

ESTYMATOR SEM SIECI O WYSOKIEJ DYNAMICE ODTWARZANIA – ZASTOSOWANIE W UKŁADZIE STEROWANIA RÓWNOLEGŁYM FILTREM AKTYWNYM

Skuteczność kompensacji prądów realizowanej przez równoległy, energetyczny filtr aktywny w decydujący sposób zależy od zastosowanych w układzie sterowania metod wyznaczania i regulacji prądu. W wielu algorytmach regulacji prądu, w tym w zapewniającym bardzo wysoką skuteczność filtracji regulatorze predykcyjnym opartym na modelu obiektu, wymagana jest informacja o zastępczej SEM sieci. Informacja o SEM sieci jest poza tym niezbędna dla każdego z algorytmów wyznaczania prądów kompensujących. Ponadto maksymalizacja skuteczności kompensacji prądów możliwa jest jedynie przy zastosowaniu predykcji SEM sieci. W artykule przedstawiono algorytm i wyniki badań estymatora i predyktora odkształconej i niesymetrycznej SEM sieci, zapewniającego bardzo wysoką precyzję i dynamikę odtwarzania.

1. WSTĘP

Energetyczne równoległe filtry aktywne (EFA) są istotnym środkiem technicznym, pozwalającym na ograniczenie prądów harmonicznych w sieciach zasilających. W przeciwieństwie do filtrów pasywnych mają zdolność natychmiastowej adaptacji do zmian parametrów kompensowanych odbiorów, a także do zmian parametrów linii zasilającej. Filtry aktywne ograniczają ponadto zagrożenie wystąpienia niepożądanych rezonansów.

Sterowanie równoległym filtrem aktywnym jest zagadnieniem rozwijanym w wielu ośrodkach badawczych na świecie. Wyniki badań prezentowane w literaturze [1, 2, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 11] potwierdzają, że dynamika i precyzja kształtowania prądów fazowych, a więc w konsekwencji skuteczność kompensacji, zależą w sposób decydujący od użytych algorytmów wyznaczania prądu zadanego oraz regulacji prądu. Cyfrowa implementacja sterowania stwarza konieczność zastosowania w tych algorytmach predykcji, kompensującej opóźnienia występujące pomiędzy sprzężeniami i sterowaniem, związane z czasem konwersji analogowo-cyfrowej i czasem obliczeń. Wymaganie to dotyczy również algorytmu wyznaczania SEM sieci. W związku z powyższym jakość kompensacji realizowanej przez EFA zależy od precyzji informacji o bieżących i przyszłych próbkach zastępczej SEM sieci, przy czym konieczne jest uwzględnienie odkształceń i niesymetrii SEM.

Proponowany w artykule algorytm pozwala na pracę EFA bez pomiaru napięcia sieci. Algorytmy bezczujnikowe stanowią istotny kierunek rozwoju metod

sterowania EFA. Spośród układów bezczujnikowych najczęściej prezentowane są w literaturze układy sterowania bez pomiaru napięcia sieci. Wynika to z tego, że nie zaleca się rezygnacji z czujników prądów fazowych lub napięcia w obwodzie prądu stałego ze względu na konieczność zapewnienia zabezpieczeń przed przekroczeniem wartości dopuszczalnych tych wielkości. Bezczujnikowe układy sterowania pozwalają na zmniejszenie kosztów i zwiększenie niezawodności EFA. Redukcja kosztów jest znaczna zwłaszcza w EFA małej mocy. W układach średniej i dużej mocy zazwyczaj mierzy się napięcie sieci, które bez względu na wymagania układu regulacji wykorzystywane jest w celu autodiagnostyki w czasie pracy EFA. W takich układach proponowany estymator i predyktor SEM ma również pełne zastosowanie i zapewnia predykcję odkształconej SEM sieci oraz wyznaczanie i predykcję składowej zgodnej podstawowej harmonicznej SEM dla algorytmu wyznaczania prądu zadanego. Estymator ten zapewnia, w przeciwieństwie do rozwiązań proponowanych w literaturze [1, 3], wysoką precyzję odtwarzania i predykcji odkształconej i niesymetrycznej SEM sieci. Proponowany algorytm estymacji można wykorzystać zarówno w układach EFA, jak i w prostownikach sterowanych z falownikami napięcia przyłączonymi do sieci poprzez dławik lub obwody stanowiące filtry wyższych rzędów, np. LCL.

W artykule przedstawiono wyniki badań uzyskanych dla opracowanego przez autora układu sterowania EFA z obwodem LCL.

2. OPIS MATEMATYCZNY UKŁADU

W układach sterowania przekształtnikami trójfazowymi, pracującymi w sieciach trójprzewodowych, wykorzystuje się zwykle reprezentację prądów i napięć fazowych za pomocą składowych ortogonalnych f_α, f_β wektora chwilowego f , określonych poprzez transformację Clarke. Metoda ta pozwala na redukcję liczby sygnałów przetwarzanych w algorytmie sterowania, a w konsekwencji na skrócenie czasu wykonywania obliczeń w procesorze. Zwykle jednak nie stosuje się reprezentacji wektorów chwilowych $\underline{f} = [f_\alpha \ f_\beta]$ za pomocą wartości zespolonych $\underline{f} = f_\alpha + jf_\beta$. Przy takim zapisie prądy i napięcia fazowe w układzie trójfazowym trójprzewodowym określone są za pomocą odpowiednich sygnałów zespolonych $\underline{f}(t)$. Reprezentacja zespolona pozwala na wykorzystanie w algorytmie sterowania metod przetwarzania sygnałów zespolonych, w szczególności zespolonej transformacji Fouriera zdefiniowanej:

$$\underline{f}(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \underline{F}_n e^{jn\omega t}, \quad \underline{F}_n = \frac{1}{T} \int_0^T \underline{f}(t) e^{-jn\omega t} dt, \quad (1)$$

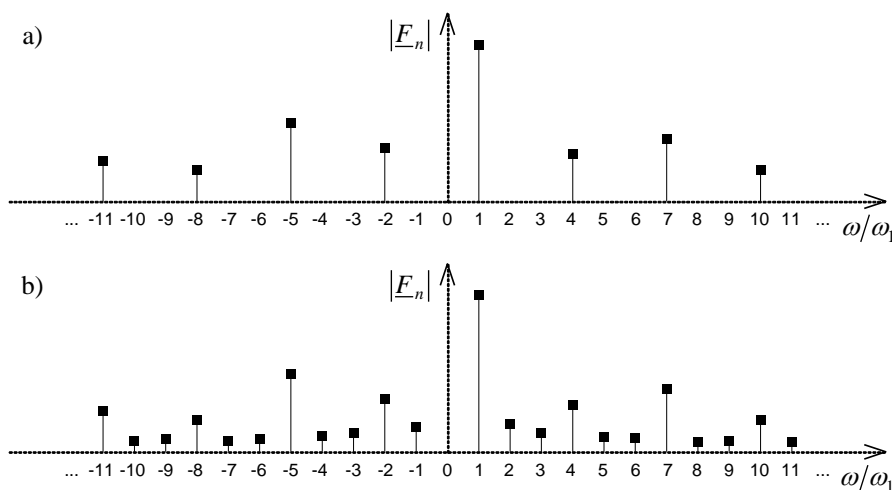
przy czym:

\underline{E}_n – zespolona amplituda,

$e^{jn\omega_1 t}$ – funkcja bazowa n -tej harmonicznej,

wyrazy szeregu dla $n > 0$ oraz $n < 0$ oznaczają harmoniczne zespolone dla częstotliwości odpowiednio dodatnich i ujemnych.

Na rysunku 1 pokazano widma amplitudowe sygnału zespolonego, reprezentującego przebiegi odkształconych napięć lub prądów w układach trójfazowych trójprzewodowych symetrycznym oraz niesymetrycznym. Widma te zawierają pełną informację o prądach lub napięciach we wszystkich trzech fazach.



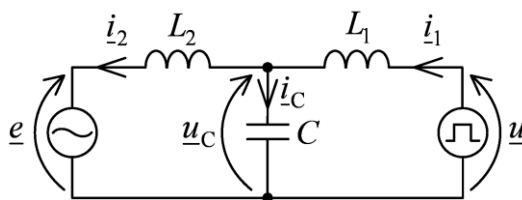
Rys. 1. Widma sygnałów zespolonych reprezentujących przebiegi odkształconych napięć lub prądów fazowych w układzie trójfazowym: a) symetrycznym b) niesymetrycznym

Proponowany algorytm estymacji i predykcji odkształconej SEM sieci oparty jest na reprezentacji częstotliwościowej sygnału zespolonego, reprezentującego SEM.

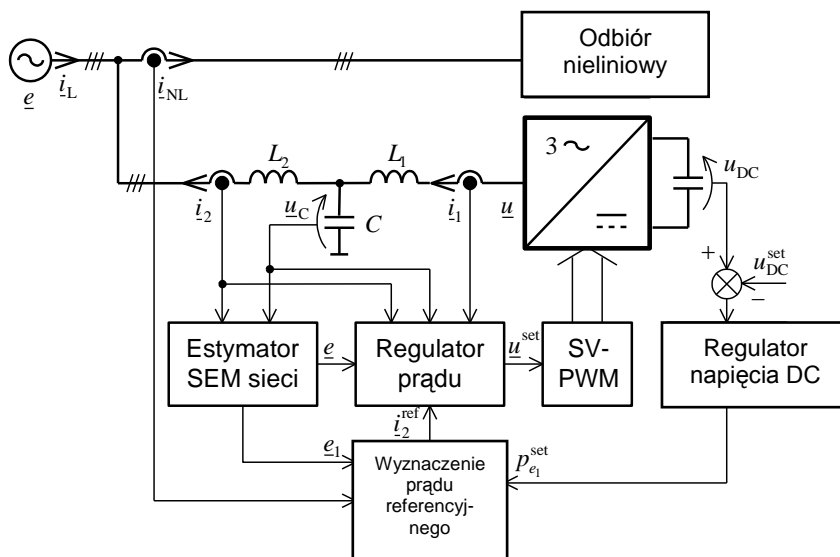
3. UKŁAD STEROWANIA RÓWNOLEGLYM FILTREM AKTYWNYM

Przykładowy układ sterowania EFA, służący do weryfikacji właściwości użytkowych estymatora SEM, sformułowano opierając się na modelu obwodowym EFA, przedstawionym na rysunku 2. Schemat blokowy układu sterowania pokazano na rysunku 3. Pomiary wykonuje się i wyznacza sterowanie co stały krok próbkowania T_s . Chwila ostatnich pomiarów odpowiada próbkom o oznaczeniu

$(k - 1)$. Napięcia określone w n -ym okresie próbkowania oznaczono $(n - 1|n)$ i aproksymowano wartościami średnimi z próbek $(n - 1)$ i (n) . Prądy referencyjne wyznaczone są w predykcyjnym algorytmie opartym na sygnałach określonych w dziedzinie częstotliwości. Próbkę $(k + 1)$ mocy chwilowych wyznaczone są na podstawie predykcji próbek określonych w poprzednim okresie SEM sieci.



Rys. 2. Model obwodowy równoległego filtra aktywnego z obwodem LCL



Rys. 3. Schemat blokowy układu sterowania EFA

W układzie zastosowano nowatorski, opatentowany przez autora niniejszego artykułu regulator prądu opisany równaniami:

$$\underline{u}_c(k-1|k) = \frac{T_S}{C} [\hat{i}_1(k-1) - \hat{i}_2(k-1)] + \underline{u}_c(k-2|k-1), \quad (2)$$

$$\hat{i}_1(k) = \frac{T_S}{L_1} [\underline{u}^{\text{set}}(k-1|k) - \underline{u}_c(k-1|k)] + \hat{i}_1(k-1), \quad (3)$$

$$\hat{i}_2(k) = \frac{T_S}{L_2} [\underline{u}_c(k-1|k) - \tilde{e}(k-1|k)] + \hat{i}_2(k-1), \quad (4)$$

$$\underline{u}_c(k|k+1) = \frac{T_S}{C} [\hat{i}_1(k) - \hat{i}_2(k)] + \underline{u}_c(k-1|k), \quad (5)$$

$$\underline{u}_c(k+1|k+2) = \frac{L_2}{T_S} [i_2^{\text{ref}}(k+2) - \hat{i}_2^{\text{ref}}(k+1)] + \tilde{e}(k+1|k+2), \quad (6)$$

$$\hat{i}_1(k+1) = \frac{C}{T_S} [\underline{u}_c(k+1|k+2) - \underline{u}_c(k|k+1)] + i_2^{\text{ref}}(k+1), \quad (7)$$

$$\underline{u}^{\text{set}}(k|k+1) = \frac{L_1}{T} [\hat{i}_1(k+1) - \hat{i}_1(k)] + \underline{u}_c(k|k+1). \quad (8)$$

Próbki podstawowej harmonicznej SEM sieci \underline{e}_1 wymagane w algorytmie wyznaczania prądów referencyjnych oraz próbki w ogólnym przypadku odkształconej i niesymetrycznej SEM \underline{e} wymagane w regulatorze prądu wyznaczone są w proponowanym algorytmie estymacji i predykcji stanowiącym rozwinięcie metody opisanej w [9].

4. ESTYMATOR I PREDYKTOR SEM SIECI O WYSOKIEJ PRECYZJI I DYNAMICE ODTWARZANIA

Strukturę algorytmu estymatora pokazano na rysunku 4. Wartość zastępczej SEM sieci $\underline{e}_{\text{calc}}(k-2|k-1)$ wyznaczana jest w każdym kroku próbkowania na podstawie równania modelu zgodnie z zależnością:

$$\underline{e}_{\text{calc}}(k-2|k-1) = L \frac{\dot{i}_2(k-2) - \dot{i}_2(k-1)}{T_s} + \underline{u}^{\text{set}}(k-2|k-1). \quad (9)$$

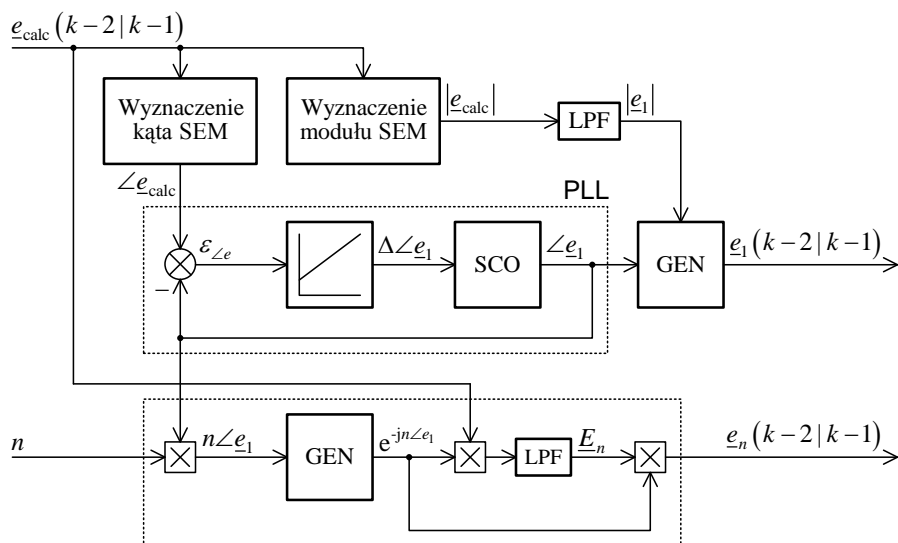
Sygnal zespolony $\underline{e}_{\text{calc}}(t)$, którego próbki wyznaczone są zgodnie z (9), zawiera wszystkie harmoniczne SEM $\underline{e}(t)$. Harmoniczne te wyrażają odkształcenie i niesymetrię przebiegów fazowych zastępczej SEM sieci (rys. 1).

Próbki prądu wyjściowego \dot{i}_2 otrzymywane są poprzez pomiary obarczone błędami. Występujący w zależności (9) iloraz różnicowy mierzonego prądu wyjściowego powoduje zwielokrotnienie błędów pomiarowych. W konsekwencji próbki zastępczej, SEM sieci obliczone zgodnie z równaniem (9) zawierają błędy o charakterze szumu. Algorytm pokazany na rysunku 4 wyznacza poszczególne, wybrane harmoniczne SEM sieci na podstawie próbek $\underline{e}_{\text{calc}}$. Podstawowa harmoniczna zespolona SEM \underline{e}_1 określana jest przy wykorzystaniu chwilowego kąta odtwarzanego za pomocą pętli fazowej (PLL) oraz modułu wyznaczonego na drodze filtracji cyfrowej (LPF). Pozostałe, dowolnie wybrane harmoniczne SEM reprezentujące odkształcenie i niesymetrię odtwarzane są na podstawie obliczonych amplitud zespolonych. Amplitudy te określone są poprzez korelację funkcji bazowej $e^{-jn\angle e_1}$ n -tej harmonicznej z sygnałem $\underline{e}_{\text{calc}}$:

$$\underline{E}_n = \overline{\underline{e}_{\text{calc}} e^{-jn\angle e_1}}, \quad (10)$$

w której składowa stała wyznaczana za pomocą dolnoprzepustowego filtru cyfrowego (LPF). Iloczyn funkcji bazowej danej harmonicznej oraz amplitudy zespolonej, wyznaczonej zgodnie z (10), stanowi odtwarzaną harmoniczną SEM. Odkształcona SEM sieci odtwarzana jest poprzez superpozycję poszczególnych harmonicznych. Predykcja polega na odpowiednim przesunięciu w fazie poszczególnych harmonicznych SEM, a następnie ich superpozycji.

W algorytmie zastosowano uśredniające filtry typu SOI z przesuwym oknem – pozwoliło to na wykonanie obliczeń w czasie zbliżonym do czasu realizacji algorytmu filtrów NOI przy znacznie szybszej odpowiedzi. Rząd użytych filtrów SOI równy jest liczbie okresów impulsowania T_s , przypadających na jeden okres SEM sieci. Istotne jest, aby okres SEM sieci stanowił pełną wielokrotność T_s . Konieczna jest więc synchronizacja okresu próbkowania T_s z okresem SEM sieci. Częstotliwość napięcia sieci zmienia się w bardzo niewielkim zakresie. Zmiany te nie wpływają zatem w istotny sposób na synchronizowany okres T_s . Przy zachowanej synchronizacji stan ustalony na wyjściach filtrów SOI osiągany jest po jednym okresie SEM sieci. Dodatkowo, filtry takie całkowicie tłumią harmoniczne sygnałów o częstotliwościach stanowiących wielokrotność częstotliwości podstawowej harmonicznej SEM sieci.



Rys. 4. Schemat blokowy algorytmu odtwarzania harmonicznych zastępczej SEM sieci

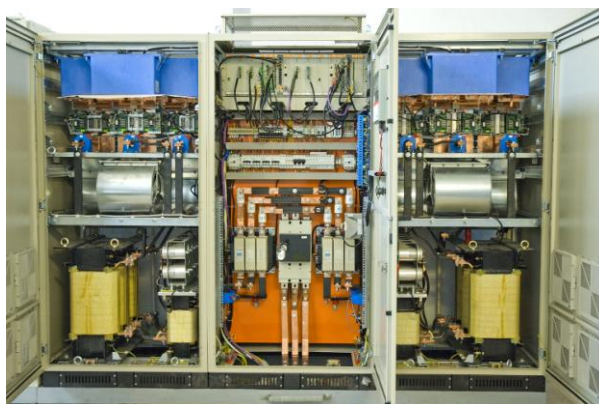
5. WYNIKI BADAŃ

Badania przeprowadzono w programie symulacyjnym PSIM oraz w systemie EFA o mocy 1,2 MVA, współpracującym z napędem maszyny wyciągowej w kopalni (rys 5). Układ sterowania zaimplementowano w postaci procedury napisanej w języku C. Parametry układu podano w tabeli 1.

Tabela 1

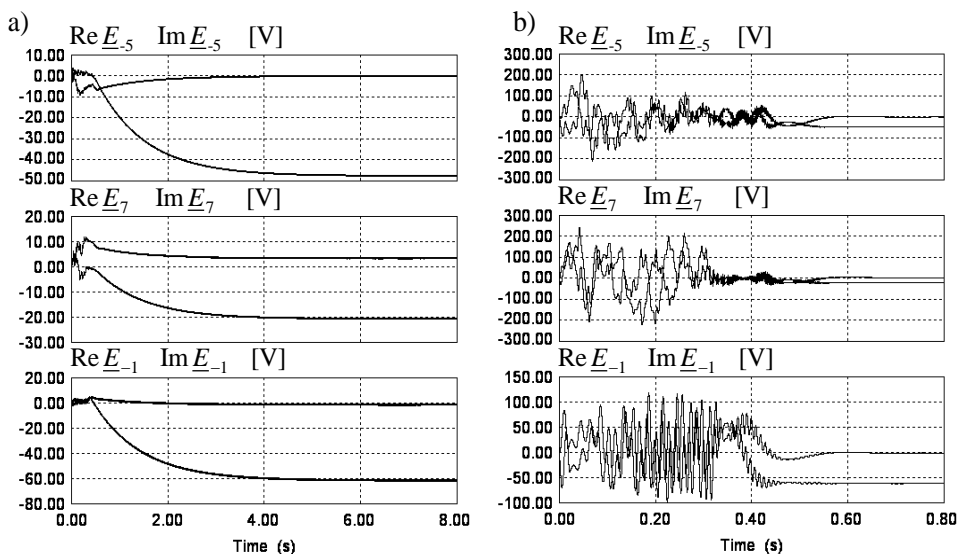
Parametry pojedynczego modułu EFA o mocy 300 kVA

Wielkość	Wartość
Międzyfazowe napięcie sieci	3 x 400 V
Częstotliwość napięcia sieci	50 Hz
Napięcie w obwodzie DC EFA	1000 V
Indukcyjność L_1 obwodu LCL	70 μ H
Indukcyjność L_2 obwodu LCL	35 μ H
Indukcyjność C obwodu LCL	200 μ F
Pojemność w obwodzie DC EFA	5 mF
Częstotliwość PWM	8 kHz
Częstotliwość próbkowania	16 kHz



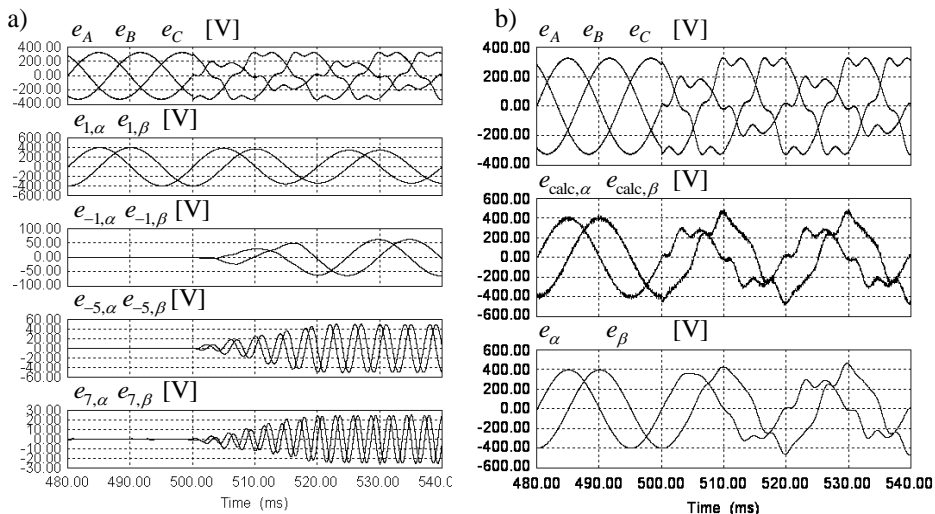
Rys. 5. Moduł EFA z obwodem LCL 2 x 300 KVA systemu o mocy 1,2 MVA sterowanego zgodnie z proponowaną metodą

Na rysunku 6 pokazano przebiegi odtwarzanych amplitud zespolonych harmonicznych SEM sieci o rzędach -5 , 7 oraz -1 w czasie rozruchu układu sterowania, przy zastosowaniu filtrów cyfrowych NOI (a) oraz SOI (b). W przypadku użycia filtrów NOI amplitudy odtwarzane są poprawnie po czasie równym 6 s, natomiast przy wykorzystaniu filtrów SOI – po czasie $0,7$ s. Początkowy etap odtwarzania w przedziale czasu od 0 do $0,7$ s odpowiada synchronizacji PLL i stanowi główny czynnik wpływający na czas odtwarzania amplitud harmonicznych w przypadku zastosowania filtrów SOI, których czas ustalania wyjścia równy jest 20 ms.



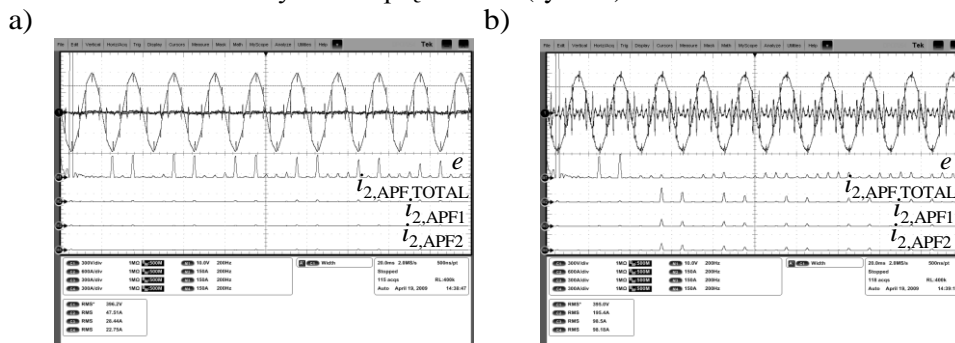
Rys. 6. Rozruch układu. Odtwarzane amplitudy zespolone harmonicznych SEM sieci przy zastosowaniu filtrów typu a) NOI, b) SOI

Na rysunku 7 pokazano przebiegi odtwarzanych harmonicznych SEM sieci (rys. 7a) oraz odkształconej SEM e_α, e_β , stanowiącej superpozycję odtwarzanych harmonicznych (rys. 7b) w czasie skokowej zmiany odkształceń i niesymetrii SEM sieci. Harmoniczne odtwarzane są poprawnie po czasie 20 ms. Przebiegi pokazane na rysunku 7b potwierdzają bardzo wysoką precyzję odtwarzania SEM sieci.



Rys. 7. Odtwarzanie SEM przy skokowej zmianie odkształceń i niesymetrii napięcia sieci: a) odtwarzane harmoniczne SEM sieci, b) odkształcona SEM sieci (superpozycja harmonicznych)

Rysunek 8 zawiera przykładowe pomiary uzyskane w systemie EFA, współpracującym z napędem maszyny wyciągowej w kopalni, sterowanym zgodnie z proponowaną metodą. Pomiary wykonano dla pracy z predykcją prądów zadanych podczas kompensacji selektywnej harmonicznych od 11 do 37. Pokazano przebiegi i widma napięcia sieci i prądów modułów mocy systemu EFA. Na rysunku widoczny jest pośredni, istotny efekt kompensacji w postaci redukcji zawartości harmonicznych w napięciu sieci (rys. 8b).



Rys. 8. Pomiar. Selektywna kompensacja prądów harmonicznych o rzędach od 11 do 37. Przebiegi przy a) wyłączonej i b) włączonej kompensacji. Skala dla prądu EFA wynosi 600A/dz

6. WNIOSKI

Zaproponowany estymator odtwarza poprawnie SEM sieci po czasie równym 20 ms od zmiany SEM. Tak wysoka dynamika odtwarzania harmoniczných zastępczej SEM sieci pożądana jest szczególnie w przypadku pracy EFA w warunkach zmiennej amplitudy, odkształceń lub niesymetrii napięcia sieci, które mogą być spowodowane procesami łączeniowymi, regulacyjnymi, pracą odbiorników niespokojnych lub stanami awaryjnymi w sieci zasilającej. Algorytm został zweryfikowany doświadczalnie i wdrożony w systemie EFA o mocy 1,2 kVA, pracującym w warunkach występowania głębokich zapadów komutacyjnych w napięciu zasilającym. Proponowany estymator jest odpowiedni dla szerokiej grupy urządzeń z falownikiem napięcia pracującym na sieć, w tym systemów EFA i prostowników PWM, zarówno małej, średniej, jak i dużej mocy. Estymator może być ponadto wykorzystywany w układach średniego napięcia z przekształtnikami wielopoziomowymi o dowolnej topologii.

LITERATURA

1. Cichowlas M., *PWM Rectifier with Active Filtering*, rozprawa doktorska, Warszawa 2004.
2. Hamasaki S-i., Kawamura A., *Improvement of Current Regulation of Line-Current-Detection-Type Active Filter Based on Deadbeat Control*, IEEE Trans. Ind. Appl., March/April 2003, vol. 39, no. 2, s. 536–541.
3. Lee D. C., Lim D. S., *AC voltage and current sensorless control of three-phase PWM rectifiers*, IEEE Trans. Power Electron., Nov. 2002, vol. 17.
4. Liserre M., Blaabjerg F., Hansen S., *Design and Control of an LCL-Filter-Based Three-Phase Active Rectifier*, IEEE Trans. Ind. Appl., September/October 2005, vol. 41, no. 5, s. 1281–1291.
5. Malinowski M., Bernet S., *A Simple Voltage Sensorless Active Damping Scheme for Three-Phase PWM Converters with an LCL Filter*, IEEE Trans. Ind. Electron., April 2008, vol. 55, no. 4, s. 1876–1880.
6. Qiu Z., Kong J., Chen G., *A Novel Control Approach for LCL-based Shunt Active Power Filter with High Dynamic and Steady-State Performance*, PESC 2008, Rhodes, 15–19 June 2008, s. 3306–3310.
7. Routimo M., Tuusa H., *LCL Type Supply Filter for Active Power Filter – Comparison of an Active and a Passive Method for Resonance Damping*, PESC 2007, 17–21 June 2007, Orlando, FL, s. 2939–2945.
8. Serpa L.A., Ponnaluri S., Barbosa P.M., Kolar J.W., *A Modified Direct Power Control Strategy Allowing the Connection of Three-Phase Inverters to the Grid Through LCL Filters*, IEEE Trans. Ind. Appl., September/October 2007, vol. 43, no. 5, s. 1388–1400.
9. Wojciechowski D., *Sterowanie przekształtnikiem sieciowym z predykcją siły elektromotorycznej*, rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2005.
10. Wojciechowski D., Strzelecki R., *Sensorless Predictive Control of Three-Phase Parallel Active Filter*, AFRICON 2007, Windhoek, Namibia, 26–28 September 2007.

11. Wu E., Lehn P.W., *Digital Current Control of a Voltage Source Converter with Active Damping of LCL Resonance*, IEEE Trans. Power Electron., September 2006, vol. 21, no. 5, s. 1364–1373.

FAST ESTIMATOR OF GRID EMF – PARALLEL ACTIVE POWER FILTER APPLICATION

Summary

Filtering quality of parallel APF depends mostly on applied methods of reference current calculation and current control. Among others, the MPC current controller requires information about grid emf. Samples of grid emf are also required in any of existing reference current calculation method. Moreover, to maximize filtering effectiveness the predicted samples of grid emf should be derived. For this purpose the fast estimator and predictor of distorted and unbalanced grid emf is proposed, which provides very high precision and dynamics of estimation. Properties of the estimator are verified by simulations and experimental results.