

UKŁAD IDENTYFIKACJI PRĄDU WZORCOWEGO AKTYWNEJ KOMPENSACJI RÓWNOLEGŁEJ¹⁾

Identification System of References Current for Active Parallel Compensation

Leszek FRĄCKOWIAK

Politechnika Poznańska

Michał GWÓŹDŹ

Przedsiębiorstwo Elektroniki
Profesjonalnej ALFINE

Ryszard PORADA

Politechnika Poznańska

Streszczenie: W artykule omówiono, opracowany przez autorów, układ identyfikacji prądu wzorcowego do aktywnej kompensacji równoległej. Przedstawiono ogólną strukturę układu kompensacji, omówiono zasadę działania oraz funkcje bloków układu sterowania. Prąd wzorcowy określono metodą wariacyjną, w postaci analitycznej, jako sygnał realizujący optymalizację pracy układu źródła energii-odbiornik. Do wyznaczenia częstotliwości, fazy i amplitudy prądu wzorcowego zastosowano metodę identyfikacji parametrów sygnałów okresowych odkształconych z wykorzystaniem filtrów cyfrowych. Fizyczny układ identyfikacji prądu wzorcowego zrealizowano za pomocą zmiennoprzecinkowego procesora sygnałowego firmy Analog Devices Inc. Uzyskano czas identyfikacji nie przekraczający okresu napięcia sieci zasilającej przy pomijalnie małych zniekształceniach nieliniowych przebiegu wzorcowego.

Summary: The article presents an identification system of reference current for active parallel compensation. The authors present general structure of a compensation system, discuss rule of its operation and functions of the control system blocks. Waveform of the reference current was identified, using variation method, in analytic form as a signal which effects optimisation of the power source—load system operation. Calculations of frequency, phase and amplitude of the reference current was performed applying a method of parameters identification of the reference current was based on a floating-point signal processor developed by Analog Devices Inc. Achieved identification time does not exceed the period of the line voltage at negligible small non-linear distortions of the reference signal.

Słowa kluczowe: teoria mocy, harmoniczne, poprawa współczynnika mocy, filtry aktywne, procesory sygnałowe
Keywords: Power Theory, Harmonics, Power factor correction, Active filters, DSP

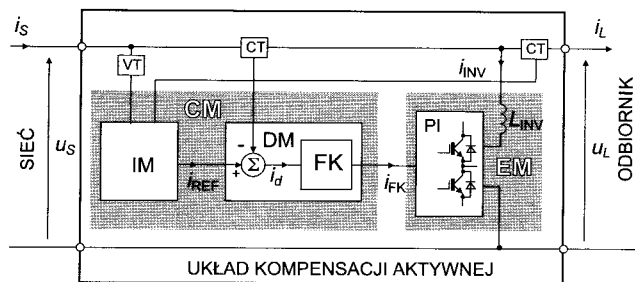
1. WPROWADZENIE

Do kompensacji oddziaływania odbiorników energii elektrycznej na sieć elektroenergetyczną stosowane są powszechnie układy złożone z elementów biernych LC (kompensatory pojemnościowe, pasywne filtry rezonansowe wyższych harmonicznych, filtry o strukturach i parametrach określanych metodami optymalizacyjnymi). W warunkach coraz większego odkształcania przebiegów napięć, a zwłaszcza prądów, będącego wynikiem szerokiego zastosowania układów energoelektronicznych, skuteczność takiej kompensacji, szczególnie w stanach dynamicznych, może być często niewystarczająca. Do zwiększenia efektywności kompensacji proponuje się obecnie inne struktury filtrów (kompensatorów) w postaci aktywnych filtrów mocy lub układów hy-

brydowych (połączenie filtrów aktywnych z członami pasywnymi typu LC) [2, 6, 7, 9, 11].

Aktualne tendencje rozwoju metod kompensacji oddziaływania odbiorników na sieć zmierną do opracowania kompensatorów realizujących kompensację dynamiczną (w czasie rzeczywistym), a jednocześnie odporniejszych na zakłócenia zarówno ze strony sieci, jak i odbiornika. Obejmują one również optymalizację energetycznych warunków pracy źródeł energii (sieci elektroenergetycznej). Kompensacja taka, zgodnie z propozycją S. Fryzego [4] i jej rozwinięciami [3, 9, 10, 11], wymaga eliminacji prądu różnicowego źródła. Eliminacja tego prądu jest możliwa za pomocą źródła prądowego dostarczającego taki prąd w przeciwfazie. Realizacja takiego kompensatora wymaga zastosowania układów aktywnych, z wykorzystaniem elementów parametrycznych lub sterowanych energetycznych źródeł prądowych [6, 9, 11].

¹⁾ Artykuł był prezentowany podczas V Szkoły — Konferencji pt.: „Elektrotechnika, prądy niesinusoidalne” w Lubiatowie (26–28 czerwca 2000 r.). Decyzją Komitetu Naukowego konferencji został wybrany do opublikowania w czasopiśmie **Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej**.



Rys. 1. Schemat ideowo-blokowy układu aktywnej kompensacji równoległej

2. STRUKTURA UKŁADU KOMPENSACJI RÓWNOLEGLEJ

Proponowany przez autorów układ kompensacji równoległej realizuje zasadę kompensacji optymalnej [9, 10, 11], z wykorzystaniem energoelektronicznego sterowanego źródła prądowego [5]. Założonym celem jest dynamiczna (tj. w czasie rzeczywistym) kompensacja prądu różnicowego, tj. prądu, będącego różnicą między aktualnym prądem odbiornika $i_L(t)$ a prądem wzorcowym $i_{REF}(t)$ (optymalnym prądem aktywnym wyznaczanym metodą zaproponowaną w [10]). Strukturę blokową układu pokazuje rysunek 1.

Kompensator, pracujący jako układ zamknięty, składa się z trzech podstawowych bloków:

- bloku identyfikacji (IM), realizującego identyfikację częstotliwości ω_{REF} , fazy φ_{REF} oraz amplitudy A_{REF} prądu wzorcowego;
- bloku decyzyjnego (DM), realizującego wymagane sterowanie kompensatora;
- bloku wykonawczego (EM) w postaci energoelektronicznego źródła prądowego;

oraz z przetworników pomiarowych napięcia (VT) i prądu (CT).

Proces sterowania kompensatora przebiega w dwóch fazach:

- wyznaczanie przebiegu prądu wzorcowego $i_{REF}(t)$;
- dynamiczne kształtowanie wymaganego prądu kompensatora w postaci $i_{INV}(t) = i_{REF}(t) - i_L(t)$ przez układ wykonawczy.

Jakość i właściwości dynamiczne procesu kompensacji zależą przede wszystkim od przyjętej metody wyznaczania wielkości wzorcowej, a także implementacji praktycznej tej metody. Optymalne sterowanie kompensatora ma na celu optymalizację pracy układu źródło energii-odbiornik, przez minimalizację wartości skutecznej prądu źródła oraz jego odkształceń (od przebiegu sinusoidalnego); tym samym minimalizowane są także straty mocy czynnej przy przepływie energii ze źródła do odbiornika. Do określenia prądu o takich właściwościach wykorzystano metodę wariacyjną [10]. W wyniku tego optymalny aktywny prąd źródła (nazywany także prądem wzorcowym) jest określony następującym wyrażeniem analitycznym:

$$i_{REF}(t) = a i(t) = e k(t) e G(t) e(t) = A_{REF}(t) e(t) \quad (1)$$

gdzie:

- $e(t)$ — napięcie źródła,
- $e G(t)$ — konduktancja zastępcza wyrażona zależnością $e G(t) = P(t) / E^2(t)$, przy czym
- $e P(t), E(t)$ — wartości chwilowe mocy czynnej oraz skutecznego napięcia źródła.

Wielkość $k(t)$ jest współczynnikiem związanym z parametrami schematu zastępczego źródła energii [10].

Podczas współpracy kompensatora z siecią elektroenergetyczną napięcie w punkcie kompensacji może być odkształcone i ulegać stochastycznym wahaniom na skutek wpływu innych odbiorców energii, stąd dostępną pomiarowo wielkością odniesienia w takim przypadku jest podstawowa harmoniczna tego napięcia. Z tego względu przyjęto, że prąd wzorcowy $i_{REF}(t)$ będzie miał przebieg sinusoidalny, o częstotliwości i fazie zgodnej z odpowiednimi wielkościami podstawowej harmonicznej napięcia sieci w punkcie kompensacji. Wielkości te są wyznaczane w układzie identyfikacji parametrów prądu wzorcowego, przy założeniu (z uwagi na wymaganą dynamikę kompensacji), że czas odpowiedzi generatora, związany ze zmianami parametrów i napięć sieci zasilającej lub obciążenia, nie przekracza jednego okresu napięcia sieci.

3. REALIZACJA MODELU LABORATORYJNEGO

W realizacji modelu laboratoryjnego układu aktywnej kompensacji równoległej wykorzystano system uruchomieniowy typu ADDS-2106X-EZ-KIT, ze zmiennoprzecinkowym procesorem sygnałowym typu ADSP-21061 Analog Devices Inc. Rozwiązanie takie jest uzasadnione wysokimi wymaganiami w stosunku do mocy obliczeniowej układu identyfikacji parametrów prądu wzorcowego (IM) oraz odpowiedniego kształtowania charakterystyk częstotliwościowych układu, dla zapewnienia stabilności układu zamkniętego kompensatora w warunkach szerokich zmian parametrów obciążenia i zasilania.

Strukturę sprzętowo-programową układu sterowania przedstawiono na rysunku 2. Program sterujący napisano w języku C (pakiet ADDS-21000-SW-PC ver. 3.3), a pewne czasowo krytyczne procedury modułu identyfikacji w języku assemblera.

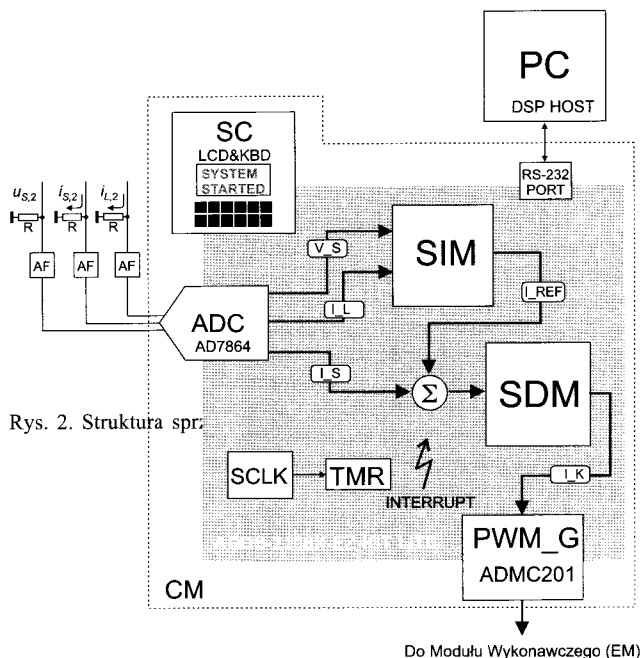
Układ sterowania (CM) zawiera następujące bloki oraz moduły programowe:

- 1) rezystory pomiarowe R dołączone do wyjść prądowych przetworników pomiarowych typu LA55-P i LV25 firmy LEM;
- 2) 4-kanałowy przetwornik analogowo-cyfrowy (ADC) typu AD7864;
- 3) generator przebiegu PWM_G typu ADMC201;
- 4) konsolę operatorską systemu (SC) z klawiaturą oraz wyświetlaczem ciekłokrystalicznym;
- 5) programowy moduł identyfikacji (SIM);
- 6) programowy moduł decyzyjny (SMD) współpracujący z sumatorem (Σ), wyznaczającym bieżącą wartość sygnału błędu (tzn. różnicy prądów wzorcowego i sieci).

Komunikacja systemu z komputerem nadrzędnym odbywa się poprzez port RS-232 pod kontrolą programu DSPHost.

Układ decyzyjny (SDM) ma strukturę filtra cyfrowego FIR drugiego rzędu, którego zadaniem jest:

- 1) kształtowanie charakterystyki amplitudowo-fazowej układu dla uzyskania jak najszerszego pasma przenoszenia przy możliwie dużej wartości stałoprądowego współczynnika



Rys. 2. Struktura sprzętowo-programowa układu sterowania (CM)

Rys. 2. Struktura sprzętowo-programowa układu sterowania (CM)

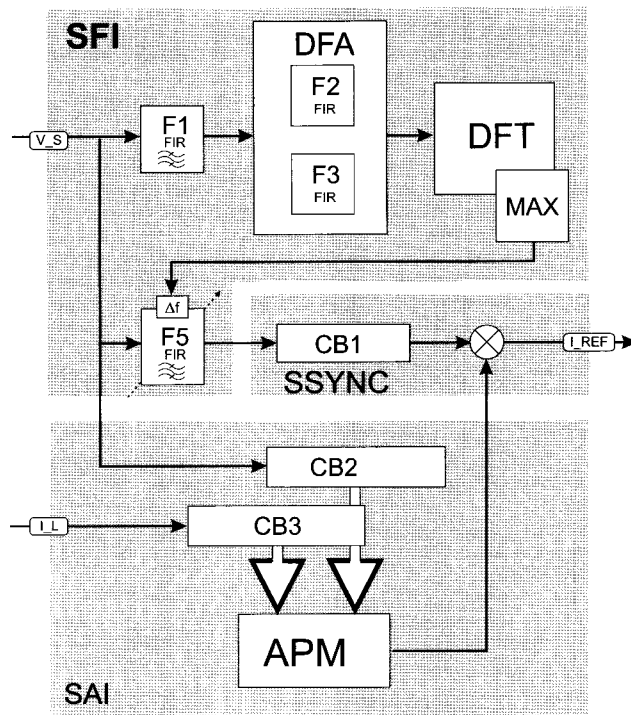
wzmocnienia i jednoczesnego zapewnienia odpowiedniego marginesu stabilności układu zamkniętego, w warunkach dużej zmienności parametrów obciążenia i zasilania; 2) eliminowanie pasożytniczych produktów modulacji szerokości impulsów PWM z sygnału sprzężenia zwrotnego.

Programowy moduł identyfikacji prądu wzorcowego (SIM), którego strukturę pokazano na rysunku 3, składa się z trzech podstawowych bloków: identyfikacji częstotliwości (PM_F), identyfikacji amplitudy (PM_A) oraz synchronizacji (PM_SYNC).

Blok identyfikacji częstotliwości podstawowej wykorzystuje wstępną filtrację napięcia sieci za pomocą filtra środkowo-przepustowego (F1) w celu zwiększenia odporności algorytmu na szумы i zakłócenia. Sygnał wyjściowy tego filtra poddawany jest następnie operacji wyznaczania częstotliwości podstawowej, realizowanej przez bloki (DFT) oraz (MAX). Obliczona wartość częstotliwości podstawowej przebiegu wzorcowego służy do sterowania pasmowo-przepustowym, przestrajalnym filtrem (F5) typu IIR, który pełni rolę zsynchronizowanego z przebiegiem napięcia sieci generatora prądu wzorcowego. Filtr ten ma 6-segmentową strukturę typu „biquad”. Daje to odpowiednio małą wartość współczynnika zniekształceń nieliniowych przebiegu wzorcowego, co zapewnia wysoką jakość procesu kompensacji.

Amplituda prądu wzorcowego jest wyznaczana w bloku (APM) po odpowiednim przetworzeniu próbek napięcia i prądu odbiornika, zapisywanych bieżąco w rejestrach kołowych CB2 oraz CB3. Moduł synchronizacji (PM_SYNC) umożliwia wyrównanie opóźnień czasowych związanych z operacjami dokonywanymi poprzez bloki (PM_F) i (PM_A) oraz wiąże z sobą — poprzez układ mnożący (M) — obie wyliczone w tych blokach wartości.

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych układu można stwierdzić, że całkowity czas odpowiedzi generatora nie przekracza jednego okresu napięcia sieci, przy współczynniku zniekształceń nieliniowych na poziomie 0,2% w paśmie 1 kHz.



Rys. 3. Struktura programowa modułu identyfikacji parametrów prądu wzorcowego

4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono układ identyfikacji prądu wzorcowego do aktywnej, optymalnej kompensacji równoległej. Do tego celu zaproponowano energoelektroniczne źródło prądowe, sterowane w systemie PWM. Przedstawiono schemat ideowy, zasadę pracy oraz strukturę cyfrową układu, sterowanego procesorem sygnałowym ADSP-21061. Uzyskane wyniki badań doświadczalnych dowodzą, że przedstawiony układ identyfikacji zapewnia krótki czas wyznaczania parametrów prądu wzorcowego (nie przekraczający jednego okresu napięcia sieci) oraz dużą odporność na skokową zmianę wymuszeń, przy niewielkiej wartości współczynnika zniekształceń nieliniowych. Umożliwia to bardzo dobre odwzorowanie przebiegu sygnału wzorcowego, a tym samym skuteczną eliminację prądu różnicowego, w różnych warunkach obciążenia i zasilania.

LITERATURA

1. Akagi H., Kanazawa V., Nabae A.: *Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits*. Proc. IJEE, IPEC, Tokyo 1983, 1375–1386.
2. Bayod Rujula A.A., Sanz Badia M.: *A new approach to harmonic compensation with hybrid active filters*. Proceedings of the 6-th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'95, 1995, 1, 925–928.
3. Czarniecki L.S.: *Interpretacja, identyfikacja i modyfikacja własności energetycznych obwodów jednofazowych z przebiegami odkształconymi*. Monografia, ZN Pol. Śl., Elektryka, z. 91, Gliwice 1984.
4. Fryze S.: *Moc rzeczywista, urojona i pozorna w obwodach o przebiegach odkształconych prądu i napięcia*. Przegl. Elektro-techn. 1931, 7, 193–203.

5. Gwóźdź M., Porada R.: *Badania symulacyjne energoelektronicznego liniowego źródła prądowego*. Materiały konferencji „Zastosowanie komputerów w elektrotechnice”, ZKWE'97, Poznań/Kiekrz, 7-9 kwietnia 1997, 291-294.
6. Gwóźdź M., Porada R.: *Eliminacja prądu różnicowego za pomocą kompensatora parametrycznego*. Proc. of XIX SPETO'96, Ustroń, maj 1996, 383-386.
7. Gwóźdź M., Porada R.: *Energoelektroniczny kompensator prądu różnicowego*. Materiały XX Seminarium z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, SPETO'97 Gliwice-Ustroń 1997, 2, 341-344.
8. Gwóźdź M., Porada R.: *Wyznaczanie składowej podstawowej odkształconych sygnałów okresowych z wykorzystaniem filtrów cyfrowych*. Materiały XXIII Międzynarodowej Konferencji z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, Gliwice-Ustroń, IC-SPETO'00, 24-27 maja 2000, 407-410.
9. Pasko M.: *Dobór kompensatorów optymalizujących warunki pracy źródeł napięć jednofazowych i wielofazowych z przebiegami okresowymi odkształconymi*. Monografia, ZN. Pol. Śl., Elektryka, z. 135, Gliwice 1994.
10. Porada R.: *Minimal active current in circuits with real sources*. Proc. of 7-th PEMC'96, Budapest, September 1996, 1, 405-409.
11. Siwczyński M.: *Metody optymalizacyjne w teorii mocy obwodów elektrycznych*. Inżynieria Elektryczna, nr 183, Kraków 1995.



Prof. dr hab. inż. Leszek Frąckowiak

Kierownik Zakładu Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki w Instytucie Elektrotechniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej. Urodzony w 1939 r. Studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej ukończył w 1963 r., doktoryzował się w 1973 r., stopień doktora habilitowanego uzyskał w 1983 r., a tytuł profesora w 1998 r. Od 1990 r. jest profesorem nadzwyczajnym Politechniki Poznańskiej.

Specjalizuje się w energoelektronice, szczególnie w zagadnieniach przekształtników energoelektronicznych napięcia stałego, oddziaływania przekształtników na sieć elektroenergetyczną i czynnej oraz bierniej kompensacji tego oddziaływania, a także w układach przekształtnikowych do odzyskiwania energii hamowania silników spalinowych. Jest autorem trzech rozpraw i ponad 150 publikacji naukowych oraz kilku podręczników i skryptów dydaktycznych. Autor licznych wdrożeń układów energoelektronicznych w przemyśle. Członek wielu organizacji i towarzystw naukowych, m. in. wiceprzewodniczący Komitetu Energoelektroniki oraz z-ca sekretarza naukowego ZG PTETiS.



Dr inż. Michał Gwóźdź

Urodził się w roku 1960. W roku 1985 ukończył kierunek: Telekomunikacja, na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. W latach 1985-1991 pracował w Instytucie Elektrotechniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej, gdzie specjalizował się w komputerowych systemach sterowania układami energoelektronicznymi. Od roku 1997 pracuje w firmie ALFINE, gdzie zajmuje się aplikacjami cyfrowych procesorów sygnałowych w energoelektronice.

W roku 1999 uzyskał stopień doktora nauk technicznych. Jest autorem i współautorem ponad 30 artykułów naukowych oraz 3 patentów.



Dr inż. Ryszard Porada

Urodził się w 1951 roku w Poznaniu. Studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej ukończył w 1974 roku. W roku 1983 uzyskał stopień doktora nauk technicznych. Po ukończeniu studiów rozpoczął pracę w Instytucie Elektrotechniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej. Zajmuje się energetyczną teorią obwodów, zastosowaniem teorii sygnałów oraz filtrów cyfrowych w energoelektronice, zagadnieniami kompensacji oddziaływania odbiorników nieliniowych w liniach zasilających, w szczególności układami aktywnej kompensacji.

W szczególności układami aktywnej kompensacji.