

Ryszard Porada, Michał Gwóźdź  
Politechnika Poznańska, Poznań

## AKTYWNA KOMPENSACJA RÓWNOLEGLA Z ZASTOSOWANIEM SZEROKOPASMOWEGO ENERGEOELEKTRONICZNEGO ŹRÓDŁA PRĄDU

### ACTIVE SHUNT COMPENSATION WITH APPLICATION BROAD-BAND POWER ELECTRONIC SOURCE CURRENT

**Abstract:** In this work we present main reasons of deterioration of power quality and interference in distribution power network. Further we determine required control interaction which improve work conditions of this network and discuss practicability of other different compensation systems. We present a proposal of main structure of shunt active compensation systems. We talk over tasks, methods and control algorithms. Structure of control algorithms (numerical structure of digital filters, digital Fourier transform) and required high precision control indicate to application of signal processors. For realization of practical systems we used floating-point digital signal processor ADSP21065L, Analog Devices Inc. Some selected results of investigations on laboratory models of active shunt compensation systems are also presented.

#### 1. Wstęp

Celem działania systemu elektroenergetycznego jest dostarczenie odbiorcom energii elektrycznej o parametrach znamionowych. Dla realizacji tego celu niezbędne jest skuteczne działanie elementów systemu, regulujących i sterujących parametrami wytwarzanej i przekazywanej energii elektrycznej.

Rozwój techniki spowodował znaczny wzrost liczby odbiorników nieliniowych, powodując obniżenie parametrów jakościowych energii elektrycznej dostarczanej do odbiorców, a także utrudniając realizację procesów regulacyjnych w systemie elektroenergetycznym. Zwiększony pobór mocy oraz odkształcony prąd tych odbiorników powodują dodatkowe straty mocy czynnej w systemie zasilania oraz w zasadniczy sposób przyczyniają się do zwiększenia odkształcenia napięcia sieci. Ponadto, generowane przez te odbiorniki wyższe harmoniczne prądu, zamykając się przez inne odbiorniki, narażają je na pracę w warunkach niezgodnych z założeniami konstrukcyjnymi. Normy i zalecenia, wydawane przez międzynarodowe i europejskie (także polskie) organizacje (m.in. IEC, CENELEC, PKN) czynią pojęcie „Jakość Energii” oraz związane z nim wymagania dotyczące m.in. dopuszczalnych poziomów odkształceń napięć i prądów (wyrażane przez odpowiednio zdefiniowane współczynniki niesinusoidalności oraz udział wyższych harmonicznnych), jako obowiązujące. Powoduje to wzrost zainteresowania nowoczesnymi, skutecznymi metodami i

układami ograniczającymi poziom odkształceń napięć i prądów, wywoływanych przez odbiorniki energii elektrycznej.

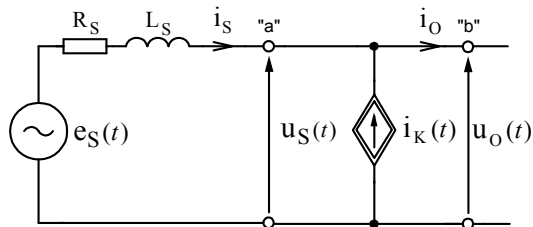
Do kompensacji oddziaływania odbiorników na sieć zasilającą stosowane są najczęściej układy złożone z elementów pasywnych  $LC$ . W warunkach coraz większego odkształcenia przebiegów napięć, a szczególnie prądów, skuteczność takiej kompensacji jest najczęściej niewystarczająca. Dla zwiększenia efektywności kompensacji proponuje się obecnie inne struktury kompensatorów w postaci aktywnych filtrów mocy lub układów hybrydowych [5,6,10] (połączenie filtrów aktywnych z układami pasywnymi typu  $LC$ ).

Obecne tendencje rozwoju metod kompensacji oddziaływania odbiorników na sieć zmierzają do opracowania kompensatorów realizujących kompensację dynamiczną (w czasie rzeczywistym), a jednocześnie odporniejszych na zakłócenia zarówno od strony sieci jak i odbiornika. Obejmują one również optymalizację energetycznych warunków pracy źródeł energii (sieci zasilającej). Układami, które mogą spełnić postulowane kryteria kompensacji, są układy aktywnej kompensacji równoległej wykorzystujące sterowane szerokopasmowe źródła prądu.

#### 2. Ogólna charakterystyka układu aktywnej kompensacji równoległej

W przypadku aktywnej kompensacji równoległej zadanie kompensacyjne można zrealizować

przez dobór sygnału prądu tak, aby spełniony był pewien warunek minimum z dodatkowymi kryteriami (np. mocy czynnej dostarczanej do odbiornika [6,7,9]). Tak określony prąd nazywa się prądem optymalnym  $i^{opt}$ , a odpowiadające mu napięcie na odbiorniku napięciem optymalnym  $u^{opt}$ . Aby wymusić na zaciskach źródła parę sygnałów  $i^{opt}$ ,  $u^{opt}$ , potrzebny jest obwód kompensacyjny, który pośredniczy między źródłem a odbiornikiem. Odnosząc to do sytuacji pokazanej na rys. 1, gdzie  $u_o, i_o$  oznaczają napięcie i prąd odbiornika, obwód kompensacyjny w postaci źródła prądowego  $i_k(t)$  doprowadza do sytuacji  $i_s(t) = i^{opt}(t)$ , a poprzez to  $u_s(t) = u_o(t) = u^{opt}(t)$  na zaciskach "a" i "b" układu.



Rys. 1. Prosty układ aktywnej kompensacji równoległej

Optymalny prąd aktywny minimalizujący normę (wartość skuteczną) prądu źródła energii może być wyznaczany różnymi metodami [6,9], a także podana w pracy [7]; wówczas ma postać analityczną:

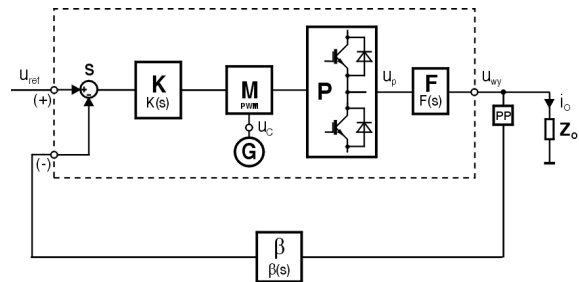
$$i^{opt}(\tau) = a i(\tau) = {}_{opt}k(t) e G(t) e_s(\tau) \quad (1)$$

Spełnienie takich warunków optymalności układu źródło-odbiornik może dotyczyć jedynie najprostszego przypadku izolowanego układu pojedynczego źródła i odbiornika. W praktyce, na zaciskach odbiornika występuje napięcie linii elektroenergetycznej, którego wartość i kształt jest wynikiem losowego oddziaływania innych odbiorników energii, a także aktualnego stanu oraz struktury linii, stąd praktyczne zapewnienie pary optymalnej  $i^{opt}$ ,  $u^{opt}$  jest trudne w praktycznej realizacji.

Przed układami aktywnej kompensacji równoległej stawia się obecnie zadania związane z pracą całego systemu elektroenergetycznego. Zadania te są zatem związane nie tylko z typowymi problemami kompensacyjnymi. Wynika stąd, że określenie zadanego stanu napięciowo-prądowego w danym węzle systemu nie może

być wyłącznie efektem realizacji zadań kompensacyjnych; należy uwzględnić także wymagania związane z pracą całego systemu energetycznego. Ustalenie kryteriów i warunków pracy układu, zarówno jakościowych jak i ilościowych jest zatem związane z wieloma różnymi czynnikami i jednoznaczne ich określenie może być trudne.

Realizacja typowych zadań układów kompensacji jest związana z dokładnością sterowania, szybkością reakcji oraz odpornością na zakłócenia, a także potrzebą dokładnego odwzorowywania (w określonym paśmie częstotliwości) sterujących sygnałów zadanych. W tym celu proponuje się wykorzystanie szerokopasmowych energoelektronicznego źródła prądu [3,4], liniowego ze względu na wejście i wyjście (w określonym paśmie częstotliwości), pracującego jako układ zamknięty, sterowanego w systemie MSI przy stałej częstotliwości nośnej, o ogólnej strukturze przedstawionej na rys. 2.



Rys. 2. Ogólny schemat ideowy energoelektronicznego niezależnego źródła prądu

Ogólną strukturę układu tworzą: sumator ( $S$ ), filtr  $K$  w torze głównym, modulator MSI ( $M$ ), przekształtnik tranzystorowy ( $P$ ), filtr wyjściowy  $F$  o strukturze zależnej od zastosowań, przetwornik pomiarowy sygnału ( $PP$ ), wymagany dla realizacji odpowiedniego sprzężenia zwrotnego, filtr  $\beta$  w torze sprzężenia oraz odbiornik  $Z_o$ .

Ze względu na sterowanie, najbardziej istotnymi elementami przedstawionej struktury układu są filtry:  $K$  w torze głównym oraz  $\beta$  w torze sprzężenia zwrotnego. Rola filtra  $K$  polega na kompensacji wpływu filtra wyjściowego  $F$  oraz obciążenia na transmitancję układu zamkniętego, a także częściowo opóźnienia charakterystycznego dla układów dyskretnych.

Oznacza to, że parametry filtra  $K$  powinny zmieniać się (adaptacyjnie) wraz ze zmianami obciążenia (w ogólnym przypadku nieliniowego

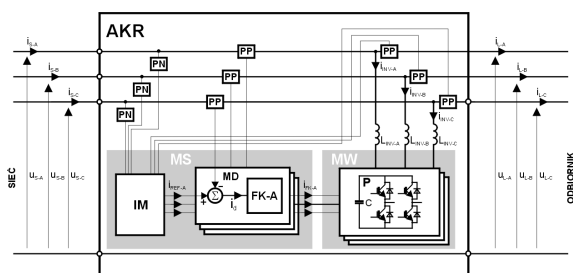
i niestacjonarnego) w taki sposób, aby odpowiednio kształtować charakterystykę amplitudowo-fazową układu dla zapewnienia jak najszerszego pasma przenoszenia przy możliwie dużej wartości współczynnika wzmocnienia i niezbędnym marginesie stabilności układu zamkniętego. Filtr analogowy  $F$  ma zasadniczy wpływ na redukcję składowych związanych z przebiegiem nośnym, generowanych przez modulator MSI oraz realizuje funkcję filtru antyaliasingowego.

### 3. Struktura sprzętowa układu

Prototyp układu aktywnej kompensacji równoległej (AKR) – rys. 3, 4, wykonano jako szerokopasmowe energoelektroniczne 3-fazowe źródło prądu, stosując tranzystorowe moduły IPM. W fazie badań laboratoryjnych wykorzystano system uruchomieniowy ALS-G2 – rys. 5, ze zmiennoprzecinkowym procesorem sygnałowym Analog Devices ADSP21065L SHARC™.



Rys. 3. Widok ogólny modelu fizycznego układu aktywnej kompensacji równoległej (AKR)



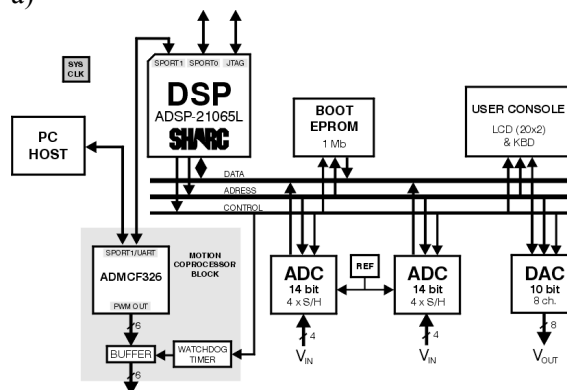
Rys. 4. Schemat blokowy modelu fizycznego układu aktywnej kompensacji równoległej (AKR)

Układ kompensacji aktywnej, którego schemat

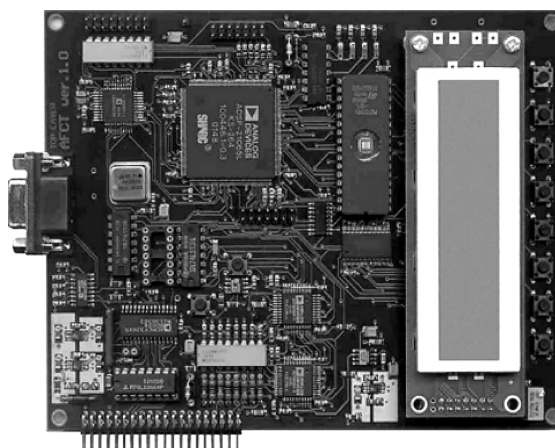
blokowy pokazano na rysunku 4, składa się z następujących modułów funkcjonalnych i elementów:

- modułu sterowania (MS) w postaci systemu mikrokomputerowego,
- modułu wykonawczego (MW) w postaci opracowanego przez autorów energoelektronicznego źródła prądu,
- przetworników pomiarowych napięcia (PN) oraz prądu (PP),
- analogowego filtra pasywnego w postaci dławików szeregowych  $L_{INV}$ .

a)



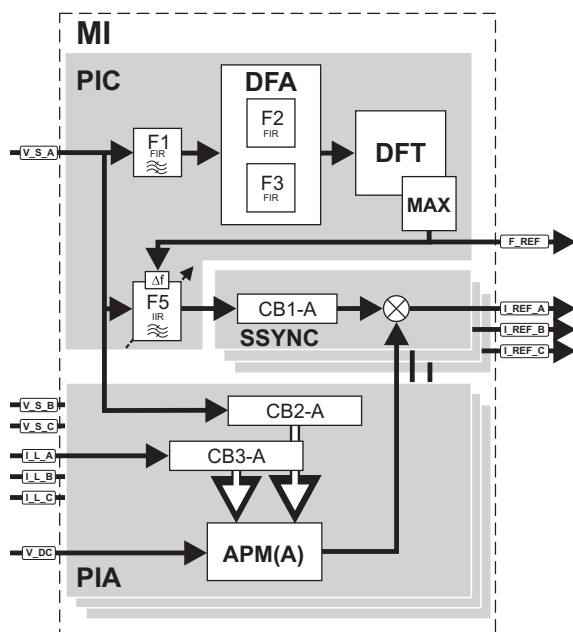
b)



Rys. 5. System uruchomieniowy ALS-G2 a) schemat blokowy; b) widok ogólny

Jakość i właściwości dynamiczne procesu aktywnej kompensacji zależą od przyjętej metody wyznaczania wielkości wzorcowej, a także od możliwości zastosowania tej metody w praktyce. W badanym układzie prąd wzorcowy określono zgodnie ze wzorem (1). Do wyznaczenia jego parametrów niezbędna jest znajomość amplitudy, fazy i częstotliwości napięcia źródła energii. Wielkości te są wyznaczone w bloku identyfikacji parametrów prądu wzorcowego IM – rys. 4, przy założeniu (z uwagi na

wymaganą dynamikę kompensacji), że czas identyfikacji, związany ze zmianami parametrów i napięć sieci zasilającej lub obciążenia, nie przekracza jednego okresu napięcia sieci. Dla efektywnej realizacji zadań sterowania, moduł sterowania podzielono na dwa moduły programowe: identyfikacji (MI) realizujący identyfikację częstotliwości, fazy i amplitudy prądu wzorcowego oraz decyzyjne (MD-A, -B, -C) realizujące wymagane sterowanie źródłem prądu, niezależnie w każdej fazie.



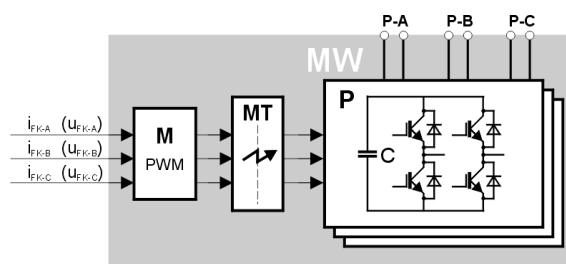
Rys. 6. Schemat blokowy modułu identyfikacji (MI)

W module identyfikacji (MI) pokazanym na rysunku 6, wyznaczane są parametry – i na tej podstawie – generowane 3-fazowe prądy zadane (referencyjne) dla źródła prądu. Moduł ten składa się z trzech niezależnych bloków: identyfikacji częstotliwości podstawowej (PIC) – wspólnego dla wszystkich faz; identyfikacji amplitudy (PIA) i synchronizacji (SSYNC) – odrębnych dla każdej fazy.

Bardzo istotnym elementem funkcjonalnym kompensatora jest programowy moduł decyzyjny (MD), którego częścią jest filtr  $K$  – rys. 2, realizowany jako filtr cyfrowy o określonym rzędzie. Zadaniem tego modułu jest kształtowanie odpowiedniej (optymalnej) charakterystyki amplitudowo-fazowej układów w warunkach dużej zmienności parametrów obciążenia i zasilania oraz eliminowanie pasożytniczych produktów modulacji szerokości impulsów z sygnału sprzężenia zwrotnego.

Moduł wykonawczy (MW), stanowiący część silnoprądową (rys. 7) kompensatora równoległego składa się z następujących bloków:

- cyfrowego, 12-bitowego modulatora szerokości impulsów (M) w postaci koprocatora firmy Analog Devices Inc. typu ADMC201, którego częstotliwość nośna synchronizowana jest zegarem systemowym,
- układu sprzęgającego modulator z blokiem silnoprądowym (MT), składającego się z szybkich elementów transpotorowych Hewlett-Packard,

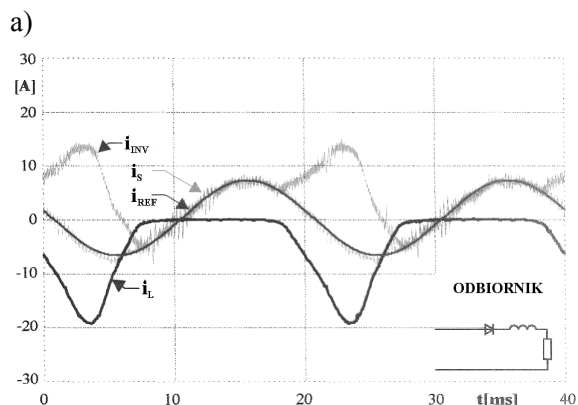


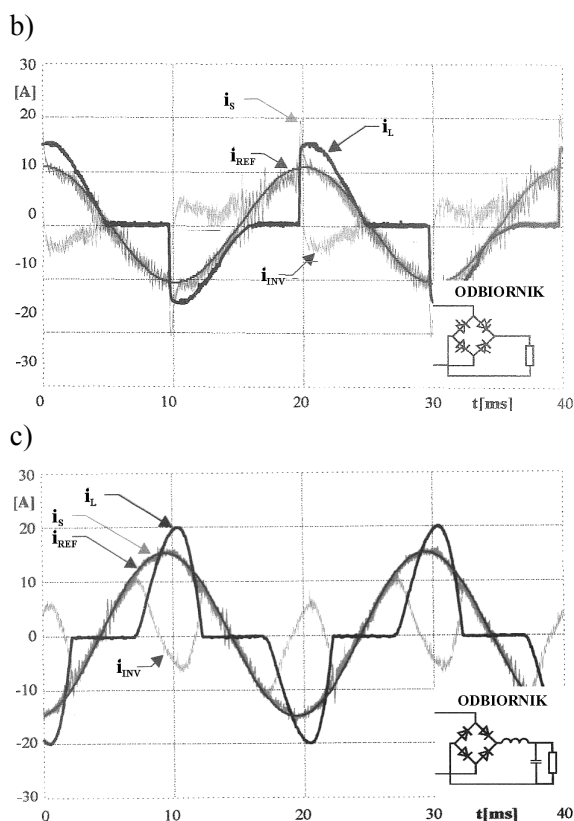
Rys. 7. Schemat blokowy bloku wykonawczego kompensatora

– przekształtnika wykonanego z wykorzystaniem inteligentnego modułu mocy (IPM) produkcji Mitsubishi Electric.

#### 4. Wyniki badań modeli fizycznych

Przedstawiono wybrane wyniki badań prototypu kompensatora aktywnego. Na rys. 8 pokazano przebiegi prądów: odbiornika  $i_L$ , sieci  $i_s$ , wzorcowego  $i_{REF}$  i kompensatora  $i_{INV}$ , dla typowych odbiorników nieliniowych w postaci: odbiornika RLD (rezystancyjno-indukcyjnego z diodą szeregową – prąd odbiornika zawiera składową stałą) – rys. 8a), odbiornika rezystancyjnego R zasilanego ze sterownika napięcia przemiennego, dla kąta załączenia  $\alpha_z = 90^\circ$  – rys. 8b) oraz odbiornika rezystancyjnego R z filtrem pasywnym LC typu  $\Gamma$  (typowe obciążenie zasilaczowe) – rys. 8c).





Rys. 8. Przebiegi prądów: odbiornika, sieci, wzorcowego i kompensatora układu AKR

Z przeprowadzonych badań zaprojektowanego i wykonanego układu wynika, że przy zastosowanej częstotliwości nośnej MSI 12 kHz i częstotliwości próbkowania 24 kHz, użyteczne pasmo kompensacji wynosiło ok. 2,5 kHz; zniekształcenia nieliniowe przebiegów wyjściowych, w paśmie 1,5 kHz wynosiły 2-3,5% (zależnie od poziomu odkształceń i dynamiki prądu kompensowanego oraz poziomu odkształceń napięcia zasilającego), błąd statyczny (DC) ok. 0,5 %. Czas odpowiedzi kompensatora nie przekraczał jednego okresu napięcia sieci zasilającej.

Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują, że wykorzystanie szerokopasmowego źródła prądu w układach aktywnej kompensacji równoległej daje dobre wyniki ze względu na skuteczność kompensacji oraz czas reakcji kompensatora. Prąd sieci zasilającej po kompensacji jest zgodny w fazie z przebiegiem napięcia sieci (kompensacja tzw. mocy biernej) oraz ma znacznie zredukowaną wartości wyższych harmonicznych (kompensacja odkształceń prądu odbiornika).

## 5. Literatura

- [1]. Edris, A., et al.: *Controlling the Flow of Real and Reactive Power*. IEEE Computer Applications in Power, 11, (1), 1998
- [2]. Fujita, H., Akagi, H.: *The unified power quality conditioner: the integration of series active filters and shunt active filters*. IEEE, 1996, pp. 494-501
- [3]. Gwóźdź M., Porada R.: *Badania symulacyjne energoelektronicznego liniowego źródła prądowego*. Konferencja "Zastosowanie Komputerów w Elektrotechnice", ZKWE'97, Poznań/Kiekrz, 7-9 kwiecień 1997, s. 291-294
- [4]. Gwóźdź, M., Porada, R.: *Compensate for Loading Effects on Power Lines with a DSP-Controlled Active Shunt Filter*. ADI - Analog Dialogue, Vol. 33, No 9, October, 1999, pp. 123-132
- [5]. Gyugyi, L., et al.: *The Interline Power Flow Controller Concept: A New Approach to Power Flow management in Transmission Systems*. IEEE Transactions on Power Delivery, 14, (3), 1999
- [6]. 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
- [7]. Porada R.: *Właściwości energetyczne procesów w układach elektrycznych*. Rozprawy, Nr 369, Politechnika Poznańska 2002
- [8]. Porada R., Gwóźdź M.: *Niezależne energoelektroniczne liniowe źródło napięciowe*. XXII Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, Gliwice-Ustroń, IC-SPETO'99, 19-22 maja 1999, s. 343-346
- [9]. Siwczyński M.: *Teoria uniwersalnych globalnie pasywnych obwodów kompensacyjnych*. JUEE, t. 6, z. 1, lipiec 2000, s. 77-86
- [10]. Yong Hua Song and Johns, A.T., (edited by): *Flexible ac transmission systems (FACTS)*. IEE Power and Energy, Series 30, England, 1999

## Dane o autorach

dr hab. inż. Ryszard Porada  
 e-mail: Ryszard.Porada@put.poznan.pl  
 dr inż. Michał Gwóźdź  
 e-mail: Michal.gwozdz@eranet.pl  
 Politechnika Poznańska  
 Instytut Elektrotechniki Przemysłowej  
 ul Piotrowo 3a  
 60-965 Poznań