

Andrzej Sikora, Barbara Kulesz
Politechnika Śląska, Gliwice

TRANSFORMATORY PROSTOWNIKOWE PODSTACJI TRAKCYJNEJ – POSZUKIWANIE NAJKORZYSTNIEJSZEGO ROZWIĄZANIA

TRAM TRACTION SUBSTATION RECTIFIER TRANSFORMERS – LOOKING FOR THE OPTIMUM DESIGN

Abstract: Polish trams are supplied with dc 600 V voltage. Tram network is supplied from traction substation, where transformation of power grid 3-phase, 15- or 20 kV ac voltage takes place. The transformation is achieved with transformer-rectifier sets. Rectified voltage is characterised by voltage ripple, due to transformation method. Number of pulses of ac component in rectifier voltage depends on rectifier-transformer set used and it may vary from 6 to 24. Older Polish substations operate with 6-pulse systems, the others with 12-pulse systems, sometimes 24-pulse systems are used. When substation electrical equipment is modernised, 6-pulse systems are exchanged for more modern systems. Increasing number of pulses in the rectified voltage should result in bettering of dc voltage quality. However, transformer design is usually more complex and, in addition, number of rectifier diodes and amount of wiring goes up. Increased number of transformer windings means an increase in transformer weight, including windings, core, insulation and chassis weight. At the same time, while the design power of the transformer is kept unchanged, the power losses will go up. This paper presents methodology of weight and power losses calculation for several different rectifier transformer types together with calculation results. The authors have tried to show how to select the most advantageous design of rectifier transformer, keeping in view enhancement of dc voltage quality as well as transformer investment costs due to increase in material (copper and iron) consumption.

1. Napięcie sieci trakcyjnej prądu stałego

Rozważania przeprowadzono dla 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,
- 12-pulsowy, z sześciofazowym transformatorem o układzie połączeń Yyd
- 18-pulsowy, z dziewięciofazowym transformatorem o układzie połączeń Dd₉
- 24-pulsowy, z dwunastofazowym transformatorem o nietypowym układzie połączeń Yd₆y₆.

Pierwszy etap analizy obejmował pracę powyższych układów przy różnych wariantach napięcia zasilania - napięcie sinusoidalne, odkształcone i asymetryczne. Maksymalna zawartość harmoniczných 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. Badania prowadzone były dla następujących warunków zasilania:

- napięcie symetryczne sinusoidalne (a1)

- napięcie asymetryczne sinusoidalne ($U_{\%}^{II} = 2\%$) (a2)
- napięcie symetryczne odkształcone ($THD_U = 7,8\%$) (b1)
- napięcie asymetryczne odkształcone ($U_{\%}^{II} = 2\%$ i $THD_U = 7,8\%$) (b2).

Metodyka obliczeń oraz cząstkowe wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych były podane w [5]. Skróczone zestawienie wyników podano w tabeli 1.

Tabela 1. Zawartość harmoniczných (współczynnik THD) dla napięcia wyprostowanego

Napięcie zasilania	Transformator – połączenia, liczba pulsów napięcia wyprostowanego			
	6	12	18	24
	Yd	Yyd	Dd ₉	Yd ₆ y ₆
a1	5,50	1,89	1,84	2,67
a2	5,70	2,39	2,35	3,05
b1	8,55	5,24	5,74	5,71
b2	8,72	5,35	5,87	5,79

2. Analiza strat mocy i masy transformatorów

Koszty inwestycyjne różnych transformatorów można oszacować porównując wymiary trans-

formatorów, 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, „f” to wielkości fazy.

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

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

przy czym przekładnia napięciowa g określona jest jako

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

Moc obliczeniowa strony wtórnej i pierwotnej

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

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

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

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 wg 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:

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

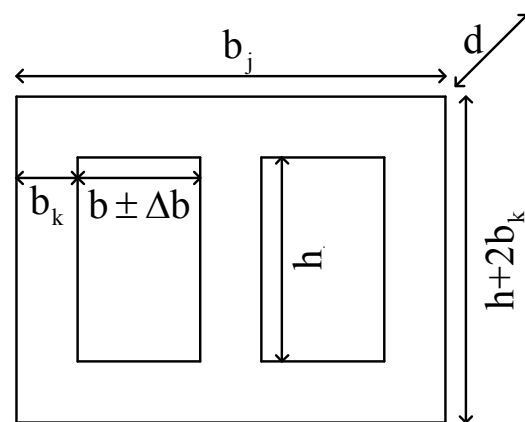
gdzie:

k – współczynnik wypełnienia okna,

zaś b, h – odpowiednio szerokość i wysokość okna.

Zmiana masy rdzenia skutkuje powiększeniem rozmiarów okna (p. 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

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).

3. Obliczenia strat mocy i masy transformatorów

Podano przykład obliczeń dla dwóch transformatorów: transformatora o układzie połączeń Dd₉, 9-fazowego 18-pulsowego i transformatora 12-fazowego o zintegrowanych uzwojeniach wtórnych Yd_{6y6}. Wielkości z indeksem „3” odnoszą się do transformatora odniesienia, którym jest trójfazowy transformator Yd.

3.1. Przykład obliczeń – transformator Dd₉

Napięcie strony wtórnej jest obliczone jako

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

Napięcie strony pierwotnej liczy się zgodnie z zależnością

$$U_p = gU_s$$

Prądy strony wtórnej i pierwotnej

$$I_{s1} = \frac{1}{\sqrt{6}} I_0, \quad I_p = \frac{I_0}{g\sqrt{3}}$$

Schemat uzwojenia transformatora 9-fazowego jednoczwojeniowego podany był w artykule [5]. W transformatorze tym uzwojenie pierwotne korzystnie jest połączyć w układ trójkąta z uwagi na strumień magnetyczny. Z wieloboku napięć indukowanych w uzwojeniach transformatora (rys.2) wynikają zależności:

$$U_s = 2U_c + 2(U_b + U_a) \sin 30^\circ$$

$$U_s = U_b + 2U_b \cos 40^\circ + 2U_b \cos 80^\circ$$

$$U_s = U_a \cos 40^\circ + U_c \cos 20^\circ$$

Z równań tych otrzymuje się

$$U_a = 0,1372U_s$$

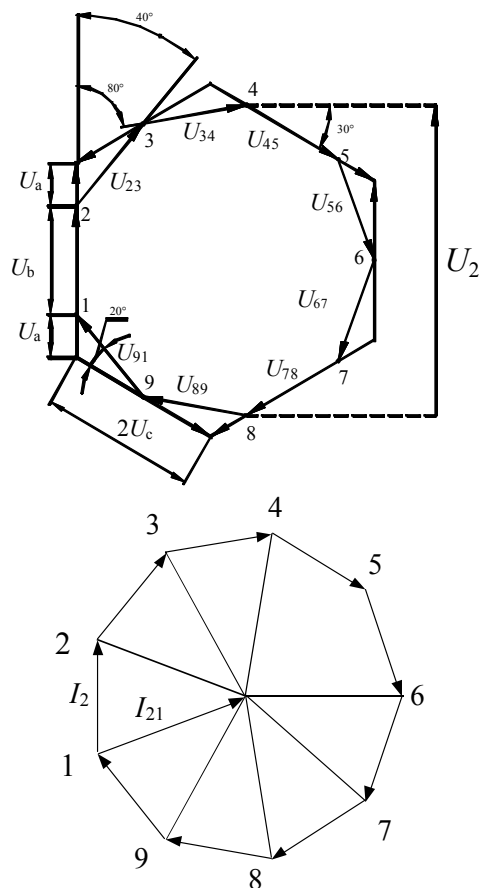
$$U_b = 0,3473U_s$$

$$U_c = 0,2577U_s$$

gdzie: U_a, U_b, U_c , - napięcia indukowane w sekcjach a, b, c uzwojenia,

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

$$U_s = 0,711U_0$$



Rys. 2. Wielobok fazy napięć i prądów transformatora 9-fazowego Dd₉

Prądy przewodowe płynące do prostownika

$$I_s = \sqrt{\frac{2}{m}} I_0 = \sqrt{\frac{2}{9}} I_0$$

Prądy płynące w uzwojeniu wynikają z wieloboku fazy prądu, rys. 2:

$$I_{21} = \frac{I_2}{2} \frac{1}{\sin 20^\circ} = 1,46I_2$$

Moc obliczeniowa

$$S_{Ns} = [3U_b + 6(U_a + U_c)] I_{21}$$

$$S_{Ns} = 1,67P_0, \quad S_{Np} = 1,005P_0$$

$$S_N = 0,5(S_{Np} + S_{Ns}) = 1,34P_0$$

Masa transformatora

$$m_{tr} = \left[\frac{S_N}{(S_N)_3} \right]^{0.75} \quad (m_{tr})_3 = 1,20(m_{tr})_3$$

Straty mocy w transformatorze

$$\Delta P = 1,20(\Delta P)_3$$

3.2. Przykład obliczeń – transformator Yd_6y_6

Transformator jednordzeniowy ze zintegrowanym uzwojeniem wtórnym jest przedmiotem patentu [6]. Schemat połączenia uzwojenia pokazano na rys. 3, rozmieszczenie uzwojeń w oknie transformatora pokazano na rys. 4. Przykład podzielenia i rozmieszczenia uzwojeń w oknie transformatora ma na celu wyrównać reaktancje widziane z zacisków uzwojenia wtórnego.

Napięcie uzwojenia wtórnego nie ulegnie zmianie

$$U_s = \frac{\pi U_0}{2m\sqrt{2} \sin 7,5^\circ} = 0,709U_0$$

Prądy w uzwojeniu składającym się z dwóch cewek połączonych równoległe :
pierwotnym

$$I_p = \sqrt{\frac{2}{3}} I_0 \frac{1}{g}$$

wtórnym uzwojeniu połączonym w gwiazdę z_2

$$I_2 = \frac{I_0}{\sqrt{3}}$$

wtórnym uzwojeniu połączonym w zygzak z_1

$$I_1 = \frac{I_0}{\sqrt{6}}$$

Liczba zwojów:

uzwojenia połączonego w gwiazdę

$$z_2 = 0,916z_s$$

uzwojenia połączonego zygzak

$$z_{1g} = z_{1d} = 0,151z_s$$

uzwojenia, które połączone jest w sześciokąt, bok dłuższy

$$z_3 = \sqrt{3}z_s$$

uzwojenia, które połączone jest w sześciokąt, bok krótszy

$$z_4 = 2z_s \sin 7,5^\circ = 0,261z_s$$

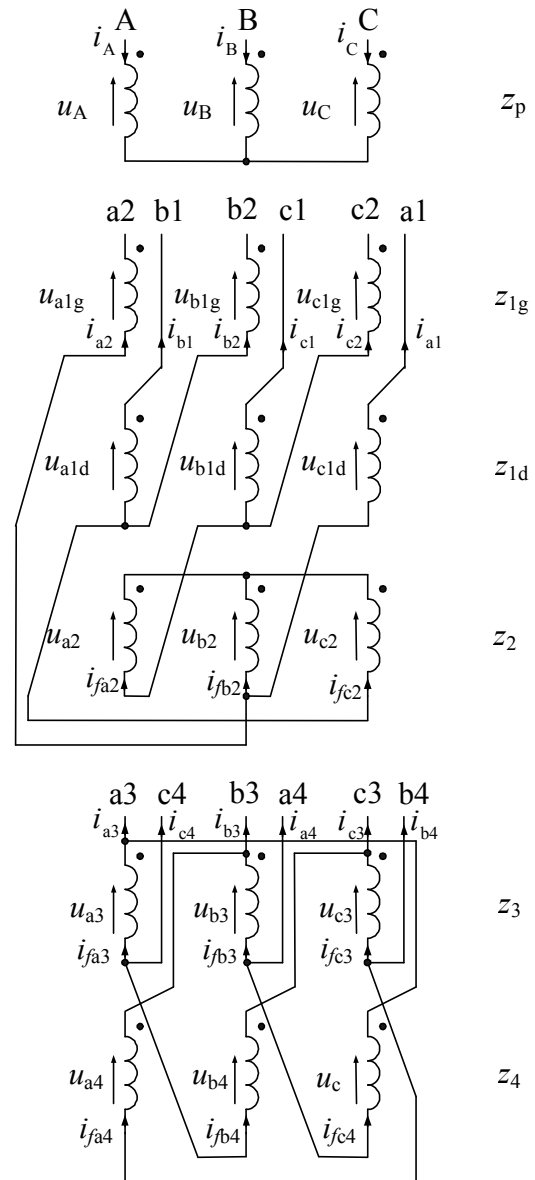
Przy czym

$$z_s = \frac{1}{g} z_p$$

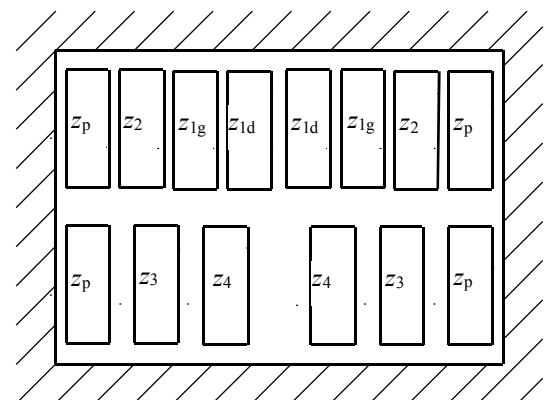
a z_p oznacza liczbę zwojów uzwojenia pierwotnego gwiazdowego transformatora Yd.

Identyczne proporcje do liczby zwojów dotyczą rozkładu napięć na uzwojeniach

$$U_2 = 0,916U_s, U_{1g} = U_{1d} = 0,151U_s$$



Rys. 3. Schemat uzwojeń transformatora Yd_6y_6



Rys. 4. Rozmieszczenie uzwojeń w oknie transformatora Yd_6y_6

Moc obliczeniowa uzwojeń wtórnych połączonych w gwiazdę i zygzak

$$S_{12} = 3U_{2f}I_2 + 6U_{1f}I_1 = 0,8P_0$$

Identyczną moc obliczeniową będzie mieć uzwojenie połączone w sześciokąt

$$S_{34} = 0,8P_0$$

Moc obliczeniowa uzwojenia pierwotnego

$$S_{pN} = \sqrt{3}I_p U_p = \sqrt{3}\sqrt{\frac{2}{3}}I_0(0,709U_0)$$

$$S_{pN} = 1,003P_0$$

Moc obliczeniowa transformatora

$$S_N = \frac{1}{2}(S_{pN} + S_{12} + S_{34}) = 1,3P_0$$

Masa transformatora w odniesieniu do masy transformatora Yd

$$m_{tr} = (m_{tr})_3 \left[\frac{S_N}{(S_N)_3} \right]^{3/4} = 1,18(m_{tr})_3$$

wzrośnie o 18%. Identycznie wzrosną straty $\Delta P = 1,18(\Delta P)_3$.

Względne wartości mocy obliczeniowej, strat mocy i masy dla różnych transformatorów są zestawione w tabeli 2.

Tabela 2. Napięcia i prądy strony wtórnej, moc obliczeniowa, masa i straty mocy różnych transformatorów

Transformator	$\frac{U_s}{U_0}$	$\frac{I_s}{I_0}$	$\frac{S_N}{P_0}$	$\frac{m_{tr}}{(m_{tr})_3}$	$\frac{\Delta P}{(\Delta P)_3}$
Yd (3)	0,740	0,816	1,047	1	1
Yyd (6)	0,715	0,577	1,22	1,12	1,12
Dd ₉ (9)	0,711	0,471	1,34	1,20	1,20
Yd ₆ y ₆ (12)	0,709	0,408	1,3	1,18	1,18

Wnioski

W porównaniu z przyjętym jako „bazowy” transformator odniesienia o układzie połączeń Yd (układ 3-fazowy, 6-pulsowy), układy o większej liczbie pulsów charakteryzują się mniejszym współczynnikiem THD napięcia wyprostowanego praktycznie w każdych warunkach zasilania – p. Tab.1.

Zastępując transformator Yd układem standardowym 6-fazowym, 12-pulsowym Yyd wzrasta o ponad 20% moc obliczeniowa transformatora, zaś o ok. 10% masa uzwojeń i rdzenia oraz straty mocy. W wypadku użycia transformatora 9-fazowego, 18-pulsowego Dd₉ moc obliczeniowa w stosunku do bazowego transformatora Yd wzrasta o 1/3, masa i straty mocy o 1/5.

Komplikuje się jednak, czego tu nie rozważano, konstrukcja rdzenia i nawinięcie uzwojeń. Dla transformatora połączonego w układzie Yd₆y₆ następuje wzrost masy i strat mocy o 18% w stosunku do transformatora Yd przy zwiększeniu mocy obliczeniowej o 1/3. Wyniki zamieszczone w Tabeli 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 się obserwuje dla każdego układu połączeń transformatorów. 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 Yd₆y₆ wydaje się być rozwiązaniem atrakcyjnym.

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, pp. 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, Chania, Crete, Greece.
- [4]. Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dn. 20 grudnia 2004r. w sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznych, ruchu i eksploatacji tych sieci (Dz.U. z 2005r., Nr 2, poz.6)
- [5]. Sikora A., Kulesz B.: *Zależność jakości energii sieci trakcyjnej od zastosowanych układów transformatorów prostownikowych*. Materiały konferencji „Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych” BOBRME Komel, maj 2008.
- [6]. *Układ prostownikowy 24-pulsowy*. Patent RP, MKP H02M7/02. Opublikowany w Biuletynie Urzędu Patentowego, 3.06.2002, nr 12/2002. Twórca: Sobota Janusz, własność: ALSTOM T&D Spółka z o.o., Zakład Transformatorów w Mikołowie.