

Witold Posiewała

Zastosowanie autotransformatora i modulacji w obwodzie prądu stałego do modernizacji stacji prostowniczej

Układy przekształtnikowe są źródłem wyższych harmonicznych prądu. Obciążanie sieci zasilającej tego typu prądem powoduje pojawienie się w napięciu sieciowym wyższych harmonicznych, które w napięciu zasilającym wywołują niepożądane skutki: prowadzą do błędnego działania urządzeń wymagających sinusoidalnego zasilania, powodują wzrost obciążenia prądowego urządzeń, których impedancja jest typu pojemnościowego, mogą prowadzić do zjawisk rezonansowych niebezpiecznych dla sieci. Wyższe harmoniczne, zwłaszcza kolejności przeciwnej, powodują zwiększenie strat w obwodach magnetycznych silników asynchronicznych, transformatorów energetycznych oraz niekiedy maszyn synchronicznych (generatorów zasilających sieć rozdzielczą średniego napięcia). Straty te są powodowane polami wirowymi pochodzącymi od wyższych harmonicznych.

Współczesne normy międzynarodowe stawiają pod względem wartości wyższych harmonicznych w prądach pobieranych ze źródła zasilającego bardzo wysokie wymagania. Dla ich spełnienia konieczne jest konstruowanie układów zoptymalizowanych pod względem zakłóceń wprowadzanych do sieci. Jedną z podstawowych metod obniżania negatywnego wpływu na sieć układów prostowniczych jest podwyższanie liczby pulsów prostownika. Przykładami takich układów są konwencjonalne prostowniki 18- czy 24-pulsowe. Są one budowane za pomocą kombinacji 6-pulsowych mostków. Mostki zasilane są za pomocą transformatorów zapewniających izolację napięć poszczególnych mostków. Zastosowanie transformatorów do budowy tego typu układów powoduje wysoki koszt realizacji oraz duże rozmiary i masę urządzenia. W przypadku istniejących stacji prostowniczych, zawierających prostowniki 6-pulsowe istnieje stosunkowo mało kosztowna możliwość ich modernizacji. Proponowany układ zastąpiłby układ mostka 6-pulsowego pozostawiając istniejący transformator.

Prostownik 12-pulsowy z autotransformatorem

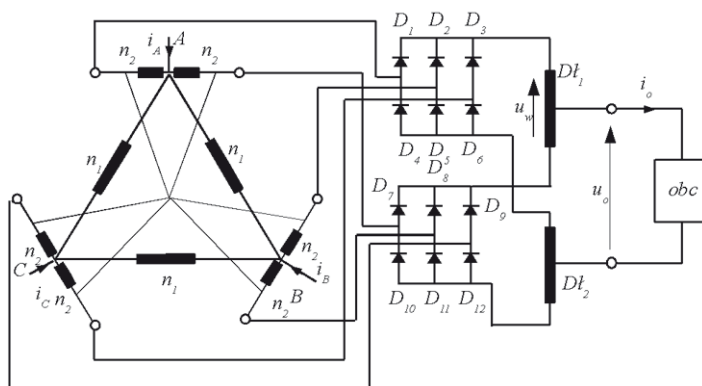
Podstawą budowy układu wielopulsowego prostownika, wykorzystującego technikę modulacji po stronie stałoprądowej, jest układ prostownika 12-pulsowego, który dzięki zastosowaniu autotransformatora o połączeniu różnicowo-trójkątowym ma w porównaniu z występującym w konwencjonalnym układzie z transformatorem mniejszy, a tym samym tańszy obwód magnetyczny. Moc gabarytowa autotransformatora jest ponad pięciokrotnie mniejsza niż transformatora z układu konwencjonalnego. Moc gabarytowa względna (odniesiona do mocy odbiornika) wynosi:

$$KVA_{atr} = 0,184 \quad (1)$$

Pokazany na rysunku 1 prostownik 12-pulsowy z autotransformatorem wyposażony jest w dwa dławiki wyrównawcze, których moc gabarytowa, względna wynosi:

$$KVA_{dl} = 0,033 \quad (2)$$

Sumaryczna, względna moc gabarytowa układu (autotransformator i dławiki wyrównawcze) wynosi więc około 0,25. Układ powinien być zasilany symetrycznym napięciem trójfazowym. Bardzo ważne jest jednak, że układ toleruje drugi typ źródła zasilania (napięcie trójfazowe o jednakowych fazowych impedancjach z 1% niesymetrią – kolejność przeciwna i 2,5% zawartością 5. harmonicznej). Przez zastosowanie techniki modulacji po stronie stałoprądowej układ prostownika uzyska cechy *clean power converter*.

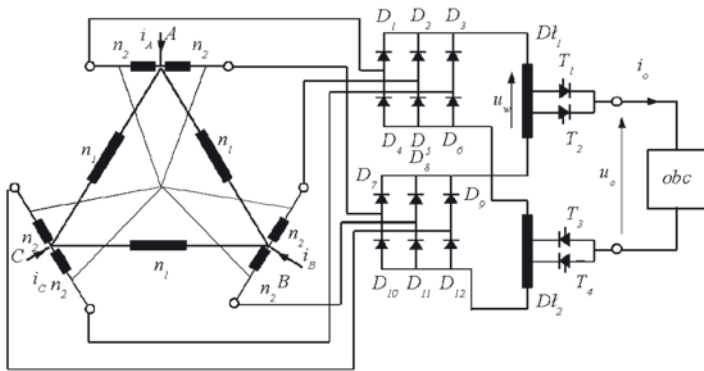


Rys.1. Schemat prostownika 12-pulsowego z autotransformatorem

Metoda modulacji w obwodzie prądu stałego

Metoda modulacji w obwodzie prądu stałego prowadzi do podwyższenia liczby pulsów prostownika bez zmiany obwodu magnetycznego i uzwojeń transformatora lub autotransformatora zasilającego mostki. Jej zastosowanie dla układów konwencjonalnych z transformatorem zostało opisane w [1]. W rozwiązaniu zaprezentowanym na rysunku 1 napięcie wyjściowe z prostownika odkłada się na wyprowadzeniach z dławików wyrównawczych. Wyprowadzenia te znajdują się w miejscach połączeń dwóch uzwojeń o takiej samej liczbie zwojów nawiniętych na wspólnym rdzeniu dławika. Na obu uzwojeniach dławików odkładają się napięcia wyrównawcze u_w , dzięki którym oba mostki są jednakowo obciążone. Jeżeli miejsce wyprowadzenia nie będzie znajdowało się między tymi uzwojeniami, prądy wyjściowe z mostków będą się od siebie różnić. Stopień niewyrównania tych prądów będzie zależał od tego, jak bardzo wyprowadzenie będzie odsunięte od punktu połączenia obu uzwojeń. Jeżeli dławiki wyrównawcze zostaną wyposażone w kilka dodatkowych odczepów i zapewniony zostanie w trakcie działania prostownika mechanizm przetaczania

„aktywnych” odczepów, można do prądów obciążających mostki wprowadzić dodatkowe harmoniczne. Na rysunku 2 przedstawiono obwód prostownika 12-pulsowego z rysunku 1, z dodatkowymi odczepami, które pozwalają powiększyć liczbę pulsów z 12 do 24 (skrót IDC od wstrzykiwania po stronie stałoprądowej [1]).



Rys. 2. Schemat prostownika z układem modulującym (IDC) pozwalającym podwoić liczbę pulsów

Jeżeli liczba odczepów zostałaby podwojona, to prostownik miałby charakter 48-pulsowy. Liczba pulsów występująca w napięciu wyjściowe mostka jest wynikiem złożenia liczby pulsów potencjałów na wyprowadzeniach dławików wyrównawczych. W przypadku układu bez modyfikacji IDC potencjały na wyprowadzeniach dławików osiągają wielkości szczytowe 6 razy w trakcie okresu. Po ich złożeniu otrzymujemy 12 pulsów. Zastosowanie dwóch odczepów zamiast jednego może spowodować podwojenie liczby szczytów tych potencjałów. Wymaga to przełączania tyrystorów układu IDC $6 \times 2 = 12$ razy na okres napięcia zasilającego. Ogólnie liczbę wymaganych przełączeń na okres można wyrazić zależnością:

$$p_k = 6 \cdot n \quad (3)$$

gdzie:

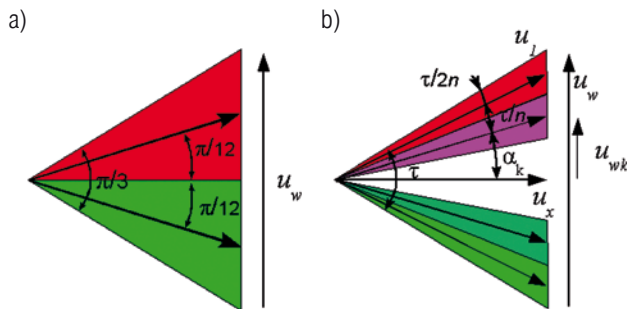
n – liczba odczepów na dławik.

Wymagany czas przewodzenia zaworów IDC wynosi:

$$T_k = \frac{T}{6 \cdot n} \quad (4)$$

gdzie:

T – okres napięcia zasilającego (sieciowego).



Rys. 3. Wykres wskazowy z zaznaczonymi kątami przewodzenia zaworów IDC

a) dla 2 odczepów, b) dla n odczepów.

W przypadku dwóch odczepów, jak na rysunku 2, $T_k = T/12$. Położenie odczepów zależy nie tylko od ich liczby, ale także od przyjętego sposobu wyzwalania tyrystorów IDC. W przypadku wyzwalania ze stałym okresem T_k położenie odczepów jest zdeterminowane koniecznością utrzymania jednakowych okresów T_k (rys. 3).

W przypadku ogólnym kąt α_k może być wyliczony z zależności:

$$\alpha_k = \frac{\tau}{2} - \frac{\tau}{2 \cdot n} - (k-1) \frac{\tau}{n} \quad (5)$$

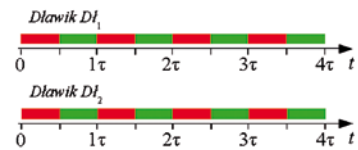
napięcie między środkiem uzwojeń dławików a k -tym odczepem można wyznaczyć z zależności:

$$u_{wk} = u_w \frac{\text{tg} \left[\frac{\tau}{2} - \frac{\tau}{2 \cdot n} - (k-1) \frac{\tau}{n} \right]}{2 \text{tg} \left(\frac{\tau}{2} \right)} \quad (6)$$

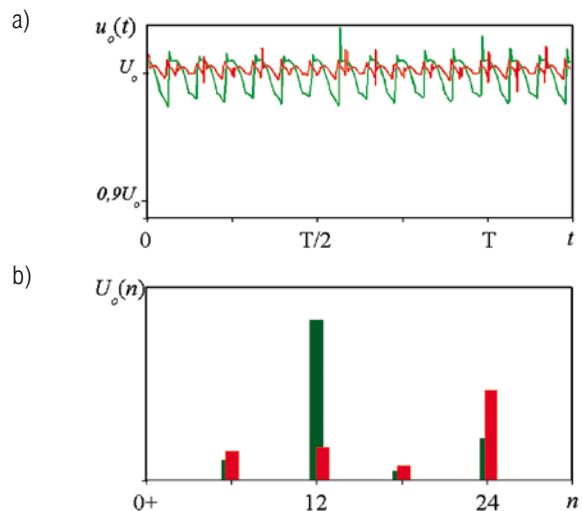
dla dwóch odczepów, jak na rysunku 3a ich położenie determinuje wymagane napięcie:

$$u_{wk} = u_w \frac{\text{tg} \left(\frac{\pi}{12} \right)}{2 \text{tg} \left(\frac{\pi}{6} \right)} \quad (7)$$

Jeżeli do wyznaczonych odczepów zostaną przyłączone zawory, które będą wyzwalane z częstotliwością określoną przez T_k zgodnie z sekwencją przedstawioną na rysunku 4, to opierając się na nieliniowym modelu prostownika można przedstawić przebieg napięcia wyjściowego U_o jak na rysunku 5.



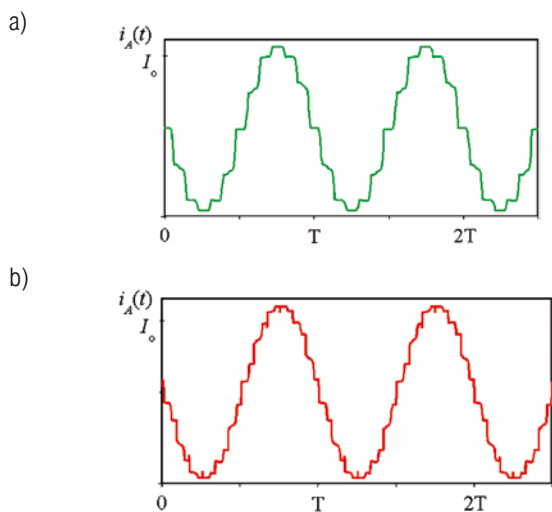
Rys. 4. Sekwencje łączenia zaworów w układzie IDC z rysunku 2



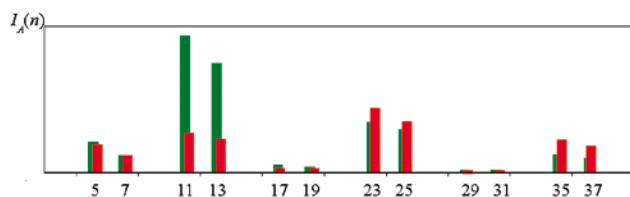
Rys. 5. Przebieg napięcia odbiornika (a) oraz jego widmo amplitudowe (b) przed zastosowaniem IDC – kolor zielony i po zastosowaniu IDC – kolor czerwony

Na rysunku 5 wyraźnie widać znaczne zmniejszenie napięcia tętnień i jednocześnie zwiększenie częstotliwości podstawowej

harmonicznej składowej zmiennej. W widmie napięcia wyjściowego zamiast harmonicznej 12. zaczyna dominować 24. Występowanie harmonicznych innych niż charakterystyczne (12. i 24.) wynika z zastosowania nieliniowego modelu autotransformatora i dławików wyrównawczych, uwzględniającego pętlę histerezy oraz prądy wirowe. Do zobrazowania skuteczności rozwiązania nawet przy stosowaniu niskiej jakości blach transformatorowych przyjęto podczas obliczeń rdzeni bardzo znaczące wykorzystanie właściwości magnetycznych żelaza i częściową pracę na kolanie charakterystyki magnesowania. Wpływ nasycenia i histerezy na analizowany układ został omówiony w [7]. Skutkiem zmiany charakteru napięcia wyjściowego z prostownika jest zmiana obciążenia autotransformatora. W prądach zasilających prostownik zaczyna dominować harmoniczna 23. i 25., zamiast charakterystycznych dla prostownika 12-pulsowego 11. i 13. Na rysunkach 6, 7, 8 przedstawiono wyniki symulacji prostownika, uwzględniające rezystancje i indukcyjności uzwojeń autotransformatora i dławików wyrównawczych, nieliniowość i histerezę rdzeni autotransformatora i dławików wyrównawczych.



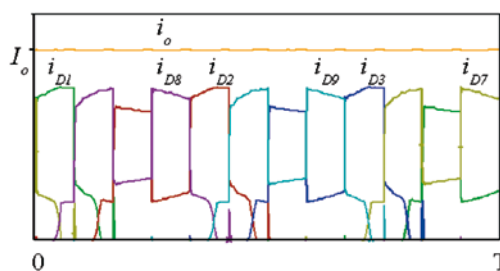
Rys. 6. Prąd sieciowy przed (a) i po zastosowaniu układu IDC (b)



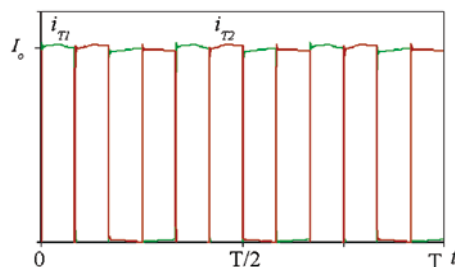
Rys. 7. Widmo napięcia i prądu sieciowego przed (kolor zielony) i po zastosowaniu układu IDC (kolor czerwony)

Zastosowanie układu wstrzykiwania po stronie stałoprądowej pozwala zmniejszyć zawartość wyższych harmonicznych w prądach sieciowych z ponad 10% do około 5%. Na rysunku 9 przedstawione są prądy płynące przez diody prostownika. Kąt przewodzenia diod w układzie bez IDC wynosi około 120° . Dla układu IDC kąt przewodzenia pozostaje na podobnym poziomie, ale kształt prądu ulega istotnej zmianie. Wielkość średnia i skuteczna jest na podobnym poziomie, jednak w przypadku układu z dodatkowymi zaworami wielkość szczytowa zwiększa się o około 50%.

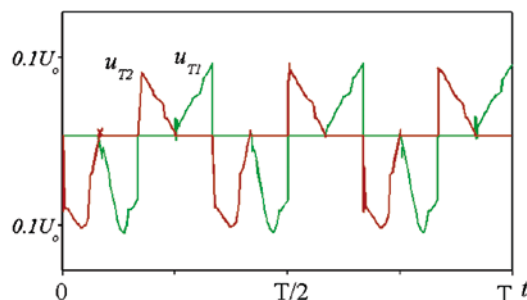
Na rysunkach 9 i 10 pokazano, jakie wymagania będą stawiane zaworom IDC. Wielkość szczytowa prądu płynącego przez każ-



Rys. 8. Prądy diod strony anodowej oraz prąd obciążenia i_o



Rys. 9. Prądy zaworów IDC



Rys. 10. Napięcia na zaworach IDC

dy zawór jest równa prądowi odbiornika. Wielkość skuteczna tego prądu wynosi:

$$I_{TDC} = \frac{\sqrt{2}}{2} I_o \quad (8)$$

Wielkość maksymalna napięć na zaworach jest w przybliżeniu 10 razy mniejsza niż napięcie odbiornika.

Podsumowanie

Współczynnik odkształceń (THD) tradycyjnego 6-pulsowego prostownika, stosowanego w kolejowych stacjach prostownikowych, wynosi w przybliżeniu 30%. Do częściowego wyeliminowania wyższych harmonicznych stosuje się układy filtrów harmonicznym, które niestety są często przyczyną powstawania niekorzystnych rezonansów. Poza tym, ze względu na konieczność eliminowania harmonicznych o stosunkowo małych częstotliwościach oraz wysokich amplitudach, filtry są dużej mocy i przez to stanowią istotny koszt całego prostownika. Zastosowanie zamiast prostownika 6-pulsowego układów o większej liczbie pulsów eliminuje potrzebę stosowania takich filtrów. Większe częstotliwości harmonicznych podstawowych, występujące w prostownikach o większej liczbie pulsów, są bowiem silnie tłumione w indukcyjności własnej sieci energetycznej.

Zaproponowana w tym artykule modernizacja stacji prostownikowych pozwala znacznie zmniejszyć negatywne oddziaływanie prostownika na sieć energetyczną. Przez zastosowanie metody

wstrzykiwania po stronie stałoprądowej można – nie ponosząc wysokich kosztów – zredukować zakłócenia wprowadzane do sieci do takiego poziomu, że prostownik stanie się układem *clean power converter*. Już użycie 4 tyrystorów daje możliwość podwojenia liczby pulsów. Podwojenie liczby pulsów obniża współczynnik THD w prądach sieciowych z ponad 10% do około 5%. Powiększenie liczby pulsów daje także pomniejszenie wartości międzyszczytowych napięcia wyjściowego prostownika oraz powiększenie częstotliwości składowej zmiennej tego napięcia. Umożliwia to stosowanie tańszych układów filtrujących napięcie wyprostowane. Do budowy układu IDC można używać tyrystory o niskim napięciu roboczym (rys. 10). Należy także zaznaczyć, że istnieje możliwość awaryjnego wyłączenia układu IDC w przypadku uszkodzeń w podobwodach sterowania zaworami lub samych zaworów. W trybie awaryjnym prostownik będzie pracował jako 12-pulsowy. Zastosowanie metody IDC utrzymuje zalety układu 12-pulsowego z autotransformatorem, polegające na jego małych kosztach budowy, a związanych z bardzo małym współczynnikiem mocy obliczeniowej autotransformatora, równym 0,2. Układ prostownika z autotransformatorem został szczegółowo opisany w [2]. Przeanalizowano tam między innymi wpływ niesymetrii sieci oraz odkształceń napięć zasilających na jego pracę. Przedstawiony w artykule prostownik 12-pulsowy z autotransformatorem może być także doposażony w inne układy redukujące wyższe harmoniczne. Zostało to opisane w [2] i [6], gdzie zaprezentowano układ aktywnej i pasywnej redukcji harmonicznyc.

Literatura

- [1] Villablanca M.E, Arrillaga J.: *Pulse multiplication in parallel convertors by multiram control of interphase reactor*. IEE PROCEEDINGS-B Vol. 139, 1992.
- [2] Posiewała W.: *Układy prostowników wielopulsowych o małej zawartości wyższych harmonicznyc zasilane z autotransformatorów*. Instytut Elektrotechniki, Warszawa, 2000.
- [3] Posiewała W.: *Układ prostownikowy 12-pulsowy*. IV Konferencja „Awaryjność i diagnostyka w energetyce”. Solina „JAWOR”, 1998 r.
- [4] Posiewała W.: *Ulepszony układ prostowniczy 12-pulsowy zmniejszający zawartość wyższych harmonicznyc w prądach sieciowych*. XXI Seminarium z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, Gliwice-Ustroń, 1998.
- [5] Posiewała W.: *Prostownik 12-pulsowy z aktywną redukcją harmonicznyc*. Proc. 3-rd International Modeling School - Crimea '99.
- [6] Posiewała W.: *Układ prostownika 12-pulsowego z aktywną redukcją harmonicznyc*. II Konferencja Naukowa „Współczesne problemy maszyn elektrycznych i energoelektroniki”, Rzeszów 1999.
- [7] Posiewała W.: *Wpływ nasycenia i histerezy na pracę prostownika 12-pulsowego z autotransformatorem*. MiS-1, 2000.

Autor

dr inż Witold Posiewała

Politechnika Rzeszowska

Zakład Podstaw Elektrotechniki i Informatyki

MAGAZYN 1 /2008 Cena 21,40 zł w tym 7% VAT



TELEKOMUNIKACJA I STEROWANIE RUCHEM



W numerze:

- * Ewolucja sygnalizacji i wprowadzanie ETCS na liniach dużej prędkości w Europie
- * Porównanie europejskich systemów oddziaływania na pociąg
- * Metodyka określania bezpieczeństwa transmisyjnego systemu komunikacyjnego
- * Współpraca pojazdu drogowego typu UPS-80 z urządzeniami kontroli niezajętości toru
- * Telematyka w zarządzaniu kryzysowym w systemach transportowych

Magazyn

Telekomunikacja i Sterowanie Ruchem 1/2008

- Ewolucja sygnalizacji i wprowadzanie ETCS na liniach dużej prędkości w Europie
- Porównanie europejskich systemów oddziaływania na pociąg
- Telematyka w zarządzaniu kryzysowym w systemach transportowych
- Metodyka określania bezpieczeństwa transmisyjnego systemu komunikacyjnego
- Współpraca pojazdu drogowego typu UPS-80 z urządzeniami kontroli niezajętości toru

Telekomunikacja i Sterowanie Ruchem 2/2008

- Bezpieczeństwo ruchu kolejowego w legislacji unijnej
- Integracja systemów bezpieczeństwa transportu – projekt ZEUS
- Analiza bezpieczeństwa w procesach ruchu kolejowego
- Problematyka analizy ryzyka w urządzeniach srk

Zamówienia

EMI-PRESS

90-955 Łódź 8

skr. poczt. 103

tel./fax 042 633 37 51

tts@emipress.com.pl