

ANDRZEJ SIKORA, BARBARA KULESZ*

DOBÓR TRANSFORMATORÓW PROSTOWNIKOWYCH
PODSTACJI TRAKCYJNYCHSELECTION OF RECTIFIER TRANSFORMERS FOR
TRACTION SUBSTATIONS

Streszczenie

Badanie efektywności rozwiązań różnych typów transformatorów prostownikowych tramwajowych podstacji trakcyjnych obejmuje takie zagadnienia jak masa transformatorów, moc znamionowa, sprawność i jakość napięcia sieci trakcyjnej. Użytkownik musi się zdecydować na użycie jednego konkretnego systemu transformacji. W użyciu są systemy wielofazowe (6-, 12-, 18- lub 24-pulsowe). Przy instalacji nowego systemu zwykle zwiększa się liczbę pulsów, gdyż oczekuje się poprawy jakości napięcia sieci trakcyjnej. W artykule porównano różne systemy 24-pulsowe i ich pracę w odbiegających od idealnych warunkach zasilania. Wskazano, że masa transformatora może być najbardziej znaczącym kryterium wyboru systemu, gdyż jakość napięcia wyprostowanego przy zasilaniu rzeczywistym w różnych systemach jest porównywalna.

Słowa kluczowe: transformatory wielofazowe, podstacje trakcyjne, przetwarzanie energii

Abstract

Investigation of effectiveness of different designs of rectifier transformers of tram traction substations covers issues such as transformer weight, rated power and efficiency and traction line voltage quality. The end user must decide, which transformer-rectifier system to adopt. Multi-phase systems with 6, 12, 18 or 24 pulses in dc rectified voltage are known and used. When installing new systems, number of pulses is usually increased in relation to existing systems, since it is considered to improve rectified voltage quality. This paper gives a short comparison of dc voltage quality for different 24-pulse systems under non-ideal supply conditions and this takes as a starting point for further investigation. Analysis of transformer power losses and weight is carried out, the procedure is defined and examples given. It is pointed out that transformer weight may constitute the most significant criterion for system selection, since under non-ideal supply conditions rectified voltage quality is comparable for different transformer types.

Keywords: multi-phase transformers, traction substations, energy transformation

* Dr inż. Andrzej Sikora, dr inż. Barbara Kulesz, Instytut Elektrotechniki Przemysłowej i Informatyki, Wydział Elektryczny, Politechnika Śląska.

1. Wstęp

Tramwajowe podstacje trakcyjne w Polsce wyposażane są w układy transformacji energii oparte o transformatory prostownikowe, przy czym wyprostowane napięcie zawiera składową zmienną zależną od liczby faz transformatora. Na starszych podstacjach pracują wciąż układy sześciopulsowe, składające się z transformatorów olejowych o układzie połączeń uzwojeń Yd, na nowszych zaś instalowane są układy dwunastopulsowe z transformatorami o układzie połączeń Yyd lub 24-pulsowe. Powstaje pytanie, jakim kryterium należy się kierować przy wyborze rozwiązania układu przekształtnikowego. W artykule autorzy postarają się wykazać, iż jednym z takich kryteriów może być masa i straty mocy transformatora prostownikowego.

2. Napięcie sieci trakcyjnej prądu stałego

Rozważania przeprowadzono dla kilku różnych układów transformatorów prostownikowych, przy czym w każdym przypadku mostki prostownikowe łączone były równolegle. Układy te były następujące:

- 6-pulsowy z trójfazowym transformatorem o układzie połączeń Yd,
- 24-pulsowy z dwoma identycznymi transformatorami sześciofazowymi, oznaczony jako 2(Y_{Zyd}), przy czym transformatory te mogą być konstrukcjami samodzielnymi lub też posiadać wspólny rdzeń,
- 24-pulsowy z dwunastofazowym transformatorem o nietypowym układzie połączeń Yd_{6y}₆.

Pierwszy etap analizy obejmował pracę powyższych układów przy różnych wariantach napięcia zasilania, które obejmowały napięcie sinusoidalne, odkształcone i asymetryczne [5]. Maksymalna zawartość harmonicznych w napięciu zasilania dla rozważanego typu sieci nie powinna przekraczać 8%, zaś niesymetria 2% [4]. Obliczenia były przeprowadzone na drodze symulacji komputerowej dla transformatorów o mocy 10 kV·A. Wyniki zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1

Zawartość harmonicznych (współczynnik THD) dla napięcia wyprostowanego

Napięcie zasilania	Transformator – połączenia, liczba pulsów napięcia wyprostowanego		
	6	24	24
	Yd	2(Y _{Zyd})	Yd _{6y} ₆
sinusoidalne, symetryczne	5,50	0,35	2,67
sinusoidalne, niesymetryczne $U_{\%}^{11} = 2\%$	5,70	1,48	3,05
niesinusoidalne, symetryczne $THD_U = 7,8\%$	8,55	5,32	5,71
niesinusoidalne, niesymetryczne, $U_{\%}^{11} = 2\%$, $THD_U = 7,8\%$	8,72	5,49	5,79

3. Analiza strat mocy i masy transformatorów

Koszty inwestycyjne różnych transformatorów można oszacować, porównując wymiary transformatorów, czyli zasadniczo objętość i masę materiałów czynnych uzwojeń i rdzenia. Rozważono różne układy transformatorów, zakładając, że w każdym przypadku układ zasilania jest ten sam, zaś moc po stronie prądu stałego jest również identyczna. Przy takich założeniach różnice między transformatorami wynikną z ich mocy obliczeniowej, która z kolei jest pochodną układu przetwarzania napięcia. Przyjęto, że:

- moc po stronie prądu stałego $P_0 = U_0 I_0$,
- napięcie zasilania U_{pN} jest trójfazowe, symetryczne i nieodkształcone,
- pominięto czasy komutacji diod mostków prostownikowych,
- przyjęto jednakowe wysokości kolumn i ich przekroje dla wszystkich transformatorów; podobnie przyjęto, że przekroje jarzma i kolumny są identyczne.

Znamionowa moc obliczeniowa transformatora:

$$S_N = \frac{S_{pN} + S_{sN}}{2} = \frac{\sqrt{3}U_{pN}I_{pN} + mU_{sf}I_s}{2} \quad (1)$$

Indeksy „p” odnoszą się do strony pierwotnej, „s” do wtórnej, m – to liczba faz po stronie wtórnej transformatora, a „f” to wielkości fazowe.

Między napięciem wtórnym transformatora a napięciem wyprostowanym zachodzi związek:

$$U_s = \frac{1}{\sqrt{2}}U_m = \frac{\pi U_0}{2\sqrt{2} \sin\left(\frac{\pi}{2m}\right)} \quad (2)$$

Prąd strony pierwotnej transformatora:

$$I_p = \frac{1}{\vartheta} I_s \quad (3)$$

przy czym przekładnia napięciowa określona jest jako:

$$\vartheta = \frac{U_p}{U_s} = \frac{2\sqrt{2}U_p m \sin\frac{2\pi}{m}}{\pi U_0} \quad (4)$$

Moc obliczeniowa strony wtórnej i pierwotnej:

$$S_{sN} = \frac{\pi P_0}{2m \sin\left(\frac{\pi}{2m}\right)}, \quad S_{pN} = \sqrt{3}U_p I_p \quad (5)$$

Przykładowo dla trójfazowego transformatora Yd $S_N = 1,047 P_0$.

Moc obliczeniową można powiązać z rozmiarami i masą materiałów czynnych, wychodząc ze związków:

$$\begin{aligned} S_{pN} + S_{sN} &= 3U_{pf} I_p + 3U_{sf} I_s \\ U_{pf} &\approx 4,44z_p f S_{Fe} B, \quad U_{sf} \approx 4,44z_s f S_{Fe} B \\ I_p &= j_{Cu} S_{Cup}, \quad I_s = j_{Cu} S_{Cus} \end{aligned} \quad (6)$$

przy czym:

- $z_p; z_s$ – liczba zwojów uzwojeń pierwotnego i wtórnego,
- B – indukcja w rdzeniu,
- S_{Fe} – przekrój kolumny,
- S_{cu} – przekrój uzwojeń,
- j_{cu} – gęstość prądu.

Założono, że indukcja B w rdzeniu jest identyczna dla wszystkich transformatorów i narzucona krzywą magnesowania rdzenia, zaś gęstość prądu j_{cu} wynika z warunków termicznych pracy uzwojeń i również jest taka sama w przypadku wszystkich transformatorów.

Straty mocy w transformatorze są proporcjonalne do masy rdzenia i uzwojeń według zależności:

$$\Delta P_{tr} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu} = p_{Fe} m_{Fe} + p_{Cu} m_{Cu} \quad (7)$$

przy czym:

- $\Delta P_{Fe}, \Delta P_{Cu}$ – straty w żelazie i uzwojeniach,
- p_{Fe}, p_{Cu} – stratności [W/kg],
- m_{Fe}, m_{Cu} – masy rdzenia i uzwojeń.

Wymiary okna transformatora są narzucone przez przekroje rdzenia i uzwojeń:

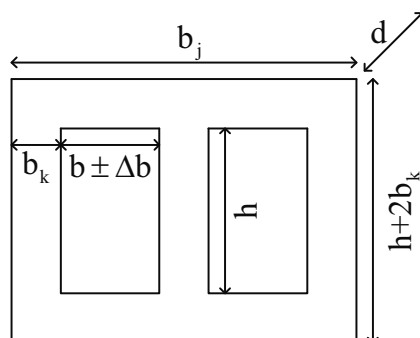
$$2(z_p S_{Cup} + z_s S_{Cus}) = kbh \quad (8)$$

gdzie:

- k – współczynnik wypełnienia okna,
- b – szerokość okna,
- h – wysokość okna.

Zmiana masy rdzenia skutkuje powiększeniem rozmiarów okna (rys. 1):

$$m'_{Fe} = m_{Fe} \left(1 \pm \frac{4\Delta b}{3(h + 2b_k) + 4b} \right) \quad (9)$$



Rys. 1. Wymiary okna transformatora

Fig. 1. Transformer window dimensions

Całkowita masa uzwojeń zależy od ich przekroju, który z kolei jest uwarunkowany mocą obliczeniową zgodnie z zależnością:

$$m'_{Cu} = m_{Cu} \left(1 \pm \frac{\Delta z_p S_{Cup} + \Delta z_s S_{Cus}}{z_p S_{Cup} + z_s S_{Cus}} \right) \quad (10)$$

Jeśli zmieni się moc obliczeniowa S_N przy stałej mocy prądu stałego P_0 , to rozmiary okna zmieniają się z b na $(b \pm \Delta b)$ (rys.1).

4. Obliczenia strat mocy i masy transformatora 2(Y_Zyd)

W dalszej części podany zostanie przykład obliczeń strat mocy masy dla układu 24-pulsowego z transformatorem 2(Y_Zyd). Wielkości z indeksem „3” odnoszą się do transformatora odniesienia, którym jest trójfazowy transformator Yd.

Napięcie strony wtórnej jest obliczone jako:

$$U_s = \frac{\pi U_0}{2m\sqrt{2} \sin \frac{\pi}{2m}}$$

i ponieważ $m = 12$, więc $U_s = 0,709 U_0$.

Napięcie strony pierwotnej liczy się zgodnie z zależnością:

$$U_p = \vartheta U_s$$

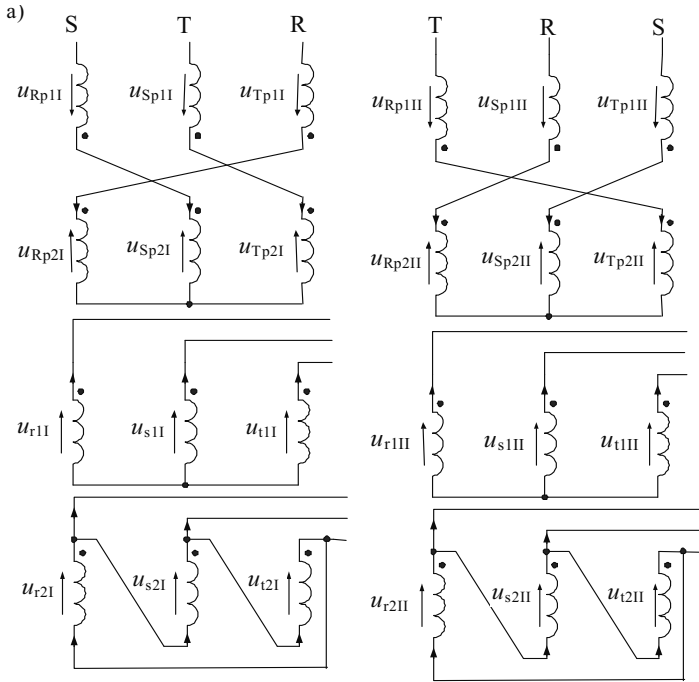
Prądy strony wtórnej:

$$I_{s1} = \frac{1}{\sqrt{6}} I_0$$

i pierwotnej

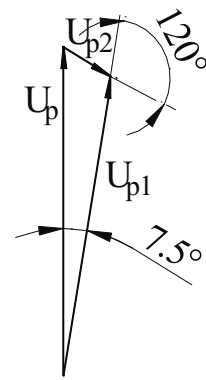
$$I_p = \frac{I_0}{\vartheta\sqrt{3}}$$

Przykład obliczeń



Rys. 2. Układ połączeń transformatora 24-pulsowego złożonego z dwóch identycznych transformatorów 6-fazowych o układzie połączeń Y_{Zyd} każdy

Fig. 2. 24-pulse transformer windings connections; transformer consists of two identical Y_{Zyd} 6-phase transformers



Rys. 3. Fazory napięć uzwojenia pierwotnego (jedna faza)

Fig. 3. Primary voltage phasors (one phase)

Układ połączeń „podwójnego” transformatora pokazano na rys. 2. Przesunięcie fazowe napięć wtórnych w transformatorze pierwszym i drugim o kąt 15° uzyskuje się poprzez podzielenie uzwojenia pierwotnego na podstawowe i dodatkowe oraz przez szeregowe ich połączenie w układ zygzyka. Fazory napięć uzwojenia zygzyka (liczby zwojów z_{p1} i z_{p2}) pokazano na rys. 3.

Między napięciami dzielonego uzwojenia strony pierwotnej zachodzą związki:

$$U_{p1} = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \sin 52,5^\circ \right) U_p, \quad U_{p2} = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \sin 7,5^\circ \right) U_p.$$

Aby obliczyć liczby zwojów poszczególnych uzwojeń, niezbędna jest znajomość napięcia zasilania i napięcia zwojowego. Napięcie zwojowe przyjmuje się identyczne jak dla transformatora 3-fazowego Yd, który stanowi tu odniesienie, zaś jego liczba zwojów określona jest jako $(z_p)_3$. Stąd też dla uzwojenia Y_Z liczby zwojów można obliczyć jako:

$$z_{p1} = 0,916(z_p)_3, \quad z_{p2} = 0,157(z_p)_3$$

a wówczas całkowita liczba zwojów wyniesie:

$$z_p = 1,067(z_p)_3$$

Przekładnia napięciowa tego transformatora w odniesieniu do transformatora Yd wynosi:

$$\vartheta = \frac{U_p}{U_s} = \frac{U_p}{(U_s)_3} \frac{(U_s)_3}{U_s} = 1,044(\vartheta)_3$$

Liczby zwojów uzwojeń wtórnych łączonych w gwiazdę (z_1) i trójkąt (z_2) oblicza się jako:

$$z_1 = \frac{1}{\vartheta}(z_p)_3, \quad z_2 = \sqrt{3}z_1$$

Ostatecznie moc obliczeniowa wynosi:

$$S_N = \frac{\sqrt{3}}{2} [1,067U_p I_p + 2U_s I_s] = \frac{\pi(1,067 + \sqrt{2})}{4m\sqrt{2} \sin \frac{\pi}{2m}} P_0$$

i $S_N = 0,88P_0$

Całkowita masa transformatora w odniesieniu do masy transformatora odniesienia $(m_{Tr})_3$ jest z kolei obliczona jako:

$$m_{Tr} = 2(m_{Tr})_3 \left[\frac{S_N}{(S_N)_3} \right]^{3/4} = 1,76(m_{Tr})_3$$

zaś całkowite straty mocy również w odniesieniu do strat mocy transformatora Yd $(\Delta P)_3$ są równe:

$$\Delta P = 1,76(\Delta P)_3$$

Przykład obliczeń – transformator zmodyfikowany

Te same co w przykładzie poprzednim dwa transformatory $Y_Z Y_d$ można nawinąć tak, by miały wspólny rdzeń. Stąd też układ połączeń, liczby zwojów, napięcia, prądy, przekładnia

napięciowa, moc obliczeniowa, masa uzwojeń i straty mocy w uzwojeniach się nie zmieniają, natomiast ulegną zmianie jedynie wartości związane z rdzeniem – masa i straty mocy. Kształt zmodyfikowanego rdzenia i rozptył strumieni, jak również ich wzajemne usytuowanie pokazano na rys. 4.

Strumień w rdzeniu:

$$\begin{aligned} |\Phi_1| &= |\Phi_2| = \Phi \\ |\Phi_{12}| &= \Phi_{12} = 2\Phi \sin 7,5^\circ \\ \Phi_{12} &= 0,261\Phi \end{aligned}$$

Przekrój rdzenia jest więc równy 26,1% przekroju rdzenia pojedynczego transformatora, stąd też masa rdzenia zmniejszy się:

$$m_{\text{Fe}\%} = \frac{6m_k + 2,261m_j}{6m_k + 4m_j} \cdot 100$$

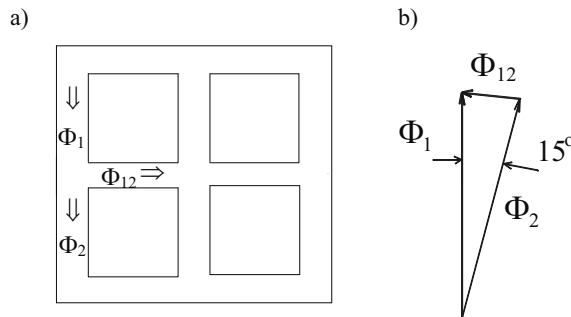
Jeżeli masa kolumn ($3m_k$) jest równa masie jarzma ($2m_j$), to całkowite zmniejszenie masy rdzenia wyniesie $m_{\text{Fe}\%} = 78\%$.

Jeśli założyć dalej, że masa uzwojeń (m_{Cu}) jest równa masie rdzenia (m_{Fe}), to masa całkowita materiałów czynnych transformatora zmniejszy się następująco:

$$m_{\text{Tr}\%} = \frac{0,78m_{\text{Fe}} + m_{\text{Cu}}}{m_{\text{Fe}} + m_{\text{Cu}}} \cdot 100 = 89\%$$

zaś w porównaniu z masą transformatora odniesienia Y_d wyniesie:

$$m_{\text{Tr}} = 0,89 \cdot 1,76(m_{\text{Tr}})_3 = 1,57(m_{\text{Tr}})_3$$



Rys. 4. Transformator 2(YZyd): a) kształt rdzenia; b) fazory strumieni magnetycznych

Fig. 4. 2(YZyd) transformer: a) core shape, b) magnetic fluxes phasors

Proporcjonalnie do zmian masy rdzenia zmieniają się również straty w rdzeniu. Jeżeli przyjmie się, że stosunek strat w rdzeniu do strat w uzwojeniach wynosi 1:4, to straty w rdzeniu można wyrazić jako:

$\Delta P_{Fe} = 0,2\Delta P$, czyli wynoszą one 20% strat całkowitych transformatora i wobec tego:

$$\Delta P_{Fe} = 0,78 \cdot 0,2(\Delta P)_{12} = 0,156(\Delta P)_{12}$$

gdzie: $(\Delta P)_{12} = 1,76(\Delta P)_3$ są stratami całkowitymi transformatora 2(Y_{Zyd}) zbudowanego na oddzielnych rdzeniach.

Ostatecznie straty całkowite transformatora wynoszą:

$$\Delta P = 0,156(\Delta P)_{12} + 0,8(\Delta P)_{12} = 0,956(\Delta P)_{12}$$

czyli w stosunku do transformatora z oddzielnymi rdzeniami zmalały o ok. 4,4%. W stosunku do transformatora odniesienia Y_d:

$$\Delta P = 0,956 \cdot 1,76(\Delta P)_3 = 1,68(\Delta P)_3$$

Względne wartości mocy obliczeniowej, strat mocy i masy dla różnych transformatorów zestawiono w tab. 2.

Tabela 2

Napięcia i prądy strony wtórnej, moc obliczeniowa, masa i straty mocy różnych transformatorów

Transformator – układ połączeń i liczba faz	$\frac{U_s}{U_0}$	$\frac{I_s}{I_0}$	$\frac{S_N}{P_0}$	$\frac{m_{Tr}}{(m_{Tr})_3}$	$\frac{\Delta P}{(\Delta P)_3}$
Y _d (3)	0,740	0,816	1,047	1	1
2(Y _{Zdy}) (12)	0,709	0,408	1,76	1,76	1,76
2(Y _{Zdy}) (12) [wspólny rdzeń]	0,709	0,408	1,76	1,57	1,68
Y _{d6y6} (12)	0,709	0,408	1,3	1,18	1,18

5. Wnioski

W porównaniu z przyjętym jako „bazowy” transformatorem odniesienia o układzie połączeń Y_d (układ 3-fazowy, 6-pulsowy), układy 24-pulsowe charakteryzują się większą mocą i mniejszym współczynnikiem THD napięcia wyprostowanego (praktycznie w każdych warunkach zasilania – tab. 1). Zastępując transformator Y_d układem dwóch identycznych transformatorów 2(Y_{Zyd}), wzrasta masa transformatora o 76%, o tyle również wzrasta jego moc (tab. 2). Transformator 2(Y_{Zyd}) ze wspólnym rdzeniem dla obu transformatorów charakteryzuje się dokładnie tą samą mocą, co układ o rdzeniach indywidualnych, a straty

mocy są nieznacznie (o 4%) niższe, ale uzyskuje się oszczędność materiałów czynnych rzędu ponad 40%. Komplikuje się jednak, czego tu nie rozważano, konstrukcja rdzenia i nawinięcie uzwojeń. Dla transformatora połączonego w układzie Yd_6y_6 następuje wzrost masy i strat mocy o 18% w stosunku do transformatora Yd .

Wyniki zamieszczone w tab. 1 wskazują jednak, że zwiększenie liczby pulsów napięcia wyprostowanego w warunkach zasilania odbiegających od rzeczywistych (czyli praktycznie stale) skutkuje znaczącym pogorszeniem jakości napięcia wyprostowanego, co obserwuje się dla każdego układu połączeń transformatorów, również dla układu Yyd , dla którego wyniki obliczeń nie zostały tu zamieszczone. Stąd też samo zmniejszenie składowej zmiennej napięcia wyprostowanego, które się zwykle zakłada, instalując układy prostownikowe o zwiększonej liczbie faz, nie jest wystarczającym kryterium wyboru układu przetwarzania. Można natomiast jako rozsądne kryterium przyjąć masę i straty w samym transformatorze. Z tego punktu widzenia transformator o układzie połączeń Yd_6y_6 wydaje się być atrakcyjnym rozwiązaniem.

Literatura

- [1] El Hayek J., *Influence of Windings Coupling on the Polygonal Equivalent Scheme of Multi-Windings Transformers*, Proc. International Conference on Electrical Machines ICEM 2002, Belgium.
- [2] Glinka T., Grzenik R., Kulesz B., Mołoń Z., Sobota J., *Transformatory prostownikowe podstacji trakcyjnych*, Wiadomości Elektrotechniczne 1-/2001, 426-430.
- [3] Ubaldini M., Foglia G., *Design and Reviewing Features in Transformers used for Power Electronics Converters*, Proc. International Conference on Electrical Machines ICEM 2006, Greece.
- [4] Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dn. 20 grudnia 2004 r. w sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznych, ruchu i eksploatacji tych sieci (Dz.U. z 2005 r., Nr 2, poz.6).
- [5] Sikora A., Kulesz B., *Przegląd rozwiązań transformatorów prostownikowych podstacji trakcyjnych*, Materiały konferencji MET 2007, 148-153.