

Andrzej Sikora, Barbara Kulesz  
Politechnika Śląska, Gliwice

## ZALEŻNOŚĆ JAKOŚCI ENERGII SIECI TRAKCYJNEJ OD ZASTOSOWANYCH UKŁADÓW TRANSFORMATORÓW PROSTOWNIKOWYCH

### DEPENDENCE OF TRACTION VOLTAGE QUALITY ON TRANSFORMER-RECTIFIER SYSTEM

**Abstract:** Tram lines in Poland are supplied from the power grid via transformer-rectifier sets, with primary three-phase transformer windings wye- or delta-connected, and secondary side windings connected in accordance with desired number of phases.. The number of pulses in rectified dc voltage depends on transformer used. Supply voltage may be either purely sinusoidal and symmetrical, or it may be distorted, or asymmetrical, or both. The paper presents several different transformer types, which are used or may be used in energy transformation and shows the results of investigating dc traction voltage quality and power grid current quality depending on transformer-rectifier set used and quality of supply voltage. The transformer types analysed are 9-phase, 2x6-phase, 12-phase and, for comparison purposes, 6-phase. The resulting dc waveforms are shown together with results of calculations covering THD vector value for different supply conditions. Results of laboratory tests are presented as well. Interesting effect of 24-pulse system changing into 6-pulse system is marked.

#### 1. Wstęp

W trakcyjnych sieciach tramwajowych w Polsce stosuje się napięcie prądu stałego o wartości średniej 600V i pewnej zawartości składowej zmiennej wynikającej ze sposobu przetwarzania energii. Napięcie stałe otrzymuje się poprzez transformację napięcia sieci elektroenergetycznej (zwykle 15 lub 20 kV, 50Hz) na napięcie ok. 525 V i następnie jego wyprostowanie przez mostkowe układy prostownicze. Stosuje się najczęściej układy, w których napięcie wyprostowane jest 6- lub 12-pulsowe, rzadziej 24-pulsowe. Możliwe do zastosowania są układy o większej liczbie pulsów (napięcia wyprostowanego) np. 18- lub 24-pulsowe. Zwiększenie liczby pulsów powinno teoretycznie skutkować poprawą jakości napięcia sieci prądu stałego, określaną poprzez zawartość wyższych harmonicznych. Powstaje pytanie, w jakim stopniu zwiększenie liczby pulsów wpływa na kształt napięcia wyprostowanego i czy jest to efekt stały czy też zależny od czynników takich jak np. jakość napięcia sieci elektroenergetycznej.

#### 2. Jakość napięcia sieci trakcyjnej prądu stałego

Jakość napięcia sieci trakcyjnej można oszacować np. na podstawie zawartości wyższych harmonicznych.

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki [1] jakość energii elektrycznej dostarczanej

poprzez 3-fazową sieć elektroenergetyczną o napięciu nie wyższym od 30kV i wyższym od 1kV powinna się charakteryzować:

- składową symetryczną przeciwną napięcia mniejszą lub równą 2%
- współczynnikiem THD mniejszym od 8%
- harmoniczną o największej amplitudzie mniejszą od 6%
- zmiennością napięcia w przedziale  $\pm 10\%$  napięcia znamionowego.

Wszystkie badania, zarówno symulacyjne, jak laboratoryjne, 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).

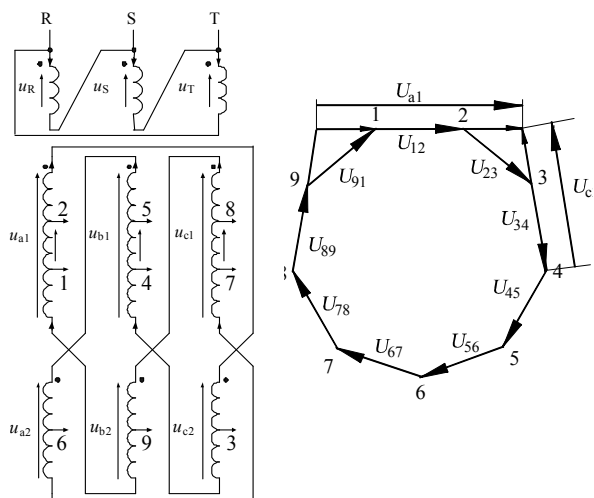
Porównywano ze sobą pracę układów 18- i 24-pulsowych, zaś układem bazowym był układ 12-pulsowy o układzie połączeń transformatora Yyd.

#### 3. Układy połączeń transformatorów

##### 3.1. Układ 18-pulsowy

Zastosowano transformator prostownikowy o układzie połączeń Dd<sub>6</sub>, gdzie napięcia uzwojeń

wtórnych tworzą dziewięciokąt foremny [2]. Układ ten pokazano na rys.1.



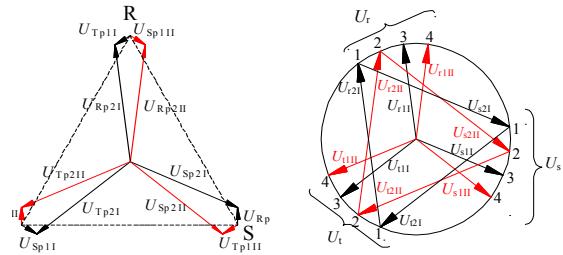
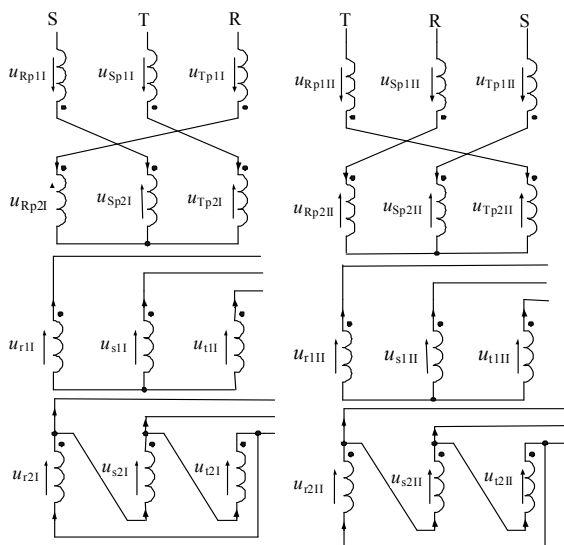
Rys. 1. Układ połączeń transformatora dziewięciofazowego Dd<sub>9</sub> i wykres wskazowy napięć strony wtórnej

**3.2. Układy 24-pulsowe**

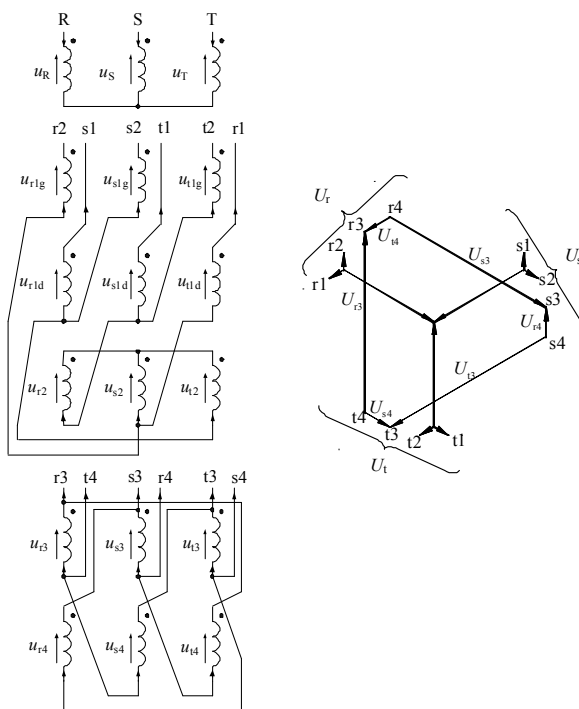
W rozważaniach uwzględniono dwa układy:

- standardowy zbudowany z dwóch identycznych transformatorów Y<sub>Z</sub>y<sub>2d</sub> (w takim transformatorze dwa uzwojenia wtórne są połączone odpowiednio w gwiazdę i trójkąt, zaś uzwojenie pierwotne jest dzielone i łączone w zygzak) i
- układ Y<sub>d</sub>6y<sub>6</sub>, budowany na jednym rdzeniu, ale w którym po stronie wtórnej fragmenty uzwojeń są wykorzystywane przez dwie sąsiednie fazy [3].

Te układy pokazano na rys. 2 i 3.



Rys. 2. Układ 24-pulsowy – dwa identyczne sześciofazowe transformatory i wykres wskazowy napięć stron wtórnych



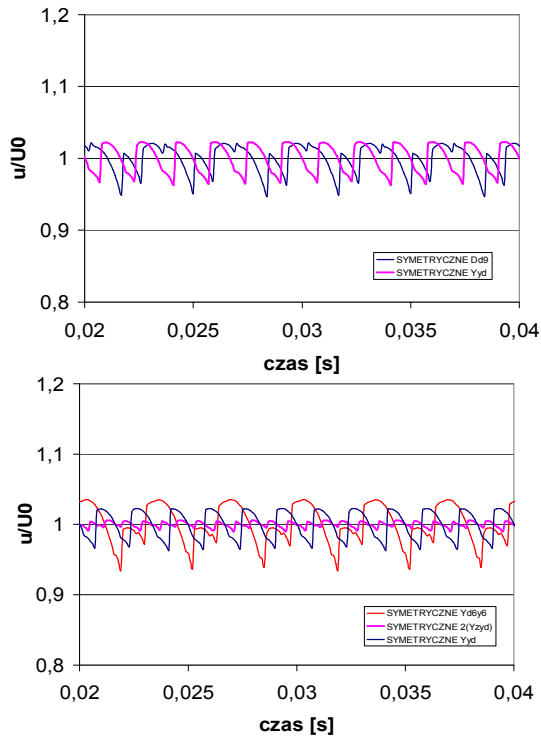
Rys. 3. Transformator 12-fazowy z fragmentami uzwojeń wtórnych łączonymi galwanicznie i układ napięć wtórnych [2]

Prostowniki do tych transformatorów są dołączane szeregowo lub równolegle.

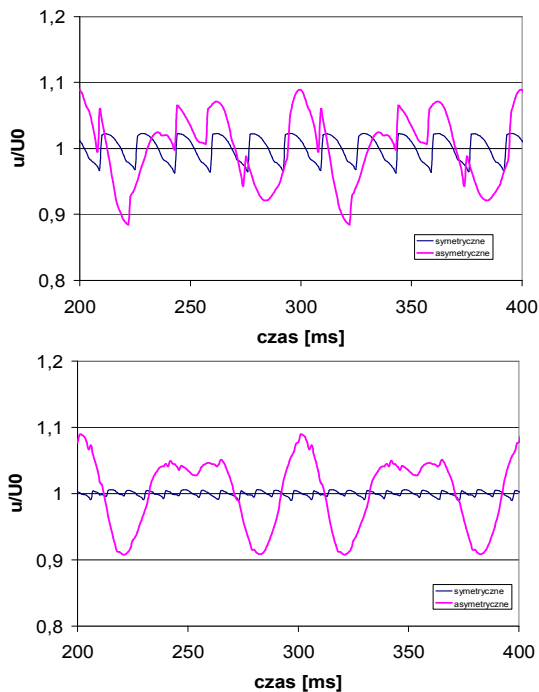
**4. Wyniki badań symulacyjnych**

Stworzono modele matematyczne dla wszystkich układów i przeprowadzono symulacje komputerowe ich pracy dla warunków zdefiniowanych powyżej.

Wynikami tych symulacji są m.in. przebiegi napięcia wyprostowanego i prądu pobieranego z sieci elektroenergetycznej. Na rys. 4 i 5 pokazano porównanie przebiegów czasowych napięcia wyprostowanego dla różnych układów transformatorów prostownikowych i różnych warunków zasilania.



Rys. 4. Porównanie kształtu napięcia wyprostowanego dla układu 12-pulsowego i 18-pulsowego (a) oraz 12-pulsowego i dwóch 24-pulsowych (b) przy zasilaniu symetrycznym sinusoidalnym

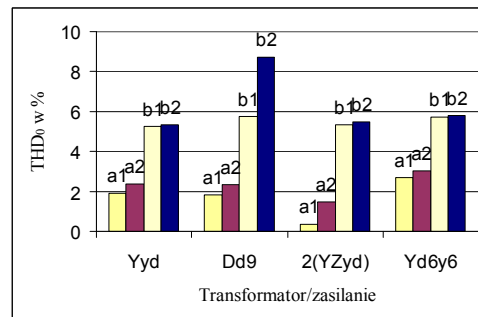


Rys. 5. Wrażliwość różnych układów na zmiany w napięciu zasilania – transformator 12-pulsowy Yyd (a) i 24-pulsowy 2(Yzd) (b); napięcie symetryczne sinusoidalne i napięcie asymetryczne odkształcone ( $U_{\%}^{II} = 2\%$  i  $THD_U = 7,8\%$ )

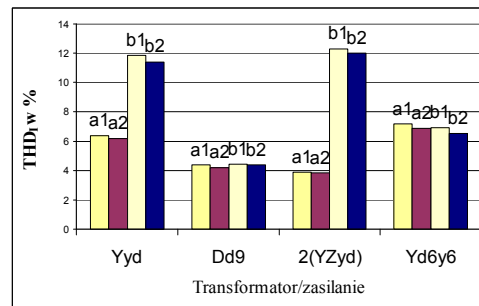
Obliczono zawartość harmonicznych w napięciu wyprostowanym ( $THD_0$ ) i prądzie zasilania transformatorów ( $THD_I$ ) dla różnych układów połączeń.

Tabela 1. Wartości współczynnika  $THD_0$  (w%) napięcia stałego w zależności od układu prostującego i parametrów zasilania – wyniki symulacji (układy równoległe)

Zasilanie (oznaczenia jak w pkt.2)	Typ transformatora i liczba pulsów napięcia wyprostowanego			
	12 Yyd	18 Dd <sub>9</sub>	24 2(Y <sub>z</sub> yd)	24 Y <sub>d6</sub> Y <sub>6</sub>
a1	1,89	1,84	0,35	2,67
a2	2,39	2,35	1,48	3,05
b1	5,24	5,74	5,32	5,71
b2	5,35	8,72	5,49	5,79



Rys. 5. Wpływ napięcia zasilania na jakość napięcia wyprostowanego



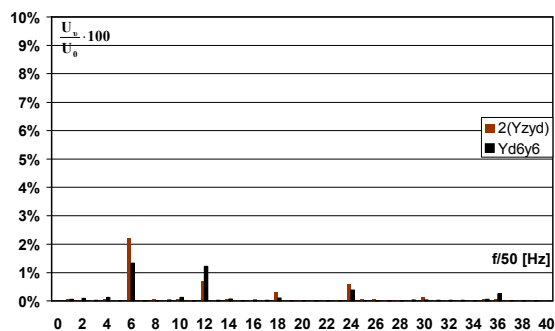
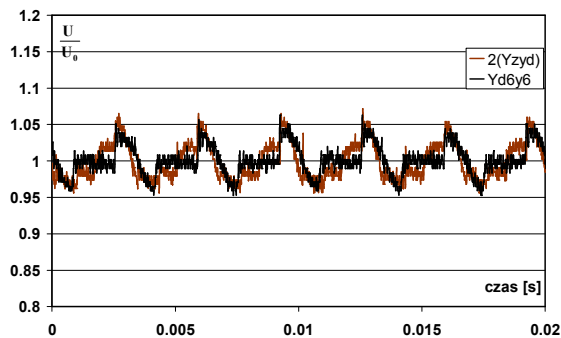
Rys. 6. Wpływ napięcia zasilania na jakość prądu pobieranego z sieci

Tabela 2. Współczynnik odkształcenia  $THD_I$  prądu zasilania w zależności od układu prostującego i parametrów zasilania – wyniki symulacji (układy równoległe)

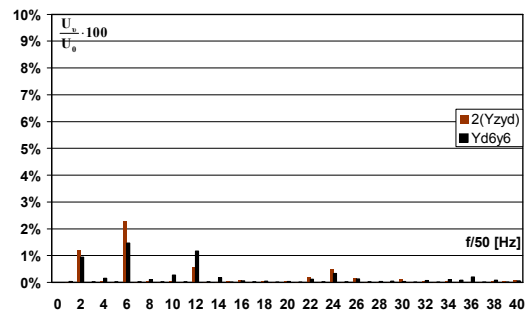
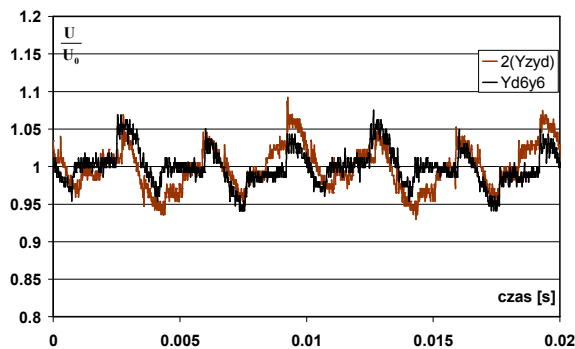
Zasilanie (oznaczenia jak w pkt.2)	Typ transformatora i liczba pulsów napięcia wyprostowanego			
	12 Yyd	18 Dd <sub>9</sub>	24 2(Y <sub>z</sub> yd)	24 Y <sub>d6</sub> Y <sub>6</sub>
a1	6,37	4,36	3,87	7,15
a2	6,16	4,20	3,83	6,86
b1	11,84	4,44	12,32	6,94
b2	11,39	4,38	12,00	6,54

## 5. Wyniki badań laboratoryjnych

Weryfikację obliczeń numerycznych przeprowadzono na drodze pomiarowej, obiektami mierzonymi były transformatory o mocy 10kVA. Przykładowe przebiegi napięć wyprostowanych dla układów 24-pulsowych przy zasilaniu symetrycznym i asymetrycznym pokazano na rys. 7 i 8. W obu przypadkach napięcie zasilania było odkształcone i współczynnik  $THD_U = 3,5\%$ . W warunkach laboratoryjnych nie było niestety możliwości dokładnego odtworzenia warunków takich jak były symulowane.



Rys. 7. Przebiegi czasowe napięcia wyprostowanego (a) i jego rozkład harmonicznych (b), zarejestrowane na transformatorach modelowych 24-pulsowych w układzie  $2(Y_{zd})$  i  $Yd_6y_6$  przy zasilaniu symetrycznym,  $THD_U = 3,5\%$



Rys. 8. Przebiegi czasowe napięcia wyprostowanego (a) i jego rozkład harmonicznych (b), zarejestrowane na transformatorach modelowych 24-pulsowych w układzie  $2(Y_{zd})$  i  $Yd_6y_6$  przy zasilaniu asymetrycznym,  $THD_U = 3,5\%$  i  $U_{II}^{\%} = 2\%$

Tabela 3. Współczynnik odkształcenia  $THD_0$  napięcia stałego w zależności od układu prostującego i parametrów zasilania – wyniki pomiarów

Zasilanie	Prostownik o liczbie pulsów			
	12 Yyd	18 Dd <sub>9</sub>	24 2(Y <sub>zd</sub> )	24 Yd <sub>6</sub> y <sub>6</sub>
$THD_U = 3,5\%$	2,41	2,60	2,41	1,89
$U_{II}^{\%} = 2\%$ , $THD_U = 3,5\%$	2,47	2,96	2,73	2,19

Tabela 4. Współczynnik odkształcenia  $THD_I$  prądu pobieranego z sieci elektroenergetycznej w zależności od układu prostującego i parametrów zasilania – wyniki pomiarów

Zasilanie	Prostownik o liczbie pulsów			
	12 Yyd	18 Dd <sub>9</sub>	24 2Y <sub>zd</sub>	24 Yd <sub>6</sub> y <sub>6</sub>
$THD_U = 3,5\%$	6,96	5,13	3,96	6,81
$U_{II}^{\%} = 2\%$ , $THD_U = 3,5\%$	7,09	5,26	4,26	7,51

## 6. Wnioski

W idealnych warunkach zasilania (napięcie sieci elektroenergetycznej trójfazowe i sinusoidalne) w napięciu wyprostowanym obserwuje się oczywistą prawidłowość, że wzrost liczby pulsów owocuje zmniejszeniem tętnień napięcia i tym samym zawartości wyższych harmonicznych ocenianych poprzez współczynnik THD. Różnice te jednak ulegają znaczącym zmianom, gdy pogarszają się warunki zasilania.

O ile różnica zawartości harmonicznych między 18- a 24-pulsowym dla napięcia zasilania symetrycznego i sinusoidalnego jest prawie pięciokrotna między układem 18-pulsowym, a klasycznym 24-pulsowym, o tyle spada ona do 60% przy napięciu asymetrycznym i odkształ-

conym (tab.1, rys.5). Najmniejszy wpływ napięcia zasilania obserwuje się w wypadku transformatora  $Yd_6y_6$  – współczynnik THD wzrasta o 115% przy napięciu odkształconym, niezależnie od tego, czy jest ono symetryczne czy nie.

Dodatkowym efektem jest również zmalenie liczby pulsów napięcia wyprostowanego, co szczególnie znaczące jest w wypadku „klasycznego” układu  $2(Y_{Zyd})$ , gdzie przy dopuszczalnej przez odnośne przepisy asymetrii i odkształceniu napięcia zasilania zamiast 24 pulsów obserwuje się, co przekłada się na wzrost o ponad 1500% współczynnika THD przy dopuszczalnym pogorszeniu napięcia zasilania.

Oddziaływania na sieć elektroenergetyczną najmniejsze mają układy 18-pulsowy  $Dd_9$  i 24-pulsowy  $Yd_6y_6$ , układ 24-pulsowy  $2(Y_{Zyd})$  przy zasilaniu napięciem odkształconym i niesymetrycznym wykazuje wzrost współczynnika THD w prądzie sieciowym o ponad 200%, zaś klasyczny układ 12-pulsowy  $Y_{yd}$  jest znacznie mniej wrażliwy (Wzrost o ok. 85%).

Efekt zmiany liczby pulsów przy odkształconym napięciu zasilania potwierdziły badania laboratoryjne układów, powtarzają one też w pewnym przybliżeniu zależności obserwowane przy badaniach symulacyjnych.

Układy prostownikowe okazują się niezwykle wrażliwe na jakość napięcia zasilania i stąd też przy projektowaniu nowych lub modernizacji starszych podstacji należy dobrze skalkulować, czy opłaca się instalowanie układów o większej liczbie pulsów niż 12.

## 7. Literatura

[1].*Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pra-cy 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).

[2].*Układ prostownikowy 18-pulsowy*. Patent RP, MKP H02M7/04 7. Opublikowany w Biuletynie Urzędu Patentowego, 20.07.1998r., nr 15/1998. Twórcy i uprawnienie: Kurczewski Wiesław , Kurczewski Adam.

[3].*Układ prostownikowy 24-pulsowy*. Patent RP, MKP H02M7/02. Opublikowany w Biuletynie Urzędu Patentowego, 3.06.2002r., nr 12/2002. Twórcą: Sobota Janusz, własność: ALSTOM T&D Spółka z o.o., Zakład Transformatorów w Mikołowie.