

Daniel WOJCIECHOWSKI
Ryszard STRZELECKI
Bogdan BAŁKOWSKI

RÓWNOLEGŁY FILTR AKTYWNY STEROWANY PREDYKCYJNIE

STRESZCZENIE *W artykule przedstawiono układ sterowania równoległym filtrem aktywnym z predykcyjnym algorytmem wyznaczania prądów kompensujących oraz predykcyjnym regulatorem prądu opartym na modelu obiektu. W układzie zastosowano estymator i predyktor zastępczej siły elektromotorycznej sieci, zapewniający poprawną pracę filtru bez pomiaru i niezależnie od odkształceń napięcia sieci w punkcie przyłączenia. Wymienione algorytmy zapewniają wysoką precyzję regulacji prądów kompensujących oraz dynamikę regulacji ograniczoną jedynie parametrami obwodowymi filtru. W artykule pokazano wyniki badań laboratoryjnych uzyskane dla filtru aktywnego o mocy 100 kVA. Porównano właściwości filtru sterowanego z predykcją oraz bez predykcji prądów kompensujących.*

Słowa kluczowe: *filtry aktywne, jakość energii elektrycznej, metody estymacji, sterowanie predykcyjne*

dr inż. Daniel WOJCIECHOWSKI,
prof. dr hab. inż. Ryszard STRZELECKI

Akademia Morska, Katedra Automatyki Okrętowej
ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia

mgr inż. Bogdan BAŁKOWSKI

C&T Elmech sp. z o.o.
ul. Podmiejska 5c, 83-000 Pruszcz Gdański

1. WSTĘP

W ostatnich latach obserwuje się znaczny wzrost poziomu odkształceń prądów zasilających, w szczególności w sieciach rozdzielczych niskiego napięcia. Związane jest to z coraz większą liczbą przyłączonych do sieci nieliniowych odbiorników energii elektrycznej. Głównymi skutkami występowania wyższych harmonicznych oraz niesymetrii prądów zasilających są odkształcenia napięć zasilających, zwiększenie strat mocy w urządzeniach energetycznych, lub też niepożądane zadziałanie wyłączników automatycznych. Odkształcenia napięć zasilających obniżają jakość energii elektrycznej dostarczanej do odbiorców i w wielu przypadkach powodują nieprawidłową pracę lub nawet niezdatność do pracy odbiorów przyłączonych do sieci, a także powodują występowanie prądów rezonansowych pojemnościowych kompensatorów mocy biernej, prowadzących w niektórych przypadkach do ich uszkodzenia.

Najbardziej efektywnym sposobem ograniczania odkształceń prądów zasilających jest stosowanie równoległych lub szeregowych filtrów aktywnych [3], [4]. Filtry aktywne, w przeciwieństwie do pasywnych filtrów indukcyjno – pojemnościowych, cechuje zdolność adaptacji do zmiennego poziomu kompensowanych odkształceń prądów.

Sterowanie energetycznymi filtrami aktywnymi należy obecnie na świecie do aktualnych zagadnień naukowych w dziedzinie energoelektroniki. Coraz częściej rezultatem badań są wdrożenia wykorzystujące opracowane metody sterowania oraz rozwiązania układowe, przy czym wdrażane są najczęściej filtry równoległe (P-APF, *ang.: Parallel Active Power Filter*). Związane jest to z pewną wadą filtrów szeregowych, w których kompensacja odkształceń prądów zasilających realizowana jest poprzez odpowiednie odkształcenie napięć po stronie odbiorów, co może być zaakceptowane jedynie dla wybranej grupy odbiorników. Dodatkowym problemem jest konieczność stosowania w filtrach szeregowych zabezpieczeń przed prądami zwarciovymi sieci zasilającej, które zamykają się przez transformator filtru przyłączony do sieci szeregowo.

W każdym układzie sterowania P-APF wyróżnić można, niezależnie od zastosowanych metod i algorytmów, nadrzędny blok wyznaczenia prądów kompensujących oraz podrzędny blok regulacji prądów fazowych. Bloki te mają decydujący wpływ na skuteczność kompensacji P-APF.

Stosowana współcześnie cyfrowa implementacja sterowania wymusza konieczność uwzględnienia w algorytmach opóźnień występujących pomiędzy sprzężeniami i sterowaniem, związanych z czasem konwersji analogowo cyfro-

wej i czasem obliczeń. Najwyższą skuteczność filtracji P-APF sterowanego cyfrowo uzyskać można zatem jedynie przy zastosowaniu w układzie sterowania algorytmów predykcyjnych, zarówno do wyznaczania prądów referencyjnych jak i regulacji prądów fazowych, które zapewniają kompensację tych opóźnień.

Algorytmy wyznaczania prądów kompensujących podzielić można na wykorzystujące reprezentację prądów w dziedzinie częstotliwości oraz w dziedzinie czasu. Metody oparte na reprezentacji widmowej pozwalają na selektywną kompensację harmonicznych, cechuje je jednak znaczny czas reakcji na zmianę kompensowanych prądów odbiorów nieliniowych, nie nadają się zatem do kompensacji nieperiodycznych odkształceń prądów zasilających. Metody wyznaczania prądów kompensujących w oparciu o reprezentację prądów w dziedzinie czasu pozwalają teoretycznie (przy pominięciu opóźnień) na natychmiastową reakcję na zmiany kompensowanych prądów oraz są mniej wymagające obliczeniowo i w rezultacie są stosowane częściej. Ważną podgrupę stanowią tu metody oparte na teorii mocy chwilowych [1], do których należy metoda predykcyjna zastosowana w przedstawionym układzie sterowania.

Regulacja prądów fazowych realizowana może być bezpośrednio w układzie z modulatorem nadażnym, lub pośrednio, w układzie stanowiącym kaskadowe połączenie regulatora prądu wypracowującego zadane napięcie oraz modulatora szerokości impulsów determinującego strategię syntezy tego napięcia. Metody pośrednie pozwalają na uzyskanie wyższej dynamiki i precyzji regulacji prądów oraz zapewniają stałą częstotliwość kluczowania tranzystorów, co pozwala na lepsze kontrolowanie ich strat łączeniowych. W prezentowanym układzie sterowania P-APF zastosowano regulator predykcyjny oparty na modelu obiektu (MPC, *ang.: Model-based Predictive Control*), który zapewnia dynamikę regulacji prądów fazowych ograniczoną jedynie parametrami obwodowymi układu. Regulator połączony jest kaskadowo z wektorowym modulatorem szerokości impulsów (SVM *ang.: Space Vector Modulator*).

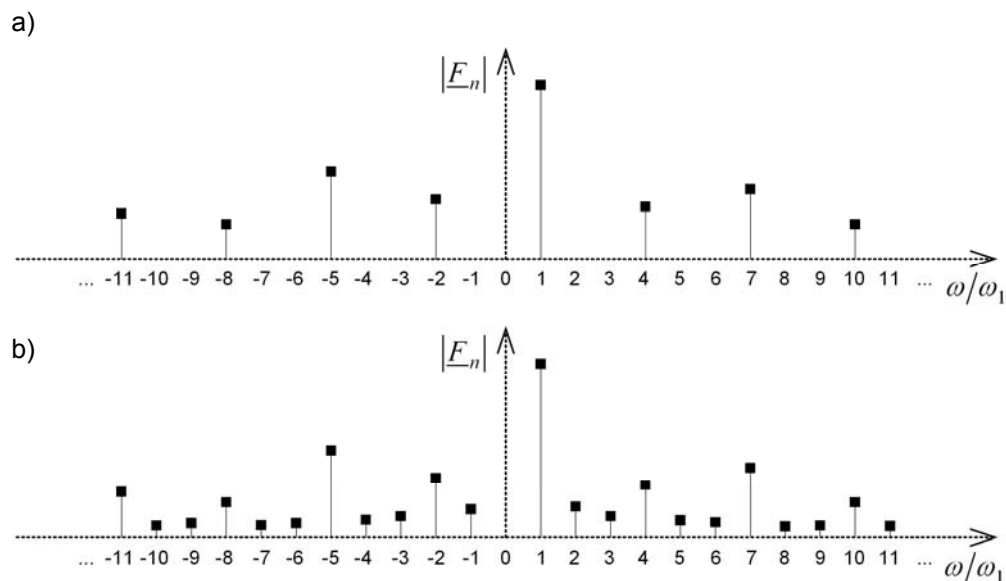
Jednym z istotnych kierunków badań związanych z filtracją aktywną są metody i algorytmy sterowania bezczujnikowego [2]. Metody takie umożliwiają zwiększenie niezawodności przekształtnika oraz redukcję kosztów. Umożliwiają one również odtwarzanie wielkości, których pomiar nie jest możliwy do zrealizowania, a których znajomość wpływa na poprawę właściwości układu sterowania. Przykładem jest zastosowany w proponowanym układzie sterowania P-APF precyzyjny algorytm estymacji i predykcji odkształconej i niesymetrycznej zastępczej SEM sieci [4], rozumianej jako zastępcze napięcie Thevenina widziane od strony zacisków P-APF. Algorytm zapewnia informację o SEM niezbędną dla poprawnej pracy zarówno algorytmu wyznaczania prądów kompensujących jak i regulatora prądów fazowych MPC.

2. OPIS MATEMATYCZNY UKŁADU

W układzie sterowania zastosowano reprezentację zespoloną prądów oraz napięć fazowych układu trójfazowego trójprzewodowego $\underline{f} = f_\alpha + jf_\beta$, gdzie składowe ortogonalne f_α, f_β wektora chwilowego f stanowiącego reprezentację geometryczną \underline{f} określone są poprzez transformację Clarke z inwariantnością mocy. Reprezentacja zespolona pozwala na wykorzystanie w algorytmie sterowania metod przetwarzania sygnałów zespolonych, w szczególności zespolonej transformacji Fouriera zdefiniowanej jako:

$$\underline{f}(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \underline{F}_n e^{jn\omega_1 t}, \quad \underline{F}_n = \frac{1}{T} \int_0^T \underline{f}(t) e^{-jn\omega_1 t} dt, \quad (1)$$

gdzie \underline{F}_n oznacza zespoloną amplitudę, natomiast $e^{jn\omega_1 t}$ – funkcję bazową n -tej harmonicznej. Wyrazy szeregu dla $n > 0$ oraz $n < 0$ oznaczają harmoniczne zespolone dla częstotliwości odpowiednio dodatnich i ujemnych. Na rysunku 1 pokazano przykładowe widma amplitudowe sygnału zespolonego reprezentującego przebiegi odkształconych napięć lub prądów w układach trójfazowych trójprzewodowych symetrycznym oraz niesymetrycznym.



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

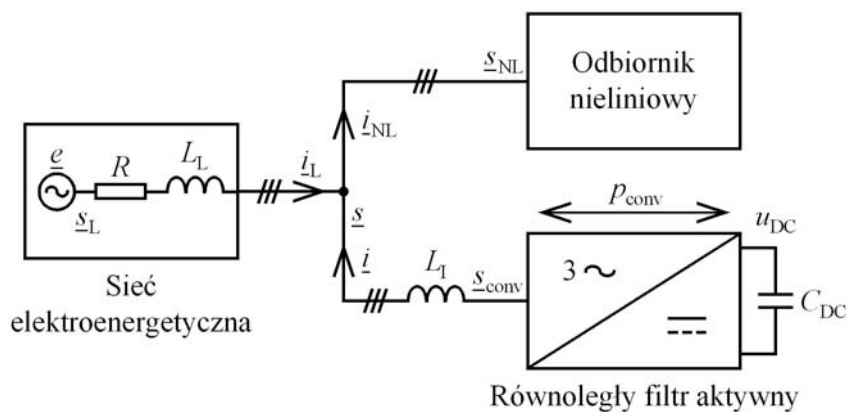
Algorytm sterowania P-APF sformułowany został w oparciu o model liniowy (rys. 2) opisany układem równań:

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i + \frac{1}{L}(u - e), \quad (2)$$

$$\frac{du_{DC}}{dt} = -\frac{1}{C_{DC}} \frac{p_{conv}}{u_{DC}} \quad (3)$$

gdzie $L = L_1 + L_L$ oraz przyjęto $R = 0$. Moce chwilowe czynna, bierna i pozorna określone są zależnościami:

$$p_{conv} = \text{Re}(\underline{u}^* \underline{i}), \quad q_{conv} = \text{Im}(\underline{u}^* \underline{i}), \quad \underline{s}_{conv} = \underline{u}^* \underline{i} = p_{conv} + jq_{conv}. \quad (4)$$



Rys. 2. Model układu z równoległym filtrem aktywnym

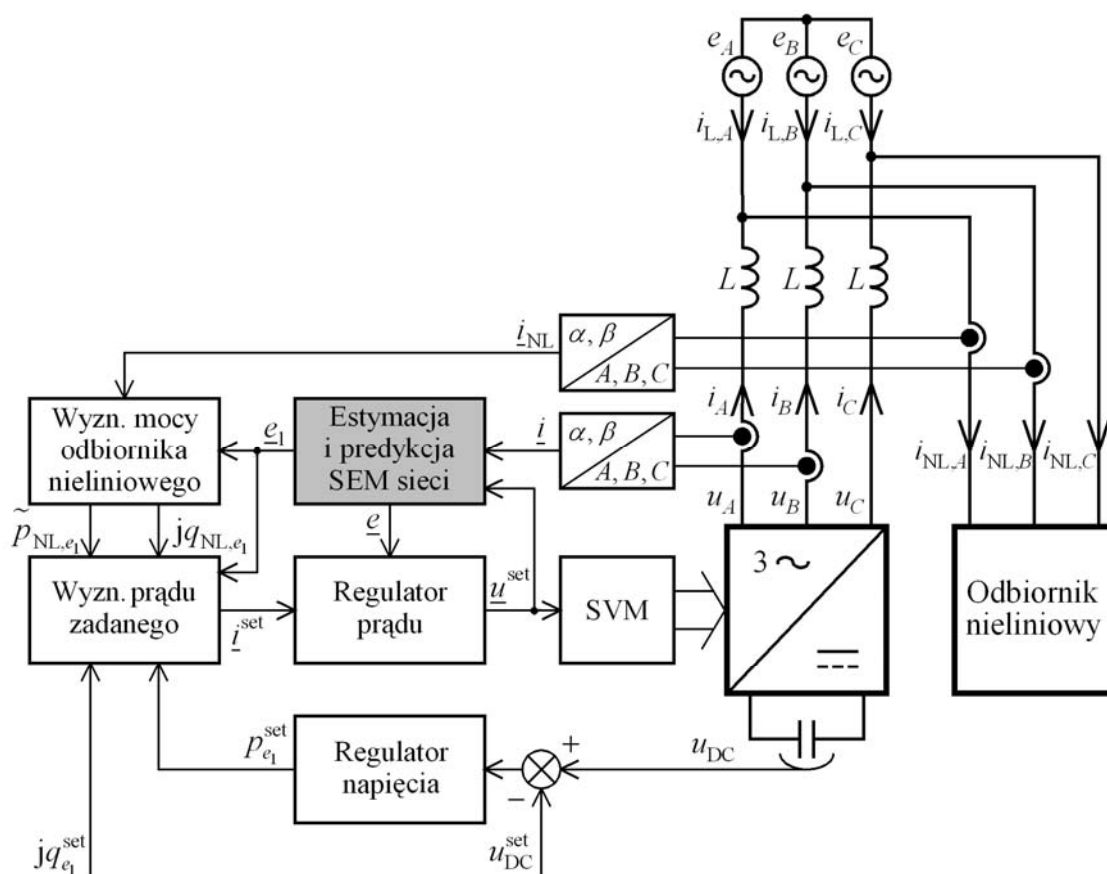
3. UKŁAD STEROWANIA

Na rysunku 3 pokazano schemat blokowy badanego układu sterowania P-APF. Pomiary oraz sterowanie realizowane są co okres próbkowania T_s . Próbkki odpowiadające chwili ostatnich pomiarów oznaczono indeksem $(k - 1)$.

Próbki średnich napięć określone pomiędzy chwilami $(n - 1)$ oraz (n) oznaczono indeksem $(n - 1|n)$. Prądy kompensujące wyznaczone są w algorytmie predykcyjnym opartym na teorii mocy chwilowych [1], zgodnie z zależnością:

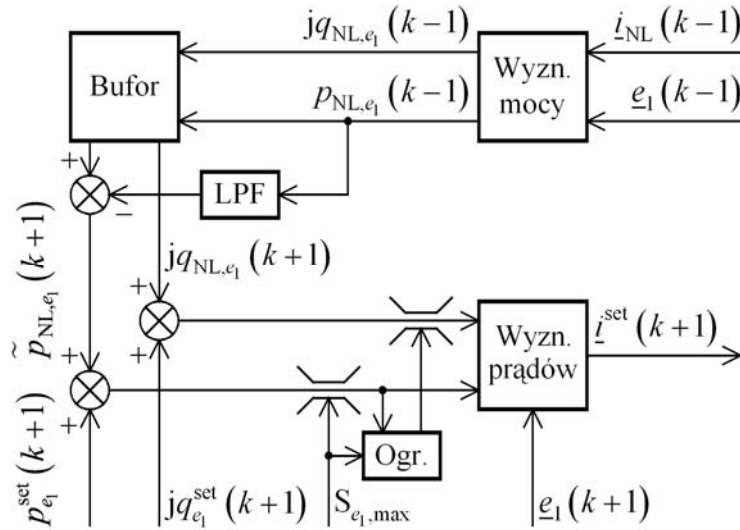
$$\underline{i}^{\text{set}}(k+1) = \left[p_{e_1, \text{lim}}(k+1) + jq_{e_1, \text{lim}}(k+1) \right] / \underline{e}_1^*(k+1), \quad (5)$$

gdzie $p_{e_1, \text{lim}}$ oraz $q_{e_1, \text{lim}}$ oznaczają wartości ograniczone mocy chwilowych, związane z podstawową harmoniczną zastępczej SEM sieci.



Rys. 3. Schemat blokowy układu sterowania równoległym filtrem aktywnym

Próbki $(k + 1)$ mocy chwilowych wyznaczone są na drodze predykcji realizowanej podstawie próbek określonych w poprzednim okresie napięcia sieci, z wykorzystaniem bufora cyklicznego (rys. 4). Liczba próbek bufora cyklicznego równa jest ilorazowi częstotliwości próbkowania $f_s = 1/T_s$ oraz częstotliwości napięcia sieci. Kompensowane składowe chwilowej mocy czynnej wyznaczone są z wykorzystaniem filtra dolnoprzepustowego (LPF).



Rys. 4. Algorytm wyznaczania prądu kompensującego P-APF

Algorytm zastosowanego regulatora prądów typu MPC opisany jest równaniami wynikającymi z zależności (3):

$$\underline{i}(k) = \underline{i}(k-1) + T_s \left[\underline{u}^{\text{set}}(k-1|k) - \underline{e}(k-1|k) \right] / L, \quad (6)$$

$$\underline{u}^{\text{set}}(k|k+1) = L \left[\underline{i}^{\text{set}}(k+1) - \underline{i}(k) \right] / T_s + \underline{e}(k|k+1). \quad (7)$$

Regulator zapewnia pełne wykorzystanie obszaru pracy filtru aktywnego [4] oraz predykcję sterowania, co oznacza że zapewnia maksymalną dynamikę regulacji prądów fazowych możliwą do uzyskania dla danych parametrów obwodowych układu P-APF.

Próbki podstawowej harmonicznej zastępczej SEM sieci \underline{e}_1 , wymagane w algorytmie wyznaczania prądów referencyjnych (zależność (5)), oraz próbki w ogólnym przypadku odkształconej i niesymetrycznej SEM \underline{e} , wymagane w regulatorze prądu (zależności (6) i (7)), wyznaczone są w algorytmie estymacji i predykcji [4]. Wstępna estymata SEM wyznaczana jest zgodnie z zależnością:

$$\underline{e}_{\text{calc}}(k-2|k-1) = L \frac{\underline{i}(k-2) - \underline{i}(k-1)}{T_s} + \underline{u}^{\text{set}}(k-2|k-1). \quad (8)$$

Sygnal zespolony $\underline{e}_{\text{calc}}(t)$ którego próbki wyznaczone są zgodnie z (8), zawiera wszystkie harmoniczne SEM sieci $\underline{e}(t)$. Harmoniczne te wyrażają odkształcenie i niesymetrię przebiegów fazowych zastępczej SEM (rys. 1). Próbkę prądu wyjściowego \underline{i} otrzymywane poprzez pomiary obarczone są błędami. Występujący w zależności (8) iloraz różnicowy mierzonego prądu wyjściowego powoduje zwielokrotnienie błędów pomiarowych. W konsekwencji próbki zastępczej SEM obliczone zgodnie z równaniem (8) zawierają błędy o charakterze szumu, które należy wyeliminować. Podstawowa harmoniczna zespolona SEM sieci wyznaczana jest przy wykorzystaniu chwilowego kąta odtwarzanego za pomocą pętli fazowej, oraz modułu SEM wyznaczanego na drodze filtracji cyfrowej. Pozostałe, dowolnie wybrane harmoniczne SEM reprezentujące odkształcenie i niesymetrię odtwarzane są na podstawie wyznaczonych amplitud zespolonych. Amplitudy te wyznaczone są na drodze korelacji funkcji bazowej $e^{-jn\angle e_1}$ n -tej harmonicznej z sygnałem $\underline{e}_{\text{calc}}$:

$$\underline{E}_n = \overline{\underline{e}_{\text{calc}} e^{-jn\angle e_1}}. \quad (9)$$

Iloczyn funkcji bazowej danej harmonicznej oraz amplitudy zespolonej wyznaczonej zgodnie z (9) stanowi odtwarzaną harmoniczną SEM. Predykcja odkształconej SEM sieci polega na odpowiednim przesunięciu w fazie poszczególnych harmonicznych SEM a następnie ich superpozycji:

$$\underline{e}_n(k-2+l|k-1+l) = \underline{e}_n(k-2|k-1) e^{jn \cdot l \cdot \Delta\angle e_1}, \quad (10)$$

$$\underline{e}(k-2+l|k-1+l) = \sum_m \underline{e}_m(k-2+l|k-1+l), \quad (11)$$

gdzie symbolem l oznaczono horyzont predykcji, natomiast $\Delta\angle e_1$ – inkrementację kąta SEM sieci wyznaczaną w pętli fazowej.

4. WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH

Badania przedstawionego układu sterowania przeprowadzono dla równoległego filtra aktywnego o mocy 100 kVA o parametrach podanych w tab. 1. Pomiary wykonano przy wykorzystaniu oscyloskopu Tektronix DPO 7054. Przed-

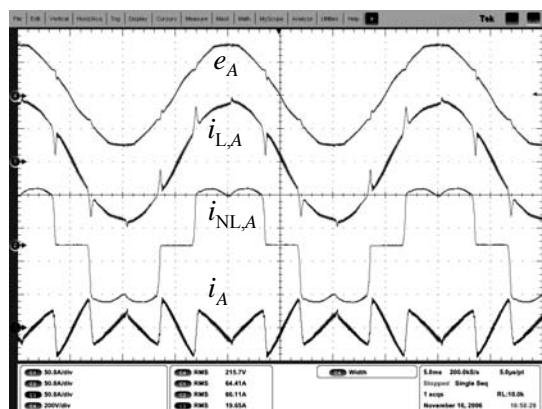
TABELA 1

Podstawowe parametry układu P-APF

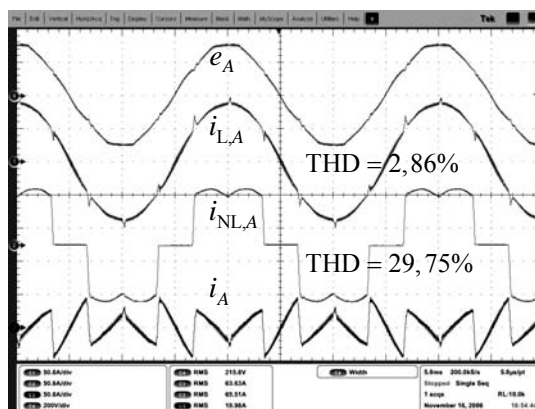
Napięcie zasilające	3x400 V	Induc. dław. sieciowych	1 mH
Napięcie w obwodzie DC	700 V	Częstotl. modulacji SVM	10 kHz
Pojemność w obwodzie DC	5 mF	Częstotl. próbkowania	20 kHz

stawiono wyniki uzyskane dla kompensacji zarówno odbioru nieliniowego o charakterze prądowym (prostownik diodowy obciążony rezystancją) (rys. 5, 7) oraz o charakterze napięciowym (prostownik diodowy obciążony równolegle połączoną rezystancją i pojemnością 1500 μF) (rys. 6). W celu lepszego zobrazowania skuteczności kompensacji P-APF w obydwu odbiorach nieliniowych nie zastosowano dławików sieciowych. Równoległy filtr aktywny bardziej skutecznie kompensuje prądy zasilające odbiorów o charakterze prądowym (por. rys. 5 oraz rys. 6). Na rysunkach 5...7a oraz 5...7b pokazano wyniki uzyskane przy sterowaniu bez predykcji oraz z predykcją prądów kompensowanych. Przy sterowaniu z predykcją P-APF zapewnia znacznie wyższą skuteczność filtracji w stanie ustalonym, natomiast wzrasta czas odpowiedzi na zmianę prądu odbioru nieliniowego (z wartości 100 μs do 20 ms). Wybór algorytmu zależy więc od aplikacji P-APF.

a)



b)

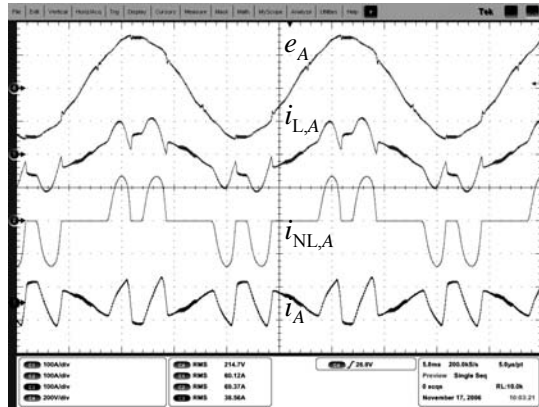


Rys. 5. Stan ustalony. Filtracja odkształceń prądów zasilających prostownika z obciążeniem R przy sterowaniu bez (a) oraz z predykcją (b) prądów

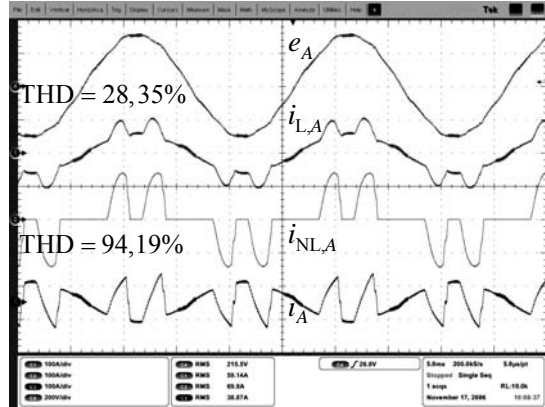
Oznaczenia:

e_A – napięcie sieci, $i_{L,A}$ – sumaryczny prąd zasilający, $i_{NL,A}$ – prąd odbiornika nieliniowego, i_A – prąd filtra aktywnego. Skala: 200 V/dz. oraz 50 A/dz.

a)

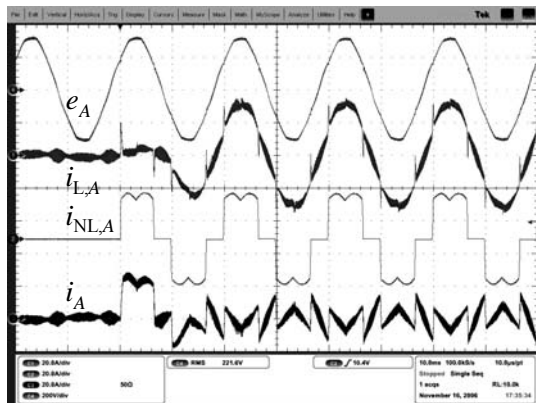


b)

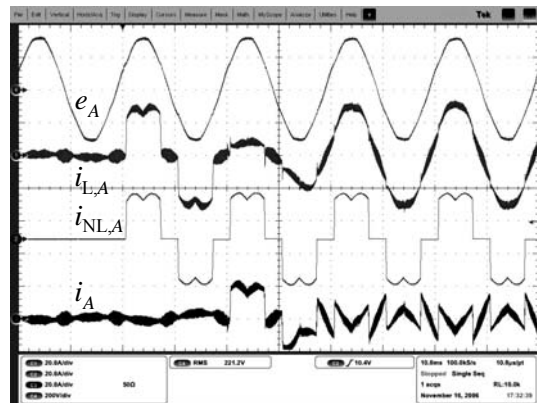


Rys. 6. Stan ustalony. Filtracja odkształceń prądów zasilających prostownika z obciążeniem RC przy sterowaniu bez (a) oraz z predykcją (b) prądów.
Skala, odpowiednio: 200 V/dz. oraz 100 A/dz.

a)



b)



Rys. 7. Załączenie odbioru nieliniowego. Filtracja odkształceń prądów zasilających przy sterowaniu bez (a) oraz z predykcją (b) prądów.
Skala, odpowiednio: 200 V/dz. oraz 20 A/dz.

5. PODSUMOWANIE

Pokazane wyniki badań potwierdzają wysoką skuteczność kompensacji P-APF sterowanego predykcyjnie bez pomiaru napięcia sieci, przyłączanego do sieci o odkształconym napięciu. W układzie możliwy jest wybór strategii stero-

Rys. 8. Filtr aktywny XINUS firmy C&T Elmech o mocy 150 kVA zainstalowany w rafinerii LOTOS S.A.



wania z predykcją lub bez predykcji prądów kompensujących, co pozwala na dostosowanie właściwości filtra do wymagań wynikających z rodzaju kompensowanych odbiorów nieliniowych. Przedstawiony w artykule układ sterowania P-APF zastosowano w rodzinie filtrów aktywnych XINUS o mocach znamionowych 50 kVA, 100 kVA oraz 150 kVA, wdrożonych przez firmę C&T Elmech.

LITERATURA

1. Akagi H., Kanazawa H., Nabae A.: Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits. Proc. IPEC 1983 Int. Conf., Tokyo, 1983.
2. Lee D. C., Lim D. S.: AC voltage and current sensorless control of three-phase PWM rectifiers. IEEE Trans. Power Electron., vol. 17, Nov. 2002.
3. Strzelecki R., Supronowicz H.: Filtracja harmoniczných w sieciach zasilających prądu przemiennego. Wydawnictwo „Adam Marszałek”, Toruń, 1998.
4. Wojciechowski D.: Sterowanie przekształtnikiem sieciowym z predykcją siły elektromotorycznej. Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2005.

Rękopis dostarczono, dnia 27.02.2007 r.

Opiniował: doc. dr hab. inż. Krzysztof Zymmer

PARALLEL ACTIVE POWER FILTER
WITH PREDICTIVE CONTROL

D. WOJCIECHOWSKI, R. STRZELECKI
B. BAŁKOWSKI

ABSTRACT *In the paper the control system of parallel active power filter with predictive calculation of reference currents and model based predictive current control is presented. In the system the estimator and predictor of equivalent grid emf is applied, which ensures correct operation of active filter without measurements of voltage at the point of common coupling, even at presence of distorted voltage. The algorithms mentioned above ensure high precision of current control and control dynamics limited only by circuit parameters of the active filter. There are presented experimental results for 100 kVA active power filter. The active filter control properties in case of control with prediction and without prediction of reference currents has been compared.*