ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2002
Seria: ELEKTRYKA z.182 Nr kol. 1551

Marcin MACIĄŻEK, Marian PASKO

STEROWANIE FILTRAMI AKTYWNYMI PRZY WYKORZYSTANIU TEORII MOCY CHWILOWEJ (p-q)

Streszczenie. Artykuł stanowi kontynuację prac związanych z zagadnieniem jakości energii elektrycznej. W pracy przedstawiona została metoda sterowania energetycznym filtrem aktywnym z wykorzystaniem teorii mocy chwilowej. Metoda ta może być używana do sterowania kompensatorów pracujących w czasie rzeczywistym. Rozważania teoretyczne zostały zilustrowane przykładami symulacji oraz ich wynikami.

HOW TO USE INSTANTANEOUS POWER THEORY FOR ACTIVE POWER FILTERS CONTROL

Summary. This paper is a continuation of the previous works concerning methods of power quality description. The method of active filter control based on instantaneous power theory has been developed. It may be applied to control of compensators working in real-time. The theoretical considerations have been illustrated by an example.

1. WSTĘP

Dynamiczny w ostatnich latach rozwój nowoczesnej technologii uwidocznił się dużym nasyceniem urządzeń służących do wytwarzania i przekształcania energii elektrycznej. Przy przekazywaniu i przetwarzaniu energii elektrycznej z konwencjonalnych źródeł istotną rolę odgrywają wszelkie układy energoelektroniczne. Za pomocą układów energoelektronicznych można pozyskiwać energię elektryczną o regulowanym napięciu, prądzie, częstotliwości itp. Szacuje się, że w krajach wysoko rozwiniętych około 70% produkowanej energii elektrycznej przekształca się przy użyciu układów energoelektronicznych [9]. Niestety, układy te oprócz zalet mają wiele wad, przede wszystkim ze względu na swój nieliniowy charakter, co w istotny sposób wpływa na wzrost odkształceń napięć i prądów. Fakt ten spowodował konieczność nowego spojrzenia na zagadnienia związane z jakością energii elektrycznej. Jakość energii i sposoby jej poprawiania stają się zagadnieniami bardzo aktualnymi tak z punktu widzenia poznawczego, ale przede wszystkim jako problem techniczny i ekonomiczny. Stosowanie dotychczasowych technik poprawiania jakości energii elektrycznej za pomocą statycznych czy rotacyjnych kompensatorów (układów modyfikujących) jest niewystarczające. Rozwiązanie tego problemu, oprócz dotychczasowych technik, wymaga zastosowania układów potrafiących ocenić energetyczny stan układu w czasie rzeczywistym (czyli z jak najmniejszym opóźnieniem). Celem tej publikacji jest przedstawienie metody

sterowania filtrem aktywnym wykorzystującej wektorową teorię mocy chwilowej. Teorię tę po raz pierwszy opublikował H. Akagi w 1983 r. na konferencji w Tokyo [1].

Rozważania teoretyczne zostały poparte przykładami symulacji układów sterujących. Artykuł ten stanowi rozwinięcie pracy [6].

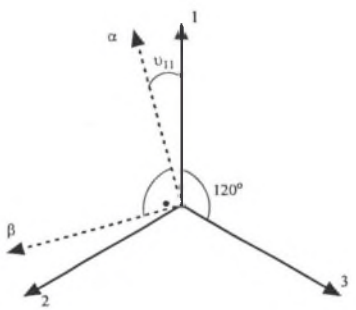
2. TEORIA MOCY CHWILOWEJ (p-q)

Teoria mocy chwilowej zaproponowana przez Akagiego może być stosowana tylko do analizy układów trójfazowych, zatem nie ma ona cech ogólnej teorii mocy, ale charakteryzuje się wieloma zaletami[1],[2],[10],[5]. Teoria ta bazuje na skalarnej transformacji napięć fazowych $[u_{L1},u_{L2},u_{L3}]^T$ oraz prądów obciążenia $[i_{oL1},i_{oL2},i_{oL3}]^T$ z trójfazowego układu naturalnego ***1-2-3*** do układu współrzędnych prostokątnych ***α-β-0***. Transformację tę przeprowadza się przeliczając wartości chwilowe według wzoru:

$$\begin{bmatrix} F_\alpha \\ F_\beta \\ F_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\upsilon_{11} & \cos\upsilon_{12} & \cos\upsilon_{13} \\ -\sin\upsilon_{11} & -\sin\upsilon_{12} & -\sin\upsilon_{13} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}, \tag{1}$$

gdzie:

υ_{11} - kąt przesunięcia pomiędzy osią **1** naturalnego układu trójfazowego a osią **α** układu prostokątnego (rys.1),



Rys. 1. Transformacja układu 1-2-3 do α–β–0
Fig. 1. Transformation of a coordinate system from a-b-c to α–β–0

υ_{12} – kąt przesunięcia pomiędzy osią **2** naturalnego układu trójfazowego a osią **α** układu prostokątnego,

υ_{13} – kąt przesunięcia pomiędzy osią **3** naturalnego układu trójfazowego a osią **α** układu prostokątnego.

W przypadku gdy osie **1** i **α** się pokrywają, tzn. gdy $\upsilon_{11} = 0$, to macierz transformacji przyjmuje postać

$$\begin{bmatrix} F_\alpha \\ F_\beta \\ F_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos\frac{4}{3}\pi & \cos\frac{2}{3}\pi \\ -\sin 0 & -\sin\frac{4}{3}\pi & -\sin\frac{2}{3}\pi \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}, \tag{2}$$

czyli

$$\begin{bmatrix} F_\alpha \\ F_\beta \\ F_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}. \tag{3}$$

Transformacja odwrotna przeprowadzana jest na podstawie danych z układu ***α-β-0*** w następujący sposób:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_\alpha \\ F_\beta \\ F_0 \end{bmatrix}. \tag{4}$$

2.1. Definicje mocy - czynnej i urojonej

Dla układu trójfazowego o napięciach fazowych $[u_{L1} \quad u_{L2} \quad u_{L3}]^T$ i prądach fazowych $[i_{oL1} \quad i_{oL2} \quad i_{oL3}]^T$ moc chwilowa [11], wyrażona przez chwilowe wartości prądów i napięć fazowych, w układzie ***1-2-3*** może być zapisana:

$$p = u_{L1} i_{oL1} + u_{L2} i_{oL2} + u_{L3} i_{oL3}. \tag{5}$$

Po przetransformowaniu napięć i prądów fazowych z układu naturalnego ***1-2-3*** do układu współrzędnych prostokątnych ***α-β-0*** według wzoru (3) moc chwilowa, ze względu na ortogonalność transformacji [7], zachowuje niezmienniczość formy przy posłużeniu się napięciami i prądami w nowym układzie współrzędnych, tzn.

$$p = u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta + u_0 i_0. \tag{6}$$

Ze względu na to, że w większości przypadków przekazywanie energii odbywa się z symetrycznego źródła napięcia za pomocą linii trójprzewodowej, to w macierzy transformacji można pominąć elementy u_0, i_0, a także chwilową moc składowej zerowej.

Jeżeli przez p_α i p_β oznaczymy chwilowe moce w osiach α i β, to moc chwilową można zapisać

$$p = p_\alpha + p_\beta = u_\alpha i_{\alpha p} + u_\alpha i_{\alpha q} + u_b i_{\beta p} + u_b i_{\beta p} = p_{\alpha p} + p_{\alpha q} + p_{\beta p} + p_{\beta q}, \tag{7}$$

gdzie:

$p_{\alpha p}$ – chwilowa moc czynna w osi α,

$p_{\alpha q}$ – chwilowa moc reaktancyjna w osi α,

$p_{\beta p}$ – chwilowa moc czynna w osi β,

$p_{\beta q}$ – chwilowa moc reaktancyjna w osi β.

Przy takiej dekompozycji suma składowych [1]

$$p_{\alpha q} + p_{\beta q} = 0. \tag{8}$$

Składowe te (nazywane chwilowymi mocami reaktancyjnymi) znoszą się wzajemnie i nie uczestniczą w przekazywaniu energii ze źródła do odbiornika. Suma pozostałych dwóch składowych (zwanych chwilowymi mocami czynnymi)

$$p = p_{\alpha p} + p_{\beta p}, \tag{9}$$

jest zgodna z typową interpretacją mocy chwilowej stosowaną w obwodach trójfazowych, a jej wartość średnia jest mocą czynną P.

Zupełnie inne podejście należy natomiast zastosować do mocy biernej. Konwencjonalna moc bierna jest definiowana w dziedzinie częstotliwości i jako taka nie może być w żaden sposób porównywana z wartościami otrzymywanymi w dziedzinie czasu. Autorzy teorii mocy chwilowej [1] wprowadzili zupełnie nowe pojęcie - *chwilowej mocy urojonej* (jednostka tej mocy z analogii do *var* została oznaczona jako *vai*, czyli wolt-amper-urojony). Chwilową moc urojoną wyliczamy korzystając ze wzoru [1],[3]

$$q = u_\alpha i_\beta - u_\beta i_\alpha, \tag{10}$$

wartości określonej wzorem (10) nie należy utożsamiać z konwencjonalnym rozumieniem pojęcia mocy biernej znanym z elektrotechniki.

3. ALGORYTM STEROWANIA

W tej części pracy opisany zostanie algorytm sterowania filtrem aktywnym przedstawiony na rys.2.

Pobrane chwilowe wartości prądów i napięć fazowych są poddawane transformacji z układu trójfazowego naturalnego do układu prostokątnego wg wzoru (11) (wykorzystano założenie upraszczające, że przekazywanie energii odbywa się z symetrycznego źródła napięcia za pomocą linii trójprzewodowej) .

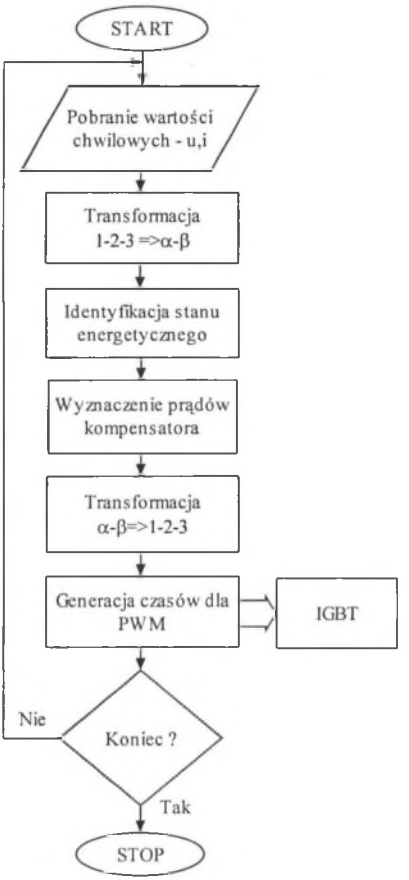
$$\begin{bmatrix} F_\alpha \\ F_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{L1} \\ F_{L2} \\ F_{L3} \end{bmatrix}. \tag{11}$$

Następnie identyfikowany jest stan energetyczny układu, wymaga to wyznaczenia wartości chwilowych mocy występujących w układzie, tzn:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ -u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, \tag{12}$$

gdzie:

$\bar{p}$ – składowa stała chwilowej mocy czynnej - odpowiada wartości chwilowej mocy czynnej w układzie trójfazowym - jest związana z energią przekazywaną ze źródła do odbiornika w jednostce czasu.

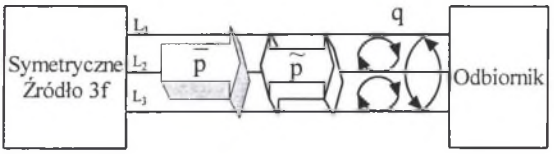


Rys. 2. Algorytm sterowania filtrem aktywnym
Fig. 2. Flow chart of the algorithm for active power filter control

Składowa prądu związana ze składową stałą chwilowej mocy czynnej odpowiada wartości chwilowej konwencjonalnie rozumianego prądu czynnego [4], czyli prądu o minimalnej wartości skutecznej zapewniającej zadaną moc czynną odbiornika (zaproponowanego przez Fryzego).

$\tilde{p}$ - składowa zmienna chwilowej mocy czynnej - jest związana z wymianą energii występującą pomiędzy źródłem a odbiornikiem w jednostce czasu.

q - chwilowa moc urojona - nie uczestniczy w przekazywaniu ani w wymianie energii pomiędzy źródłem i odbiornikiem, związana jest z wymianą energii pomiędzy fazami odbiornika. Odpowiada za występowanie dodatkowych niekorzystnych składowych prądu. W przypadku gdy mamy do czynienia z trójfazowym symetrycznym sinusoidalnym układem napięć i prądów, to wartość składowej stałej chwilowej mocy urojonej jest równoważna tradycyjnie rozumianej mocy biernej. Dodatkowo składowe zmienne chwilowej mocy czynnej i urojonej związane są ze składową symetryczną kolejności przeciwnej prądu [5].



Rys. 3. Ilustracja składowych mocy w teorii mocy chwilowej
Fig. 3. Illustration of power decomposition for instantaneous power theory

Główną zaletą współrzędnych prostokątnych jest możliwość prostego zapisu równań wynikowych dla prądów kompensujących. Prąd źródła układu przed włączeniem filtra aktywnego, przetransformowany do układu α-β, można zapisać w postaci:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \begin{bmatrix} u_\alpha & -u_\beta \\ u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix}. \tag{13}$$

Z zależności tej można także wyznaczyć prądy kompensatora, eliminujące niekorzystne składowe (wybrane lub wszystkie) poza składową stałą chwilowej mocy czynnej. Otrzymane w ten sposób prądy kompensatora należy następnie przetransformować z układu prostokątnego do układu trójfazowego naturalnego.

$$\begin{bmatrix} i_{1k} \\ i_{2k} \\ i_{3k} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha k} \\ i_{\beta k} \end{bmatrix}. \tag{14}$$

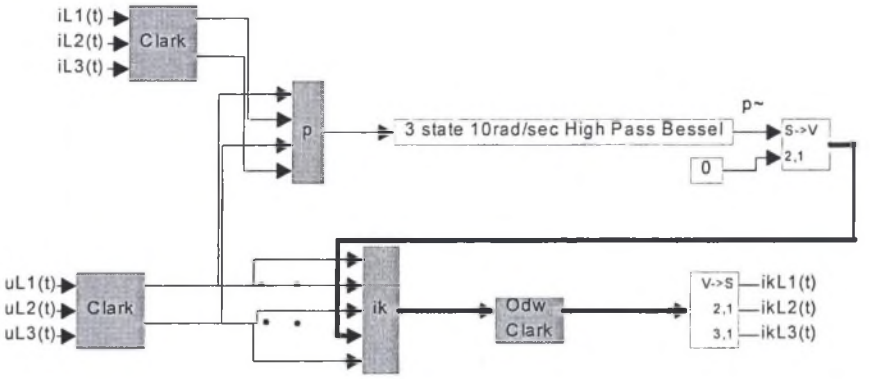
W dalszej części pracy opisane zostaną przykładowe algorytmy eliminujące poszczególne składowe prądu źródła.

3.1. Eliminacja składowej zmiennej chwilowej mocy czynnej

Prądy kompensatora należy wyznaczyć z zależności:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha k} \\ i_{\beta k} \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \begin{bmatrix} u_\alpha & -u_\beta \\ u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{15}$$

Schemat blokowy algorytmu sterowania wraz z wynikami symulacji został przedstawiony na rys. 4 i 5.

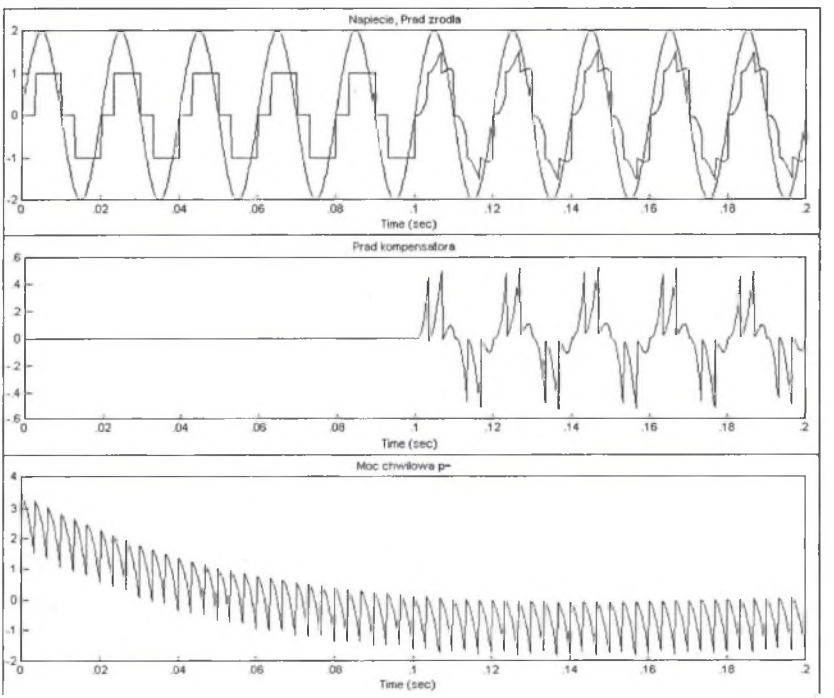


Rys. 4. Algorytm sterowania filtrem aktywnym do eliminacji składowej zmiennej chwilowej mocy czynnej

Fig. 4. Flow chart of the algorithm of active power filter control for elimination of varying component of instantaneous active power

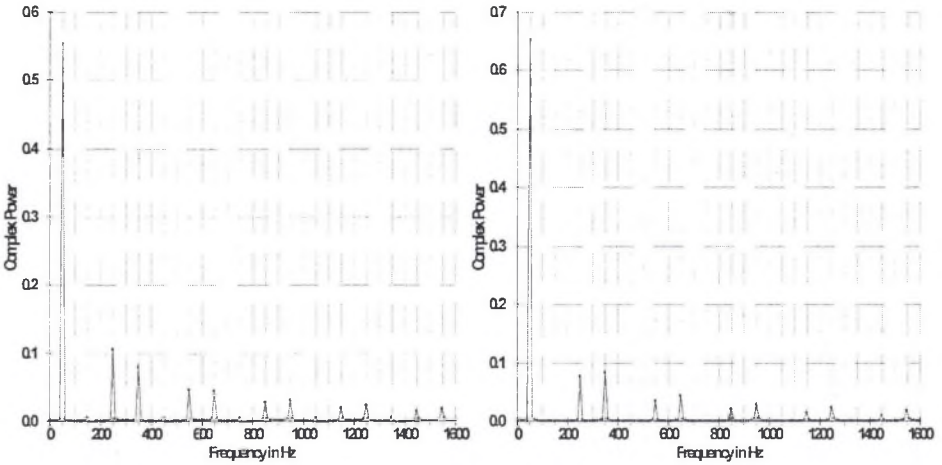
Na rys.5 przedstawiono przebieg napięcia w fazie L_1, prądu źródła w fazie L_1, prądu kompensatora, oraz składowej zmiennej chwilowej mocy czynnej uzyskane w wyniku symulacji algorytmu sterującego z rys.4.

Na rys.6 przedstawiono widma amplitudowe prądu źródła przed załączeniem filtru aktywnego i po jego załączeniu.



Rys. 5. Wyniki symulacji algorytmu z rys.4

Fig. 5. Simulation results for the algorithm from Fig.4



Rys. 6. Widmo amplitudowe prądu źródła przed i po załączeniu filtru
Fig. 6. Amplitude spectrum of the source current before and after switching on active power filter

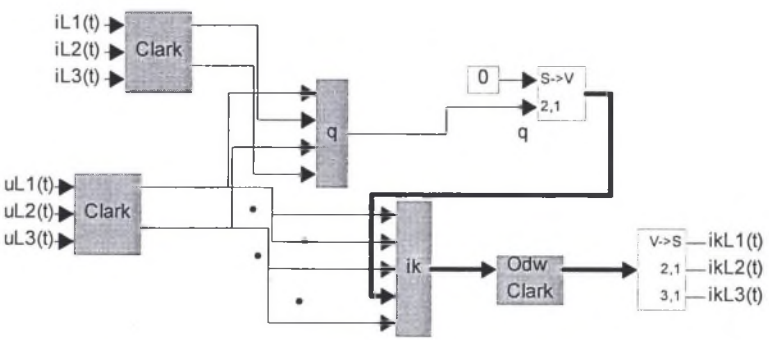
Do odseparowania składowej zmiennej chwilowej mocy czynnej wykorzystano tutaj górnoprzepustowy filtr cyfrowy. Analizując rys.6, można zauważyć, że amplitudy harmonicznych prądu źródła uległy tylko nieznacznemu zmniejszeniu po załączeniu filtru aktywnego.

3.2. Eliminacja chwilowej mocy urojonej

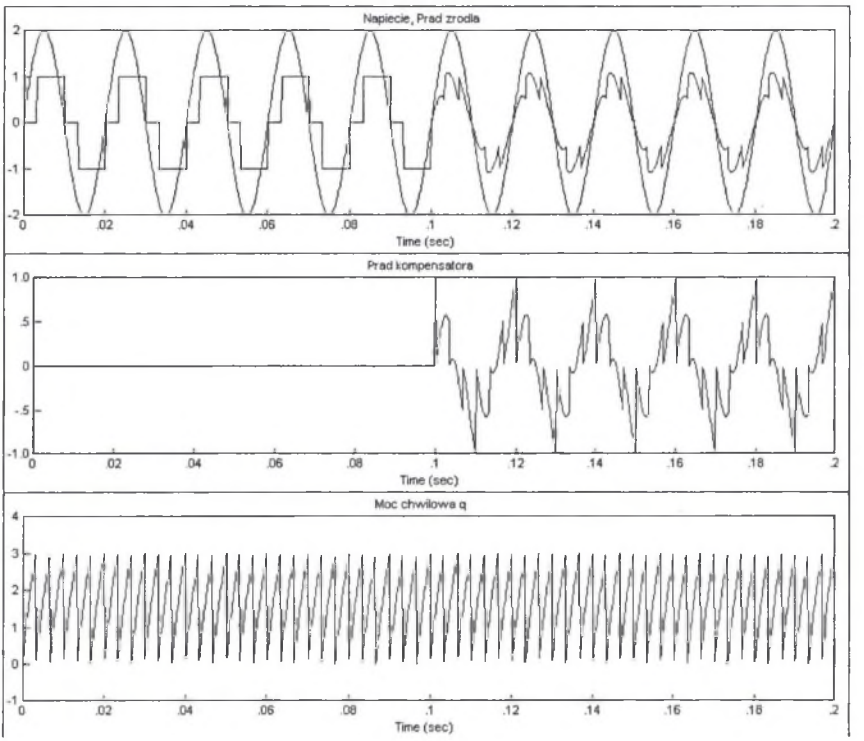
Prądy kompensatora należy wyznaczyć z zależności:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha k} \\ i_{\beta k} \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \begin{bmatrix} u_\alpha & -u_\beta \\ u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix}. \tag{16}$$

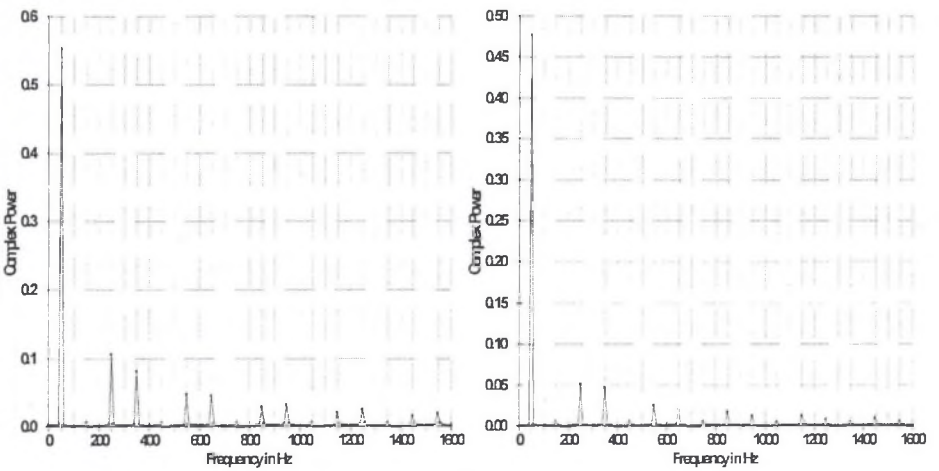
Schemat blokowy algorytmu sterowania do eliminacji chwilowej mocy urojonej przedstawiono na rys.7.



Rys. 7. Algorytm sterowania filtrem aktywnym do eliminacji chwilowej mocy urojonej
Fig. 7. Flow chart of the algorithm of active power filter control for elimination of instantaneous imaginary power



Rys. 8. Wyniki symulacji algorytmu z rys.7
Fig. 8. Simulation results for the algorithm from Fig.7



Rys. 9. Widmo amplitudowe prądu źródła przed i po załączeniu filtru
Fig. 9. Amplitude spectrum of the source current before and after switching on active power filter

Natomiast na rys.8 pokazano przebiegi czasowe napięcia, prądów źródła i kompensatora w fazie L_1, a także przebieg chwilowej mocy urojonej uzyskane w wyniku symulacji algorytmu z rys.7.

Na rys.9 przedstawiono widma amplitudowe prądu źródła przed załączeniem filtru aktywnego i po jego załączeniu.

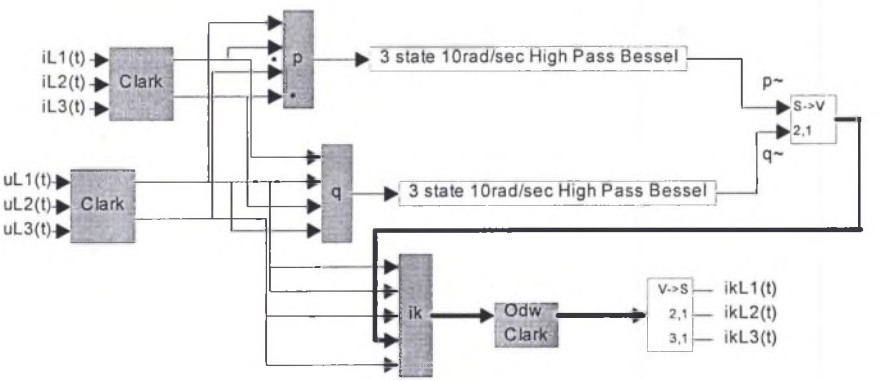
Pozostałe nieskompensowane harmoniczne w prądzie źródła związane są ze składową zmienną chwilowej mocy czynnej. Filtr aktywny sterowany tą wersją algorytmu ma najlepsze właściwości dynamiczne (w układzie nie występują elementy wprowadzające opóźniające analizę sygnału).

3.3. Eliminacja składowych zmiennych chwilowej mocy czynnej i urojonej

Prądy kompensatora należy wyznaczyć z zależności:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha k} \\ i_{\beta k} \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \begin{bmatrix} u_\alpha & -u_\beta \\ u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}. \tag{17}$$

Schemat blokowy algorytmu sterowania do eliminacji składowych zmiennych chwilowych mocy czynnej i urojonej przedstawiono na rys.10.

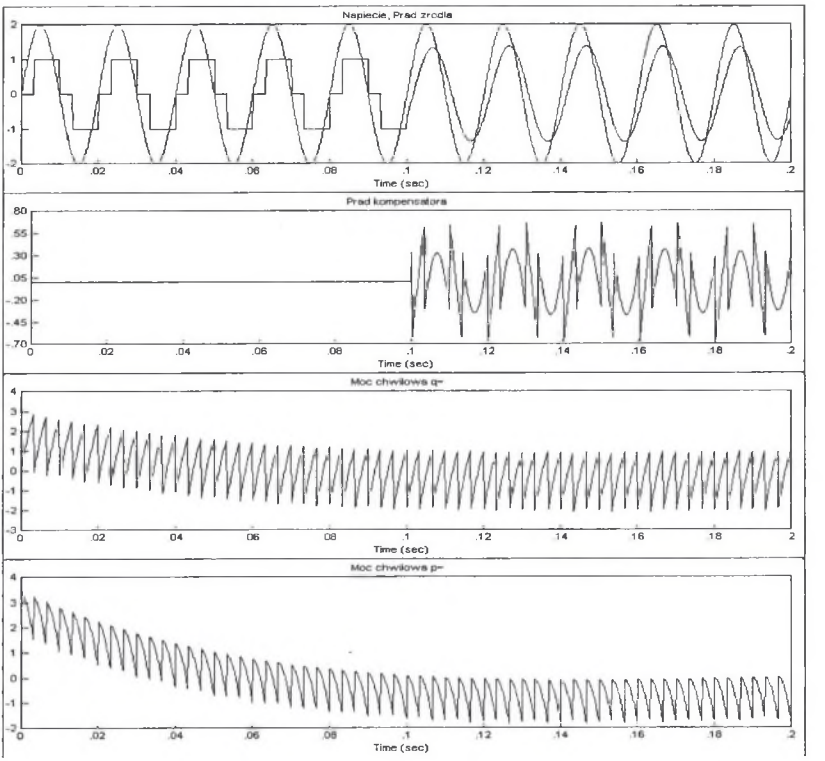


Rys. 10. Algorytm sterowania filtrem aktywnym do eliminacji składowych zmiennych chwilowej mocy czynnej i urojonej

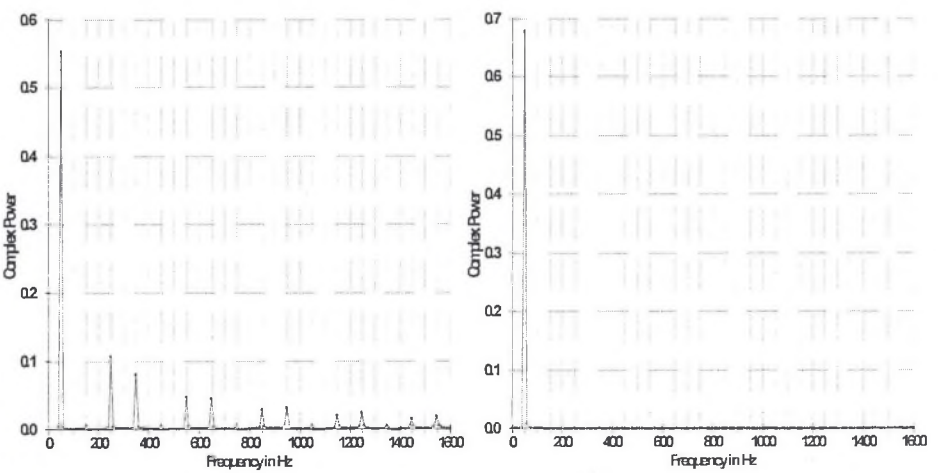
Fig. 10. Flow chart of the algorithm of active power filter control for elimination of varying components of instantaneous active and imaginary powers

Na rys.11 pokazano przebiegi czasowe napięcia, prądów źródła i kompensatora w fazie L_1, a także przebiegi składowych zmiennych chwilowych mocy czynnej i urojonej uzyskane w wyniku symulacji algorytmu z rys.10.

Na rys.12 przedstawiono widma amplitudowe prądu źródła przed załączeniem filtru aktywnego i po jego załączeniu.



Rys. 11. Wyniki symulacji algorytmu z rys.10
Fig. 11. Simulation results for the algorithm from Fig.10



Rys. 12. Widmo amplitudowe prądu źródła przed i po załączeniu filtru
Fig. 12. Amplitude spectrum of the source current before and after switching on active power filter

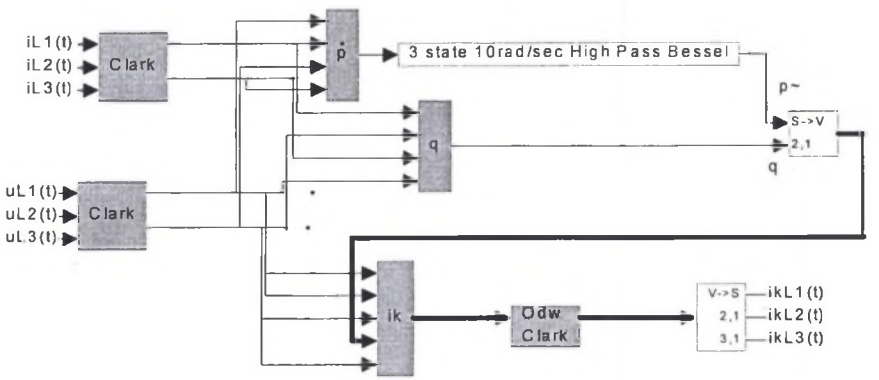
Filtr aktywny sterowany według tej wersji algorytmu nazywany jest również aktywnym filtrem wyższych harmonicznych. Należy jednak zaznaczyć, że dodatkowo eliminowane są składowe kolejności przeciwnej o częstotliwości podstawowej. W przypadku gdy filtr ma za zadanie eliminować jedynie wyższe harmoniczne, należy wyznaczać wartości średnie mocy chwilowych dla zgodnego i przeciwnego kierunku wirowania. Rozwiązanie tego zagadnienia można znaleźć w pracy [8].

3.4. Eliminacja chwilowej mocy urojonej oraz składowej zmiennej chwilowej mocy czynnej

Prądy kompensatora należy wyznaczyć z zależności:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha k} \\ i_{\beta k} \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \begin{bmatrix} u_\alpha & -u_\beta \\ u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \end{bmatrix}. \tag{18}$$

Schemat blokowy algorytmu sterowania do eliminacji chwilowej mocy urojonej oraz składowej zmiennej chwilowej mocy czynnej przedstawiono na rys.13.

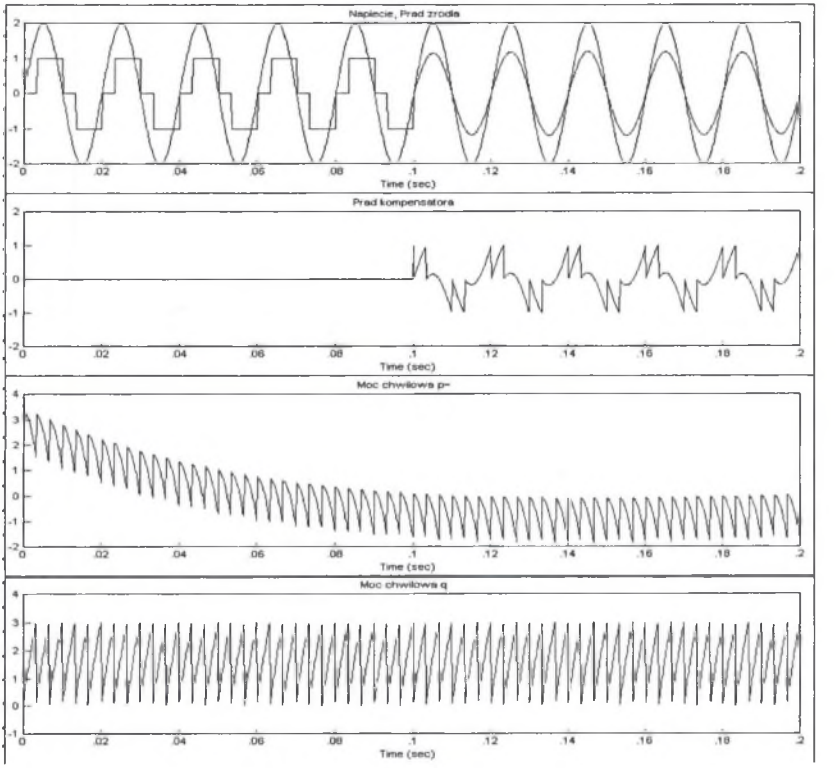


Rys. 13. Algorytm sterowania filtrem aktywnym do eliminacji chwilowej mocy urojonej i składowej zmiennej chwilowej mocy czynnej

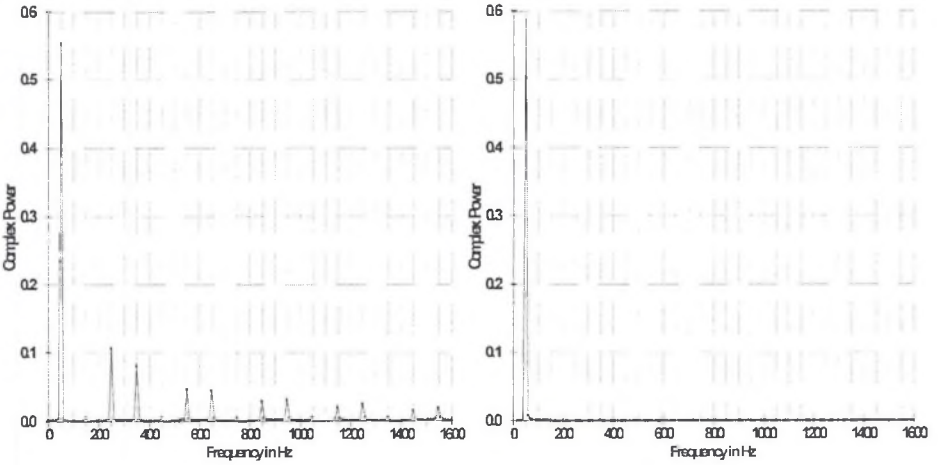
Fig. 13. Flow chart of the algorithm of active power filter control for elimination of instantaneous imaginary power and varying component of instantaneous active power

Na rys.14 pokazano przebiegi czasowe napięcia, prądów źródła i kompensatora w fazie L_1, a także przebiegi składowej zmiennej chwilowej mocy czynnej i chwilowej mocy urojonej uzyskane w wyniku symulacji algorytmu z rys.13.

Na rys.15 przedstawiono widma amplitudowe prądu źródła przed załączeniem filtru aktywnego i po jego załączeniu.



Rys. 14. Wyniki symulacji algorytmu z rys.13
Fig. 14. Simulation results for the algorithm from fig.13



Rys.15. Widmo amplitudowe prądu źródła przed i po załączeniu filtru
Fig.15. Amplitude spectrum of the source current before and after active power filter switching on

4. OGRANICZENIA STOSOWANIA

W celu zilustrowania ograniczeń stosowania teorii mocy chwilowej wykonano symulację układu sterowania z rys.13 przy zasilaniu układu napięciem odkształconym lub niesymetrycznym.

4.1. Zasilanie napięciem odkształconym

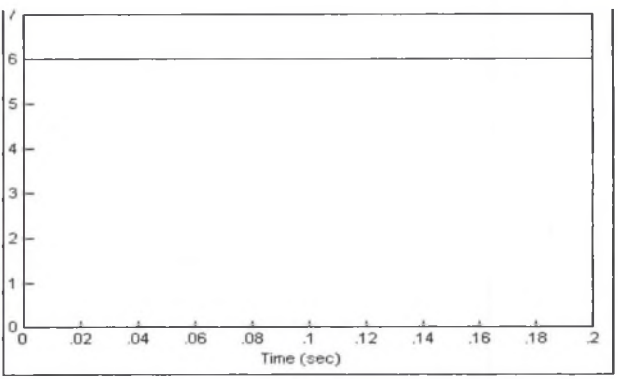
W przypadku gdy odbiornik zasilany jest napięciem odkształconym, w prądzie źródła pozostaną odkształcenia wywołane wyższymi harmonicznymi napięcia zasilającego. Odkształcenia te są spowodowane niepoprawnym wyliczeniem prądów kompensujących. Analizując wzór (18), można zauważyć, że dla układu zasilanego symetrycznym trójfazowym napięciem sinusoidalnym

$$u_\alpha^2 + u_\beta^2 = const. \tag{19}$$

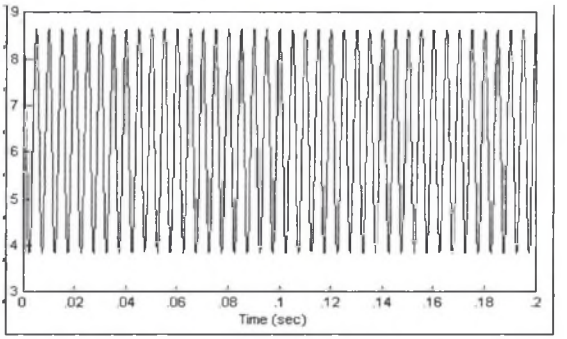
Natomiast dla układu zasilanego napięciem odkształconym

$$u_\alpha^2 + u_\beta^2 \neq const. \tag{20}$$

Zależności te zilustrowano na rys.16 i 17.

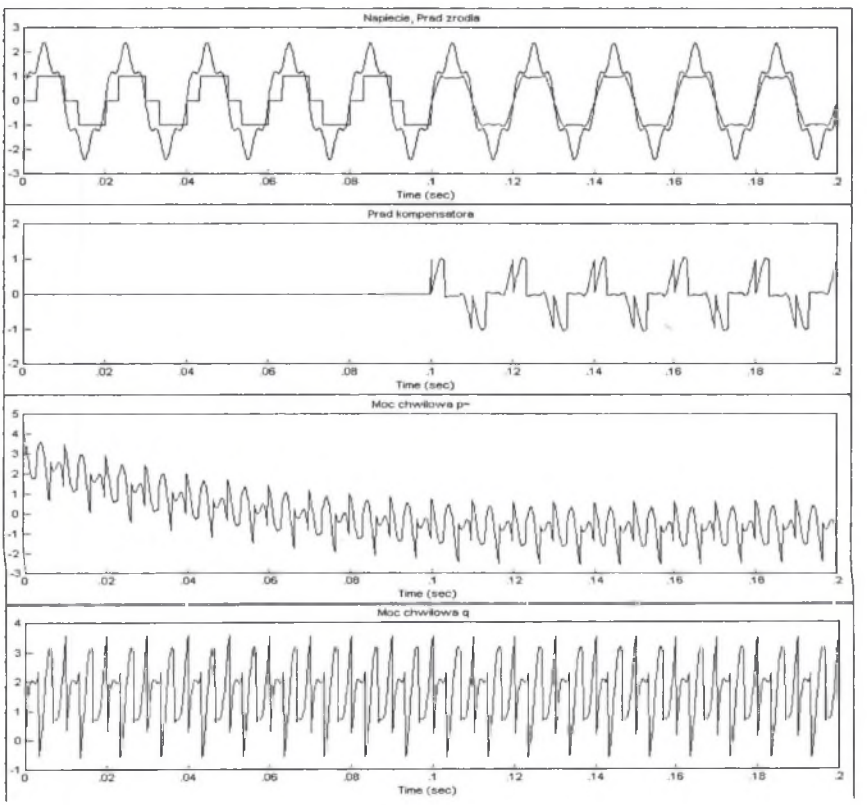


Rys. 16. Wykres funkcji opisanej za pomocą wzoru (19)
Fig. 16. The waveform of function (19)



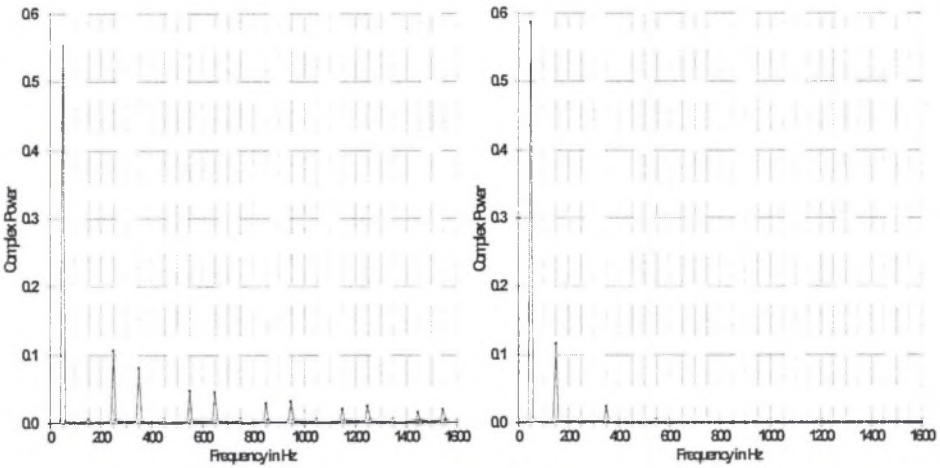
Rys. 17. Wykres funkcji opisanej za pomocą wzoru (20)
Fig. 17. The waveform of function (20)

Algorytm sterujący z rys.13 poddano symulacji przy zasilaniu napięciem odkształconym (zawierającym dodatkowo piątą harmoniczną), otrzymane w wyniku tej symulacji przebiegi czasowe napięcia, prądu źródła i prądu kompensatora w fazie L_1, a także przebiegi składowej zmiennej chwilowej mocy czynnej i chwilowej mocy urojonej pokazano na rys.18.



Rys. 18. Wyniki symulacji algorytmu z rys.13 w przypadku zasilania napięciem odkształconym
Fig. 18. Simulation results of the algorithm from Fig.13 in the case of supply voltage distortion

Na rys.19 przedstawiono widma amplitudowe prądu źródła przed załączeniem filtru aktywnego i po jego załączeniu.

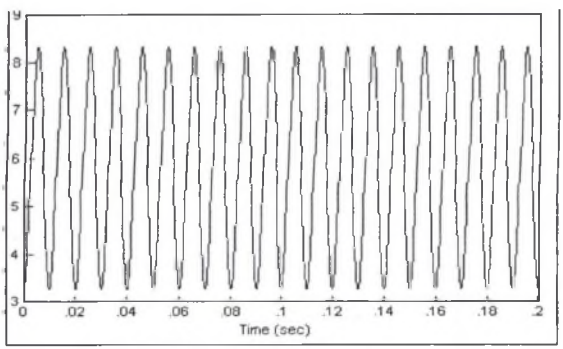


Rys. 19. Widmo amplitudowe prądu źródła przed i po załączeniu filtru
Fig. 19. Amplitude spectrum of the source current before and after switching on active power filter

Analizując rys.18 i 19, można zauważyć, że w wyniku błędnego wyznaczenia prądów kompensujących prąd źródła po włączeniu do układu filtru aktywnego jest dalej silnie odkształcony.

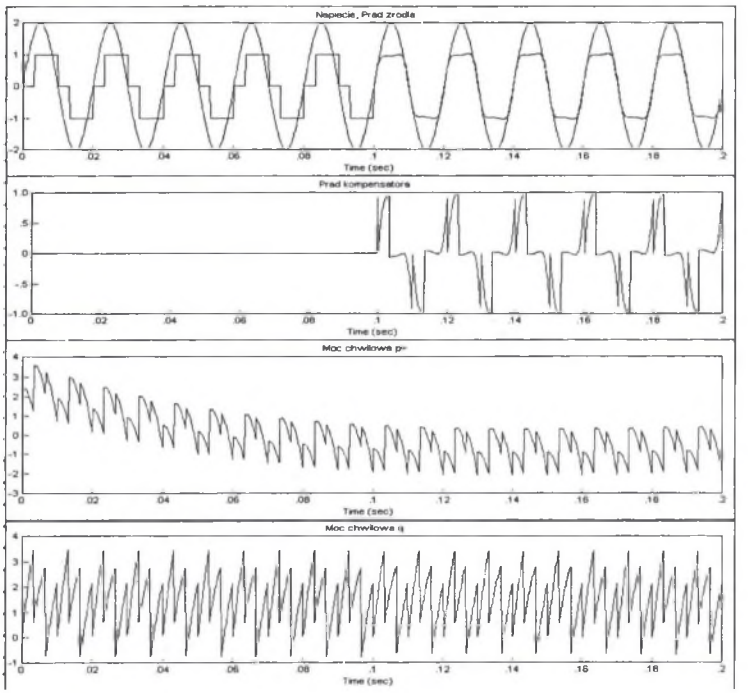
4.2. Zasilanie napięciem niesymetrycznym

Przeprowadzając podobne (jak dla przypadku zasilania napięciem odkształconym) rozważania dla sytuacji, w której układ zasilany jest napięciem niesymetrycznym, udowodniono, że algorytm wykorzystujący teorię mocy chwilowej prowadzi do błędnego wyznaczenia prądów kompensujących (prądy te zawierają dodatkowe składowe związane ze składową przeciwną napięcia zasilania). Na rys.20 zilustrowano zależność ze wzoru (20).



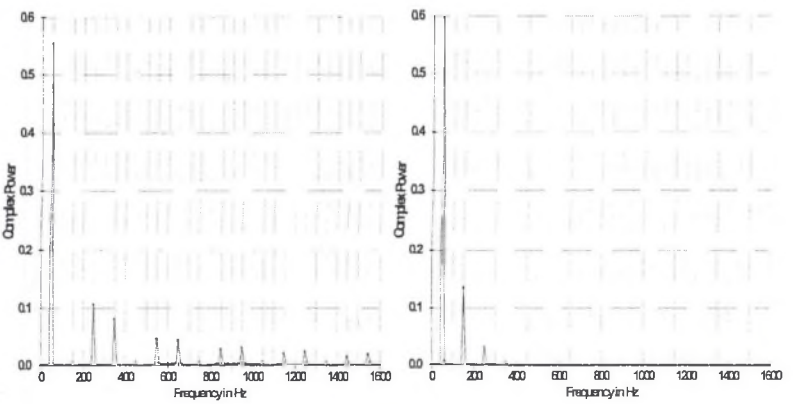
Rys. 20. Wykres funkcji opisanej za pomocą wzoru (20)
Fig. 20. The waveform of function (20)

Natomiast na rys.21 pokazano przebiegi napięcia zasilania, prądu źródła, prądu kompensatora w fazie L_1, a także przebiegi składowej zmiennej chwilowej mocy czynnej i chwilowej mocy urojonej otrzymane w wyniku symulacji algorytmu sterowania z rys.13 w przypadku zasilania układu napięciem niesymetrycznym.



Rys. 21. Wyniki symulacji algorytmu z rys.13 w przypadku zasilania napięciem niesymetrycznym
Fig. 21. Simulation results of the algorithm from Fig.13 in the case of supply voltage unbalance

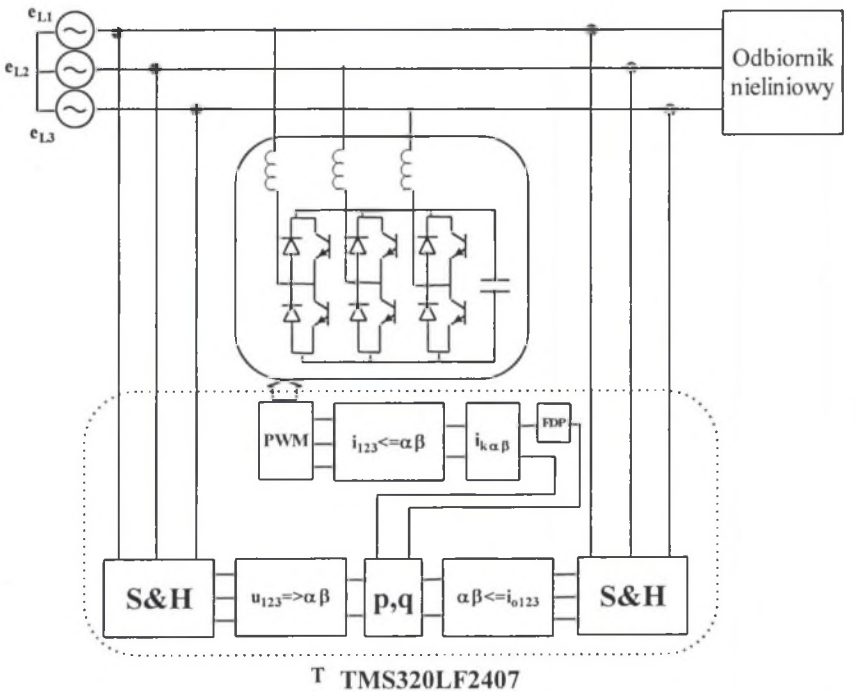
Na rys.22 przedstawiono widma amplitudowe prądu źródła przed załączeniem filtru aktywnego i po jego załączeniu.



Rys. 22. Widmo amplitudowe prądu źródła przed i po załączeniu filtru
Fig. 22. Amplitude spectrum of the source current before and after switching on active power filter

Przeprowadzone symulacje (dla algorytmu sterowania z rys.13) przy zasilaniu układu napięciem odkształconym (zawierającym dodatkowo 20% udział piątej harmonicznej), jak też napięciem niesymetrycznym dowodzą, że ten sposób sterowania nie nadaje się do stosowania w układach pracujących z takimi warunkami zasilania. Główną przyczyną tych ograniczeń jest postać macierzy transformacji stosowana w tej teorii mocy chwilowej.

5. PRZYKŁADOWA REALIZACJA



Rys. 23. Przykładowa realizacja układu sterowania z procesorem sygnałowym TMS320LF2407
Fig. 23. Exemplary realization of the control system based on signal processor TMS320LF2407

Zaproponowano układ sterowania jak na rys.23, zastosowany w układzie procesor sygnałowy TMS320LF2407 wykonuje wszystkie obliczenia związane z wyznaczeniem prądów kompensujących. Układ ten ma wbudowane przetworniki A/C , a także osiem 16-bitowych kanałów PWM (z możliwością awaryjnego wyłączania), co pozwala zminimalizować układ sterujący praktycznie do jednego układu.

6. WNIOSKI

* Wektorowa teoria mocy chwilowej umożliwia budowę efektywnych algorytmów sterowania filtrem aktywnym (kompensatorem aktywnym).
* Dynamika układu sterowania jest silnie związana z rodzajem i długością (dotyczy filtrów cyfrowych) zastosowanego filtru górnoprzepustowego. Wykorzystywanie filtru o szybkiej odpowiedzi pozwoli na śledzenie zmian obciążenia, ale mimo wszystko w układzie mogą powstawać wahania mocy chwilowej. Dlatego filtr powinien być dobierany pod kątem konkretnego zastosowania.
* W zależności od potrzeb układ może pracować jako: aktywny filtr wyższych harmonicznych, kompensator symetryzujący uogólnione obciążenie widziane z zacisków źródła lub kompensator aktywny eliminujący wszystkie niekorzystne składowe mocy chwilowej.
* W przypadku eliminacji składników związanych wyłącznie z chwilową mocą urojoną kompensator nie musi zawierać elementów gromadzących energię (w idealnym przypadku $p_k=0$), a jedynie elementy przełączające.
* Wydajny algorytm sterujący umożliwia zastosowanie kilku kompensatorów małej mocy (dla konkretnego obciążenia lub grupy obciążeń), zamiast centralnego kompensatora zbudowanego z drogich elementów pasywnych. Takie rozwiązanie zapewnia przy tym znacznie lepsze parametry kompensacji.
* Duża szybkość reakcji na zmiany obciążenia (operowanie na wartościach chwilowych) i proste operacje matematyczne powodują, że teoria mocy chwilowej doskonale sprawdza się w obszarze sterowania filtrami aktywnymi.
* Należy jednak pamiętać o wadach i ograniczeniach tej teorii, z których najważniejsze to możliwość zastosowania jedynie w układach trójfazowych, trudność z szybkim wyznaczeniem składowych stałych mocy czynnej i urojonej, generowanie dodatkowych wyższych harmonicznych w przypadku zasilania napięciem odkształconym bądź niesymetrycznym.

LITERATURA

1. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A.: Generalized Theory of the Instantenous Reactive Power in Three-Phase Cirucuits. IPEC'83 Tokyo, Japan 1983, pp. 1375-1386.
2. Afonso J., Couto C., Martins J.: Active Filters with Control Based on the p-q Theory. IEEE Industrial Electronics Newsletter vol.47, no. 3, September 2000.
3. Cristaldi L., Ferrero L., A.: Mathematical Foundations of the Instantaneous Power Concepts: An Algebraic Approach. ETEP Vol.6 No. 5, str. 305-314.
4. Fryze S.: Moc czynna, bierna i pozorna w obwodach o przebiegach odkształconych prądu i napięcia. „Przegląd Elektrotechniczny" Nr 7, str.193-203, Nr 8, str.225-234, 1931 r. oraz Nr 22, str. 673-676, 1932 r.
5. Hanzelka Z.: Zastosowanie wektorowej teorii mocy chwilowej do sterowania energetycznych filtrów aktywnych. Materiały Międzynarodowej Konferencji Jakość Energii Elektrycznej, Spała 1991, str. 111-117.
6. Maciążek M., Pasko M.: Sterowanie trójfazowym filtrem aktywnym przy wykorzystaniu teorii mocy chwilowej. XXV IC-SPETO, Gliwice-Ustroń 2002, str. 303-308.
7. Paszek W.: Stany nieustalone maszyn elektrycznych prądu przemiennego. WNT, Warszawa 1986.

8. Strzelecki R.: Zastosowanie teorii mocy chwilowej do sterowania energetycznych filtrów aktywnych. „Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej" Tom III, 1997, str. 65-74.
9. Strzelecki R., Supronowicz H.: Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
10. Watanabae E. H., Aredes M.: Compensation of Non-Periodic Currents Using the Instantaneous Power Theory. IEEE PES Summer Meeting, Seatle, July 2000, pp. 994-998.
11. Willems J.L.: Mathematical Foundations of the Instantaneous Power Concepts: A Geometrical Approach. ETEP Vol.6 No. 5, str. 299-304.

Wpłynęło do Redakcji dnia 2 czerwca 2002 r.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Kazimierz Mikołajuk

Abstract

The dynamic development of technology has resulted in large number of devices for generation and conversion of electrical energy. Power electronics systems play a significant role in transmission and conversion of energy from conventional sources. These systems enable to obtaining supply with regulation of voltage, current, frequency etc. In high developed countries about 70% of electrical energy is converted by means of power electronics devices. Unfortunately, in spite of many advantages these devices have a lot of disadvantages, e.g. nonlinear characteristic that results in distortion of voltages and currents. This is the answer for the question why a new view point for problems of power quality is required. The most of the solutions that have been applied for power quality improvement become unsatisfactory. So it seems that now the development of systems with on-line identification of the working conditions is very important. The aim of this paper is to propose a method for control of active power filter on the base of instantaneous power theory developed by H. Akagi in 1983. The theoretical considerations have been illustrated by an example.