

Polepszenie jakości przekształcanej energii elektrycznej w układach prostownikowych mocy z modulatorem prądu

Abstract. *In this paper the diode rectifier with power electronics current modulator utilized in output circuit is described. With aid of such solution, power grid current is almost sinusoidal. This solution of rectifier is very useful in case large power of load, because the power of current modulator is about 2% to 3% of total DC power. To increase the efficiency coefficient and to regulate the value of voltage in DC circuit of modulator the additional small power transistor rectifier with sinusoidal grid current was also implemented.*

Słowa kluczowe: prostownik mocy, źródło prądowe, modulator prądu, regulator prądu, filtry cyfrowe

Wstęp

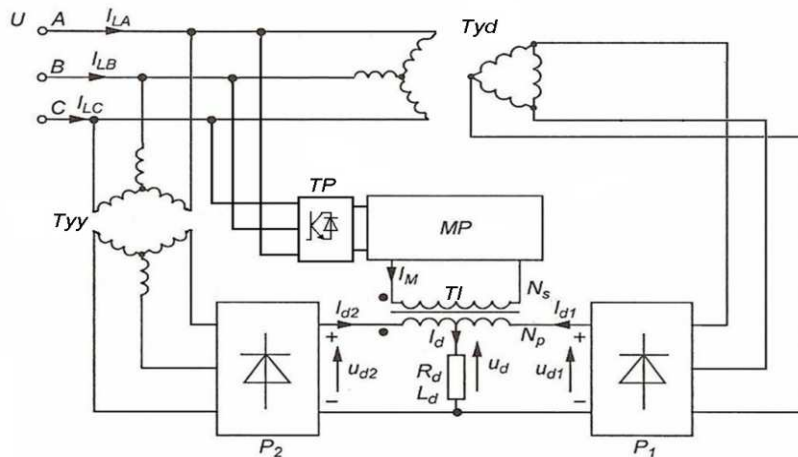
Szczególnie aktualnym problemem elektroenergetyki i energoelektroniki jest polepszenie jakości przekształcania energii elektrycznej. Niestety konwencjonalne rozwiązania diodowych i tyrystorowych układów prostownikowych charakteryzują się znacznie odkształconym prądem pobieranym z sieci [1]. Jeden ze sposobów umożliwiających poprawę widma prądu linii polega na wykorzystaniu filtrów pasywnych lub równoległych kompensatorów aktywnych. Inną metodą jest wykorzystanie modulacji szerokości impulsów w głównym obwodzie silnoprądowym zasilania prostowników. Układy takie wymagają jednak stosowania zaworów w pełni sterowalnych przełączanych z częstotliwością wielokrotnie większą od częstotliwości napięcia sieci. W celu zmniejszenia niekorzystnego odkształcenia prądu sieci buduje się również układy złożone z kilku prostowników połączonych równolegle bądź szeregowo [1].

W niniejszym artykule zaprezentowano natomiast rozwiązanie prostownika diodowego mocy o polepszonych wskaźnikach energetycznych bazujące na koncepcji zastosowania modulacji prądów w obwodzie prądu stałego [2].

Idea modulacji prądów w obwodzie stałoprądowym diodowego prostownika mocy

Na rys. 1 przedstawiono schemat ideowy układu trójfazowego prostownika diodowego z modulacją prądów w obwodzie stałoprądowym. Mostki prostownicze (P_1) i (P_2) zasilane są z transformatorów energetycznych o połączeniach gwiazda-gwiazda (Tyy) oraz gwiazda-trójkąt (Tyd) w celu zapewnienia przesunięcia fazowego napięć zasilających o 30 stopni elektrycznych. Po stronie stałoprądowej mostki połączone są za pomocą transformatora impulsowego (TI) z dodatkowym uzwojeniem, w którego obwód – po stronie pierwotnej – włączony jest energetyczny modulator prądu (MP). Za pośrednictwem szerokopasmowego transformatora TI przemienny prąd modulatora jest odpowiednio dodawany (z uwzględnieniem znaku „+” lub „-”) do prądów wyjściowych każdego z prostowników składowych. W konsekwencji możliwe staje się kształtowanie prądów wejściowych mostków składowych, a zatem i wypadkowego prądu sieci.

Zaimplementowany w opisywanym rozwiązaniu modulator prądu MP bazuje na jednofazowym tranzystorowym falowniku napięcia pracującym w regulacji nadążnej prądu. Stanowi zatem sterowane energoelektroniczne źródło prądowe.



Rys. 1. Układ prostownikowy mocy z energoelektronicznym modulatorem prądu w obwodzie DC

W stałoprądowym obwodzie pośredniczącym modulatora prądu zastosowano dodatkowo pomocniczy prostownik tranzystorowy małej mocy (TP) o sinusoidalnym prądzie sieci. Jego zadaniem jest m.in. stabilizacja oraz regulacja napięcia na kondensatorze obwodu pośredniczącego modulatora.

Algorytm wyznaczania sygnału referencyjnego modulatora prądu

Modulator prądu jest sterowanym energoelektronicznym źródłem prądowym - falownikiem z szeregowym indukcyjnym filtrem wyjściowym pracującym w regulacji nadążnej prądu. W analizowanym przypadku częstotliwość podstawowej harmonicznej prądu modulatora jest sześciokrotnie większa od częstotliwości napięcia sieci, a jego przebieg (synchronizowany napięciem sieciowym) jest trójkątny. Uzyskany w ten sposób wypadkowy prąd pobierany ze źródła jest dobrze przybliżony do przebiegu sinusoidalnego, a jego współczynnik THD wynosi teoretycznie zaledwie około 1%.

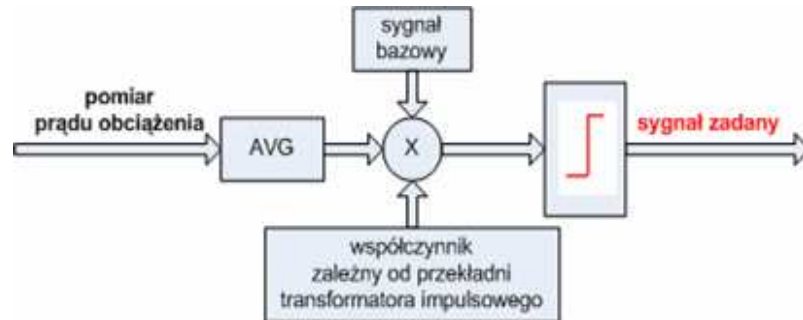
W przypadku prawidłowo dobranych parametrów i struktury regulatora w torze sterowania modulatora prądu sygnał wyjściowy oscyluje wokół sygnału referencyjnego. Poziom tych oscylacji można ograniczyć (np. poprzez zwiększenie częstotliwości pracy zaworów), ale nie całkowicie wyeliminować. W konsekwencji dla odbiornika o charakterze źródła prądowego następuje skokowa zmiana prądu modulatora w pobliżu jego wartości maksymalnych i minimalnych wymuszona przez obciążenie. Taki stan pracy może być niebezpieczny m.in. dla obciążenia ze względu na pojawiające się przepięcia w napięciu wyjściowym prostownika. W przypadku pojawienia się przepięć o dużych wartościach szczytowych odbiornik może ulec uszkodzeniu.

W celu ograniczenia poziomu tych przepięć występujących w przypadku odbiornika o charakterze źródła prądowego opracowano algorytm wyznaczania sygnału referencyjnego modulatora – algorytm z tzw. ogranicznikiem sygnału. Schemat blokowy układu ilustrujący działanie algorytmu z ogranicznikiem sygnału pokazano na rys. 2

Blok (AVG) odpowiada za wyznaczenie wartości średniej prądu obciążenia. Otrzymana w ten sposób wartość jest mnożona przez współczynnik zależny od przekładni transformatora impulsowego oraz dodatkowo przez sygnał bazowy (synchronizowany napięciem sieciowym przebieg trójkątny o jednostkowej amplitudzie i o częstotliwości 300 Hz). W konsekwencji uzyskujemy sygnał trójkątny o amplitudzie równej iloczynowi wartości średniej prądu obciążenia i wartości współczynnika

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

zależnego od przekładni transformatora sprzęgającego modulator z obwodami wyjściowymi mostków diodowych. Amplituda tego sygnału jest ograniczana w bloku ogranicznika sygnału. Wartość ograniczenia amplitudy jest uzależniona od dopuszczalnych wartości poziomów przebiegów.



Rys.2. Schemata blokowy układu wyznaczania sygnału referencyjnego modulatora prądu dla algorytmu z ogranicznikiem sygnału

Układ sterowania prostownikiem pomocniczym małej mocy

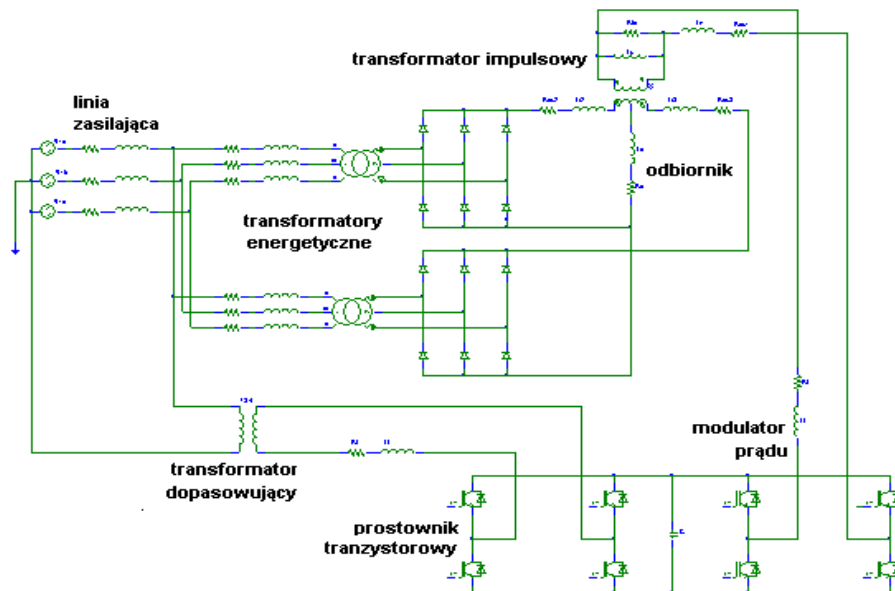
Na rys. 3 wyjaśniono sposób rozwiązania problemu zasilania energoelektronicznego modulatora prądu. W tym celu wykorzystano kondensator w obwodzie pośredniczącym oraz pomocniczy sterowany prostownik tranzystorowy małej mocy o sinusoidalnym prądzie sieci. Bazując na definicji prądów aktywnych wg Fryzego [3] opracowano układ sterowania pomocniczego prostownika tranzystorowego (pracującego w zakresie pracy falownikowej) umożliwiającego regulację oraz stabilizację napięcia na kondensatorze w stałoprądowym obwodzie pośredniczącym energoelektronicznego MP. Wartość chwilową referencyjnego fazowego prądu sieci wyznacza się dla pomocniczego prostownika jednofazowego z zależności:

$$(1) \quad i_{LpREF}(t) = -\frac{P'_{DC}}{U_L^2} u_L(t)$$

gdzie:

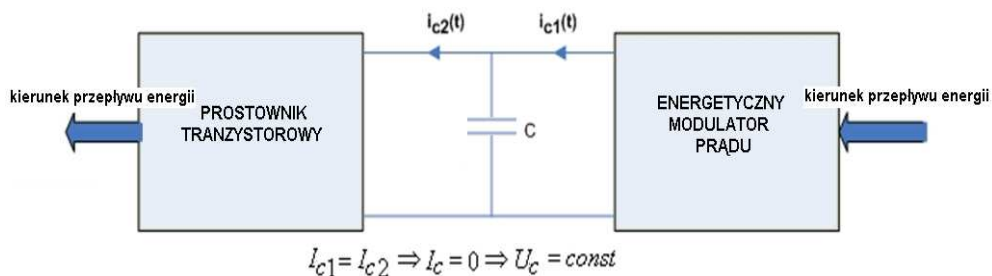
P'_{DC} – moc dostarczana przez modulator prądu do obwodu pośredniczącego.

Regulacja (stabilizacja) napięcia na kondensatorze jest niezbędna. W przypadku jej braku napięcie to zmienia się w sposób niekontrolowany w zależności od wartości prądu modulatora i napięcia na zaciskach transformatora impulsowego. Zwiększeniu amplitud tych sygnałów towarzyszy wzrost napięcia na kondensatorze obwodu pośredniczącego. Ze względu na małą moc przenoszoną przez tranzystorowy prostownik pomocniczy w wykonanym układzie laboratoryjnym uzasadnione było zastosowanie układu jednofazowego (rys. 3).



Rys.3. Model symulacyjny części silnoprądowej układu prostownikowego z modulatorem prądu i dodatkowym prostownikiem tranzystorowym małej mocy

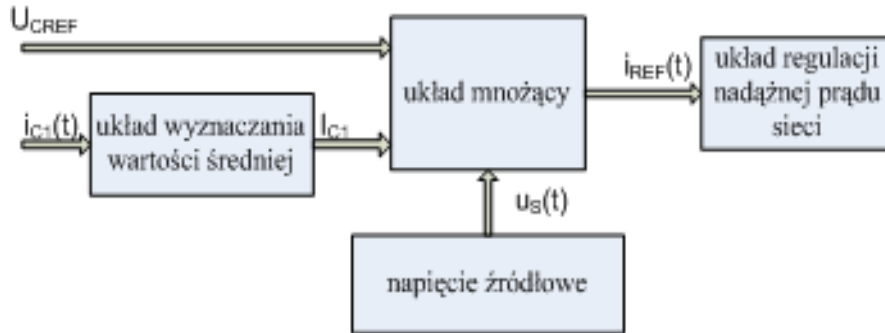
Na rys. 4 przedstawiono przepływ energii (zaznaczony strzałkami w kolorze niebieskim) w obwodzie stałoprądowym między modulatorem prądu a pomocniczym prostownikiem tranzystorowym.



Rys.4 Schemat blokowy ilustrujący przepływ energii w obwodzie pośredniczącym modulatora prądu i prostownika pomocniczego

Na rys. 5 przedstawiono schemat blokowy opracowanego przez autora układu sterowania pomocniczego prostownika tranzystorowego. Umożliwia on uzyskanie sinusoidalnego prądu sieci w szerokim zakresie zmian zarówno napięcia referencyjnego na kondensatorze U_{CREF} , jak i prądu obwodu pośredniczącego modulatora $i_{c1}(t)$ (rys. 4.). Osiągnięto to w wyniku bezpośredniego wyznaczania mocy czynnej P'_{DC} dostarczanej do obwodu stałoprądowego przez modulator. Moc ta równa jest iloczynowi napięcia na kondensatorze U_{CREF} oraz wartości średniej prądu $i_{c1}(t)$.

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012



Rys. 5. Schemat blokowy układu sterowania prostownika pomocniczego

Napięcie $u_s(t)$ wyrażone jest wzorem (2). W celu zapewnienia pracy falownikowej prostownika pomocniczego jest ono przesunięte o 180° względem napięcia linii (napięcia strony wtórnej transformatora dopasowującego sprzęgającego prostownik tranzystorowy z siecią).

$$(2) \quad u_s(t) = -\frac{1}{U_{L2}^2} u_{L2}(t)$$

gdzie:

$u_{L2}(t)$ – wartość chwilowa napięcia strony wtórnej transformatora dopasowującego,

U_{L2} – wartość skuteczna napięcia strony wtórnej transformatora dopasowującego.

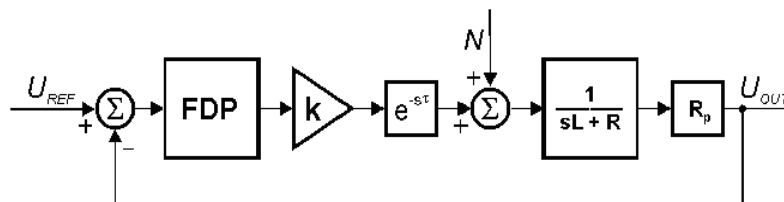
Na wyjściu układu mnożącego otrzymuje się wartość chwilową referencyjnego prądu aktywnego, jaki musi zostać wygenerowany przez prostownik pomocniczy, aby napięcie na kondensatorze było równe napięciu referencyjnemu U_{CREF} . Ostatnim elementem układu sterowania jest blok układu regulacji nadsiężnej prądu odpowiedzialny za formowanie impulsów załączających zawory przekształtnika.

W układzie sterowania z rys. 5 nie uwzględniono w bilansie energetycznym strat mocy na zaworach. W celu wyznaczenia wartości chwilowej referencyjnego prądu aktywnego, a w konsekwencji także ilości energii oddawanej do sieci z uwzględnieniem tych strat, zaimplementowano w dalszym etapie badań dodatkowy regulator porównujący napięcie zadane z napięciem rzeczywistym na kondensatorze. Zamiast regulatora napięcia możliwe jest również zastosowanie regulatora prądu porównującego wartości średnie prądu wyjściowego modulatora $i_{c1}(t)$ oraz wejściowego prostownika tranzystorowego $i_{c2}(t)$ w obwodzie pośredniczącym [2].

Struktura i parametry regulatora prądu w torze sterowania modulatora prądu

Opracowany na podstawie teorii sygnałów liniowy model modulatora prądu z układem sterowania przedstawiono na rys. 6 [4]. Bezpośrednio za regulatorem prądu w postaci filtra dolnoprzepustowego pierwszego rzędu (FDP) znajduje się blok wzmacniacza 0-rzędu (k). Reprezentuje on wypadkowe wzmocnienie układu sterowania i części silnopiędowej modulatora prądu. Blok (e^{-st}) odpowiada wypadkowemu opóźnieniu wnoszonemu przez modulator MSI i falownik. Wartości (R) oraz (L) dwójnika na wyjściu mostka umożliwiają uwzględnienie wpływu rezystancji oraz indukcyjności wyjściowego filtru pasywnego modulatora oraz parametrów zwarciovcych transformatorów energetycznych i transformatora impulsowego. Rezystancja (R_p)

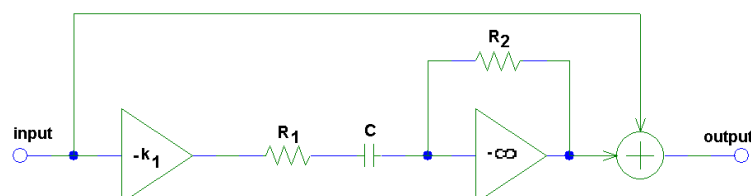
odpowiada stałej przetwarzania przetwornika pomiarowego prądu znajdującego się w obwodzie wyjściowym modulatora. Sygnał (N) reprezentuje natomiast napięcie indukowane w uzwojeniach strony wtórnej transformatora impulsowego.



Rys. 6. Schemat blokowy liniowego modelu modulatora prądu z układem sterowania

Opracowany model sygnałowy wykorzystano do badań umożliwiających ocenę wpływu różnych parametrów i struktur regulatora w torze sterowania na stabilność układu oraz jakość kształtowania przebiegu wyjściowego – w sensie wierności odwzorowania w nim sygnału referencyjnego. W trakcie badań symulacyjnych (realizowanych przy pomocy oprogramowania Orcad oraz Matlab) sformułowano kryteria doboru parametrów i struktury regulatora w torze sterowania energoelektronicznego modulatora prądu [4]. Na ich podstawie dokonano wyboru docelowego rozwiązania, które w następnej kolejności zweryfikowano na etapie badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych.

Zakładając częstotliwość impulsowania kluczy na poziomie 12 kHz za górną częstotliwość graniczną filtra dolnoprzepustowego przyjęto 6 kHz. Nawiązano w ten sposób do wymagań określonych przez twierdzenie Kotelnikowa-Shanonna o minimalnej częstotliwości próbkowania sygnałów ciągłych (modulator MSI należy w tym przypadku traktować jak układ próbkująco-pamiętający). Na podstawie wyników dalszych badań dokonano modyfikacji regulatora prądu zbudowanego na bazie filtra dolnoprzepustowego o dodatkową strukturę posiadającą właściwości górnoprzepustowe – pokazaną na rys. 7 [4].



Rys. 7. Dodatkowa struktura bazująca na filtrze górnoprzepustowym

Dodatkowa struktura bazuje na członie różniczkującym (filtr górnoprzepustowy), który odznacza się dodatnim przesunięciem fazy. W założeniu, struktura ta, ma za zadanie zminimalizować efekty opóźnienia fazy wprowadzone przez człon opóźniający. Opracowanie niekonwencjonalnego regulatora z korektorem fazy umożliwiło zwiększenie wzmocnienia w stosunku do rozwiązania bazującego na pojedynczym filtrze dolnoprzepustowym o ok. 30%. W konsekwencji poprawiono jakość odwzorowania sygnału referencyjnego w silnoprądowym sygnale wyjściowym modulatora prądu, uzyskując tym samym zmniejszenie współczynnika THD wypadkowego prądu sieci układu prostownikowego.

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

Realizacja układu eksperymentalnego

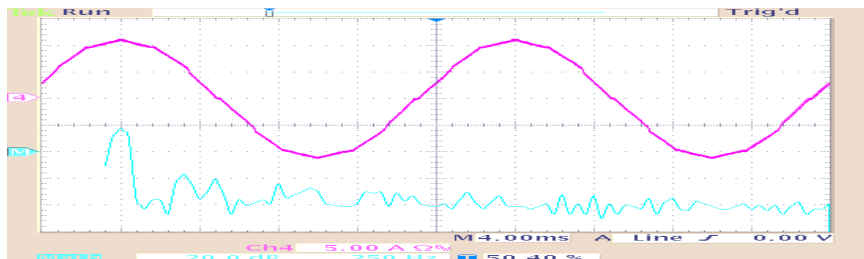
Przy realizacji modelu fizycznego diodowego układu prostownikowego z energoelektronicznym modulatorem prądu przyjęto następujące założenia wyjściowe: moc wyjściowa prostownika – $P_D=6$ kW, napięcie zasilania – $U_L= 3\times 400$ V, napięcie wyjściowe – $U_d= 178$ V, znamionowy prąd wyjściowy – $I_{dN}=33.7$ A.

Część silnoprądową energoelektronicznego modulatora prądu oraz pomocniczego prostownika tranzystorowego zrealizowano w oparciu o dwa 3-fazowe falowniki napięcia P3-5.0/550MFE LABINVERTER firmy ALFINE TIM. Modulator prądu sprzęgnięto z obwodami wyjściowymi prostowników diodowym za pomocą zaprojektowanego i wykonanego we własnym zakresie szerokopasmowego transformatora impulsowego.

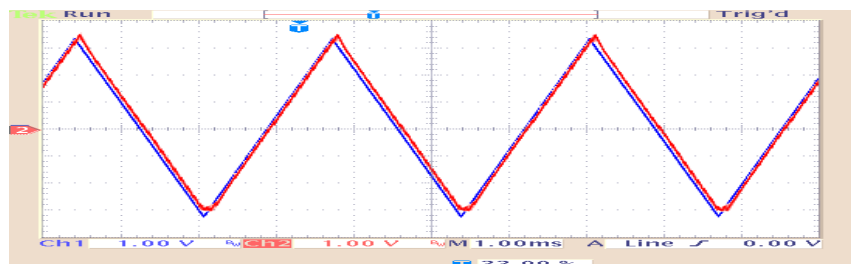
Układ sterowania zaworami energoelektronicznego modulatora prądu oraz pomocniczego prostownika tranzystorowego zrealizowano w oparciu o system uruchomieniowy ALS-G3-1369 firmy ALFINE TIM. Bazuje on na zmiennoprzecinkowym procesorze sygnałowym rodziny SHARC 3 – generacji typu ADSP-21369 firmy Analog Devices. W kodzie źródłowym zrealizowano m.in. układ sterowania bazujący na niekonwencjonalnym regulatorze będącym połączeniem struktur górno- i dolnoprzepustowej. W tym celu wykorzystano cyfrowe filtry o nieskończonej odpowiedzi impulsowej *IIR*

Wybrane wyniki badań układu eksperymentalnego

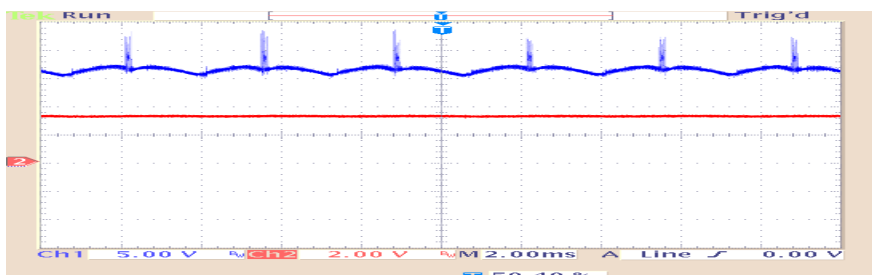
Na rys. od 8 do 11 zaprezentowano wybrane wyniki badań eksperymentalnych uzyskanych dla układu prostownika diodowego z energoelektronicznym modulatorem prądu w warunkach bliskich obciążeniu znamionowemu.



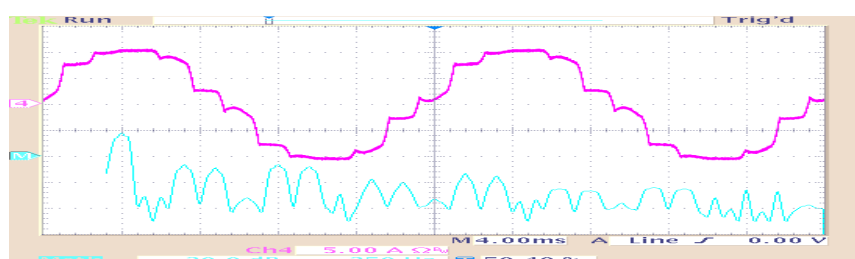
Rys. 8. Przebiegi i analiza widmowa wypadkowego prądu sieci (THD=2,4%)



Rys. 9. Przebiegi sygnału referencyjnego (kolor niebieski) i wyjściowego (kolor czerwony) modulatora prądu



Rys. 10. Przebieg napięcia (kolor niebieski) oraz prądu (kolor czerwony) odbiornika



Rys. 11. Przebiegi i analiza widmowa wypadkowego prądu sieci w przypadku wyłączenia modulatora prądu (THD =11,6%)

Podsumowanie

Opisywane rozwiązanie jest szczególnie uzasadnione ekonomicznie w przypadku układów prostownikowych dużych i bardzo dużych mocy ze względu na to, że moc modulatora wynosi zaledwie 2-3% mocy obciążenia. Zastosowanie dodatkowego prostownika pomocniczego małej mocy pracującego w zakresie pracy falownikowej dodatkowo przyczynia się do poprawy współczynnika sprawności. Współczynnik THD prądu sieci dla warunków znamionowych pracy, jaki uzyskano w trakcie prac badawczych, wyniósł odpowiednio: 1,15% (dla modelu symulacyjnego) oraz 2,4% (dla modelu eksperymentalnego). Dodatkową zaletą układu jest duży stopień niezawodności. Nawet w przypadku uszkodzenia modulatora prądu prostowniki diodowe zapewniają dostarczenie energii do odbiornika.

Literatura

1. Piróg S. Energoelektronika. Negatywne oddziaływanie układów energoelektronicznych na źródła energii i sposoby ich ograniczania. AGH. Kraków 1998.
2. Supronowicz H., Strzelecki R. Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy. OWPW. Warszawa 2000.
3. Fryze S. Moc rzeczywista, pozorna i urojona w obodach elektrycznych o przebiegach odkształconych prądu i napięcia. Przegląd elektrotechniczny Nr 7 i 8, 1931
4. Krystkowiak M., Gwóźdź M. Control system of power electronics current modulator utilized in diode rectifier with sinusoidal grid current. Przegląd elektrotechniczny Nr 7 (2009), s. 138-140.

Autor: dr inż. Michał Krystkowiak; Zakład Energoelektroniki i Sterowania Politechniki Poznańskiej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, e-mail: Michal.Krystkowiak@put.poznan.pl