

Mirosław MROZEK

Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom

UKŁAD STEROWANIA PRZEKSZTAŁTNIKIEM AC-DC Z FUNKCJĄ KOREKCJI WSPÓŁCZYNNIKA MOCY PFC

Słowa kluczowe

Współczynnik mocy, przekształtnik AC-DC, korekcja współczynnika mocy PFC (*Power Factor Correction*).

Streszczenie

Jedną z miar odpowiedniego wykorzystania energii w zasilaczach impulsowych jest współczynnik mocy (PF). Wpływ na wartość tego współczynnika ma przesunięcie fazowe między napięciem a prądem, a także zawartość składowych harmonicznych prądu pobieranego z sieci. W celu korekcji współczynnika mocy stosuje się odpowiednie układy biernie lub aktywnie. W artykule opisano mikroprocesorowy układ sterowania przetwornicą AC-DC z funkcją aktywnej korekcji współczynnika mocy PFC (ang. *Power Factor Correction*). Opisano strukturę przekształtnika AC-DC bazującego na topologii przekształtnika DC-DC step-up (Boost) przy założeniu ciągłego prądu dławika modulacji PWM o częstotliwości 20 kHz.

Wprowadzenie

Współczynnik mocy (ang. *Power Factor*) jest miarą wykorzystania energii elektrycznej pobieranej przez odbiorniki zasilane z sieci energetycznej. Jest on definiowany jako stosunek mocy czynnej do mocy pozornej. Współczynnik mocy o wartości mniejszej niż 1 oznacza, że występują straty energii zasilającej [1, 2]. Są one spowodowane przepływem mocy biernej między siecią i odbiornikami zawierającymi komponenty pojemnościowe i indukcyjne lub odbiorni-

kami nieliniowymi zawierającymi elementy energoelektroniczne jak zasilacze impulsowe. Głównymi elementami stopnia wejściowego takich zasilaczy są prostownik i kondensator filtrujący. Prąd pobierany z sieci przez zasilacz bez korekcji współczynnika mocy jest bardzo odkształcony i charakteryzuje się dużą zawartością składowych harmonicznych [3]. Emitowanie do sieci wyższych harmonicznych powoduje między innymi:

- przeciążenia sieci spowodowane wzrostem wartości skutecznej prądu,
- przeciążenia przewodów neutralnych na skutek sumowania się harmonicznych trzeciego rzędu wywołanych przez odbiorniki jednofazowe,
- odkształcenia napięcia sieci, co negatywnie wpływa na pracę innych urządzeń do niej podłączonych.

Wymagania na zawartość składowych harmonicznych prądu pobieranego przez urządzenia elektryczne z publicznej sieci zasilającej określone są w normach:

- PN-EN 61000-3-2 „Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC)” „Dopuszczalne poziomy emisji harmonicznych prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika mniejszy lub równy 16 A)”;
- PN-EN 61000-3-12 „Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC)” „Dopuszczalne poziomy emisji harmonicznych prądu dla odbiorników o znamionowym prądzie fazowym większym od 16 A i mniejszym lub równym 75 A przyłączonego do publicznej sieci zasilającej”.

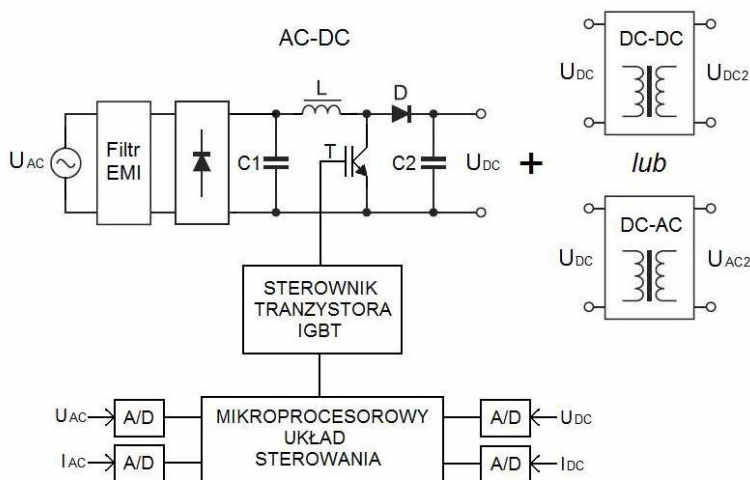
Każdy zasilacz o mocy powyżej 75 W oznaczony znakiem CE musi posiadać układ korekcji współczynnika mocy PFC. Układy korekcji dzieli się na pasywne i aktywne. W układach pasywnych jako element kompensujący wykorzystuje się najczęściej dławik umieszczony przed lub za mostkiem prostownika oraz równoległe i szeregowo filtry harmonicznych. Do zalet tej metody zaliczyć można: prostotę, niezawodność, brak emisji zakłóceń elektromagnetycznych oraz brak strat przełączania. Głównymi wadami są znaczna masa i rozmiary, zwłaszcza w przypadku filtrów częstotliwości sieciowej, a także zależność kształtu przebiegu prądu wejściowego od obciążenia. Ponadto pomimo eliminacji składowych harmonicznych składowa podstawowa może być przesunięta względem napięcia, obniżając tym samym wartość współczynnika. W rezultacie skuteczność pasywnej korekcji współczynnika jest zazwyczaj mniejsza niż w przypadku korekcji aktywnej. Zawartość generowanych harmonicznych prądu przy aktywnych metodach jest znacznie mniejsza niż w układach pasywnych w całym zakresie obciążenia.

Opracowane i wytwarzane w ITeE – PIB zasilacze impulsowe dużych mocy przeznaczone do plazmowej obróbki powierzchni posiadają pasywne układy korekcji współczynnika mocy. Zredukowanie ich niekorzystnego oddziaływania na sieć zasilającą AC stanowiło motywację do wykonania projektu aktywnego układu korekcji współczynnika mocy (PFC) [4]. Układ ten tworzy przekształtnik AC-DC ze sterowaniem mikroprocesorowym, który może współpracować z przetwornicą DC-DC lub DC-AC.

1. Przekształtnik AC/DC z aktywną korekcją współczynnika mocy PFC

Jako aktywne układy korekcji współczynnika mocy wykorzystywane są przekształtniki włączone szeregowo z obciążeniem lub z kolejnym komponentem zasilacza, na przykład kolejnym stopniem konwersji DC-DC lub DC-AC [5, 6, 7, 8]. Najczęściej w tym zastosowaniu używany jest przekształtnik o topologii step-up (Boost) z przewodzeniem ciągłym prądu. Na rys. 1 zamieszczono schemat blokowy wykonanego przekształtnika AC/DC z aktywną korekcją współczynnika mocy zrealizowanego z wykorzystaniem topologii step-up.

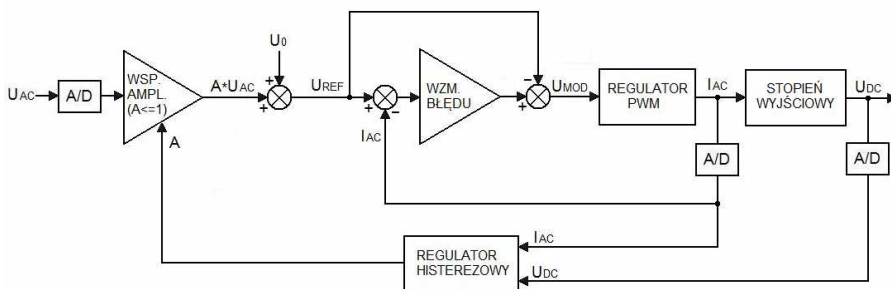
Układ ten składa się z dławika L , łącznika tranzystorowego T , diody D i kondensatora $C2$. Na jego wejście doprowadzane jest wyprostowane napięcie z prostownika i kondensatora filtrującego $C1$, a sygnałem wyjściowym jest regulowane napięcie stałe U_{DC} . Zachowanie sinusoidalnego poboru prądu i fazy zgodnej z napięciem sieci polega na odpowiednim, impulsowym włączaniu i wyłączaniu łącznika tranzystorowego ze stałą częstotliwością i zmiennym wypełnieniem. Od chwili włączenia tranzystora dławik L magazynuje energię, którą podczas wyłączenia tranzystora przekazuje przez diodę D do kondensatora filtra wyjściowego i obciążenia. Dla mniejszych mocy stosuje się tranzystory MOSFET, które mogą pracować z dużą częstotliwością przełączania. Dla większych mocy wykorzystuje się tranzystory typu IGBT, które ze względu na wysoki poziom strat łączeniowych są przełączane mniejszymi częstotliwościami. W opisywanym układzie zastosowano tranzystor IGBT ze względu na pracę przetwornicy w zakresie do 16 A prądu wyjściowego. Tranzystor T sterowany jest sygnałem PWM o częstotliwości 20 kHz poprzez sterownik tranzystora IGBT z mikroprocesorowego układu sterowania. Mikroprocesor na podstawie mierzonych wartości prądów i napięć oblicza czas trwania impulsu sterującego tranzystorem.



Rys. 1. Schemat blokowy modułu przetwornicy AC/DC z korekcją współczynnika mocy PFC

2. Algorytm sterowania mikroprocesorowego

Na rys. 2 przedstawiony jest algorytm sterowania mikroprocesorowego układu korekcji współczynnika mocy PFC. Do realizacji algorytmu sterowania zastosowany został mikrokontroler jednocukłowy SH7084 firmy Renesas. Posiada 32-bitową architekturę typu RISC, wewnętrzną pamięć programu Flash ROM o pojemności 512 KB, wewnętrzną pamięć danych RAM o pojemności 32 KB oraz jest wyposażony w liczne układy peryferyjne, między innymi w rozbudowaną, wielokanałową jednostkę czasowo-licznikową (MTU). Jednostka ta umożliwia generowanie na odpowiednim wyjściu mikroprocesora sygnału o zadanej częstotliwości i wypełnieniu, który został wykorzystany do sterowania tranzystora w trybie modulacji szerokością impulsu PWM (ang. *Pulse Width Modulation*). Mikrokontroler ten wyposażony jest również w 8-kanałowy przetwornik analogowo-cyfrowy A/D, ale ze względu na nie wystarczającą rozdzielczość i szybkość przetwarzania do pomiarów wykorzystano zewnętrzny, 12-bitowy przetwornik AD7864 firmy Analog Devices. Przetwornik ten, sterowany również przez mikroprocesor, dokonuje pomiarów wartości chwilowych napięcia U_{AC} , prądu I_{AC} (jest to jednocześnie prąd pobierany z sieci i prąd przepływający przez dławik L) oraz napięcia wyjściowego UDC. Pomiar dokonywany jest co 50 μ s, czyli na półokres przebiegu napięcia sieciowego przypada 200 pomiarów.

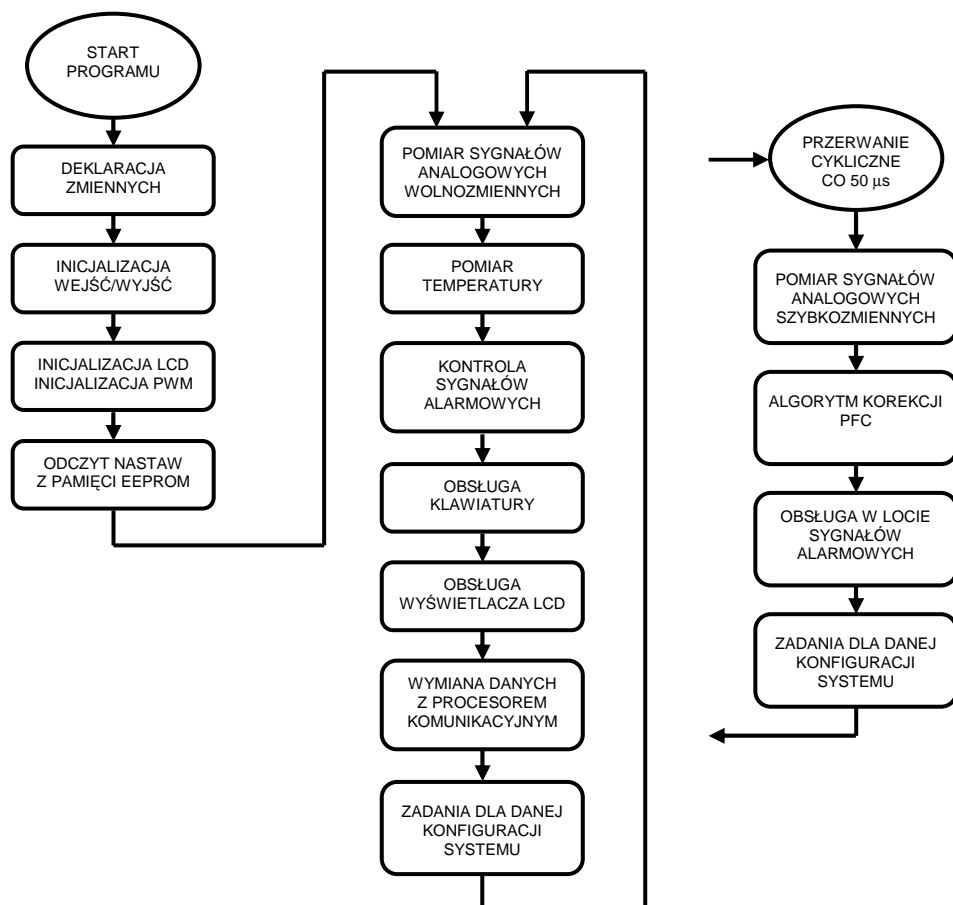


Rys. 2. Algorytm korekcji współczynnika mocy PFC

Napięcie sieci U_{AC} jest wzorcem sinusoidy dla prądu I_{AC} . Wartość napięcia odpowiadająca prądowi chwilowemu I_{AC} po konwersji analogowo-cyfrowej jest odejmowana od napięcia referencyjnego U_{REF} . Napięcie U_{REF} jest sumą napięcia U_{AC} pomnożonego przez współczynnik amplitudy A i napięcia U_0 . Napięcie U_0 jest wartością stałą i zostało dobrane doświadczalnie, jest ono składową stałą napięcia U_{REF} i jest niezbędne do poprawnego generowania przebiegu sinusoidalnego prądu w okolicach zera napięcia sieciowego. Wyliczony sygnał błędu jest wzmacniony 10-krotnie, a następnie jest od niego odejmowany sygnał U_{REF} , w wyniku czego otrzymuje się wartość napięcia modulacji U_{MOD} . U_{MOD} jest wprost proporcjonalne do wypełnienia impulsów sterujących, im wyższa wyli-

czona wartość tego napięcia, tym większe wypełnienie. Powyżej określonej wartości U_{MOD} wypełnienie pozostaje maksymalne. Współczynnik amplitudy A jest wyznaczany w tzw. regulatorze histerezowym na podstawie zmierzonych wartości prądu I_{AC} i napięcia wyjściowego U_{DC} . Może on przyjmować wartości z zakresu $0 \div 1$. W zależności od wartości rezystancji obciążenia, dla zachowania określonej wartości napięcia wyjściowego U_{DC} , musi się zmieniać amplituda prądu I_{AC} . Aby dynamiczna zmiana prądu obciążenia I_{DC} nie wpływała na kształt prądu I_{AC} , a tym samym na zawartość jego harmonicznych, wprowadzono histerezę zmian napięcia wyjściowego U_{DC} dla inicjacji zmiany amplitudy prądu I_{AC} oraz zmianę amplitudy prądu I_{AC} w jego punkcie zerowym.

Mikroprocesorowy układ sterowania przekształtnikiem AC-DC, poza opisaną szybką pętlą regulacyjną, wykonywaną co $50 \mu s$, wykonuje również inne zadania. Na rys. 3 zamieszczono algorytm całego programu wykonywanego przez mikrokontroler.



Rys. 3. Algorytm programu wykonywanego przez mikrokontroler

Po włączeniu zasilania mikrokontroler wykonuje najpierw zadania związane z inicjalizacją wejść i wyjść cyfrowych, konfiguracją wbudowanych układów peryferyjnych (kanałów PWM, układów czasowych), inicjalizacją przerwań wewnętrznych z układu czasowego i zewnętrznych z odpowiednich wejść, inicjalizacją wyświetlacza LCD oraz odczytuje ustawienia parametrów z pamięci EEPROM. Zadania te są wykonywane jednorazowo po każdym załączeniu zasilania, a także po restarcie sprzętowym lub programowym od wewnętrznego układu kontrolującego ciągłość wykonywania programu (*watchdog*) mikroprocesora.

Następnie w pętli głównej programu cyklicznie wykonywane są zadania związane z obsługą wejść i wyjść, pomiary sygnałów analogowych wolnozmiennych oraz obliczane średnie kroczące poszczególnych pomiarów z n cykli pomiarowych. W pętli tej odczytywane są dane wprowadzane przez użytkownika za pomocą klawiatury lub zdalnie za pomocą interfejsu komunikacyjnego Modbus RTU. Za komunikację odpowiedzialny jest drugi mikrokontroler (komunikacyjny), który znajduje się na tej samej płycie co mikroprocesor główny. Wymiana danych między mikroprocesorami dokonywana jest cyklicznie w pętli głównej programu.

W czasie wykonywania zadań z pętli głównej, jednocześnie co 50 μ s generowane jest przez wewnętrzny układ czasowy mikroprocesora zgłoszenie przerwania wykonywania głównej pętli. Priorytet tego przerwania ustawiony został na poziomie najwyższym. Zgłoszenie przerwania skutkuje wykonywaniem procedury obsługi przerwania, co oznacza w tym przypadku wykonywanie algorytmu korekcji współczynnika mocy PFC.

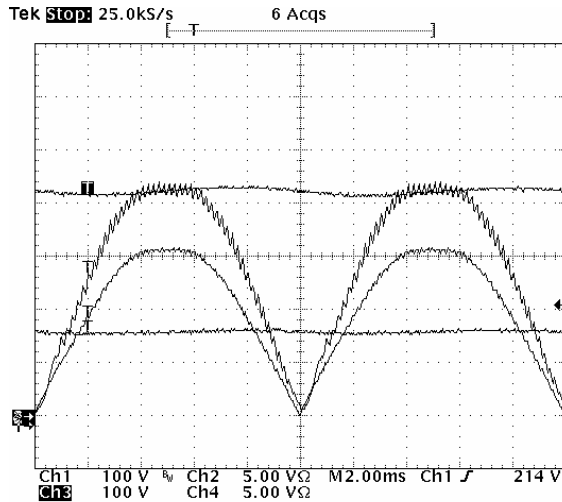
Program mikrokontrolera sterującego przekształtnikiem AC-DC został opracowany i skompilowany przy wykorzystaniu środowiska programistycznego *High-performance Embedded Workshop*, a kod wynikowy został umieszczony w pamięci wewnętrznej z użyciem programu *Flash Development Toolkit*.

3. Badania weryfikacyjne algorytmu korekcji współczynnika mocy mikroprocesorowego układu sterowania

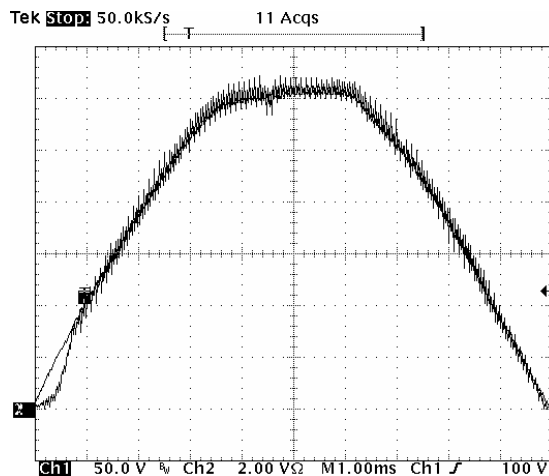
Opracowany przekształtnik AC/DC wbudowano w zasilacz magnetronowego źródła plazmy o mocy 3 kW, a następnie poddano badaniom weryfikacyjnym na stanowisku uruchomieniowym. Badania dotyczyły poprawności generowanego przebiegu prądu pod względem zawartości harmonicznych oraz zgodności fazy prądu z fazą napięcia sieci.

Przedstawione przebiegi wskazują, że przesunięcie fazowe między prądem a napięciem jest pomijalnie małe, a kształt generowanego przebiegu prądu pokrywa się prawie w całym półokresie napięcia sieciowego (rys. 4). Delikatne zniekształcenie przebiegu prądu na początku półokresu (rys. 5) wynika z naturalnej właściwości indukcyjności, czyli opóźnienia odpowiedzi prądu na wymuszające go napięcie i nosi nazwę *Cusp Distortion* [9]. Zjawiska tego nie da się całkowicie wyeliminować, można je natomiast minimalizować, stosując dławik o mniejszej

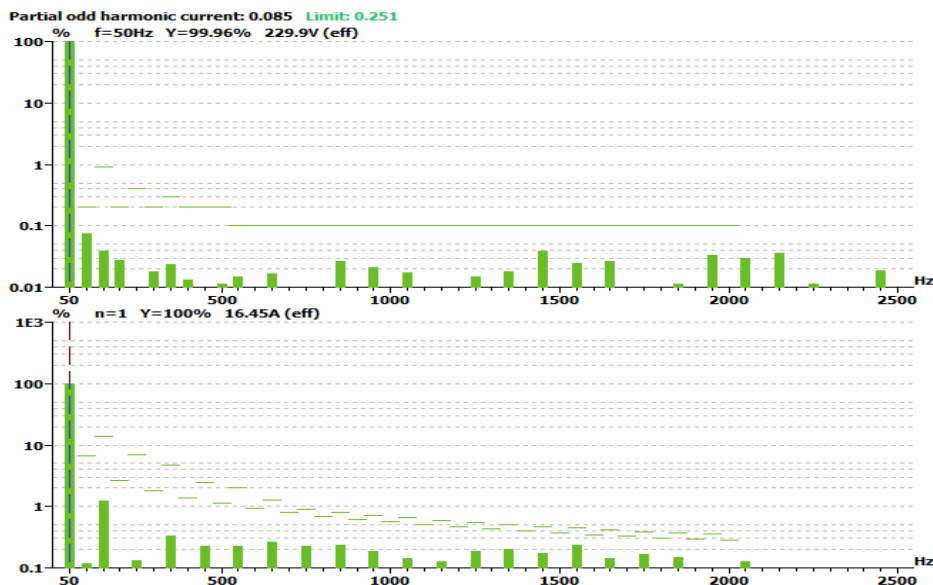
wartości indukcyjności, ale efektem ubocznym będzie z kolei wyższa wartość tętnień prądu di/dt . Tętnienia, które są widoczne na oscylogramie (rys. 5), mają częstotliwość 20 kHz i powstają podczas przełączania tranzystora kluczującego. Minimalizację tętnień przy małych indukcyjnościach można uzyskać, zwiększając częstotliwości modulacji, ale to wymaga zastosowania tranzystora T, mogącego pracować przy częstotliwościach powyżej 20 kHz oraz szybszego mikroprocesora.



Rys. 4. Przebiegi prądów i napięć w przetwornicy AC-DC
 Ch1 – U_{AC} , Ch2 – I_{AC} , Ch3 – U_{DC} , Ch4 – I_{DC}



Rys. 5. Porównanie kształtu napięcia U_{AC} i prądu I_{AC}
 Ch1 – U_{AC} , Ch2 – I_{AC}



Rys. 6. Wykres widmowy zawartości harmonicznych napięcia sieci (górny) i pobieranego prądu (dolny) z aktywnym układem PFC dla prądu 16ARMS/AC

Badania na procentową zawartość składowych harmonicznych napięcia sieciowego i prądu przekształtnika AC-DC z aktywnym układem korekcji współczynnika mocy (rys. 6) były wykonywane przy wykorzystaniu źródła Netwave 7 (300 V_{AC}, 26 A_{AC}, częstotliwość DC – 5 kHz, moc wyjściowa AC 7,5 kVA, moc wyjściowa DC 9 kW) i analizatora harmonicznych DPA500N (do 16 A) firmy EM TEST. Zawartość poszczególnych składowych harmonicznych zawiera się poniżej 1% i największa jest dla składowej trzeciej (w okolicach 1%), co jest zgodne z normą PN-EN 61000-3-2.

Podsumowanie

Opracowany mikroprocesorowy, jednofazowy przekształtnik AC-DC z funkcją korekcji współczynnika mocy PFC spełnia wymagania stawiane w normie PN-EN 61000-3-2 na poziom emisji harmonicznych prądu fazowego do 16 A. Przetwornica ta może współpracować z następnym stopniem konwersji DC-DC lub DC-AC. Może zostać wbudowana w urządzenie lub stanowić autonomiczny zasilacz o mocy 3000 W z funkcją PFC i o regulowanym stałym napięciu wyjściowym w zakresie 325÷600 V. Dzięki zastosowaniu mikroprocesora użytkownik może wprowadzać zdalnie (poprzez łącze szeregowe RS485 z protokołem Modbus RTU) lub lokalnie (przy wykorzystaniu wyświetlacza LCD i klawiatury) parametry pracy przetwornicy, tj. napięcia wyjściowego i prądu maksymalnego, jaki może być pobierany przez odbiornik.

Bibliografia

1. Vinaya Skanda: Power Factor Correction In Power Conversion. Application Note Microchip Technology Inc.
2. Strzelecki R., Supronowicz H.: Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy. OWPW, Warszawa 2000.
3. Mohamad Nazir Bin Abdullah: Design of a single phase unity Power factor switch mode Power supply (SMPS) with active Power factor correction. www.scribd.com/doc/92980528/Design-of-a-Single-Phase-Unity-Power-Factor.
4. Majcher A., Gospodarczyk A., Mrozek M., Przybylski J.: Podstawowe moduły złożonych systemów sterowania plazmowych procesów inżynierii powierzchni. „Problemy Eksploatacji” 3/2004.
5. Georgakas K., Safacas A., Tsoumas I.: Current high harmonics investigation of an AC–DC–AC converter consisting of high frequency semiconductor elements supplying a DC machine. Electromotion 2005, Proceedings, Paper DS2/6, Lausanne, Switzerland, September 27–29, 2005.
6. Georgakas K., Safacas A.: Power factor correction and efficiency investigation of AC–DC converters using forced commutation techniques. ISIE, Congress, Dubrovnik, June 20–23, 2005.
7. Bor-Ren Lin: A single-phase three-level pulsewidth modulation AC/DC converter with the function of power factor corrector and active power filter. Electric Power Systems Research, Volume 58, Issue 3, 20 July 2001, pp. 157–167.
8. Bayindira R., Sagirolub S., Colaka I.: An intelligent power factor corrector for power system using artificial neural networks. Electric Power Systems Research, Volume 79, Issue 1, January 2009, pp. 152–160.
9. Natarjan K.: Control of cusp distortion in power factor correcting boost converter. Electrical and Computer Engineering, 1997. Engineering Innovation: Voyage of Discovery. IEEE 1997 Canadian Conference.

Recenzent:
Bogusław GRZESIK

A control system for AC-DC converter with the function of a power factor correction PFC

Key words

Power factor, AC-DC converter, Power Factor Correction PFC.

Summary

One of the measures of the appropriate use of energy in a pulsed power supply is the power factor (PF), which corresponds to losses in the transmission of electricity. The phase shift has an influence on the power factor between voltage and current as well as the content of power system harmonics taken from power mains. To correct the power factor, one should use a suitable passive or active circuit.

The microprocessor control system of an AC-DC converter with an active power factor correction function is presented in the article. The general structure of a controller and an algorithm of controlling PFC in topology step-up (Boost) with a continuous conduction mode and modulation PWM and frequency 20 kHz is described.