

# AKTYWNA OPTIMALIZACJA WŁAŚCIWOŚCI ENERGETYCZNYCH

## 1. WPROWADZENIE

Rozwój techniki, szczególnie ostatnich lat, jest przyczyną znacznego wzrostu liczby odbiorników nieliniowych, powodujących pogorszenie parametrów jakościowych energii elektrycznej dostarczanej do odbiorców. 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 harmonicznych), jako obowiązujące. Dotyczy to także odchyień i wahań wartości napięcia i jego częstotliwości, zapadów oraz impulsów napięcia, generowanych podczas normalnej pracy systemu energetycznego lub wywołanych przyczynami losowymi. Powoduje to znaczny 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  $LC$  (kompensatory pojemnościowe, pasywne filtry rezonansowe wyższych harmonicznych, filtry o strukturach i parametrach określanych metodami optymalizacyjnymi). W warunkach coraz większego odkształcenia przebiegów napięć, a szczególnie prądów, skuteczność takiej kompensacji, szczególnie w stanach dynamicznych układów, jest najczęściej niewystarczająca. Dla zwiększenia efektywności kompensacji proponuje się obecnie inne struktury kompensatorów w postaci aktywnych filtrów mocy lub układów hybrydowych (połączenie filtrów aktywnych z układami pasywnymi typu  $LC$ ).

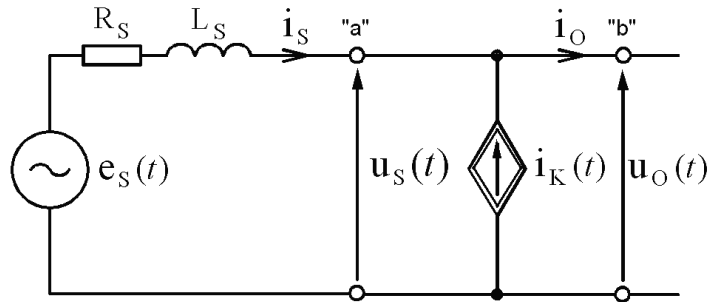
Obecne tendencje rozwoju metod kompensacji oddziaływania odbiorników na sieć zmagają się do opracowania kompensatorów realizujących kompensację dynamiczną (w czasie rzeczywistym), a jednocześnie odporniejszych na zakłócenia zarówno od strony sieci jak i odbiornika. Obejmują one również optymalizację energetycznych warunków pracy źródeł energii (sieci zasilającej).

Układami, które mogą spełnić postulowane kryteria kompensacji, są układy aktywnej kompensacji szeregowej i równoległej w postaci sterowanych źródeł napięcia i prądu, a także ich połączenie szeregowo- równoległe, nazywane zunifikowanymi sterownikami przepływu mocy UPFC (Unified Power Flow Controller). Ogólnym celem stosowania tych układów jest m.in. aktywna filtracja zniekształceń napięcia i prądu sieci, a także regulacja i symetryzacja napięć i prądów oraz sterowanie przepływem energii w systemie energetycznym. Głównymi czynnikami oddziaływania UPFC na procesy zachodzące w sieciach zasilających są: regulowane – co do amplitudy i fazy podstawowej harmonicznej, a także zawartości harmonicznych – prąd kompensujący oraz szeregowo napięcie dodawcze. W realizacji praktycznej wielkości te są zwykle generowane przez falowniki energoelektroniczne.

## 2. OGÓLNE ZASADY STEROWANIA OPTIMALNEGO UKŁADAMI

W przypadku prostego układu źródło- odbiornik zadanie optymalizacyjne można realizować się poprzez dobór sygnału prądu tak, aby spełniony był pewien warunek

minimum z dodatkowymi kryteriami (np. mocy czynnej dostarczanej do odbiornika). Tak uzyskany prąd nazywa się prądem optymalnym  ${}_{opt}i$ , a odpowiadające mu napięcie na odbiorniku napięciem optymalnym  ${}_{opt}u$ . Aby wymusić na zaciskach źródła parę sygnałów  ${}_{opt}i, {}_{opt}u$  potrzebny jest obwód kompensacyjny, który pośredniczy między źródłem a odbiornikiem. Odnosząc to do sytuacji pokazanej na rysunku A.1, gdzie  $u_o, i_o$  oznaczają napięcie i prąd odbiornika, obwód kompensacyjny w postaci źródła prądowego  $i_k(t)$  doprowadza do sytuacji  $i_s(t) = {}_{opt}i(t)$ , a poprzez to  $u_s(t) = u_o(t) = {}_{opt}u(t)$  na zaciskach "a" i "b" układu.



Rys. A.1. Prosty układ równoległej kompensacji dwójnikowej

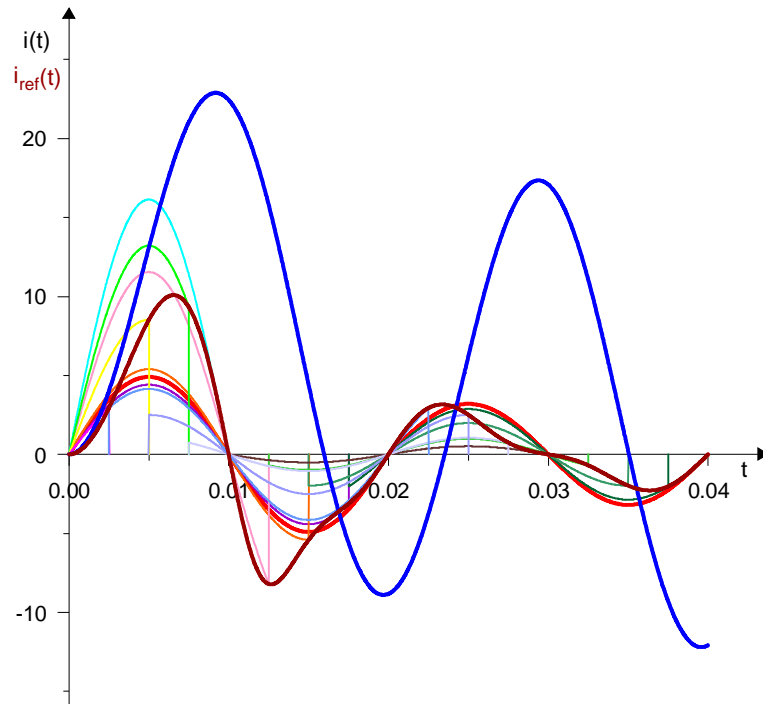
Spełnienie takich warunków optymalności układu źródło- odbiornik może dotyczyć jedynie najprostszego przypadku izolowanego układu pojedynczego źródła i odbiornika. W praktyce, na zaciskach odbiornika występuje napięcie linii transmisyjnej, którego wartość i kształt jest wynikiem stochastycznego oddziaływania innych odbiorników energii, a także aktualnego stanu oraz struktury linii transmisyjnej, są więc jednocześnie zapewnienie pary optymalnej  ${}_{opt}i, {}_{opt}u$  jest trudne do realizacji.

Optymalny prąd aktywny minimalizujący normę (wartość skuteczną) prądu źródła energii oraz jego odkształcenie (od przebiegu sinusoidalnego), może być określany różnymi metodami. Wyznaczony przy zastosowaniu metod wariacyjnych, aktywny prąd optymalny, dla przyjętego prostego modelu zastępczego źródła energii oraz linii transmisyjnej w postaci dwójnika szeregowego  $RL$ , określa następująca postać analityczna:

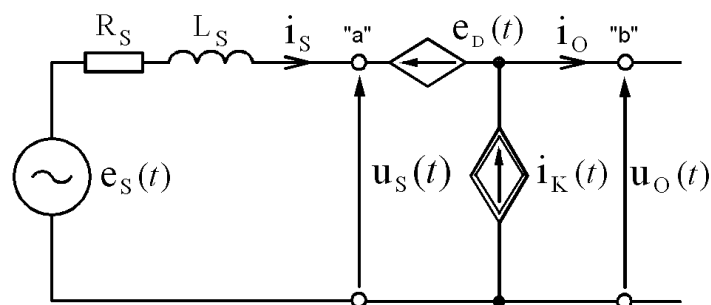
$${}_{opt}i(t) = i_{REF}(t) = i_a(t) = {}_{opt}k(t) e_s(t) = A_{REF}(t) e_s(t) \quad (1)$$

Spełnienie warunków jednoczesnego przenoszenia przez optymalny prąd aktywny zadanej mocy czynnej oraz zachowania kształtu napięcia źródła, w stanie dynamicznym układu nie jest możliwe. Wymagałoby to wygenerowania odpowiedniego sygnału prądu przed uzyskaniem informacji o wymaganych dla czasu  $t$  wartościach chwilowych mocy czynnej i napięcia skutecznego odbiornika. Sytuację tę ilustruje rysunek 2, na którym pokazano przebiegi „idealnych” prądów aktywnych odbiornika  $RL$  przy zasilaniu napięciem sinusoidalnym w stanie nieustalonym oraz wyznaczanego (na podstawie podanej zależności) prądu aktywnego  $i_{ref}(t)$ .

Możliwe jest jednak generowanie sygnału prądu wzorcowego przy kompromisowym kryterium nadążania za aktualnie zapotrzebowaną mocą czynną i/lub jednoczesnym zachowaniu odpowiedniego kształtu (określonym np. stopniem odkształcenia przebiegu od kształtu sinusoidalnego), z zadaną dokładnością. Wymaga to zastosowania adaptacyjnych metod wyznaczania parametrów tego sygnału. W stanach ustalonych (lub bliskich ustalonym) wystarcza zastosowanie wprost relacji (1) do wyznaczania prądu optymalnego.



Rys. 2. Przebiegi: prądu odbiornika i prądów aktywnych dla wybranych przedziałów czasowych oraz prądu wzorcowego  $i_{ref}(t)$ .



Rys. 3. Układ kompensacji szeregowo- równoległej (czwórnikowej)

Dla wymuszenia optymalnego napięcia na zaciskach odbiornika skuteczniejszy może być (w warunkach rzeczywistych) układ kompensacji czwórnikowej, składający się z dwóch źródeł sterowanych: szeregowego źródła napięcia  $e_D(t)$  oraz równoległego źródła prądu  $i_K(t)$  – rysunek 3.

Przed układami szeregowo- równoległej kompensacji aktywnej stawia się szersze zadania, związane z pracą całego systemu elektroenergetycznego. Oprócz prostych zadań wynikających z kompensacji wyższych harmonicznych napięcia i prądu czy regulacji i symetryzacji napięć oraz prądów linii wymienia się następujące:

- bilansowanie mocy biernej systemu;
- regulacja i sterowanie przepływów mocy czynnej;
- kompensację szybkozmiennych wahań mocy czynnej;
- zwiększenie przepustowości linii przesyłowych;
- poprawa stabilności systemu elektroenergetycznego;
- tłumienie międzysystemowych oscylacji mocy;
- oddziaływanie na prądy zwarciove.

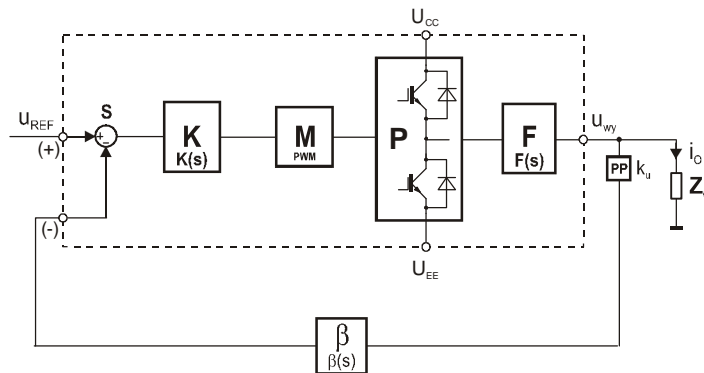
Głównym czynnikiem, który umożliwia realizację tych zadań, jest regulowane co do amplitudy i fazy podstawowej harmonicznej, a także zawartości harmonicznych napięcie dodawcze  $e_D(t)$ , generowane przez szeregowe źródło napięcia. Można w nim wyróżnić trzy składowe. Pierwsza z nich, będąca w fazie z podstawową harmoniczną napięcia sieci, odpowiada za regulację napięcia oraz kompensację wahań w wybranym węźle linii. Druga składowa tego napięcia służy do kompensacji spadku napięcia na linii zasilającej i powinna być przesunięta względem prądu linii o kąt  $90^\circ$  (przy uwzględnieniu tylko reaktancji linii). Te dwie składowe napięcia powinny zawierać również składowe harmoniczne, niezbędne do kompensacji odkształceń napięcia sieci. Trzecia składowa napięcia umożliwia regulację przepływu mocy czynnej w liniach transmisyjnych (dwustronnie zasilanych). Zgodnie z uproszczoną relacją:

$$P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin(d - a) \quad (2)$$

gdzie:  $P$  – przesyłana moc czynna;  $U_1, U_2$  – napięcia na końcach linii;  $X$  – reaktancją linii,  $d$  – kąt pomiędzy wskazami napięć  $U_1$  i  $U_2$ , wprowadzenie dodatkowego napięcia przesuniętego względem jednego z tych napięć o kąt  $\pm 90^\circ$  umożliwia zmianę wartości kąta wzajemnego przesunięcia między wskazami napięć  $U_1$  i  $U_2$  (o kąt  $a$ ), a tym samym zmianę zarówno wartości, jak i kierunku przepływu mocy czynnej.

Zadania stawiane przed układami kompensacji szeregowo- równoległej są zatem powiązane nie tylko z typowymi problemami kompensacyjnymi. Wynika stąd, że określenie optymalnego stanu napięciowo- prądowego w danym węźle systemu nie może być wyłącznie efektem omawianego poprzednio podejścia optymalizacyjnego; należy uwzględnić także wymagania optymalizacyjne związane z pracą całego systemu energetycznego. Ustalenie kryteriów i warunków optymalizacyjnych, zarówno jakościowych jak i ilościowych jest zatem związane z wieloma różnymi czynnikami i jednoznaczne ich określenie może być trudne.

Skuteczna realizacja zadań układów aktywnej kompensacji jest związana z dokładnością sterowania, szybkością reakcji oraz odpornością na zakłócenia, a także dynamiką i dobrym odwzorowaniem (w określonym paśmie częstotliwości) sterujących sygnałów zadanych na wyjściu energetycznym układów. Do realizacji tych zadań mogą być wykorzystane układy energoelektronicznych sterowanych źródeł napięcia i prądu, pracujące jako układy zamknięte, sterowane w systemie PWM, o ogólnej strukturze pokazanej na rysunku 4.



Rys. 4. Ogólny schemat ideowy niezależnego źródła energii.

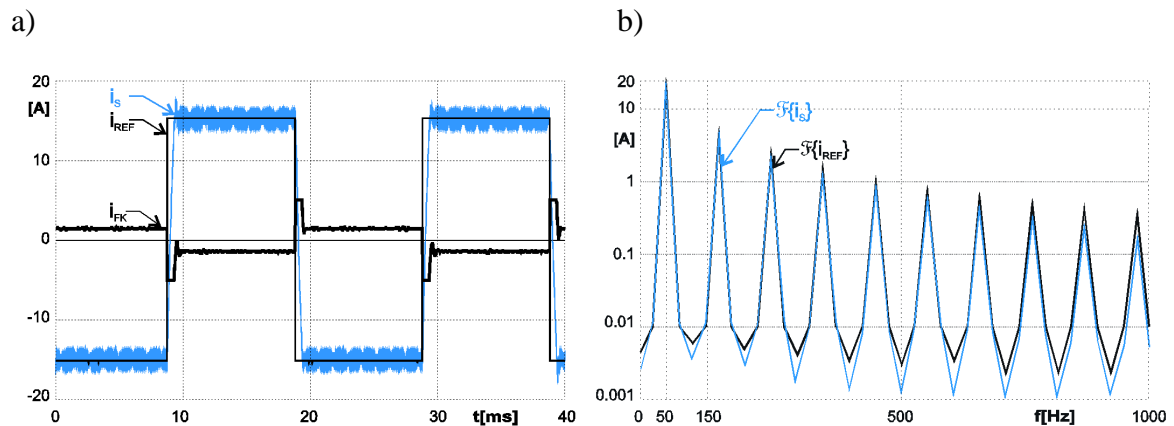
Odpowiedni dobór struktury i parametrów pasywnego filtra wyjściowego  $F$  umożliwia pracę tego układu jako źródła prądu lub napięcia.

Najbardziej istotnymi (ze względu na sterowanie) elementami przedstawionej struktury

źródła są filtry układu: główny  $K$  oraz zewnętrzny  $b$ . Rola filtru  $K$  polega na kompensacji wpływu zarówno pasywnego filtra wyjściowego  $F$ , jak i obciążenia (w ogólnym przypadku nieliniowego i niestacjonarnego), na transmitancję układu zamkniętego. Parametry tego filtru powinny zatem zmieniać się w taki sposób, aby odpowiednio kształtować charakterystykę amplitudowo-fazową układu dla zapewnienia jak najszerszego pasma przenoszenia częstotliwości przy możliwie dużej wartości napięciowego współczynnika wzmocnienia i odpowiednim marginesie stabilności układu zamkniętego. Wymagania te mają zasadniczy wpływ na zdolność układu do kształtowania odpowiedzi układu oraz powtarzalność przebiegu wyjściowego w stosunku do sygnału wzorcowego, a tym samym na redukcję niepożądanych składowych widma.

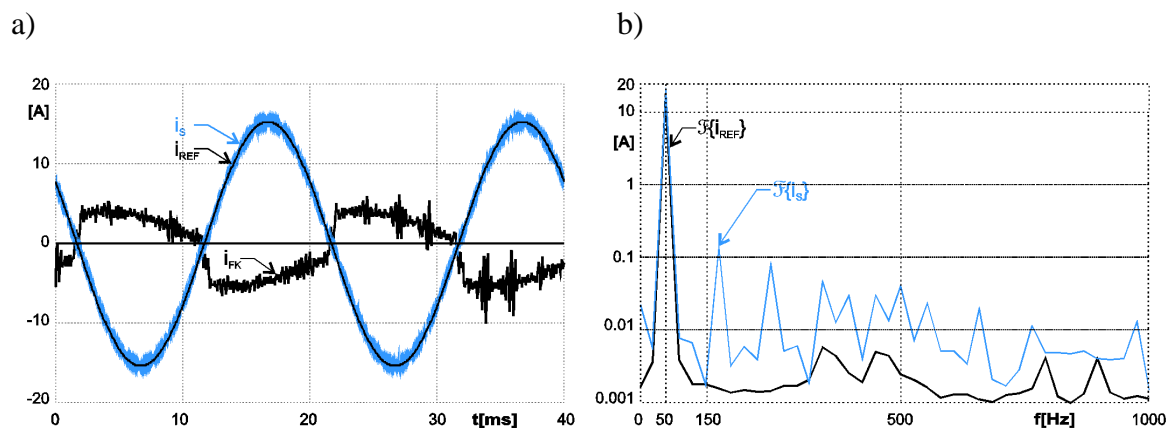
Do realizacji wymienionych powyżej celów regulacji zastosowany został cyfrowy filtr adaptacyjny pełniący rolę filtru  $K$  toru głównego. Istotą tej adaptacji jest automatyczne dopasowywanie parametrów filtru  $K$  do zmieniających się właściwości obiektu regulacji i jego otoczenia, przez odpowiednią zmianę algorytmu sterowania na podstawie wyników identyfikacji (obiektu i otoczenia).

Zrealizowane zostały układy prototypowe źródeł prądu i napięcia, sterowane za pomocą zmiennoprzecinkowego procesora sygnałowego typu ADSP-21061.



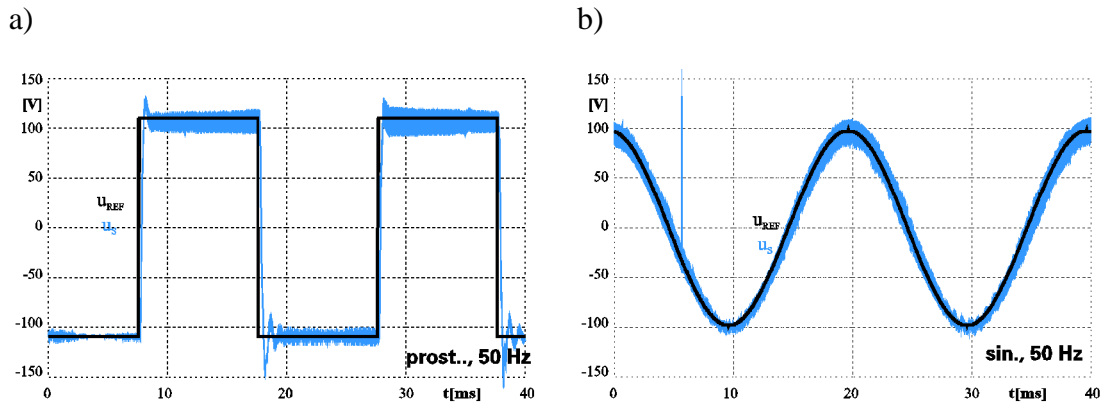
Rys. 5. Wyniki badań układu prototypowego źródła prądowego dla sygnału wzorcowego prostokątnego: a) przebiegi wybranych wielkości; b) wyniki analizy widmowej.

Na rysunku 5 pokazane są (dla pracy układu jako źródła prądu) przebiegi prostokątnego sygnału wzorcowego  $i_{REF}$ , prądu wyjściowego  $i_s$  oraz sygnału sprzężenia zwrotnego  $i_{FK}$  (rys. 5a), a także wyniki analizy widmowej tych wielkości (rys. 5b). Takie same wielkości dla sinusoidalnego sygnału wzorcowego przedstawia rys. 6.



Rys. 6. Wyniki badań układu prototypowego źródła prądowego dla sygnału wzorcowego sinusoidalnego: a) przebiegi wybranych wielkości; b) wyniki analizy widmowej.

Uzyskana w obu przypadkach górna częstotliwość graniczna pasma przenoszenia (-3 dB) wynosi ok. 3,2 kHz przy nierównomierności charakterystyki amplitudowej ok. 0,4 dB; współczynnik zniekształceń nieliniowych prądu wyjściowego wyniósł 0,7 % w paśmie przenoszenia i 0,2 % w paśmie 0,5 kHz.



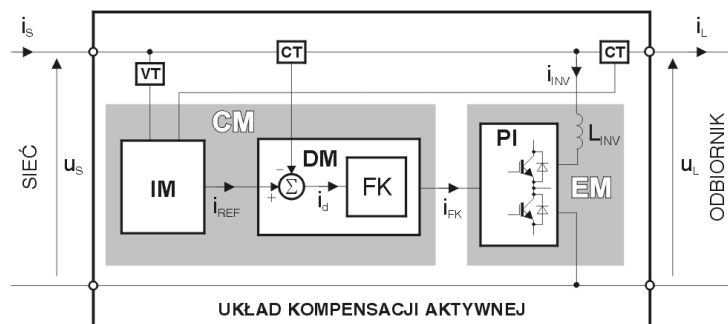
Rys. 7. Wybrane wyniki badań układu prototypowego źródła napięcia (obciążonego odbiornikiem  $RL$ ); przebieg wzorcowy: a) prostokątny; b) sinusoidalny.

Rysunek 7 prezentuje wybrane wyniki badań prototypowego układu źródła napięcia. Pokazane zostały przebiegi prostokątnego (rys. 7a) oraz sinusoidalnego (rys. 7b) sygnału wzorcowego  $u_{REF}$  oraz napięcia wyjściowego źródła napięcia  $u_s$ . Dla badanego źródła napięcia użyteczne pasmo przenoszenia wynosi ok. 3 kHz, przy zniekształceniach nieliniowych przebiegu wyjściowego nie większych niż 0,3 % w paśmie 1 kHz oraz ok. 0,7 % w paśmie 3 kHz.

Wyniki badań układów prototypowych niezależnych sterowanych źródeł energii wskazują, że mogą one być zastosowane jako elementy wykonawcze układów aktywnej kompensacji szeregowej i równoległej.

### 3. UKŁAD AKTYWNEJ KOMPENSACJI RÓWNOLEGŁEJ

Na podstawie przedstawionych powyżej wyników badań zaprojektowany został układ aktywnej kompensacji równoległej, przy wykorzystaniu energoelektronicznego sterowanego źródła prądowego. Założonym celem jest dynamiczna (możliwie w czasie rzeczywistym) kompensacja prądu różnicowego tj. prądu, będącego różnicą między aktualnym prądem odbiornika  $i_L(t)$  i prądem wzorcowym  $i_{REF}(t)$  (optymalnym prądem aktywnym), wyznaczanym na podstawie związku (1). Strukturę blokową układu pokazuje rysunek 8.



Rys. 8. Schemat ideowo- blokowy układu aktywnej kompensacji równoległej

Układ kompensacji aktywnej, pracujący jako układ zamknięty, składa się z trzech

podstawowych bloków:

- bloku identyfikacji (IM), realizującego identyfikację częstotliwości  $w_{REF}$ , fazy  $j_{REF}$  oraz amplitudy  $A_{REF}$  prądu wzorcowego;
- bloku decyzyjnego (DM), realizującego wymagane sterowanie kompensatora;
- wykonawczego (EM) w postaci energoelektronicznego źródła prądowego;
- przetworników pomiarowych napięcia (VT) i prądu (CT).

Proces sterowania kompensatorem przebiega w dwóch fazach:

- wyznaczanie przebiegu prądu wzorcowego  $i_{REF}(t)$ ;
- dynamiczne kształtowanie wymaganego prądu kompensującego 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. Realizacja optymalnego sterowania kompensatorem ma na celu optymalizację pracy układu źródło energii- odbiornik, przez minimalizację wartości skutecznej prądu źródła oraz jego odkształceń (od przebiegu sinusoidalnego).

W zastosowaniach do kompensacji równoległej w sieciach elektroenergetycznych, w których napięcie źródła energii (generatora synchronicznego) ma przebieg praktycznie sinusoidalny, wzorcowy przebieg prądu, uwzględniający bieżący stan procesu w układzie źródło- odbiornik, powinien charakteryzować się następującymi cechami:

1. kształt prądu wzorcowego, a tym samym kształt prądu pobieranego z sieci, powinien być sinusoidalny w każdym okresie podstawowym napięcia (z ewentualnym założonym przesunięciem prądu  $j_i$  względem napięcia):

$$i_{REF}(t) = i_s(t) = A_{REF}(t) \sin(w_s t + j_i) \quad (3)$$

uwzględnienie szybkich zmian prądu odbiorników energii może spowodować uzależnienie amplitudy tego prądu  $A_{REF}(t)$  od czasu w ramach okresu napięcia źródła – w takich stanach prąd wzorcowy będzie odbiegał kształtem od sinusoidy;

2. wartość skuteczna prądu wzorcowego (optymalnego aktywnego) powinna odpowiadać aktualnie zapotrzebowanej przez odbiornik mocy czynnej, z uwzględnieniem wpływu parametrów sieci.

Realizacja tych cech prądu wzorcowego wymaga także jego synchronizacji z napięciem źródła dla zachowania zgodności częstotliwości i fazy.

Zgodnie z tymi założeniami, do określenia parametrów prądu wzorcowego niezbędna jest znajomość amplitudy, fazy i częstotliwości napięcia źródła energii (generatora synchronicznego). Jednak pomiarowo dostępne jest jedynie napięcie w punkcie kompensacji, które może być odkształcone i ulegać stochastycznym wahaniom na skutek wpływu innych odbiorników energii. Sąd jako wielkość odniesienia w takim przypadku może być przyjęta jedynie podstawowa harmoniczna tego napięcia. Z tego względu można przyjąć, 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 bloku identyfikacji parametrów prądu wzorcowego, przy wykorzystaniu opracowanej metody identyfikacji tych wielkości [39,48,49,52,59] i założeniu (z uwagi na wymagania dynamikę kompensacji), że czas identyfikacji, związany ze zmianami parametrów i napięć sieci zasilającej lub obciążenia, nie przekracza jednego okresu napięcia sieci.

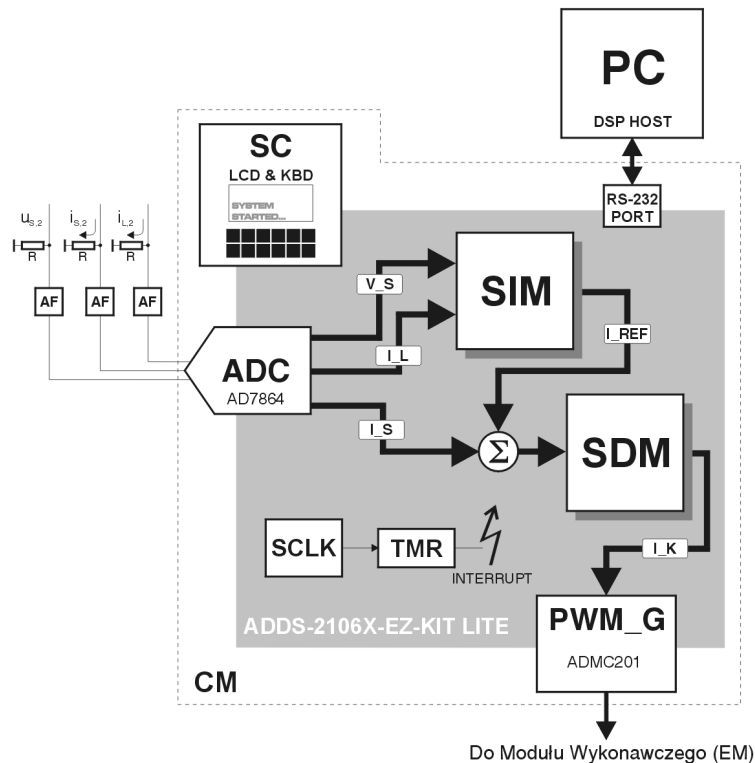
Do realizacji sterowania układem kompensatora jako układem zamkniętym opracowany i zastosowany został w bloku decyzyjnym adaptacyjny filtr cyfrowy FIR, którego zadaniem jest:

- kształtowanie charakterystyki amplitudowo- fazowej układu dla uzyskania jak

najszerszego pasma przenoszenia, przy możliwie dużej wartości stałoprądowego współczynnika wzmocnienia i jednocześnie zapewnienia odpowiedniego marginesu stabilności układu zamkniętego, w warunkach dużej zmienności parametrów obciążenia i zasilania;

- eliminowanie pasożytniczych produktów modulacji szerokości impulsów PWM z sygnału sprzężenia zwrotnego.

Blok wykonawczy (EM) pełni rolę sterowanego źródła prądu, w którym zastosowany został inteligentny moduł IGBT produkcji MITSUBISHI (sprzężony z układem sterowania za pomocą szybkich elementów transoptorowych HEWLETT-PACKARD) oraz cewka ( $L_{INV}$ ), pełniąca rolę filtra ograniczającego pasożytnicze produkty modulacji szerokości impulsów w prądzie wyjściowym. Magazynem energii dla źródła prądu jest kondensator.



Rys. 9. Struktura sprzętowo- programowa układu sterowania (CM)

W realizacji modelu laboratoryjnego układu aktywnej kompensacji równoległej wykorzystany został system uruchomieniowy typu ADDS-2106X-EZ-KIT ze zmiennoprzecinkowym procesorem sygnałowym typu ADSP-21061 Analog Devices Inc. Rozwiązanie takie jest uzasadnione wysokimi wymaganiami odnośnie do mocy obliczeniowej bloku identyfikacji parametrów prądu wzorcowego (IM) oraz odpowiedniego kształtowania charakterystyk częstotliwościowych układu.

Struktura sprzętowo- programową układu sterowania przedstawia rysunek 9. Program sterujący napisany jest w języku C (pakiet ADDS-21000-SW-PC ver. 3.3).

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

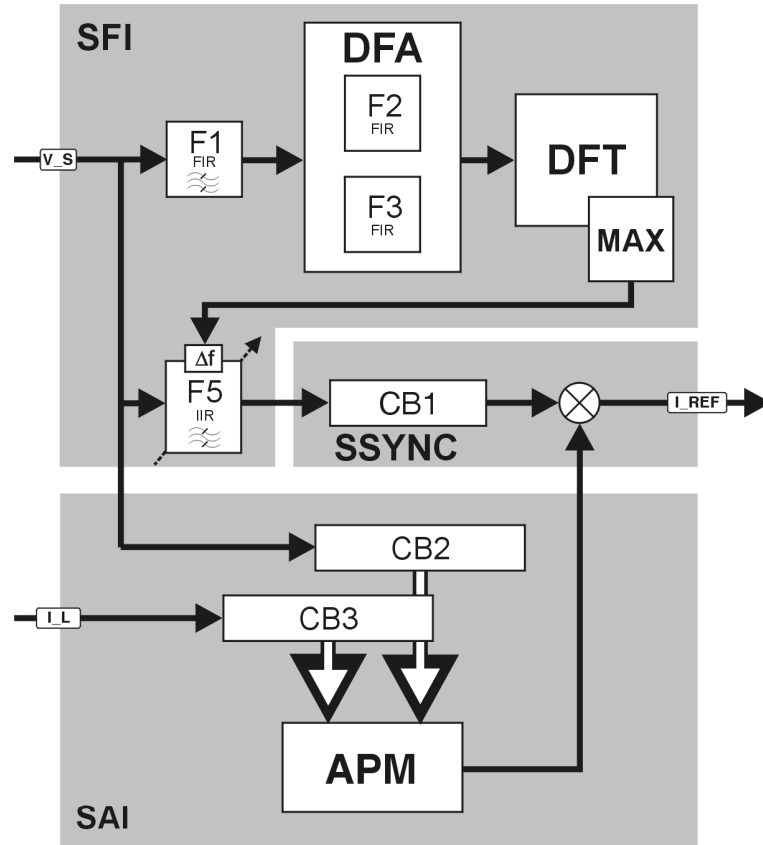
- 1) rezystory pomiarowe R dołączone do wyjść prądowych przetworników pomiarowych typu LA55-P i LV25 firmy LEM;
- 2) 4- kanałowy przetwornik analogowo- cyfrowy (ADC) typu AD7864;
- 3) generator przebiegu PWM\_G typu ADCMC201;
- 4) konsolę operatorską systemu (SC) z klawiaturą oraz wyświetlaczem ciekłokrystalicznym;
- 5) programowy moduł identyfikacji (SIM);



6) programowy moduł decyzyjny (SMD) współpracujący z sumatorem ( $\Sigma$ ), 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.

Programowy moduł identyfikacji prądu wzorcowego (SIM) o strukturze pokazanej na rysunku 10, składa się z trzech podstawowych bloków: identyfikacji częstotliwości (PM\_F), identyfikacji amplitudy (PM\_A) oraz synchronizacji (PM\_SYNC).



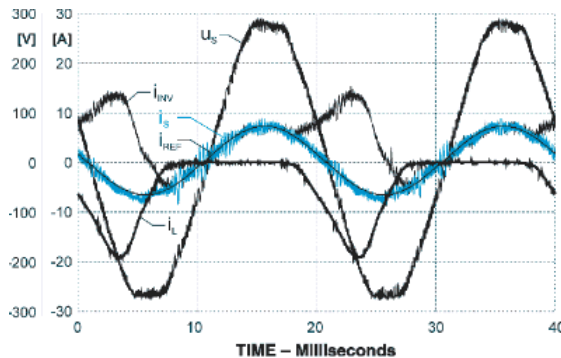
Rys. 10. Struktura programowa modułu identyfikacji parametrów prądu wzorcowego

Blok identyfikacji częstotliwości podstawowej wykorzystuje wstępną filtrację napięcia sieci za pomocą filtra środkowo- przepustowego (F1) w celu zwiększenia odporności algorytmu na szumy 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.

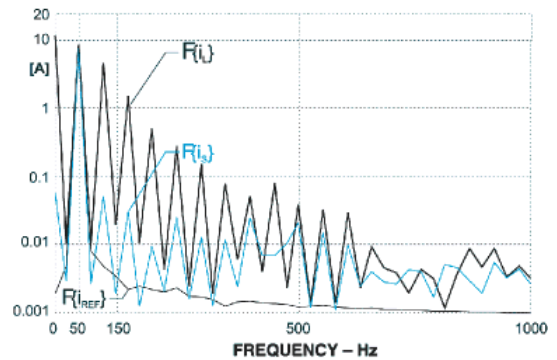
Amplituda prądu wzorcowego wyznaczana jest w bloku (APM) po odpowiednim przetworzeniu próbek napięcia i prądu odbiornika, zapisywanych bieżąco w rejestrach kołowych CB2 oraz CB3. Moduł synchronizacji (PM\_SYNC) umożliwia wyrównanie opóźnień czasowych związanych z operacjami dokonywanymi poprzez bloki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

Na podstawie przeprowadzonych badań bloku identyfikacji 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.

a)

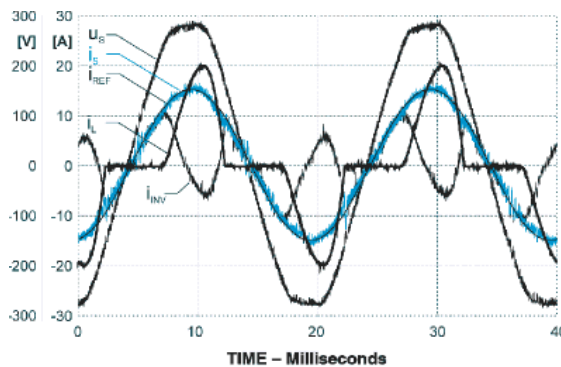


b)

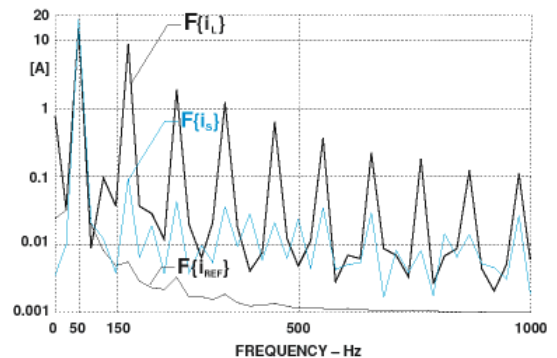


Rys. 11. Wyniki badań układu prototypowego filtra aktywnego (odbiornik  $RL$  z diodą):  
a) przebiegi wybranych wielkości; b) wyniki analizy widmowej.

a)



b)



Rys. 12. Wyniki badań układu prototypowego filtra aktywnego (odbiornik  $RC$  z mostkiem 4D):  
a) przebiegi wybranych wielkości; b) wyniki analizy widmowej.

Na rysunkach 11 i 12 pokazane zostały wybrane wyniki badań układu aktywnej kompensacji prądu różnicowego. Źródłem odkształconego prądu (rys. 11) był odbiornik rezystancyjno- indukcyjny z diodą energetyczną. Jest to szczególnie niekorzystny przypadek odbiornika nieliniowego, generujący jednocześnie: silnie odkształcony prąd ze składową stałą oraz tzw. moc bierną. Przebiegi napięcia zasilającego  $u_s$  oraz prądów odbiornika  $i_L$ , sieci  $i_s$ , filtra aktywnego  $i_{INV}$  i sygnału wzorcowego  $i_{REF}$  przedstawia rysunek 11a, natomiast rysunek 11b – wyniki analizy widmowej tych wielkości. Takie same wielkości dla odbiornika  $RC$  z mostkiem 4D (typowej konfiguracji zasilacza sprzętu elektronicznego powszechnego użytku) pokazane są na rysunku 12.

Podobnie jak dla źródła prądowego, układ aktywnej kompensacji prądu różnicowego zapewnia dobre odwzorowanie sygnału wzorcowego  $i_{REF}$ , wyznaczanego w module identyfikacji (IM). Prąd sieci jest zgodny w fazie z przebiegiem napięcia sieci (kompensacja tzw. mocy biernej) oraz ma znacznie zredukowane wartości wyższych harmonicznych (kompensacja odkształceń prądu odbiornika –  $THD < 1\%$ ). Uzyskane wyniki badań doświadczalnych dowodzą, że przedstawiony układ kompensacji aktywnej zapewnia krótki czas wyznaczania parametrów prądu wzorcowego (nie przekraczający jednego okresu napięcia sieci), 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.