeń przez taki transformator.

Dokonując wyboru sposobu zasilania układów trakcji kolei dużych prędkości należy dążyć do wyboru takiego układu połączeń, aby zapewnić minimum szybkości przekazywania energii w całym zakresie zmian współczynnika obciążenia mocą uzwojeń wtórnych transformatora. Wybór sposobu zasilania oraz zastosowanie konkretnego układu połączeń uzwojeń transformatora ma decydujące znaczenie na proces planowania rozkładu jazdy pociągów. Ma to też zasadniczy wpływ na decyzję o zastosowaniu lub nie dodatkowych układów kompensujących chwilowe zmiany napięć w sieci zasilającej.

10. BIBLIOGRAFIA

- [1] Burchi G., Lazarou C., Golovanov N., Roscia M.: *Estimation of Voltage Unbalance in Power Systems Supplying High Speed Railway*, Electrical Power Quality and Utilisation, Vol. XI, No. 2, pp. 113-119, 2005.
- [2] Marimoto H., Uzuka T., Horiguchi A., Akita T.: *New Type of Feeding Transformer for AC Railway Traction System*, pp. 800-805, PEDS 2009.
- [3] Uzuka T., Nagasawa H.: *AC power supply for railways in Japan*, Elektrische Bahnen, Vol. 107, pp. 199-206, April-May 2009.