

MIROSLAW LEWANDOWSKI*

WPŁYW METODY STEROWANIA PRZEKSZTAŁTNIKIEM
4QS NA WIDMO PRĄDUINFLUENCE OF THE 4QS CONVERTER METHOD OF
CONTROL ON A SPECTRUM OF CURRENT HARMONICS

Streszczenie

W artykule przedstawiono zasadę przetwarzania energii w pojeździe elektrycznym zasilanym z sieci prądu przemiennego. Głównymi elementami obwodu są: transformator T_p , przekształtnik 4QS, filtr (L_2C_2), pojemność C_p , układ hamowania (T_hR_h), falownik napięcia (FN) i silnik asynchroniczny (AC). Przekształtnik 4QS wpływa poprawę współczynnika mocy i warunków pracy systemu zasilania pojazdu. Opisano pracę dwu- i trójpoziomowego przekształtnika 4QS. Przeprowadzono analizę wpływu przekształtnika oraz jego sposobu sterowania na widmo prądu.

Słowa kluczowe: napędy trakcyjne, przkkształtnik czterokwadrantowy (4QS), harmoniczne, sterowanie

Abstract

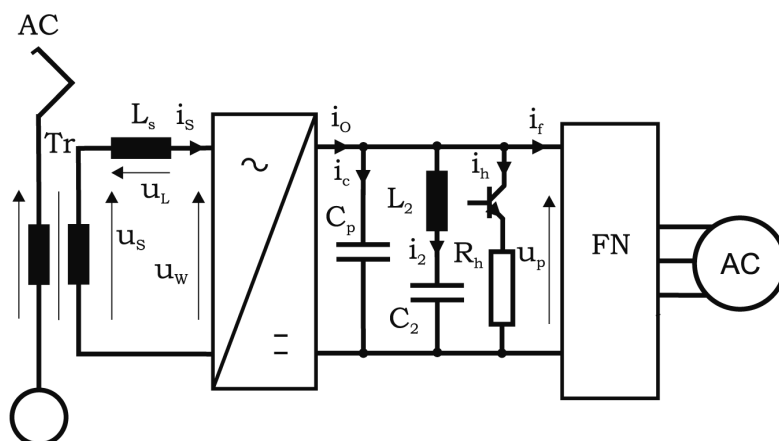
The principle of energy conversion in the locomotive supplied from AC power network is presented. The elements of locomotive's main electric circuit are: transformer (T_p), four-quadrant converter (4QS), series filter (L_2C_2) capacitance (C_p), branch of braking system (T_hR_h), voltage inverter (FN) and asynchronous motor (AC). 4QS converter consuming current of a waveform close to sinusoidal with phase factor close to unity is a favorable solution for rectifier and inverter applications. There are described in the paper the models of two-level and three-level 4QS converters. Influence of type of a converter and a method of its control on current harmonic spectrum were analyzed.

Keywords: traction drives, four-quadrant converter (4QS), harmonics, control

* Dr hab. in. Mirosław Lewandowski, Instytut Maszyn Elektrycznych, Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska.

1. Wstęp

System zelektryfikowanego transportu stanowi kompleksowy układ przetwarzania i dostawy energii elektrycznej od źródeł energii (elektrownie), poprzez sieci transmisyjne i rozdzielcze do podstacji trakcyjnych, z których przez sieć trakcyjną energia elektryczna dostarczana jest do obwodu głównego elektrycznego pojazdu szynowego. Podstawowym zadaniem obwodu głównego elektrycznego pojazdu szynowego (zwanego potocznie lokomotywą) jest zasilanie energią elektryczną układu napędowego lokomotywy w celu wytworzenia siły pociągowej umożliwiającej pokonanie sił oporów ruchu całego pociągu i nadanie zadanej prędkości pojazdowi. Przy zasilaniu pojazdu trakcyjnego prądem przemiennym jednofazowym poprawę współczynnika mocy i warunków pracy systemu zasilania można uzyskać przez wprowadzenie do obwodu głównego pojazdu trakcyjnego przekształtnika czterokwadrantowego zwanego 4QS. Wówczas na wejściu obwodu głównego lokomotywy znajduje się jednofazowy transformator obniżający napięcie z sieci zasilającej (15 kV/16,7 Hz lub 25 kV/50 Hz). Uzwojenia wtórne transformatora zasilają przekształtniki czterokwadrantowe. Zastosowanie modułów przekształtnikowych w pojazdach trakcyjnych umożliwiło konstrukcję lokomotyw wielosystemowych, tzn. poruszających się przy zasilaniu z sieci różnych systemów napięć AC(15 kV/16²/₃ Hz i 25 kV/50 Hz), DC(3 kV, 1,5 kV). Możliwe jest również wykorzystanie przekształtnika 4QS w procesie hamowania elektrycznego z rekuperacją energii do sieci zasilającej. Odzyskanie energii podczas hamowania pojazdu w trakcji elektrycznej dałoby szansę na poprawę efektywności energetycznej systemu. Przez poprawę współczynnika mocy zmniejsza się straty w sieci trakcyjnej i obniża się spadki napięć w długich odcinkach sieci. Na rys. 1 pokazano schemat obwodu przetwarzania energii elektrycznej lokomotywy zasilanej z sieci AC. Elementami modelu obwodu głównego lokomotywy są: transformator – T_r , przekształtnik czterokwadrantowy – 4QS, filtr szeregowy – L_2C_2 , pojemność obwodu pośredniczącego – C_p , gałąź układu hamowania składającego się z tranzystora – T_h i rezystora hamowania – R_h oraz falownik – FN zasilający silnik asynchroniczny – AC. Napięcie zasilania z sieci AC po obniżeniu amplitudy w transformatorze podawane jest na wejście przekształtnika czterokwadrantowego.



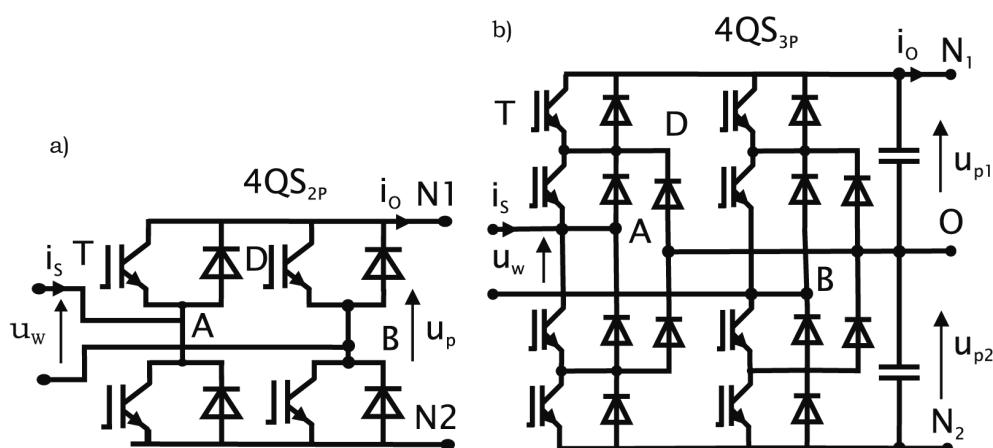
Rys. 1. Schemat obwodu głównego pojazdu trakcyjnego z przekształtnikami 4QS

Fig. 1. Main circuit diagram of a traction vehicle equipped with the 4QS converters

Przekształtnik 4QS, pobierający prąd zbliżony do sinusoidalnego dzięki odpowiedniemu sterowaniu, posiada współczynnik mocy bliski jedności i jest korzystnym rozwiązaniem, gdy pracuje jako prostownik lub jako falownik.

2. Zasada kształtowania przebiegu prądu

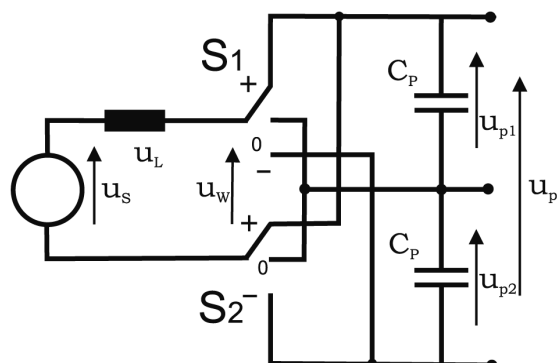
Schemat przekształtnika 4QS pokazano na rys. 2a (przekształtnik dwupoziomowy) oraz na rys. 2b (przekształtnik trójpoziomowy). Gałąź przekształtnika składa się z elementu przełączającego T (tranzystor, tyrystor) oraz przeciwnie połączonych diod D . Dławik o indukcyjności L_s połączony jest szeregowo ze źródłem napięcia przemiennego U_s i kondensatorem C_p , który jest źródłem napięcia stałego falownika zasilającego silnik asynchroniczny. Zasadę pracy przekształtnika 4QS autor opisał w pracach [3, 4].



Rys. 2. Schemat przekształtnika 4QS: a) dwupoziomowego, b) trójpoziomowego

Fig. 2. Scheme of the 4QS converter a) two-level, b) three-level

Spadek napięcia na reaktancji U_L dodaje się wektorowo do napięcia zasilającego U_s , by dać napięcie wejściowe przekształtnika U_w . Zwróćmy uwagę na fakt, że napięcie wejściowe przekształtnika ma większą amplitudę niż napięcie zasilające. Aby układ pracował jako falownik, zamiast obciążenia musimy mieć źródło energii prądu stałego. Jeśli wektor U_w opóźnia się względem wektora U_s , to mamy przepływ mocy od źródła w kierunku odbiornika, natomiast jeśli wektor U_w wyprzedza wektor U_s , to przepływ energii jest odwrotny (tzn. od odbiornika do źródła prądu przemiennego). Przy pracy przekształtnika 4QS w trybie prostownikowym układ z natury rzeczy jest niestabilny. Schemat trójpoziomowego przekształtnika 4QS uzasadniająco poziomu napięcia U_w w zależności od stanów S_1 i S_2 pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Schemat idealnego przekształtnika obrazujący powstawanie poziomów napięcia U_w

Fig. 3. Scheme of an ideal converter which illustrates the formation of the voltage levels U_w

Każda gałąź konwertera jest reprezentowana przez 3 możliwe stany załączenia, które oznaczone są jako „+”, „0” oraz „-”. Daje to wynik w postaci 9 różnych stanów napięcia u_w , jak pokazano w tab. 1. Zakładamy równe napięcie U_{p1} i U_{p2} w obwodzie pośredniczącym podczas pracy.

Tabela 1

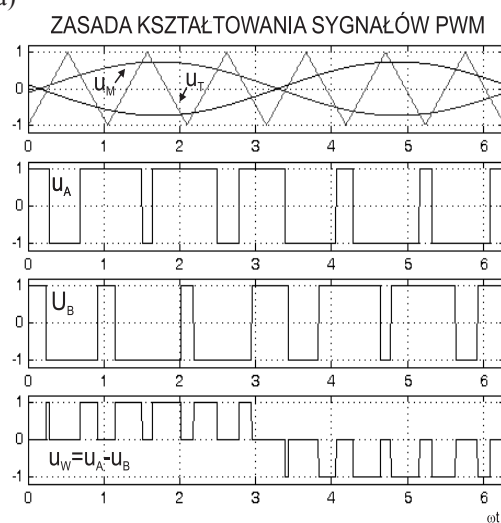
Stany przełączeń i wynikowe napięcie konwertera

S_1	S_2	u_w
-	-	0
0	0	0
+	+	0
+	0	U_{p1}
0	-	U_{p2}
-	0	$-U_{p1}$
0	+	$-U_{p2}$
+	-	$U_{p1} + U_{p2}$
-	+	$-U_{p1} - U_{p2}$

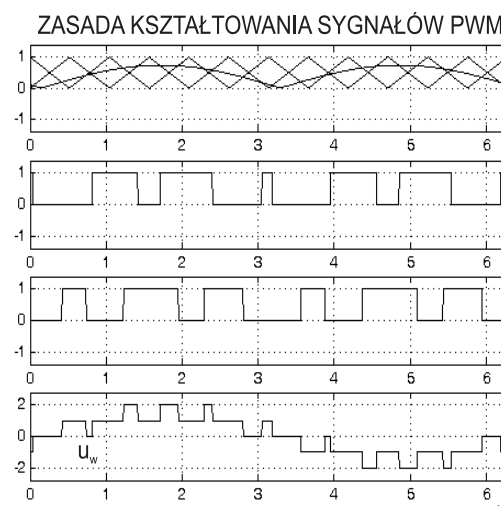
Sterownik steruje pracą łączników (zaworów), tak aby poprzez napięcie U_w wpływać na fazę podstawowej harmonicznej prądu i_s , tak aby ona w fazie z napięciem u_s . Czasy pracy zaworów przekształtnika mogą być regulowane za pomocą modulacji PWM oraz przez regulację histerezową prądu i_s . Należy jednak rozważyć następujące zagadnienia:

- akcje łączeniowe muszą być rozłożone równomiernie na klucze w celu uzyskania zbilansowanych strat łączeniowych,
- akcje łączeniowe muszą być wykorzystane ekonomicznie w celu redukcji strat łączeniowych lub uzyskania odpowiednio małych skoków prądu,
- minimalne czasy włączenia i wyłączenia zaworów (ten minimalny czas *on/off* wynosi od jednej do kilku milisekund),
- kondensatory obwodu DC muszą być równomiernie ładowane.

a)



b)



Rys. 4. Przebiegi czasowe napięcia trójkątnego U_T , sinusoidalnego napięcia modulującego U_M oraz sygnały pomocnicze dla: a) dwupoziomowego, b) trójpoziomowego

Fig. 4. Time figures of triangle voltage U_T , sinusoidal modulating voltage U_M and auxiliary signals for a) two-level converter, b) three-level converter

Na rysunku 4 przedstawiono przebieg czasowy napięcia u_w oraz przebiegi pomocnicze wyznaczające czasy przełączeń dla przekształtnika 4QS dwu- i trójpoziomowego. Przebiegi pomocnicze powstały przez porównanie napięcia przebiegu trójkątnego oraz przebiegu sinusoidalnego, którego amplituda i faza wpływa na wartość amplitudy pierwszej harmonicznej napięcia u_{w1} oraz jej fazy.

Stopień odkształcenia przebiegu czasowego prądu i_s w odniesieniu do prądu i_{prog} sinusoidalnego (będącego w fazie z przebiegiem czasowym napięcia u_s) jest charakteryzowany za pomocą tzw. współczynnika zawartości harmonicznych THD. Zbyt duże wartości THD są niedopuszczalne, dlatego, by ograniczyć współczynnik THD, stosuje się różne metody modulacji napięcia u_w .

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{N_{max}} I_n^2}}{I_1} \quad (1)$$

gdzie:

I_1 – skuteczna wartość prądu składowej podstawowej,

I_n – skuteczna wartość prądu n -tej harmonicznej.

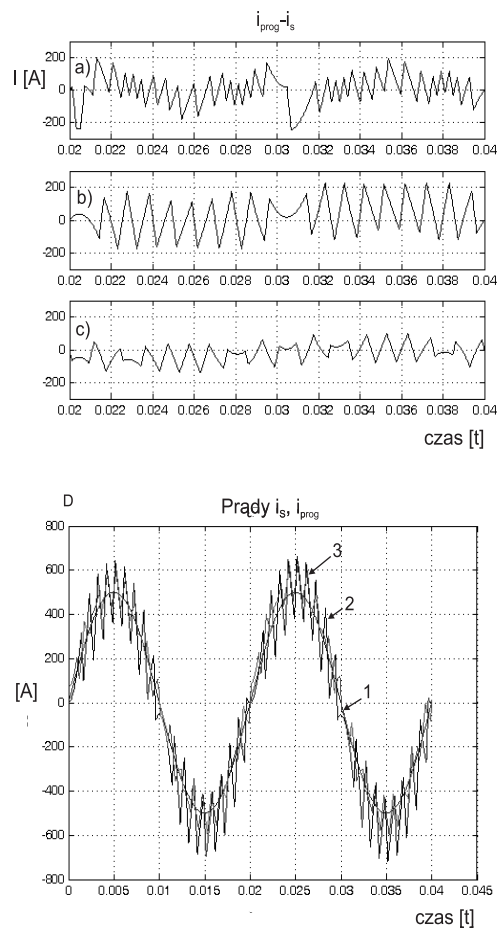
Metodę PWM charakteryzują między innymi dwa współczynniki. Współczynnik modulacji częstotliwości m_f określa się jako stosunek częstotliwości fali nośnej do częstotliwości fali modulującej

$$m_f = \frac{f_T}{f_M} \quad (2)$$

Współczynnik modulacji amplitudy m_A jest stosunkiem amplitudy funkcji modulującej do amplitudy fali nośnej

$$m_A = \frac{U_M}{U_T} \quad (3)$$

Przeprowadzono obliczenia przebiegu czasowego prądu i_s dla przekształtnika dwupoziomowego, trójpoziomowego i modulacji PWM oraz przekształtnika dwupoziomowego przy regulacji histerezy prądu. Prąd i_{prog} miał zadaną wartość amplitudy i częstotliwości. Obliczenia przeprowadzono dla zmiennego współczynnika modulacji, którego wartość wynosiła 8, 12, 16. Dla regulacji histerezy tak dobierano wartości parametrów, żeby ilość przełączeń w okresie była zbliżona jak dla modulacji PWM. W tab. 2 przedstawiono wartości THD_I prądu i_s dla sterowania PWM przekształtnika dwupoziomowego i trójpoziomowego oraz histerezy (dwupoziomowego).



Rys. 5. Przebiegi czasowe różnicy pomiędzy prądem programowanym będącym w fazie z napięciem wejściowym U_s a prądem rzeczywistym I_s : a) przekształtnik trójpoziomowy, b) przekształtnik trójpoziomowy, c) sterowanie histerezowe prądu, d) przebieg czasowy prądu –1) i_{prog} , 2) i_s PWM, 3) i_s sterowanie histerezowe

Fig. 5. Time figures of the difference between programmed current which has the same el. angle with the input voltage U_s and a real current I_s : a) three-level converter b) two-level converter, c) hysteresis current control, d) current time curve 1) i_{prog} , 2) i_s PWM, 3) i_s hysteresis control

Tabela 2

m_f	THD _I		
	PWM		histerezowy
	dwupoziomowy	trójpoziomowy	dwupoziomowy
8	0,153	0,077	0,159
12	0,101	0,044	0,110
16	0,080	0,022	0,093

3. Wnioski

Przeprowadzone badania symulacyjne i obliczenia wartości THD dla prądu płynącego w części AC obwodu głównego pojazdu trakcyjnego zasilanego z sieci prądu przemiennego pokazały możliwość wpływu na harmoniczne prądu zarówno przez rodzaj przekształtnika, jak i parametry metody sterowania. Głównym ograniczeniem są dopuszczalne wartości czasu trwania poszczególnych stanów pracy tyrystorów lub tranzystorów.

Literatura

- [1] Böcker J., *Tolerance Band Controller of a Three – Level Four – Quadrant Converter Including DC Link Balancing*, 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Germany 2004.
- [2] Chang G., *Modeling Characteristics of Harmonic Currents Generated by High-Speed Railway Traction Drive Converters*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 2, April 2004.
- [3] Dixon J., Luis Morá L., *A Clean Four-Quadrant Sinusoidal Power Rectifier Using Multistage Converters for Subway Applications*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 52, no. 3, June 2005.
- [4] Kiss P., Dán A., *Modelling of High Power Locomotive Drives for Harmonic Penetration Studies*, The First International Meetings on Electronics & Electrical Science and Engineering, Djelfa, November 4–6, 2006.
- [5] Kiss P., Dán A., *Novel Analytical Approximation Method of Frequency Dependent Thevenin Impedance*, Proc. IEEE Bucharest PowerTech, Bucharest, June 28–July 2, 2009.
- [6] Lewandowski M., *Model matematyczny obwodu głównego pojazdu trakcyjnego zasilanego z sieci prądu przemiennego*, MET'2009 "Modern Electric Traction", Gdańsk 2009.
- [7] Lewandowski M., Maciołek T., *Przekształtnik 4QS w obwodzie głównym pojazdu trakcyjnego*, ZN WSI Konferencja Naukowa, Komputerowe systemy wspomaganie prac inżynierskich, Radom 1994.
- [8] Oettmeier M., Heising C., Staudt V., Steimel A., *Dead-Beat Control for a Single-Phase 50-kW, 16.7-Hz Railway-Grid Representation Inverter Featuring Variable Grid Parameters*, 2nd International Conference on Power Engineering, Portugal 2009.
- [9] Skarpetowski G., *Uogólniona teoria przekształtników statycznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997.