

## Jarosław ROLEK, Andrzej KAPŁON

POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA, KATEDRA ENERGOELEKTRONIKI,  
Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

# Badania laboratoryjne układu prostownika multipulsowego

Mgr inż. Jarosław ROLEK

Absolwent wydziału EAil Politechniki Świętokrzyskiej. Od 2004 r. asystent w Katedrze Energoelektroniki Politechniki Świętokrzyskiej. Jego zainteresowania dotyczą obszaru napędów elektrycznych i energoelektroniki



e-mail: jrolek@tu.kielce.pl

Dr hab. inż. Andrzej KAPŁON

Kierownik Katedry Energoelektroniki Politechniki Świętokrzyskiej. Przedmiotem badań naukowych są zagadnienia w obszarze maszyn i napędów elektrycznych oraz energoelektroniki.



e-mail: akaplon@tu.kielce.pl

### Streszczenie

Zmniejszenie udziału wyższych harmonicznych w prądach fazowych przekształtników AC/DC uzyskuje się między innymi poprzez stosowanie równoległe połączonych układów prostowników mostkowych z modulacją w obwodzie prądu stałego [4, 5]. W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych tego typu układu przekształtnikowego podczas pracy multipulsowej.

**Słowa kluczowe:** prostowniki wielopulsowe, modulacja, wektor przestrzenny, analiza widmowa.

## Experimental investigations of the multipulse rectifier

### Abstract

AC/DC converters, as non-linear electrical loads, generate high harmonic currents and voltages. This causes deformation of the power system current and voltage shapes and increases active power losses. Reduction of harmonics in supply currents of AC/DC converters can be obtained, among others, by use of parallel connected 6-pulse bridges with modulation in the DC current circuit [4, 5]. The paper deals with analysis of multipulse rectifiers with use of the space vector method in relation to supply currents of the m-phase power system. Asymmetry in loads of the bridges, when assuming the constant total rectifier load, changes the phase angle and, subsequently, generates the intermediate position of the supply current space vector on a complex plane. Increase in the number of intermediate positions brings the space vector close to the case of the rotating one and, in consequence, the rectifier to the multipulse one. The experimental results of laboratory investigations of such an AC/DC multipulse rectifier with modulation in the DC current circuit are presented.

**Keywords:** multipulse rectifiers, modulation, space vector, spectrum analysis.

## 1. Wprowadzenie

Przekształtniki napięcia przemiennego na stałe powodują powstawanie odkształconych prądów w sieciach energetycznych. W przypadku, gdy przekształtnik o właściwościach układu  $q$ -pulsowego jest obciążony źródłem prądowym o bezpulsacyjnym przebiegu prądu wyprostowanego, a ponadto jest zasilany z idealnego źródła napięcia, w sieci są generowane harmoniczne prądu rzędu  $h$ :

$$I_h = \frac{I_1}{h} = \frac{I_1}{kq \pm 1} \quad (1)$$

gdzie:  $k$  - liczba naturalna,  $I_1$  - harmoniczna podstawowa prądu.

Jak wynika z (1) redukcję wyższych harmonicznych, a tym samym zmniejszenie współczynnika odkształcenia prądu THDi (Current Total Harmonic Distortion) w sieciach zasilających uzyskuje się poprzez stosowanie rozwiązań zwiększających liczbę pulsów przekształtnika [1]. Układy o większej od 12-stu liczbie

pulsów charakteryzują się znacznym skomplikowaniem obwodów magnetycznych układów zasilania i są rozwiązaniami dość kosztownymi.

Alternatywnym rozwiązaniem zwiększania liczby pulsów jest stosowanie układów prostownikowych z modulatorami w obwodzie prądu stałego [2, 3].

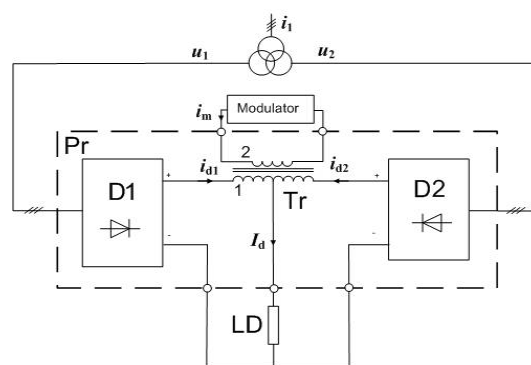
Przedmiotem badań jest układ prostownikowy Pr [4, 5], który złożony jest z dwóch równoległe połączonych diodowych układów mostkowych D1 i D2 (rys. 1), zasilanych dwoma symetrycznymi i idealnymi układami napięć trójfazowych  $U_1$  i  $U_2$ , przesuniętymi względem siebie o kąt elektryczny  $30^\circ$ . Niezależną pracę składowych układów D1 i D2 zapewnia ich skojarzenie za pomocą pierwotnego uzwojenia 1 transformatora międzyfazowego Tr. Do uzwojenia wtórnego 2 dołączony jest modulator. Układy mostkowe D1 i D2 pracują na wspólne obciążenie LD.

Analizę pracy takiego przekształtnika przeprowadzono z wykorzystaniem wektora przestrzennego. W odniesieniu do prądów pobieranych z sieci 3-fazowej bez przewodu neutralnego wektor przestrzenny, przy założeniu inwariantności przekształcenia prądów, jest określony następująco

$$\underline{I} = I_a + jI_\beta = \frac{2}{3} (i_a + \underline{a} i_b + \underline{a}^2 i_c) e^{-j\theta_A} \quad (2)$$

gdzie:  $\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$  - jednostkowy wektor obrotu,  $\theta_A$  - kąt pomiędzy wskazem prądu fazy A a osią  $\alpha$  płaszczyzny liczb zespolonych.

Analogiczne przekształcenie obowiązuje dla napięć zasilających przekształtnik.



Rys. 1. Schemat blokowy układu prostownikowego  
Fig. 1. Block diagram of AC/DC converter

W każdym okresie napięcia zasilającego, przy założeniu jednokrotnej komutacji zaworów oraz stałoprądowego obciążenia, wektory przestrzenne prądów zasilających każdy z mostków składowych D1 i D2 tworzą sześcioramiennie gwiazdy przesunięte względem siebie o kąt  $30^\circ$ . Gwiazdy te wyznaczają dwanaście

sektorów możliwych położenia wektora przestrzennego prądów liniowych 12-pulsowego układu prostownikowego zbudowanego z mostków **D1** i **D2** włączonych do pracy równoległej (rys. 1).

Asymetria w obciążeniu mostków składowych **D1** i **D2** powoduje przesunięcie wektora przestrzennego układu prostownikowego w stronę 6-ramienną gwiazdy bardziej obciążonego mostka. Zmiana asymetrii obciążenia mostków składowych, przy warunku stałej wartości obciążenia układu prostownikowego wymusza przemieszczanie grota wektora przestrzennego po boku sektora, a tym samym jego obrót [4, 5].

## 2. Asymetria obciążenia mostków składowych układu prostownikowego

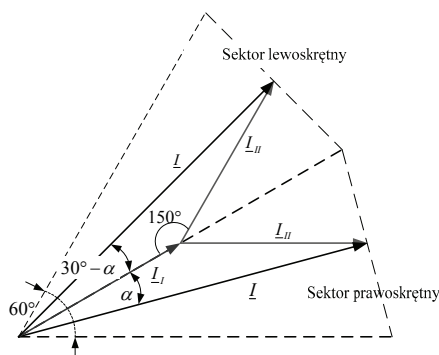
Wymuszanie zmiennej w czasie asymetrii obciążenia mostków składowych powoduje obrót fazora prądu zasilającego układ prostownikowy.

Uwzględniając, że moduł fazora prądów fazowych  $|I_f|$  ( $|I_{lf}|$ ) mostka składowego **D1** (**D2**) jest równy prądowi wyprostowanemu tego mostka  $I_{d1}$  ( $I_{d2}$ ) oraz zachowując warunek stałej wartości obciążenia układu prostownikowego (rys. 2), sposób zmiany asymetrii obciążenia mostków, w każdym z dwunastu sektorów określają zależności [4, 5]:

$$I_{d1} = I_d \frac{\sin(30^\circ - \alpha)}{2\sin(15^\circ) \cos(15^\circ - \alpha)} \quad (3)$$

$$I_{d2} = I_d \frac{\sin(\alpha)}{2\sin(15^\circ) \cos(15^\circ - \alpha)} \quad (4)$$

gdzie:  $I_d$  - prąd obciążenia układu prostownikowego,  $\alpha$  - kąt położenia fazora prądu w danym sektorze, przy czym  $0^\circ < \alpha < 30^\circ$



Rys. 2. Fazory prądów zasilających mostki składowe oraz układ prostownikowy  
Fig. 2. Space vectors of supply phase currents of component bridges and AC/DC converter

Prąd modulujący  $I_M$ , płynący w uzwojeniu pierwotnym transformatora międzyfazowego  $Tr$  stanowi różnicę prądów  $I_{d1}$  oraz  $I_{d2}$  (rys. 3b) i z uwzględnieniem (3) oraz (4) w każdym sektorze jest określony zależnością:

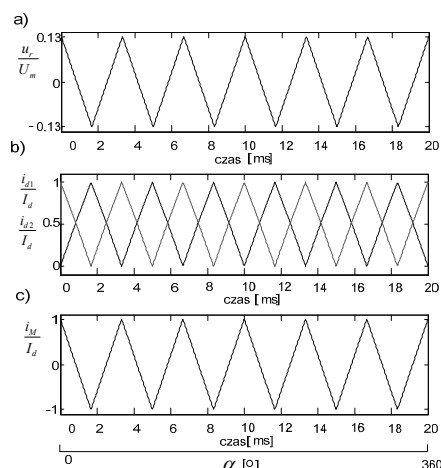
- w sektorze prawoskrętnym:

$$I_M = I_d \left( \frac{\sin(30^\circ - \alpha)}{\sin(15^\circ) \cos(15^\circ - \alpha)} - 1 \right) \quad (5)$$

- w sektorze lewoskrętnym:

$$I_M = I_d \left( \frac{\sin(\alpha)}{\sin(15^\circ) \cos(15^\circ - \alpha)} - 1 \right) \quad (6)$$

Zmianę prądu modulującego  $I_M$  w funkcji kąta obrotu  $\alpha$  przedstawiono na rysunku 3c.



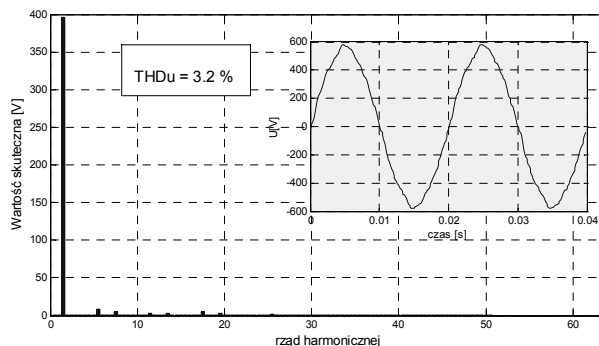
Rys. 3. Napięcie różnicowe, prądy obciążenia mostków składowych oraz prąd modulujący  $I_M$

Fig. 3. Time plots of: differential voltage, load currents of component bridges, modulation current  $I_M$  for AC/DC converter

## 3. Multipulsowa praca układu prostownikowego – wyniki badań laboratoryjnych

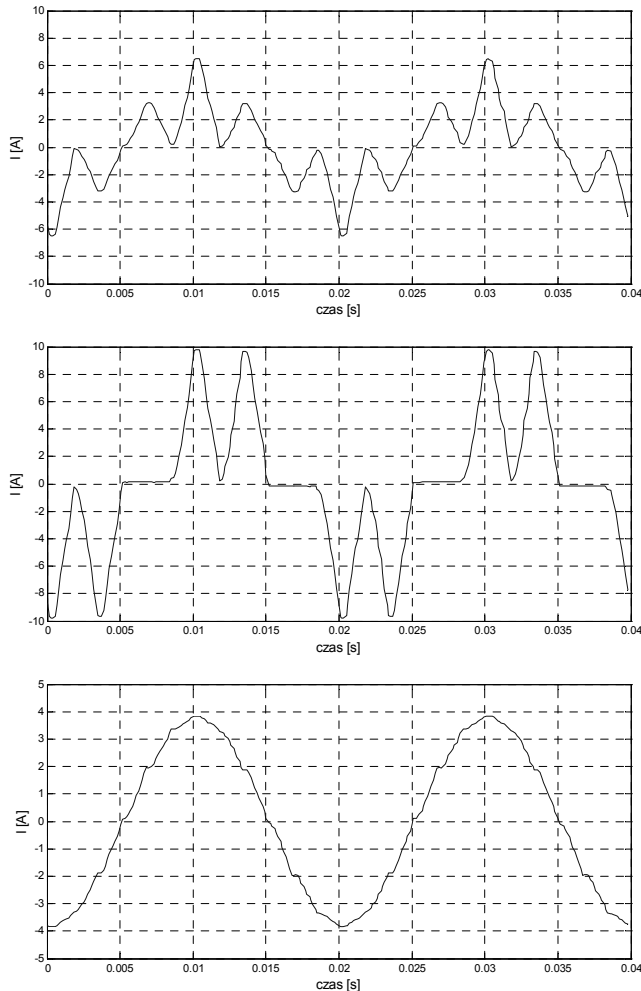
Multipulsową pracę eksperymentalnego układu prostownikowego jak na rysunku 1 o mocy 2kVA uzyskano wymuszając prąd modulujący o kształcie określonym zależnością (5) i (6), poprzez obciążenie strony wtórnej transformatora międzyfazowego rezystorem o oporności dobranej w taki sposób, że amplituda prądu modulującego jest równa składowej stałej prądu obciążenia układu prostownikowego [4, 5]. Moc modulatora wynosi 2.35% mocy prądu stałego. Możliwe jest zastąpienie modulatora oporowego układem energoelektronicznym. Umożliwia to, poza kształtowaniem prądu modulującego dopasowywanie jego amplitudy do warunków obciążenia [5].

Eksperymentalny układ prostownikowy jest zasilany z sieci przemysłowej napięciem o zawartości wyższych harmonicznych  $THD_u = 3.2\%$  (rys. 4).



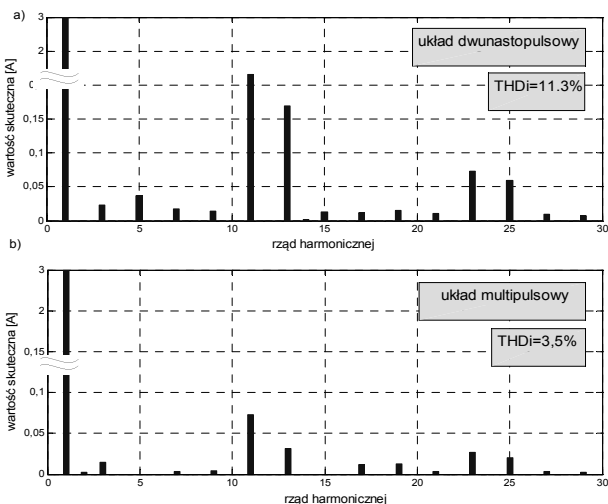
Rys. 4. Przebieg napięcia zasilającego układ prostownikowy i jego widmo amplitudowe  
Fig. 4. Waveform and spectrum of the supply phase voltage of multipulse converter

Dla takiego przypadku zasilania, rysunek 5 ilustruje przebiegi prądów fazowych składowych mostków oraz układu przekształtnikowego. Prąd fazowy układu ma kształt krzywej łamanej i jest bliski sinusoidalnemu. Zawartość wyższych harmonicznych dla tego przebiegu przedstawiono na rysunku 6b.



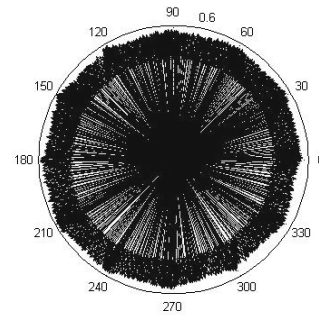
Rys. 5. Prąd fazowy mostków składowych oraz układu przekształtnikowego dla eksperymentalnego układu multipulsowego

Fig. 5. Oscillograms of the supply phase currents of component bridges and AC/DC multipulse converter



Rys. 6. Widmo amplitudowe prądu fazowego eksperymentalnego układu a) dwunastopulsowego, b) multipulsowego

Fig. 6. Amplitude spectrum of the supply phase currents of the experimental a) twelvepulse converter, b) multipulse converter



Rys. 7. Trajektoria wektora przestrzennego prądów fazowych eksperymentalnego układu multipulsowego

Fig. 7. Trajectory of the phase current space vector of the experimental AC/DC multipulse converter

Przebiegi w pozostałych fazach są analogiczne. Prądy te tworzą fazor przedstawiony na rysunku 7. Grot fazora wykreśla równoramienny dwunastobok. Współczynnik THDi prądu sieciowego dla analizowanego przypadku układu prostownikowego wynosi 3.5%. Odłączenie modulatora powoduje przejście układu do pracy jak w klasycznym układzie 12-pulsowym o widmie amplitudowym prądu fazowego jak na rysunku 6a, dla którego THDi = 11.3%. W powyższych przypadkach na kształt przebiegu prądu fazowego, jak i na jego THDi znaczący wpływ ma odkształcenie napięcia sieci zasilającej układ prostownikowy (rys. 4).

#### 4. Wnioski

Zbudowany układ prostownikowy z obwodem modulatora wymuszającym prąd modulujący określony zależnościami (4) i (5) zapewnia bliski do sinusoidalnego kształt prądu pobieranego z sieci zasilającej. Wyniki pomiarów prądów zasilających są zbliżone do wyników badań symulacyjnych [5]. Różnice pomiędzy wynikami uzyskanymi z pomiarów i symulacji wynikają z faktu zasilania układu eksperymentalnego odkształconym napięciem sieci, co z kolei nie było uwzględnione w badaniach symulacyjnych.

Artykuł napisany w ramach realizacji projektu badawczego własnego Nr N N510 356936 MNiSzW.

#### 5. Literatura

- [1] Derek A. Paice: Power Electronic Converter Harmonics. Multipulse Methods for Clean Power, IEEE PRESS, New York (1996).
- [2] Miyairi S.: Harmonic and Pulsation Reducing Circuit Used in Multiplex Polyphase Rectifier Circuit, US Patent No. 4488211 (1984).
- [3] Miyairi S.: Circuit for Reducing Harmonics and Pulsation in Multiplex Polyphase Rectifying Circuits or Inverters, Respectively Provided with Interphase Reactors, US Patent, No. 4532581 (1985).
- [4] Kapłon A., Rolek J.: Space Vector Analysis of Multipulse Rectifiers with Modulation in DC Circuit, VI International Scientific and Technical Conference "Efficiency and Power Quality of Electrical Supply of Industrial Enterprises", Mariupol, (2008).
- [5] Kapłon A., Rolek J.: Analysis of Multipulse Rectifiers with Modulation in DC Circuit in Vector Space Approach, 13th Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC, Poznań, (2008).
- [6] Kapłon A., Rolek J.: Sposób kształtowania prądu modulującego transformatora międzyfazowego w obwodzie prądu stałego układu prostowników niesterowanych, Zgłoszenie patentowe, P-388599 (2009).

otrzymano / received: 25.10.2010

przyjęto do druku / accepted: 01.12.2010

artykuł recenzowany