

Andrzej Gospodarczyk, Andrzej Majcher, Mirosław Mrozek
Instytut Technologii Eksploatacji - PIB, Radom

TRÓJFAZOWY PRZEKSZTAŁTNIK MOCY AC/DC

THREE-PHASE AC/DC POWER CONVERTER

Streszczenie: W artykule przedstawiono konstrukcję trójfazowego przekształtnika mocy AC/DC. Opisano wymagania oraz stosowane rozwiązania dla tego typu układów. Przedstawiony przekształtnik wykonano w topologii pełnego mostka oraz mostka pół-sterowanego. Porównanie wyników badań obu rozwiązań wskazuje na wyższą użyteczność układu mostkowego. Przekształtnik cechuje się prostą i tanią konstrukcją, zgodnością z wymaganiami normatywnymi emisji harmonicznymi, możliwością dwukierunkowego przepływu energii. Uniwersalność opracowania pozwala na jego aplikację do konwersji trójfazowej energii prądu z magnesami trwałymi na energię prądu stałego w celu jej dalszego przetwarzania na energię AC publicznej sieci zasilającej.

Abstract: The article presents the design of a three-phase AC/DC power converter. The requirements and solutions used for this type of systems are described. The presented converter is made as full bridge and a half-controlled bridge circuits. The comparison of the results for the two solutions indicates higher utility of the full bridge circuit. The converter has a simple and a cost-effective design, complies with the normative requirements for harmonic emissions, the possibility of bidirectional flow of energy. The versatility of this converter allows for its application in three-phase energy conversion of permanent magnet generator to DC energy and its further processing to the public electricity AC network.

Słowa kluczowe: trójfazowy przekształtnik AC/DC, układ korekcji współczynnika mocy (PFC)

Keywords: three-phase AC/DC converter, Power Factor Correction (PFC)

1. Wstęp

Jednym z głównych wymagań dla współczesnych trójfazowych przekształtników AC/DC jest ograniczenie poziomu emisji harmonicznymi do sieci zasilającej. Prąd pobierany przez urządzenia elektryczne z publicznej trójfazowej sieci zasilającej nie może zawierać większego poziomu emisji harmonicznymi niż określono w normach: PN-EN 61000-3-2 „Kompatybilność elektro-magnetyczna (EMC). Dopuszczalne poziomy emisji harmonicznymi prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika mniejszy lub równy 16 A)” lub PN-EN 61000-3-12 „Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Dopuszczalne poziomy emisji harmonicznymi prądu dla odbiorników o znamionowym prądzie fazowym większym od 16 A i mniejszym lub równym 75 A przyłączonego do publicznej sieci zasilającej”. Wydaje się, że tendencja ograniczania emisji harmonicznymi będzie ulegać zaostrzeniu, w kierunku zwiększania wartości prądów pobieranych z publicznej trójfazowej sieci zasilającej, jak i zmniejszania poziomu zawartości harmonicznymi. Ograniczenie emisji harmonicznymi prądu ma pozytywny aspekt techniczny - lepsza jest jakość energii, mniej strat w generatorach, sieciach i transforma-

torach zasilających, w przekształtnikach dobiera się podzespoły na mniejszy prąd. Jednakże w aspekcie ekonomicznym, wyższy koszt przekształtnika wynikający z zastosowania takich rozwiązań musi być zachowany na poziomie akceptowalnym przez odbiorcę. W artykule przedstawiono konstrukcję przekształtnika, który spełnia wymagania normatywne, a jednocześnie jest rozwiązaniem korzystnym ekonomicznie.

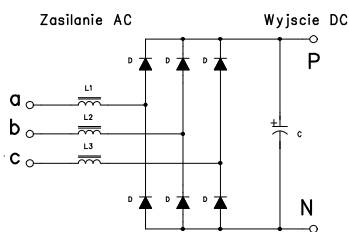
2. Układy stosowane w trójfazowej technice ograniczania emisji harmonicznymi prądu

Ponieważ zwykły układ prostowniczy z filtrem kondensatorowym nie spełnia wymagań normy PN-EN 61000-3-2 lub PN-EN 61000-3-12, stosuje się pasywne, aktywne lub mieszane układy zmniejszające emisję harmonicznymi prądu.

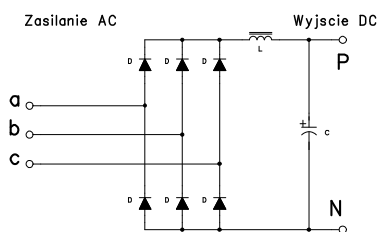
Najprostszą i najbardziej rozpowszechnioną formą są układy pasywne, w których do każdej z faz, po stronie prądu przemiennego, włączone są dławiki (rys. 1a) lub jeden dławik po stronie prądu stałego (rys. 1b). W bardziej rozbudowanych układach stosowane są równoległe i szeregowo filtry harmonicznymi.

Innym prostym rozwiązaniem są układy prostownikowe z transformatorami, których uzwojenia wtórne łączone są w gwiazdę, trójkąt lub zygzak dla zwiększenia pulsacji. Prąd nie zawsze ma w nich kształt sinusoidalny, ale spełniają one wymagania normatywne, gdyż normy określają jedynie zawartość harmonicznych. Ze względu na stosunkowo niską wartość częstotliwości sieci zasilającej (50Hz lub 60Hz), dławiki mają stosunkowo dużą wartość indukcyjności, są więc relatywnie ciężkie i stosunkowo drogie. W związku z nieliniowością dławików (działanie jest skuteczniejsze dla większych wartości prądu) w układach pasywnych występują problemy z ich doбором, zwłaszcza dla obciążeń mniejszych od nominalnych. Wadą jest również wprowadzanie dodatkowych straty energii, zwłaszcza w dławikach, w których spadek napięcia powoduje zmniejszenie dostępnego napięcia wyjściowego DC. Jednocześnie jest to prosty obwód, który nie generuje zakłóceń.

a)



b)



Rys. 1. Pasywne trójfazowe układy ograniczenia emisji harmonicznych; a) dławiki po stronie AC, b) dławik po stronie DC

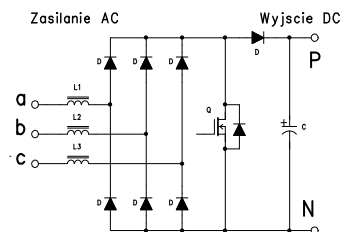
W aktywnych układach ograniczenia poziomu emisji harmonicznych, prąd płynący przez indukcyjności jest impulsowo, synchronicznie do przebiegów napięć poszczególnych faz, włączany i wyłączany za pomocą odpowiednich tranzystorów. W momencie włączenia tranzystora dławik magazynuje energię, by przy wyłączonym tranzystorze tę samą energię, o innych parametrach, przekazać do kondensatora filtra wyjściowego. Dla mniejszych mocy stosuje się tranzystory MOSFET ze względu na

możliwą dużą częstotliwość pracy. Natomiast dla większych mocy - tranzystory typu IGBT. Ze względu na stosunkowo wysoki poziom strat, zwłaszcza strat dynamicznych, istotne znaczenie będą miały wprowadzane na rynek nowoczesne półprzewodniki wykonane w technologii węgla krzemu (SiC). Przy aktywnych układach, ze względu na relatywnie wysoką częstotliwość modulacji, stosowane są dławiki o znacznie mniejszej indukcyjności niż przy pasywnych układach, prądy mają znacznie lepszy kształt, a tym samym niższą zawartość harmonicznych, również dla wartości mniejszych od nominalnych. Trójfazowe aktywne układy ograniczania poziomu emisji harmonicznych prądu są wykonywane w topologiach [1]:

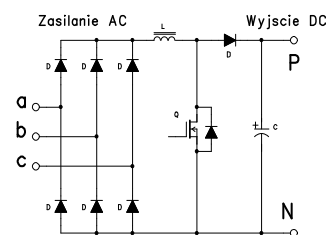
- step-up (Boost): jednotranzystorowych (rys. 2a, b), mostkowych lub mostkowych półsterowanych z jednym tranzystorem na każdą fazę (rys. 2c, d), lub innym jak np. VIENNA Rectifier (rys. 2e),
- step-down (Buck), mostkowym (rys. 2f).

Przy zasilaniu trójfazowym już najprostszy aktywny układ z jednym tranzystorem pozwala na znaczne ograniczenie zawartości harmonicznych prądów fazowych.

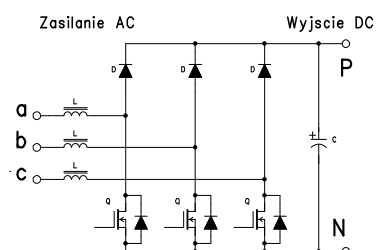
a)

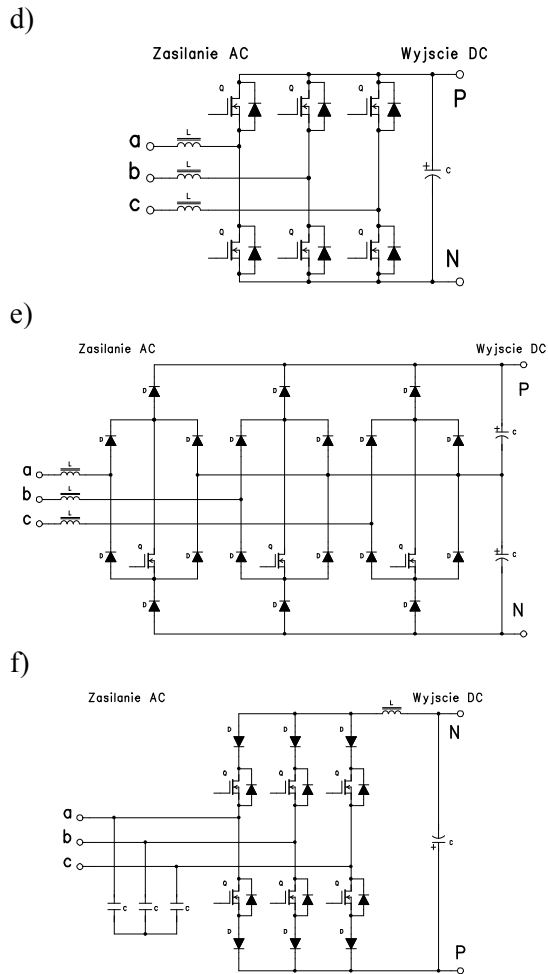


b)



c)





Rys. 2. Aktywne układy ograniczania harmonicznych

a) układ step-up (Boost) z dławikiem po stronie AC; b) układ step-up (Boost) z dławikiem po stronie DC; c) układ step-up (Boost) pół-sterowany z jednym tranzystorem na fazę; d) układ step-up (Boost) mostkowy; e) układ step-up (Boost) typu VIENNA Rectifier; f) układ step-down (Buck).

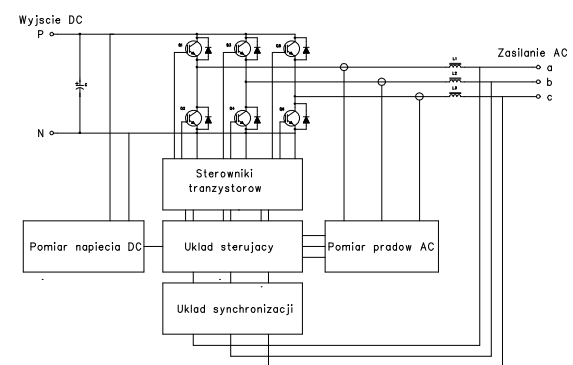
W układzie mostkowym sześciu tranzystorów stosunkowo łatwo wykonać przekształtnik dwukierunkowy, pracujący jako typowy układ ograniczania emisji harmonicznych, a przy wzroście napięcia baterii kondensatorów powyżej progu decyzyjnego, jako układ oddający energię prądu stałego do sieci zasilającej trójfazowego prądu przemiennego. Ma to szczególne znaczenie dla obciążeń generujących energię, takich jak przekształtniki zasilające silniki asynchroniczne, które podczas hamowania, zamieniają energię kinetyczną mas wirujących na energię elektryczną. Przekształtniki z jednym tranzystorem i pół-sterowane, z jednym tranzystorem na fazę nie posiadają takich zdolności.

Duże znaczenie ma również dostępność na rynku gotowych modułów tranzystorów połączonych do danej aplikacji. Spotykane są głównie zestawy sześciu tranzystorów połączonych w mostek dla układu step-up (Boost), oraz specjalistyczny układ VIENNA Rectifier (IXYS) [2].

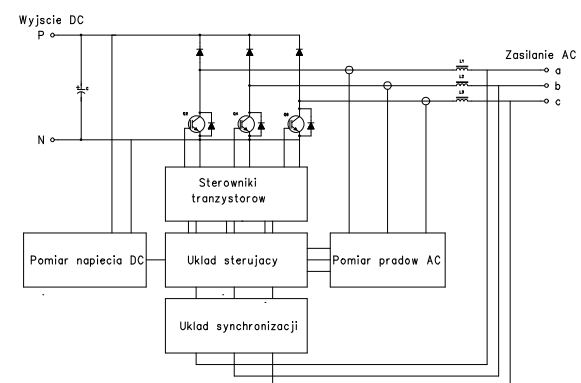
3. Przekształtnik mocy AC/DC

Ze względu na właściwość dwukierunkowego przepływu energii opracowano przekształtnik mostkowy, pracujący w układzie step-up (Boost). Wykorzystano w nim typowy, łatwo dostępny mostek trójfazowy [3, 4].

Ze względu na podobieństwo topologii, badaniom poddano również przekształtnik pracujący w układzie step-up (Boost) półsterownym z jednym tranzystorem na każdą fazę. Przekształcenie układu wykonano poprzez zablokowanie sygnałów bramkowych górnych tranzystorów przy niewielkiej modyfikacji układu sterowania. Schemat blokowy opracowanego przekształtnika mostkowego mocy AC/DC przedstawiono na rys. 3, a przekształtnika półsterownego na rys. 4.



Rys. 3. Schemat blokowy mostkowego trójfazowego przekształtnika mocy AC/DC



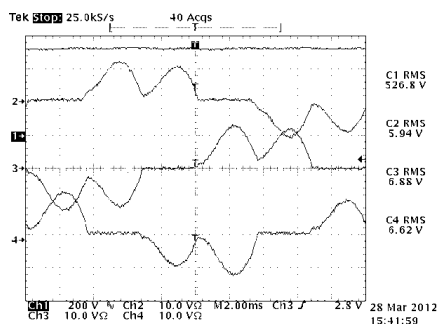
Rys. 4. Schemat blokowy pół-sterownego trójfazowego przekształtnika mocy AC/DC

Napięcia zasilające a, b, c są poprzez *Układ synchronizacji* przekazywane do *Układu sterowania*. Napięcie wyjściowe DC jest poprzez układ *Pomiar napięcia DC* przekazywane do *Układu sterowania*. W zależności od wartości zmierzonego napięcia wyjściowego DC w stosunku do wartości zadanej tego napięcia, zmieniają się amplitudy napięcia faz a, b, c , które są wartością zadaną do stabilizacji poszczególnych prądów fazowych. Sygnały sprzężenia zwrotnego poszczególnych prądów fazowych są przekazywane do *Układu sterowania* z układu *Pomiar prądów AC*. W układzie sterowania następuje porównanie wartości zadanych z rzeczywistymi wartościami płynących prądów i generowane są sygnały PWM, które poprzez układ *Sterowników tranzystorów*, gdzie następuje ich wzmacnienie i separacja galwaniczna, sterują bramkami poszczególnych tranzystorów mocy.

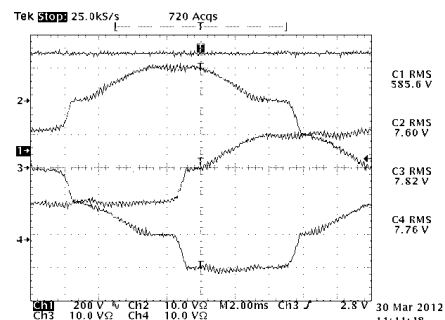
4. Badania przekształtnika półsterowanego z jednym tranzystorem na fazę

Układ przekształtnika półsterowanego z jednym tranzystorem na fazę cechuje się zbliżonym do sinusoidy przebiegiem prądu w górnej połowce, za którą odpowiada tranzystor typu IGBT w pełni sterowalny (rys. 5). W dolnej połowce sinusoidy danej fazy prąd wynikowy jest sumą prądów płynących w danym momencie w pozostałych dwóch fazach. Przebieg prądu wynikowego dla typowej modulacji PWM z prądowymi pętlami sprzężenia zwrotnego [5], jest bardziej odkształcony od kształtu sinusoidy. Poprawa tego kształtu możliwa jest jedynie poprzez modyfikacje w układzie sterującym.

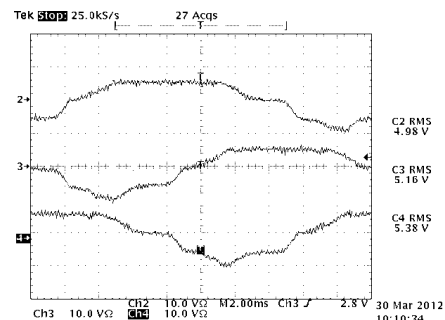
a)



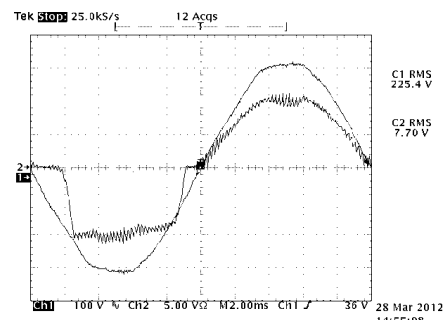
b)



c)



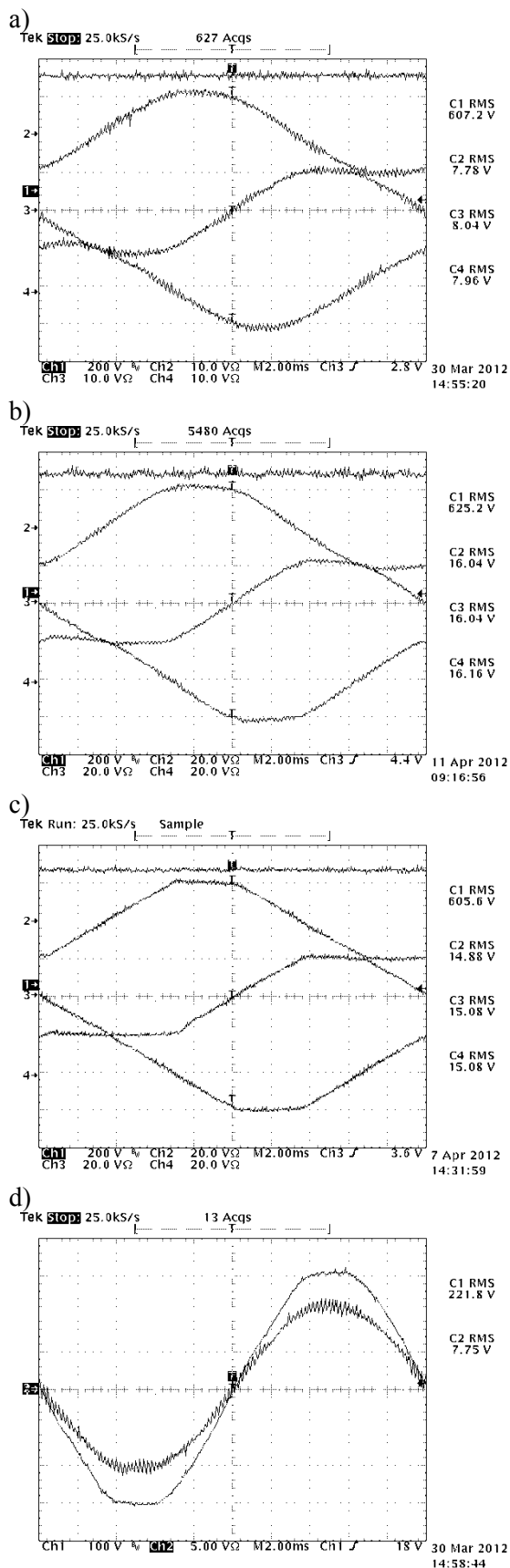
d)



Rys. 5. Oscylogramy prądów fazowych układu przekształtnika z jednym tranzystorem na fazę a) układ z wyłączonym sterowaniem PFC; b) układ z włączonym sterowaniem PFC; c) układ z włączonym sterowaniem PFC i ograniczeniem prądów fazowych do 5A (Ch.1-napięcie wyj. DC, Ch.2-prąd fazy L1, Ch.3-prąd fazy L2, Ch.4-prąd fazy L3); d) kształt prądu fazy L1 ze sterowaniem PFC w odniesieniu do fazowego napięcia zasilającego (Ch.1 – napięcie fazowe L1, Ch.2 – prąd fazy L1)

5. Badania przekształtnika mostkowego

Dla przekształtnika mostkowego próby wykonywano przy zasilaniu napięciem $3 \times 230\text{V}/400\text{V}$ w układzie z dławikiem, o indukcyjności 3mH , w każdej fazie, filtrem pojemnościowym zawierającym kondensator elektrolityczny 1mF przy obciążeniu rezystorem. W układzie mostkowym, pełno-sterowanym kształty pobieranych z sieci trójfazowej prądów fazowych są bardzo zbliżone do przebiegów sinusoidalnych.

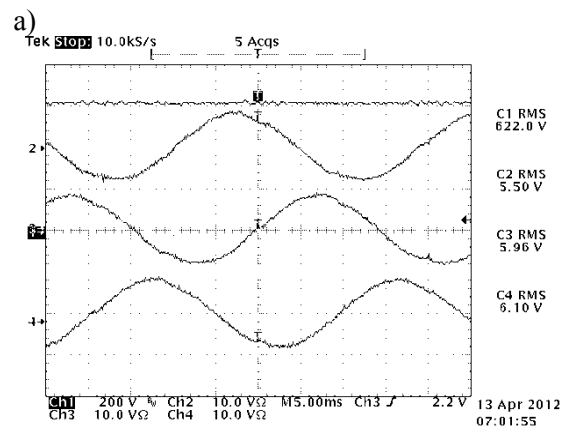


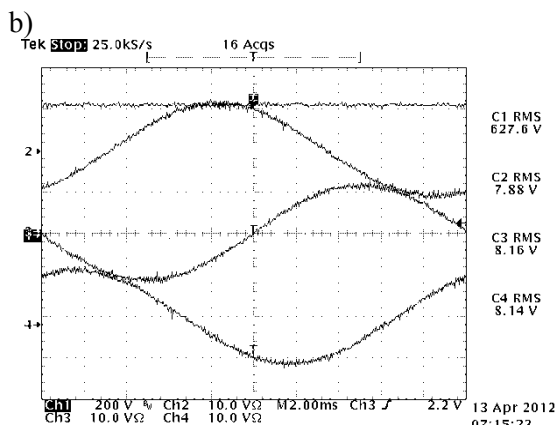
Rys. 6. Oscylogramy prądów fazowych układu przekształtnika mostkowego

a) układ z włączonym sterowaniem PFC, obciążenie 75 Ω ; b) układ z włączonym sterowaniem PFC, obciążenie 37,5 Ω ; c) układ z włączonym sterowaniem PFC i ograniczeniem prądów fazowych do 20 A (Ch.1-napięcie wyjściowe DC, Ch.2-prąd fazy L1, Ch.3-prąd fazy L2, Ch.4-prąd fazy L3); d) kształt prądu fazy L1 ze sterowaniem PFC w odniesieniu do fazowego napięcia zasilającego (Ch.1 – napięcie fazowe L1, Ch.2 – prąd fazy L1).

Przeprowadzono próby działania układu przekształtnika mostkowego przy zasilaniu z prądnicy z magnesami trwałymi napędzanej przez silnik asynchroniczny sterowany przez mikroprocesorowy sterownik prędkości obrotowej. Efekty przedstawiono na Rys. 7.

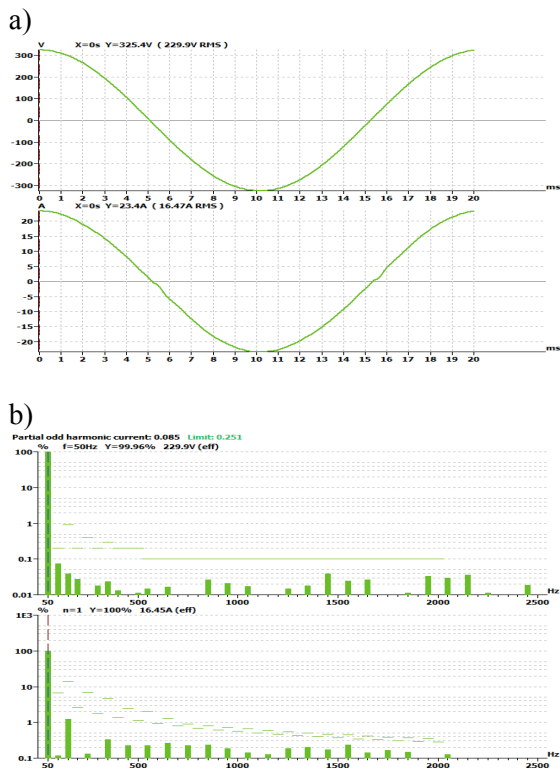
Prądnice z magnesami trwałymi znalazły szerokie zastosowanie w pozyskiwaniu energii ze źródeł odnawialnych, głównie w energetyce wiatrowej. Zastosowanie zamiast zwykłego prostownika przekształtnika AC/DC niesie szereg korzyści. Zwiększa się zakres prędkości prądnicy dla pozyskiwania z niej energii o parametrach pozwalających na współpracę z publiczną siecią zasilającą. Pobieranie z prądnicy prądów o niskiej zawartości harmonicznych zwiększa sprawność całego układu pozyskiwania energii. Wartość napięcia wyjściowego AC skonstruowanej prądnicy nie jest wielkością krytyczną dla współpracy z siecią zasilającą, gdyż ze specyfiki układu step-up (Boost) wynika, że wartość napięcia wyjściowego DC w dosyć szerokim zakresie można ustawiać poprzez sterowanie. Taki układ jest przewidywalny, nie generuje udarów prądowych typowych dla innych rozwiązań.





Rys. 7. Prądy fazowe dla sterowania PFC przy zasilaniu z prądnicy z magnesami trwałymi
 a) 35Hz, obciążenie 400Ω; b) 50Hz, obciążenie 200Ω; Ch.1-napięcie wyjściowe DC, Ch.2-prąd fazy L1, Ch.3-prąd fazy L2, Ch.4-prąd fazy L3.

Przeprowadzono również pomiary emisji harmonicznych (rys. 8). Według normy PN-EN 61000-3-2 bada się poziom zawartości harmonicznych w zakresie do 2kHz, jakie urządzenie badane pobiera z sieci zasilającej. Do badań wykorzystano trójfazowe zasilanie sieciowe oraz jednofazowy analizator harmonicznych i flickerów do 16 A, typ DPA500N (EM TEST).



Rys. 8. Wyniki pomiarów emisji harmonicznych przetwornicy mostkowej

a) przebieg napięcia wymuszającego (górny) i pobieranego prądu (dolny) z aktywnym układem PFC dla maksymalnego dopuszczalnego prądu 16ARMS/AC; b) wykres zawartości harmonicznych napięcia wymuszającego (górny) i pobieranego prądu (dolny) z aktywnym układem PFC dla maksymalnego dopuszczalnego prądu 16ARMS/AC

6. Podsumowanie

Przedstawiony trójfazowy przekształtnik AC/DC w układzie mostkowym pełno-sterowanym, z typowym sterowaniem PWM z prądową pętlą sprzężenia zwrotnego, charakteryzuje się przebiegami prądów fazowych zbliżonymi do przebiegu sinusoidalnego. Użyte w konstrukcji elementy - moduły tranzystorów typu IGBT - są łatwo dostępne. Przekształtnik został zbudowany na prąd nominalny 10ARMS/AC (daje to moc nominalną 6,9kW) z możliwością chwilowego przeciążenia do 16ARMS/AC (daje to moc maksymalną 11,04kW). Czas przeciążenia zależy od wartości prądu przeciążenia i warunków termicznych stanu początkowego przekształtnika.

Przy doborze mostka istotnym parametrem są starty mocy, zwłaszcza dynamiczne, powodujące wydzielanie się ciepła i potrzebę stosowania układów chłodzenia mostka. Do układów dobrano mostek tranzystorów typu IGBT dedykowany do pracy z częstotliwością kluczkowania do 20kHz. Opracowany układ sterowania pozwala na dynamiczne ograniczenie prądu tranzystora do wartości nastawionej. Zastosowany sterownik zespolony tranzystora zabezpiecza tranzystor przed jego zwarcie.

W związku z pojawieniem się na rynku tranzystorów wykonanych w technologii węgla krzemu (SiC) o relatywnie niskich stratach dynamicznych i o większej częstotliwości kluczkowania, należy się spodziewać ograniczenia gabarytów i masy konstruowanych przekształtników.

7. Literatura

- [1]. Kolar J. W., Friedli T.: The essence of three-phase PFC rectifier system. Proceedings of the 33rd IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC 2011).
- [2]. IXYS, VUM25-05, Advanced Technical Information.
- [3]. Gospodarczyk A., Majcher A., Mrozek M., Przybylski J.: Modułowe systemy sterowania i zasilania dla plazmowych procesów inżynierii materiałowej. Problemy Eksploatacji 2/2004, s. 189-197.

[4]. Gospodarczyk A., Majcher A., Neska M.: Przekształtnik rezonansowy w układach zasilania urządzeń plazmowych.. Problemy Eksploatacji 3/2011, s. 189-195.

[5]. Mrozek M.: Układ sterowania przekształtnikiem AC-DC z funkcją korekcji współczynnika mocy PFC. Problemy Eksploatacji 3/2012, s. 145-154.

Autorzy

mgr inż. Andrzej Gospodarczyk
andrzej.gospodarczyk@itee.radom.pl

dr inż. Andrzej Majcher
andrzej.majcher@itee.radom.pl

mgr inż. Mirosław Mrozek
mirosław.mrozek@itee.radom.pl

Instytut Technologii Eksploatacji – PIB
ul. K. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom

Informacje dodatkowe

Prace wykonano w ramach realizacji Programu Strategicznego pn.: „Innowacyjne systemy wspomaganie technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki” w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka.