

Andrzej Sikora, Barbara Kulesz  
Politechnika Śląska, Gliwice

## WPLYW PROCESÓW KOMUTACYJNYCH NA PRACĘ TRANSFORMATORA PROSTOWNIKOWEGO O NIETYPOWYM UKŁADZIE POŁĄCZEŃ

### COMMUTATION PROCESSES IN NON-STANDARD RECTIFIER TRANSFORMER

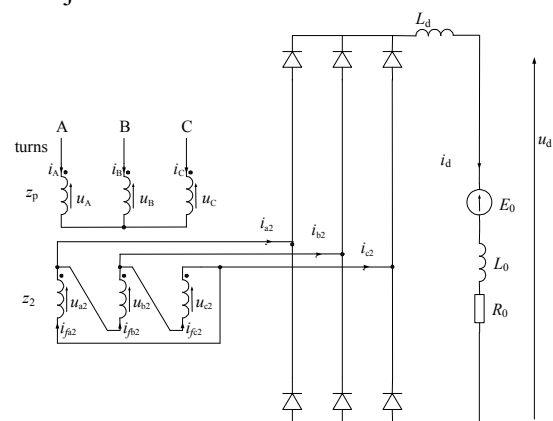
**Abstract:** To obtain rectified voltage needed for d.c. traction networks, different types of energy transformation circuits may be used. This paper deals with 6- and 24-pulse transformer-rectified set operation under different supply conditions. Commutation issues have been investigated for Yd transformer supplied with sinusoidal and distorted voltage. It has been shown that supply voltage THD factor affecting rectified voltage quality is not sufficient to examine voltage transformation extensively; phase angles of the harmonics have been researched as well and their impact on commutation processes presented. For 24-pulse system it has been shown that transformer windings connection scheme giving the desired phase shifts between secondary side voltages is not sufficient to achieve 24 pulses in rectified voltage. Due to commutation, this system produces 6 pulse output voltage only. In order to modernise traction substation, simple switchover from 3-phase to 12-phase transformer with presented windings connection is not, therefore, possible.

#### 1. Wstęp

Pojazdy trakcyjne w Polsce zasilane są z sieci trakcyjnej prądu stałego. Do uzyskania tego napięcia 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 o trójfazowy transformator z układem połączeń Yd (rys.1). Większą liczbę faz można uzyskać przez zastosowanie różnych wariantów połączeń, warunkiem jednak dla otrzymania napięcia 24-pulsowego jest otrzymanie napięć wtórnych transformatora przesuniętych między fazami kolejnymi o  $15^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $75^\circ$ , 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. W niniejszym artykule skoncentrujemy się na pokazaniu, jak komutacja prądów oddziałuje na jakość napięcia wyprostowanego i sieć zasilającą na przykładzie transformatora 24-pulsowego o nietypowym układzie połączeń uzwojeń.



Rys. 1. Transformator prostownikowy 3-fazowy, 6-pulsowy – układ Yd

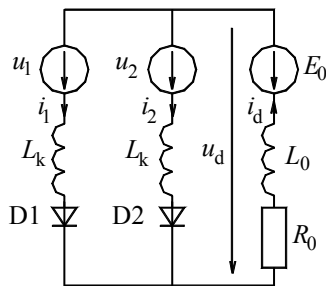
#### 2. Procesy komutacyjne w prostownikach niesterowanych

Komutację w układzie prostownikowym definiuje się jako całość procesów przejmowania prądu płynącego przez dany zawór przez zawór

kolejnej gałęzi przekształtnika. Jeśli proces obejmuje dwa zawory, to mówimy o komutacji prostej, jeśli więcej, to o złożonej. Proces “wygaszania” 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 złożonych układów transformacyjnych poza obniżeniem średniej wartości napięcia wyprostowanego, może również przy specyficznych warunkach zasilania wystąpić niepożądane z punktu widzenia odbiorcy odkształcenie napięcia wyprostowanego.

### 3. Komutacja prosta - pojęcia

Rys.2 przedstawia obwód zastępczy dla komutacji prostej prostownika diodowego. Odbiornik jest zamodelowany przy pomocy elementów  $R_0-L_0-E_0$  i zakłada się, że indukcyjność  $L_0$  jest na tyle duża, że wartość prądu chwilowego odbiornika jest równa wartości średniej tego prądu.  $L_k$  to indukcyjność zastępcza obwodu anodowego. Zakłada się, że diody są idealne.



Rys. 2. Zastępczy schemat obwodu komutacyjnego

Po przeprowadzeniu analizy tego obwodu [3] spadek napięcia wyjściowego spowodowany niezerowym czasem komutacji wynosi

$$\Delta u_d = \frac{1}{2} \left( u_2 - u_1 - L_k \frac{di_d}{dt} \right) \quad (1)$$

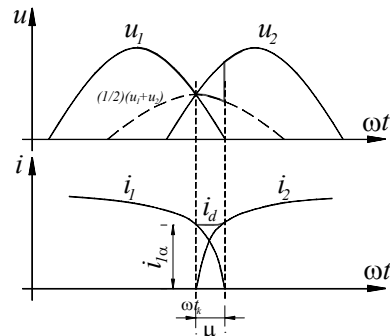
zaś uogólniając powyższe zależności na układ wielopulsowy o liczbie pulsów  $q$ , średni spadek napięcia wyprostowanego spowodowany komutacją wyniesie po przekształceniach:

$$\Delta U_d = \frac{q}{2\pi} L_k \int_0^\mu \left( \frac{di_2}{dt} - \frac{di_1}{dt} - \frac{di_d}{dt} \right) d\vartheta = \frac{q}{2\pi} L_k \int_0^\mu \frac{di_1}{dt} d\vartheta = -\frac{q}{2\pi} \omega L_k \int_{i_{1\alpha}}^0 di_1 = \frac{q}{2\pi} X_k i_{1\alpha} \quad (2)$$

gdzie

$i_1$  – prąd komutującej gałęzi mostka,

$i_{1\alpha}$  jest wartością chwilową prądu w gałęzi kończącej przewodzenie – p. rys.3.



Rys. 3. Napięcia i prądy w obwodzie komutacyjnym

Spadek (strata) napięcia wyprostowanego  $\Delta U_d$  zależy więc wprost od liczby pulsów  $q$ , od reaktancji obwodu komutacyjnego i od prądu wyprostowanego (wartość chwilowa w chwili rozpoczęcia komutacji).

Zakładając, że  $i_d = I_d$

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

a kąt komutacji  $\mu$  (p. rys.3) jest równy

$$\mu = \arccos \left[ 1 - \frac{\omega L_k I_d}{2U_m \sin \frac{\pi}{q}} \right] \quad (4)$$

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

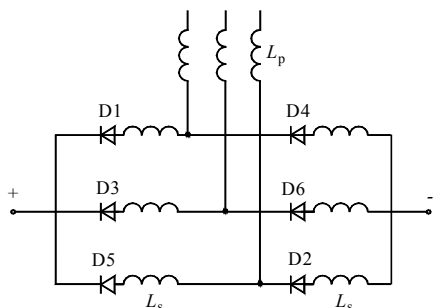
Wartość średnią prądu wyprostowanego uzyskuje się przez zsumowanie wartości średnich prądów w przedziale komutacji i poza nią.

### 4. Komutacja w układzie mostkowym sześciopulsowym

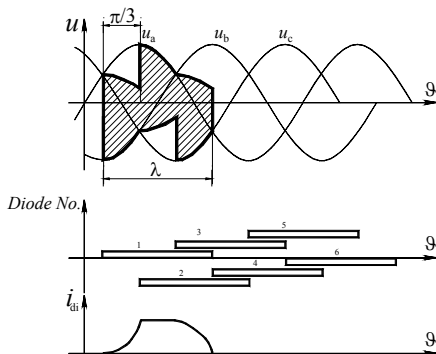
W zależności m.in. od wartości prądu obciążenia, może w tym układzie (rys.4) wystąpić komutacja prosta lub złożona.

Przebiegi napięć, przełączania poszczególnych zaworów i przebieg prądu pojedynczego za-

worui ilustruje dla komutacji prostej rys.5.



Rys. 4. Układ mostkowy sześciopulsowy



Rys.5.Przebiegi napięć fazowych, napięcia wyprostowanego (czerwona linia) przełączania poszczególnych zaworów i prądu pojedynczej diody

Kąt komutacji  $\mu \leq \pi/3$  (na rys.5 pokazano przypadek  $\pi/3$ ), kąt przewodzenia zaworu  $\lambda = \pi$ . Zakładając stałość wartości średniej prądu odbiornika ( $L_0 = \infty$ ), zachodzi

$$\frac{U_d}{U_{d0}} = \frac{1}{2}(1 + \cos \mu) \quad (5)$$

gdzie  $U_{d0}$  jest napięciem wyprostowanym w stanie jałowym.

W czasie komutacji dwa uzwojenia transformatora są zwarte przez komutujące diody, prąd komutacji dla układu można więc wyrazić jako

$$I_{km} = I_k \sqrt{2} = \frac{U_d \sqrt{2} \sqrt{3}}{2X_k} \quad (6)$$

zaś charakterystykę prądowo-napięciową przekształtnika jako

$$\frac{U_d}{U_{d0}} = 1 - \frac{X_k I_d}{U \sqrt{6}} \quad (7)$$

gdzie  $U$  jest wartością skuteczną napięcia zasilania.

Dla kąta komutacji mniejszego od  $\pi/3$  zachodzą związki

$$0 \leq \frac{I_d}{I_{km}} \leq 0,5 \quad 1 \geq \frac{U_d}{U_{d0}} \geq 0,75 \quad (8)$$

i kąt przewodzenia

$$\lambda = \frac{2\pi}{3} + \mu. \quad (9)$$

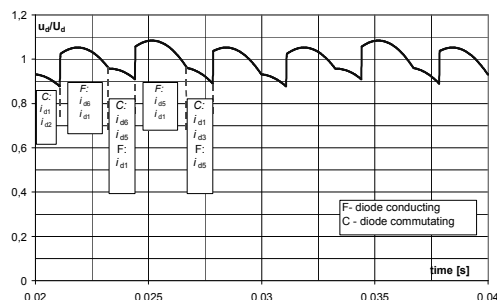
## 5. Badania symulacyjne

Pracę układu transformator trójfazowy o układzie połączeń Yd – prostownik niesterowany mostkowy sześciodiodowy zamodelowano komputerowo dla transformatora o mocy 10 kVA [1]. Przy odkształceniu napięcia zasilania powinny pojawić się chwilowe zwiększenia i zmniejszenia (w stosunku do przebiegów sinusoidalnych) napięć anodowych, co powinno zmienić czasy komutacji. Cykl badań symulacyjnych obejmował 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%.

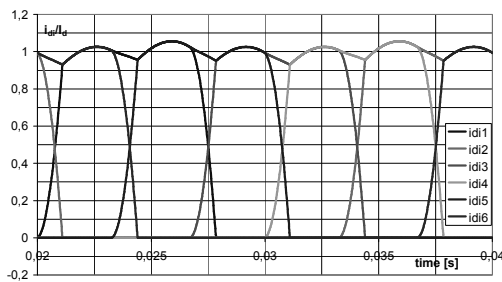
Rozważono stan jałowy pracy transformatora i obciążenie znamionowe.

Wyniki dla obciążenia znamionowego i zasilania napięciem sinusoidalnym symetrycznym pokazano na rys.6 i 7. Komutacja diod odpowiada komutacji prostej,  $\mu = \pi/9 < \pi/3$ , zaś  $\lambda = \pi$ . Jednocześnie przewodzą dwie diody, zaś w przedziale komutacji przewodzi jedna, zaś dwie komutują.



Rys. 6. Napięcie wyprostowane w układzie Yd – przebieg

Asymetria zasilania nie wywiera żadnego wpływu na przebiegi napięcia wyprostowanego i prądów zasilania.



Rys. 7. Przebieg prądów poszczególnych diod w prostowniku. Kąt przewodzenia pojedynczej diody  $\pi$ , kąt komutacji  $\pi/9$

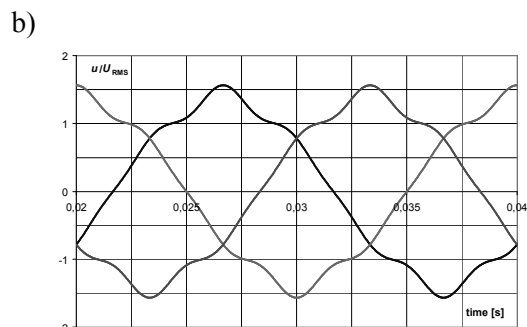
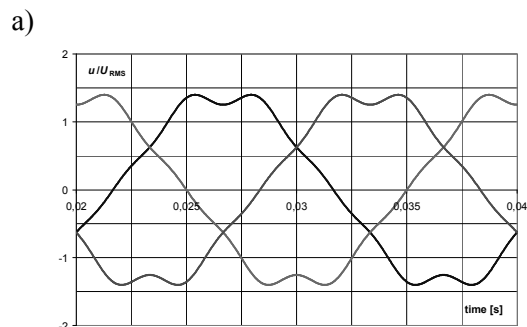
Kolejną serię symulacji pracy układu przeprowadzono dla napięć zasilających odkształconych, ale z podstawową harmoniczną symetryczną. Wprowadzono harmoniczne 5 i 7 tak, aby całkowity współczynnik THD nie przekroczył 8% (wynosi on 7,81%), ale uwzględniono różne przesunięcia obu tych harmonicznych względem harmonicznej podstawowej. Współczynnik THD definiowany jest

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

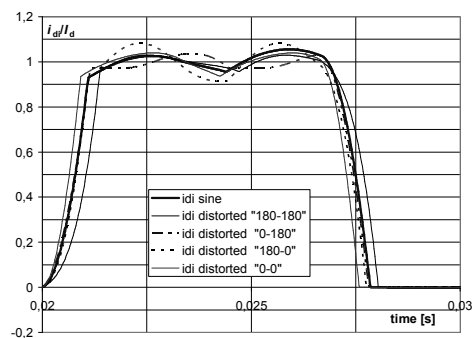
Rozważono cztery przypadki: a) kąt przesunięcia harmonicznej 5. względem 1  $\varphi_5=0^\circ$ , kąt przesunięcia harmonicznej 7 względem 1  $\varphi_7=0^\circ$ , b)  $\varphi_5=0^\circ$ ,  $\varphi_7=180^\circ$ , c)  $\varphi_5=180^\circ$ ,  $\varphi_7=0^\circ$ , d)  $\varphi_5=180^\circ$ ,  $\varphi_7=180^\circ$ . Wyniki w postaci niektórych przebiegów napięć zasilających pokazano na rys.8. Komutacja w każdym przypadku jest komutacją prostą.

Kąty komutacji wahają się od  $0,078\pi$  do  $0,128\pi$ . Całkowity kąt przewodzenia każdej diody stale wynosi  $\pi$ . Kąty komutacji zależą, jak oczekiwano, głównie od kształtu napięcia zasilania, przy czym najdłuższy kąt występuje przy kształcie zbliżonym do schodkowego ( $\varphi_5=\varphi_7=180^\circ$ ) (w strefie komutacji diod szybkość zmiany napięcia jest najmniejsza), zaś najkrótszy przy napięciach najbardziej przypominających sinusoidę ( $\varphi_5=\varphi_7=0^\circ$ ).

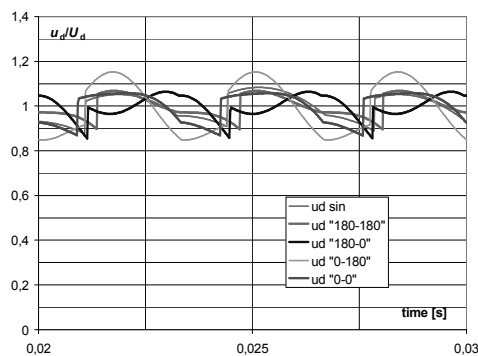
Przy piątej i siódmej harmonicznej przesuniętych w stosunku do pierwszej ( $\varphi_5=0^\circ$ ,  $\varphi_7=180^\circ$  - kształt napięcia przypominający trójkąt lub  $\varphi_5=180^\circ$ ,  $\varphi_7=0^\circ$  - kształt napięcia przypominający trapez) kąty komutacji wynoszą  $\pi/9$  występuje stosunkowo duże tętnienie prądu wyprostowanego.



Rys. 8. Wybrane przebiegi napięć zasilających transformator,  $THD=7.81\%$  ( $u_{5\%}=6\%$ ,  $u_{7\%}=5\%$ ); a)  $\varphi_5=0^\circ$ ,  $\varphi_7=180^\circ$ , b)  $\varphi_5=180^\circ$ ,  $\varphi_7=0^\circ$



Rys. 9. Prąd pojedynczej diody przy różnych układach napięć zasilających (jasnoniebieska linia – przebiegi sinusoidalne)



Rys. 10. Napięcie wyprostowane przy różnych układach napięć zasilających (jasnoniebieska linia – przebiegi sinusoidalne)

Współczynniki THD napięcia wyprostowanego i wartości względne poszczególnych znaczących harmonicznych w odniesieniu do harmonicznej podstawowej zgrupowano w tabeli 1.

Najbardziej korzystny przypadek z punktu widzenia jakości napięcia wyprostowanego zachodzi, gdy 5. harmoniczna jest w opozycji do podstawowej (napięcie „schodkowe” lub „trapezowe”). W praktyce przemysłowej spotykaliśmy się z napięciem zawierającym 5., 7. i 11 harmoniczną, THD nie większym niż 2,5%, kształt napięcia przypominał sinusoidę z nieco spłaszczonymi rejonami ekstremów.

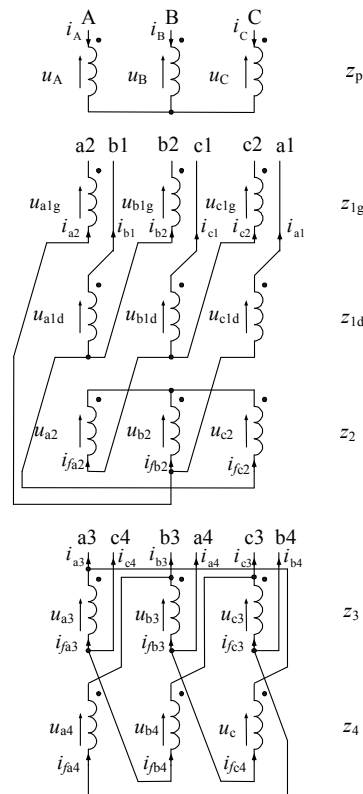
Tabela 1. Współczynnik THD w napięciu wyprostowanym

Zasilanie	Harmoniczne napięcia wyprostowanego w % wartości średniej			THD napięcia wyprostowanego w %	
	$\nu = 6$	$\nu = 12$	$\nu = 18$		
Sinusoidalne	5,1	1,25	1,25	5,74	
THD=7,81%, przesunięcie fazowe harmonicznej					
$\varphi_5$	$\varphi_7$				
0°	0°	5,8	1,8	1	6,37
180°	180°	3,8	2	1,3	4,59
0°	180°	11,2	1,4	1,2	11,41
180°	0°	4,4	1,2	1,2	4,82

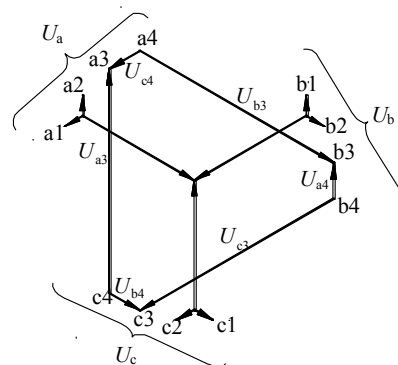
Wszystkie powyżej rozważane układy mają podobny wpływ na sieć zasilającą, współczynnik THD prądu pobieranego z sieci waha się od ok. 22% w przypadku o napięciu „schodkowym” do ok. 24,5% dla napięcia zbliżonego do „trójkątnego”.

**6. Komutacja w układzie 24-pulsowym**

Układ 24-pulsowy może być zrealizowany np. poprzez równoległe połączenie dwóch transformatorów 6-fazowych [1], o odpowiednio przesuniętych kątach fazowych napięć zasilających (układ 2(Y<sub>ZYd</sub>)). Możliwe jest też zastosowanie specjalnej konstrukcji transformatora Yd<sub>6</sub>y<sub>6</sub> [1] (rys.11), który współpracuje z układem prostowniczym złożonym z 24 diod. Transformator taki może pracować z mostkami prostownikowymi łączonymi szeregowo lub równoległe. Porównanie napięcia wyprostowanego dla 2 układów 24-pulsowych i układu równoległego prostownika pokazano na rys. 13.



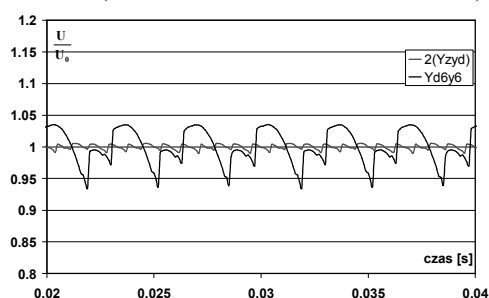
Rys. 11. Schemat transformatora 24-pulsowego



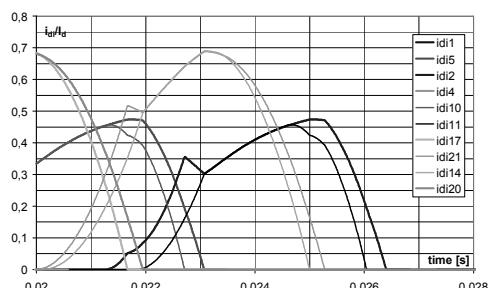
Rys. 12. Układ napięć fazowych wtórnych dla transformatora z rys. 11

W standardowym układzie (2(Y<sub>ZYd</sub>)) obserwujemy, jak można było oczekiwać, 24 pulsy napięcia wyprostowanego na jeden okres napięcia zasilającego. Dla transformatora Yd<sub>6</sub>y<sub>6</sub> liczba podstawowych pulsów wynosi jednak 6, a nie 24! Odpowiedź na pytanie, dlaczego tak się dzieje, dają przebiegi prądów diod prostownika skonfrontowane z napięciami fazowymi poszczególnych napięciami fazowymi uzwojeń strony wtórnej (p. rys. 12). Czasy komutacji poszczególnych diod praktycznie nie ulegają zmianie przy odkształceniu napięcia zasilania lub jeżeli, to bardzo nieznacznie. Same czasy przewodzenia diod

są jednak bardzo krótkie i czasy pracy poszczególnych zaworów składają się praktycznie tylko ze stref komutacji. Ze względu jednak na to odkształcenie, załączenie diod odbywa się przy innych wartościach napięć anodowych. W rezultacie zmianie ulegają wartości chwilowe prądów diod i tym samym komutacyjne spadki napięć. Kształt napięcia wyprostowanego nie ulega jednak znaczącej zmianie, dalej obserwuje się efekt 6-pulsowości, pogłębiony (wzrost THD napięcia wyprostowanego od 2,70% do 9,49%), zaś prąd pobierany z sieci, również nieco bardziej się odkształca (wzrost THD z 7,16% na 9,49%).



Rys. 13. Porównanie kształtu napięcia wyprostowanego dla układów 24-pulsowych



Rys. 14. Prądy poszczególnych diod mostka dla układu zasilanego napięciem sinusoidalnym

## 7. Wnioski

Transformator  $Yd_6y_6$  powstał m.in. dlatego, by obniżyć koszty produkcji transformatora (obniżenie masy uzwojeń i rdzenia) w porównaniu do innych znanych rozwiązań transformatorów prostownikowych [2].

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 przeprowadzono 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. Rozrzut współczynnika 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%.

Transformator  $Yd_6y_6$  ze względu na specyfikę swojej budowy i cykl komutacji odznacza się również pracą 6-pulsową, niemniej jednak przy znacznie niższym współczynniku THD napięcia wyprostowanego niż klasyczny układ  $Yd$ . W stosunku do układu  $Yd$  wykazano jednak mniejszą wrażliwość na odkształcenia napięcia zasilania. Aby jednak uzyskać projektowaną pracę 24-pulsową, należy zmienić układ połączeń prostownika i prawdopodobnie dodać układ dławików wygładzających.

## 8. References

- [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 (*Basics of Power electronics – in Polish*). WNT Warszawa 1980r.
- [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.