

ANDRZEJ SIKORA, BARBARA KULESZ*

WPLYW KSZTAŁTU NAPIĘCIA ZASILANIA
NA PRACĘ TRANSFORMATORÓW
PROSTOWNIKOWYCH 24-PULSOWYCHIMPACT OF SUPPLY VOLTAGE WAVEFORM ON 24-PULSE
TRANSFORMER-RECTIFIER OPERATION

Streszczenie

Napięcie zasilania tramwajowej sieci trakcyjnej uzyskuje się przez prostowanie napięcia sieci energetycznej. W zależności od użytego transformatora i prostownika można uzyskać różne kształty napięcia wyprostowanego. W napięciu tym zawsze obecna jest składowa przemienna, której zawartość można oszacować np. za pomocą współczynnika THD. W artykule zaprezentowano dwa odmienne systemy prostownikowe 24-pulsowe, zbudowane na bazie dwóch różnych transformatorów ($2(Y_{z}y_d)$ i Y_{d,y_6}), zaś wyniki obliczeń odniesiono do systemu 6-pulsowego. Przeanalizowano również wpływ odkształcenia napięcia zasilania na napięcie wyprostowane. Współczynnik THD w napięciu zasilającym wynika z wartości skutecznych czy też amplitud poszczególnych harmonicznnych, ale wzięliśmy również pod uwagę różne przesunięcia fazowe pomiędzy najbardziej istotnymi harmonicznymi (rzęd 5 i 70). Cztery przypadki skrajne zostały przedstawione i przeanalizowane. Stwierdziliśmy, że największą zaletą systemu Y_{d,y_6} jest mniejsza wrażliwość na odkształcenia napięcia zasilania.

Słowa kluczowe: zasilanie trakcji tramwajowej, transformator prostownikowy, transformator wielofazowy

Abstract

Tram supply networks are supplied with dc voltage, obtained by rectifying power grid voltage. Depending on type of transformer used and rectifier connection used, different dc waveform shapes can be achieved. The ever-present ac content of rectified voltage may be evaluated with, for instance, THD factor. The paper presents different methods of rectifying ac voltage, using 24-pulse systems, built on basis of two different transformers ($2(Y_{z}y_d)$ and Y_{d,y_6}), with reference to basic 6-pulse system. Since ac voltage is seldom ideal, we have analysed also the influence of supply distortion on resulting dc voltage. Apart from analysing the usual THD factor in ac voltage, which takes into account amplitudes (RMS-values) of different harmonics, we have also taken into account possible phase shifts between decisive harmonics (of 5th and 7th order). Four extreme cases are presented in the paper. After detailed analysis, we have concluded, that the greatest advantage of Y_{d,y_6} system is lower sensitivity as far as distortion of supply voltage is concerned.

Keywords: tram traction supply, rectifier transformer, multi-phase transformer

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

1. Wstęp

Do uzyskania napięcia trakcji w szczególności tramwajowej stosuje się zespoły prostownikowe instalowane na podstacjach trakcyjnych, składające się z transformatorów o różnych układach połączeń ($m_2 \geq 3$) i układów prostownikowych złożonych z mostków diodowych niesterowanych. Dzięki wielofazowości tych transformatorów można uzyskać układy prostownicze o powiększonej liczbie pulsów napięcia wyprostowanego przypadającej na jeden okres napięcia zasilającego. Układem najprostszym, wciąż jeszcze znajdującym zastosowanie, jest układ prostownikowy 6-pulsowy, oparty na trójfazowym transformatorze z układem połączeń Yd.

Większą liczbę faz można uzyskać przez zastosowanie różnych wariantów połączeń. Jednak warunkiem do otrzymania napięcia 24-pulsowego jest otrzymanie napięć wtórnych transformatora przesuniętych między fazami kolejnymi o 15° , 15° , 15° , 75° itd.

Liczba pulsów w napięciu wyprostowanym zależy od zastosowanego układu przekształtnikowego. Na wartość zarówno chwilową, jak i średnią napięcia wyprostowanego ma wpływ wiele innych czynników poza budową i liczbą diod mostka prostownikowego, m.in. symetria budowy transformatora, symetria napięć zasilających układ oraz ich odkształcenie od sinusoidy, praca w liniowym zakresie charakterystyki magnesowania transformatora jak również charakter i jakość procesów komutacyjnych w układzie transformator–prostownik.

2. Procesy komutacyjne w prostownikach niesterowanych

Komutację w układzie prostownikowym definiuje się jako całość procesów przejmowania prądu płynącego przez dany zawór przez zawór kolejnej gałęzi przekształtnika. Proces „wyszazania” prądu w jednej gałęzi prostownika i „narastania” w drugiej nie może przebiegać skokowo (w czasie $\Delta t = 0$), ze względu na wymóg ciągłości prądu. W trakcie procesu komutacji obserwuje się oddziaływanie dwóch napięć: „pierwotnego” – jest to napięcie fazowe odpowiedniego uzwojenia transformatora (napięcie zasilania) i napięcia samoindukcji obwodu anodowego (wynikające z istnienia indukcyjności obwodu komutacyjnego), które powoduje oczywiście zmniejszenie całkowitego napięcia w danej gałęzi mostka.

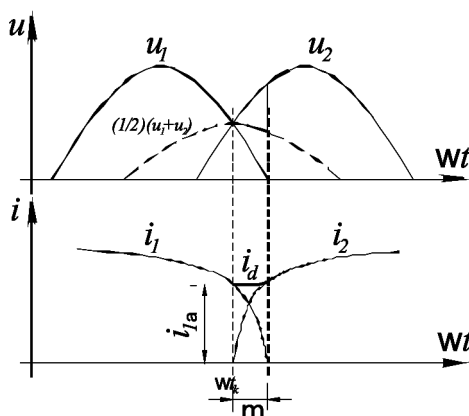
Dla układu wielopulsowego o liczbie pulsów q , średni spadek napięcia wyprostowanego spowodowany komutacją wynosi [3]

$$\Delta U_d = \frac{q}{2\pi} L_k \int_0^\mu \left(\frac{di_2}{dt} - \frac{di_1}{dt} - \frac{di_d}{dt} \right) d\vartheta = \quad (1)$$

$$\frac{q}{2\pi} L_k \int_0^\mu \frac{di_1}{dt} d\vartheta = -\frac{q}{2\pi} \omega L_k \int_{i_{1\alpha}}^0 di_1 = \frac{q}{2\pi} X_k i_{1\alpha}$$

gdzie:

- i_1 – prąd komutującej gałęzi mostka,
- $i_{1\alpha}$ – wartość chwilowa prądu w gałęzi kończącej przewodzenie (rys. 1).



Rys. 1. Napięcia i prądy w obwodzie komutacyjnym

Fig. 1. Voltages and currents in commutating circuit

Spadek napięcia wyprostowanego ΔU_d zależy od liczby pulsów q , od reaktancji obwodu komutacyjnego i od prądu wyprostowanego (wartość chwilowa w chwili rozpoczęcia komutacji). Zakładając, że $i_d = I_d$

$$U_d = U_m \frac{q}{\pi} \sin \frac{\pi}{q} \left[1 - \frac{\omega L_k I_d}{2U_m \sin \frac{\pi}{q}} \right] \quad (2)$$

kąt komutacji μ (rys. 1) jest równy

$$\mu = \arccos \left(1 - \frac{\omega L_k I_d}{2U_m \sin \frac{\pi}{q}} \right) \quad (3)$$

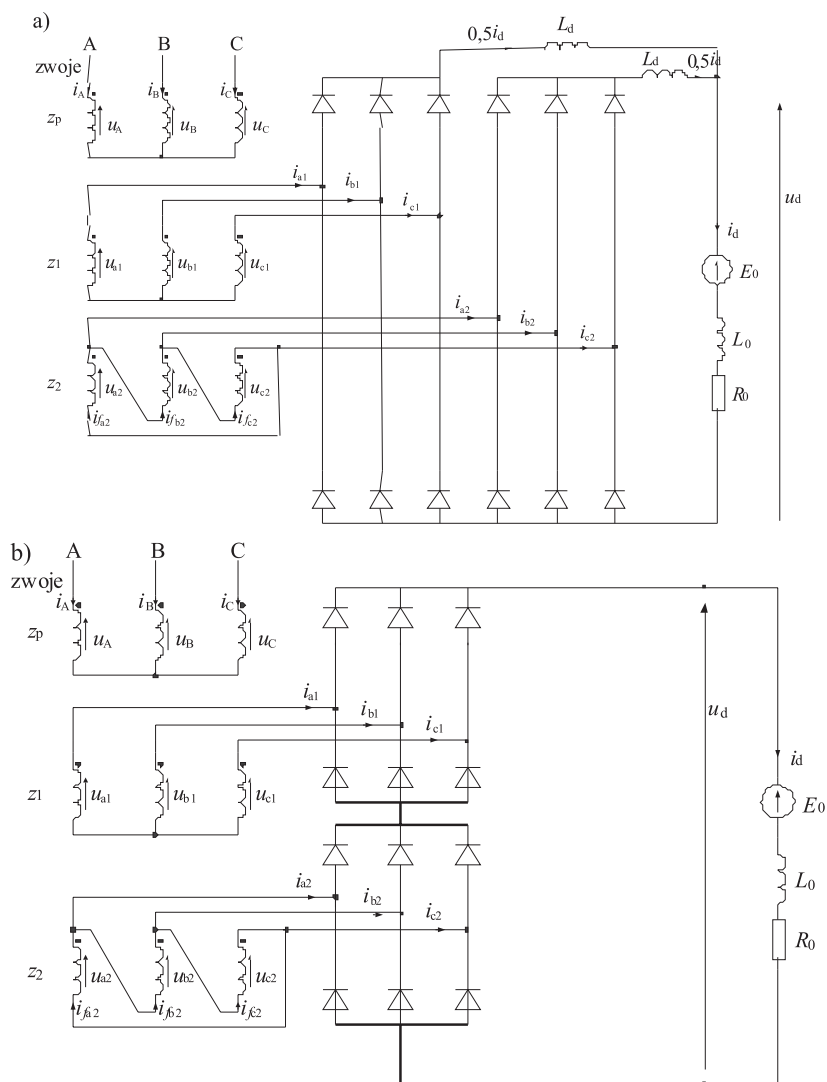
Wartość indukcyjności obwodu komutacyjnego L_k będzie zależna od indukcyjności L_p i L_s obwodu pierwotnego i wtórnego oraz od układu połączeń transformatora.

Wartość średnią prądu wyprostowanego uzyskuje się przez zsumowanie wartości średnich prądów w przedziale komutacji i poza nią.

3. Badania symulacyjne

Uzyskanie napięcia wyprostowanego ze składową zmienną 24-pulsową wymaga zastosowania transformatora 12-fazowego z przesunięciami fazowymi napięć fazowych strony wtórnej wynoszącymi $15^\circ, 15^\circ, 75^\circ, 15^\circ$. Układ taki można skonstruować, np. wykorzystując dwa transformatory 6-fazowe Y_{yd} i przesuwając w fazie ich napięcia zasilania strony pier-

wotnej (układ $2(Y_{zd})$) lub też np. poprzez wykorzystanie transformatora skonstruowanego w ALSTOM Mikołów o nietypowym układzie połączeń faz wtórnych (Yd_6y_6 [1]). Zarówno jeden, jak i drugi transformator mogą współpracować z układem prostownikowym równoległym lub szeregowym. Połączenie jednego transformatora Y_{zd} z układem równoległym lub szeregowym prostownikowym pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Transformator Y_{zd} (6-fazowy) współpracujący z układem prostownikowym:
a) równoległym, b) szeregowym

Fig. 2. 6-phase Y_{zd} transformer operating with rectifier connected: a) in parallel, b) in series

Praca układów została zamodelowana dla transformatorów o mocy 10 kVA. By przeanalizować wpływ napięcia zasilania na obciążanie się poszczególnych uzwojeń transformatora, a także na przebiegi napięcia wyprostowanego, zaproponowano następujące warunki zasilania:

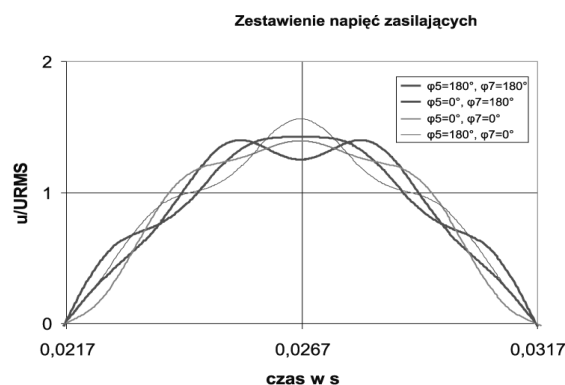
- zasilanie symetryczne napięciem sinusoidalnym (warunki odniesienia),
- zasilanie asymetryczne napięciem sinusoidalnym,
- zasilanie symetryczne napięciem odkształconym, z zawartością 5. i 7. harmonicznej, przy czym THD napięcia zasilania wyniósł 7,81%. Uwzględniono jednak różne przesunięcia obu tych harmonicznych względem harmonicznej podstawowej. Współczynnik THD definiowany jest jako

$$\text{THD} = \left(\sqrt{\sum_{v=2}^{40} U_v^2} / U_1 \right) \cdot 100$$

Rozważono cztery przypadki:

- a) kąt przesunięcia harmonicznej 5. względem 1. $\varphi_5 = 0^\circ$, kąt przesunięcia harmonicznej 7. względem 1. $\varphi_7 = 0^\circ$,
- b) $\varphi_5 = 0^\circ$, $\varphi_7 = 180^\circ$,
- c) $\varphi_5 = 180^\circ$, $\varphi_7 = 0^\circ$,
- d) $\varphi_5 = 180^\circ$, $\varphi_7 = 180^\circ$.

Kształty poszczególnych napięć zasilających pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Napięcia zasilania (dodatnia półfala) o współczynniku THD = 7,81% i różnych kątach fazowych harmonicznych $v = 5$ i $v = 7$

Fig. 3. Different shapes of supply voltage with THD coefficient equal to 7.81% and different phase shifts of 5th and 7th harmonic

Współczynniki THD napięcia wyprostowanego zgrupowano w tabeli 1, przy czym ograniczono się już do tylko dwóch wariantów napięcia zasilającego, przy których kształt najbardziej odbiega od sinusoidy, tj. dla kombinacji $\varphi_5 = 0^\circ$, $\varphi_7 = 180^\circ$ i $\varphi_5 = 180^\circ$, $\varphi_7 = 180^\circ$.

**Odształcenie napięcia wyprostowanego przy różnych wariantach
odkształcenia napięcia zasilania**

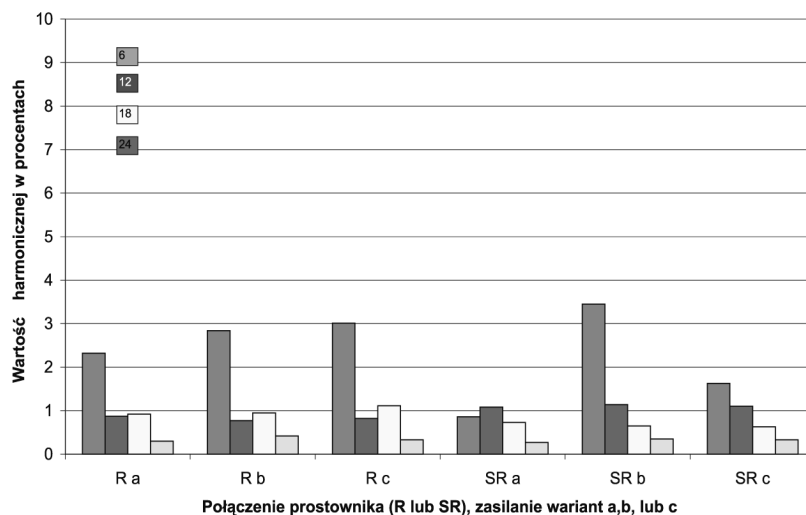
Układ	Wariant zasilania	THD napięcia wyprostowanego w [%]
Yd ₆ y ₆ równoległy	a	2,7
	b	3,15
	c	3,38
Yd ₆ y ₆ szeregowo-równoległy	a	1,65
	b	3,73
	c	2,14
2(Y _z yd) równoległy	a	0,34
	b	8,23
	c	1,08
2(Y _z yd) szeregowo-równoległy	a	0,71
	b	8,23
	c	1,29

a) napięcie sinusoidalne,

b) napięcie odkształcone, THD = 7,81%, $\varphi_5 = 0^\circ$, $\varphi_7 = 180^\circ$,

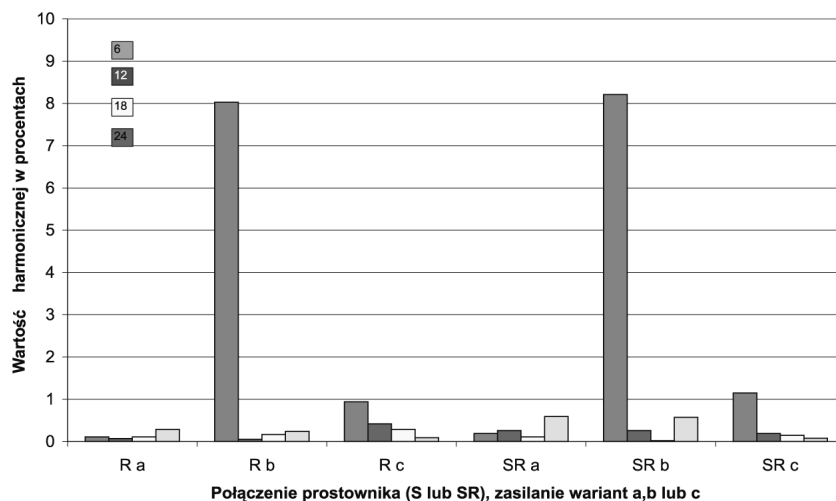
c) napięcie odkształcone, THD = 7,81%, $\varphi_5 = 180^\circ$, $\varphi_7 = 180^\circ$.

Oba transformatory okazują się jednak wrażliwe nie tylko na odkształcenie napięcia zasilania w sensie amplitudowo definiowanego THD, ale również na przesunięcia fazowe poszczególnych harmonicznnych. Przykładowe wyniki dla wszystkich układów połączeń i napięć, jak w tab. 1, pokazano na rys. 4 i 5.



Rys. 4. Wartości harmonicznnych 6, 12, 18 i 24 dla transformatora Yd₆y₆ zasilanego napięciem sinusoidalnym i odkształconym (warianty a,b i c wg oznaczeń w tab. 1), przy prostownikach połączonych równoległe (R) lub szeregowo-równoległe (SR)

Fig. 4. Harmonic values (order 6, 12, 18, 24) for Yd₆y₆ transformer supplied with sinusoidal and distorted voltage (variants a,b,c are defined in accordance with Table 1), with rectifiers connected in parallel (R) or in mixed, series-parallel circuit (SR)

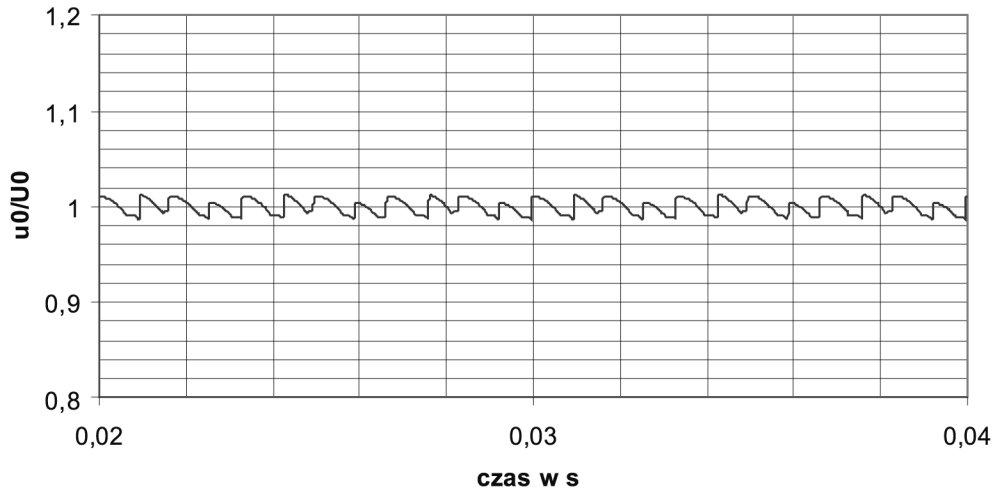


Rys. 5. Wartości harmonicznych 6, 12, 18 i 24 dla transformatora $2(Y_z y_d)$ zasilanego napięciem sinusoidalnym i odkształconym (warianty a,b i c wg oznaczeń w tabeli 1), przy prostownikach połączonych równolegle (R) lub szeregowo-równolegle (SR)

Fig. 5. Harmonic values (order 6,12,18,24) for $2(Y_z y_d)$ transformer supplied with sinusoidal and distorted voltage (variants a,b,c are defined in accordance with Table 1), with rectifiers connected in parallel (R) or in mixed, series-parallel circuit (SR)

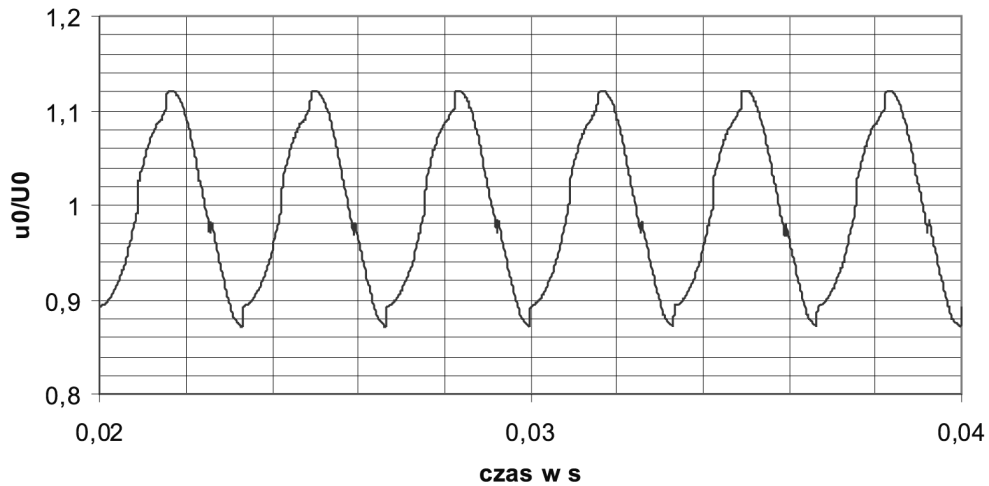
Jak pokazano już wcześniej [6], transformator $Yd_6 y_6$ w wariantcie połączenia równoległego prostowników zachowuje się praktycznie stale jak układ 6-pulsowy. Przy połączeniu szeregowo-równoległym wzrasta składowa 12-pulsowa napięcia wyprostowanego, jednak przy zasilaniu czysto sinusoidalnym jest ona największa ze wszystkich. Niemniej odkształcenie napięcia zasilającego eliminuje już ten efekt całkowicie (rys. 4).

Układ $2(Y_z y_d)$ pracuje prawidłowo zarówno przy połączeniu równoległym, jak i szeregowo-równoległym prostowników (rys. 5), przy czym tętnienie napięcia wyprostowanego jest niewielkie (THD niższe niż 1%). Jednak odkształcenie napięcia zasilania natychmiast wprowadza bardzo duży udział harmonicznej szóstej i jest on więcej niż 2x wyższy niż w transformatorze $Yd_6 y_6$, który tym samym wykazuje się mniejszą wrażliwością na odkształcenie napięcia zasilania. Przebiegi napięć wyprostowanych pokazano na rys. 6 i 7.



Rys. 6. Przebieg napięcia wyprostowanego dla transformatora $2(Y_2yd)$ zasilanego napięciem sinusoidalnym; połączenie prostownika szeregowo-równoległe

Fig. 6. Dc voltage waveform for $2(Y_2yd)$ transformer supplied with sinusoidal voltage; rectifier connected in mixed fashion (series-parallel connection)



Rys. 7. Przebieg napięcia wyprostowanego dla transformatora $2(Y_2yd)$ zasilanego napięciem odkształconym wariant $THD = 7,81\%$, $\varphi_5 = 0^\circ$, $\varphi_7 = 180^\circ$; połączenie prostownika szeregowo-równoległe

Fig. 7. Dc voltage waveform for $2(Y_2yd)$ transformer supplied with distorted voltage, $THD = 7.81\%$ and phase shifts $\varphi_5 = 0^\circ$, $\varphi_7 = 180^\circ$; rectifier connected in mixed fashion (series-parallel connection)

4. Wnioski

Transformator Yd_6y_6 powstał m.in. dlatego, by obniżyć koszty produkcji transformatora (obniżenie masy uzwojeń i rdzenia) w porównaniu z innym znanymi rozwiązaniami transformatorów prostownikowych [7].

Drugim istotnym względem była możliwość poprawy jakości napięcia wyprostowanego i prądu zasilania w sensie zmniejszenia odpowiednich współczynników THD. Obserwowanie wpływu kształtu napięcia zasilania na pracę zespołu transformator–prostownik przeprowadzone dla najprostszego układu Yd pokazało, że sam współczynnik THD napięcia zasilania, definiowany na podstawie zależności wiążącej amplitudy poszczególnych harmonicznych, jest niewystarczający.

Przy identycznym współczynniku i identycznych wartościach skutecznych 5. i 7. harmonicznej, ale różnych kątach fazowych tych napięć uzyskuje się różne kształty napięć zasilania. Ma to wpływ na czasy komutacji diod w poszczególnych gałęziach mostka prostownikowego oraz, co bardziej istotne, wpływ na wartości chwilowe komutowanych prądów, co z kolei przekłada się na kształt i tym samym spektrum harmonicznych napięcia wyjściowego. Współczynnik THD w napięciu wyjściowym dla czterech pokazanych przypadków wynosi od 4,59 do 11,41%, przy największej (szóstej) harmonicznej zmieniającej się w granicach od 3,8 do 11,2%.

Porównując pracę transformatorów $Yd_6y_{6,1}2(Y_{z,yd})$, zauważa się, że Yd_6y_6 w wariantcie połączenia równoległego prostowników zachowuje się praktycznie stale jak układ 6-pulsowy. Przy połączeniu szeregowo-równoległym wzrasta składowa 12-pulsowa napięcia wyprostowanego, ale przy zasilaniu czysto sinusoidalnym jest ona największa ze wszystkich. Niemniej odkształcenie napięcia zasilającego eliminuje już ten efekt całkowicie.

Układ $2(Y_{z,yd})$ pracuje prawidłowo zarówno przy połączeniu równoległym, jak i szeregowo-równoległym prostowników, przy czym tętnienie napięcia wyprostowanego jest niewielkie (THD niższe od 1%). Odkształcenie napięcia zasilania natychmiast wprowadza bardzo duży udział harmonicznej szóstej i jest on więcej niż 2x wyższy niż w transformatorze Yd_6y_6 , który tym samym wykazuje się mniejszą wrażliwością na odkształcenie napięcia zasilania. Aby jednak uzyskać projektowaną pracę 24-pulsową w transformatorze Yd_6y_6 , należy zmienić układ połączeń prostownika i prawdopodobnie dodać układ dławików wygładzających.

L i t e r a t u r a

- [1] Sikora A., Kulesz B., *Multi-phase rectifier transformers and their impact on traction lines voltage quality*, ICEM 2008 Proceedings, Vilamoura, Portugal.
- [2] Sikora A., Kulesz B., *Effectiveness of different designs of 12- and 24-pulse rectifier transformers*, ICEM 2008 Proceedings, Vilamoura, Portugal.
- [3] Tunia H., Winiarski B., *Podstawy energoelektroniki*, WNT, Warszawa 1980.
- [4] 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.
- [5] *Układ prostownikowy 24-pulsowy*, Patent RP, MKP H02M7/02. Biuletyn Urzędu Patentowego, 3.06.2002, nr 12/2002. Twórca: Sobota Janusz, własność: ALSTOM T&D Spółka z o.o., Zakład Transformatorów w Mikołowie.

- [6] Sikora A., Kulesz B., *Wpływ procesów komutacyjnych na pracę transformatora prostownikowego o nietypowym układzie połączeń*, artykuł przyjęty na konferencję PEMINE 2010.
- [7] Sikora A., Kulesz B., *Dobór transformatorów prostownikowych podstacji trakcyjnych*, materiały konferencji SEMTRAK, 2008.