

Tomasz ADRIKOWSKI
Dawid BUŁA
Marian PASKO

DYNAMICZNA KOMPENSACJA MOCY BIERNEJ Z UŻYCIEM 1-FAZOWEGO ENERGETYCZNEGO FILTRU AKTYWNEGO

STRESZCZENIE *Pewna grupa odbiorników energii elektrycznej pobiera szybko zmienną w czasie moc bierną. Do takiej grupy należą obwody biurowe złożone z komputerów. Taki obwód pobiera moc bierną o dużej dynamice zmian na poziomie minut czy sekund i ułamka sekund, co uniemożliwia skuteczne skompensowanie mocy biernej z użyciem standardowych kompensatorów bazujących na baterii kondensatorów. Potrzebują one bowiem od kilku do kilkudziesięciu sekund na przełączenie pomiędzy kolejnymi sekcjami baterii kondensatorów co wynika bezpośrednio z czasu potrzebnego na ich rozładowanie.*

Przedmiotem rozważań będzie zastosowanie 1-fazowego filtra aktywnego do kompensacji dynamicznych zmian mocy biernej. Do sterowania 1-fazowym filtrem aktywnym zostanie wykorzystany algorytm p-q. Rozważania zostaną poparte symulacjami przeprowadzonymi w środowisku MATLAB-Simulink.

Słowa kluczowe: *1-fazowy energetyczny filtr aktywny, teoria mocy p-q, dynamiczna kompensacja mocy biernej, korekcja współczynnika mocy*

1. WSTĘP

Koszty związane ze złą jakością energii elektrycznej w ujęciu globalnym mogą być ogromne [5], dlatego też coraz bardziej istotne są pomiary oraz identyfikacja

dr inż. Tomasz ADRIKOWSKI, dr inż. Dawid BUŁA
e-mail: [tomasz.adrikowski; dawid.bula]@polsl.pl

Institut Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Śląskiej,
Zakład Elektrotechniki Teoretycznej, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice

prof. dr hab. inż. Marian PASKO
e-mail: marian.pasko@polsl.pl

Institut Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Śląskiej, Zakład Maszyn Elektrycznych
i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie, ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice

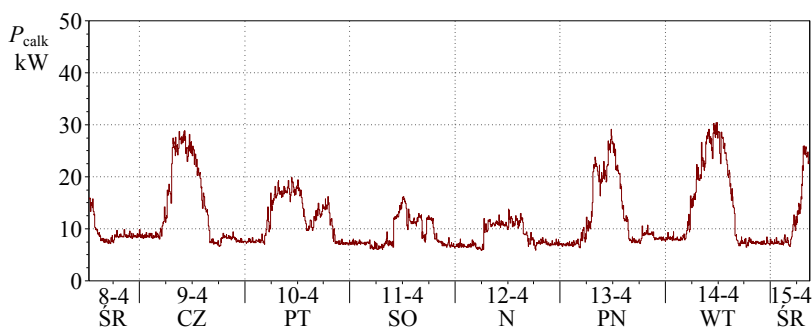
problemów z nią związanych. Problemy te zależą od charakteru stosowanych odbiorników. Inne zjawiska będą występować w przemyśle ciężkim a inne w osiedlach mieszkaniowych czy biurach. Z punktu widzenia odbiorcy ważne są natomiast parametry, które mogą powodować generowanie dodatkowych kosztów w postaci kar umownych. Jest to np. moc bierna, dla której stosuje się odpowiednie zapisy w umowach z dostawcą energii elektrycznej [6], które regulują dodatkowe opłaty za ponadumowny pobór energii biernej o charakterze indukcyjnym oraz pojemnościowym.

W pracy przedstawiono analizę zmienności pobieranej mocy biernej na podstawie przeprowadzonych pomiarów w obwodzie biurowym złożonym głównie z komputerów [3], jakie przeprowadzone w jednym z budynków Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej.

Otrzymane wyniki pomiarowe posłużyły do opracowania modelu symulacyjnego 1-fazowego energetycznego filtru aktywnego (filtr EFA) przeznaczonego do kompensacji dynamicznych zmian mocy biernej. Model filtru zasymulowano w środowisku Matlab-Simulink. Do jego sterowania zostanie wykorzystany algorytm p-q. W ramach symulacji przeprowadzono badanie kompensacji mocy biernej dla przykładowego testowego przebiegu zmienności mocy biernej obciążenia.

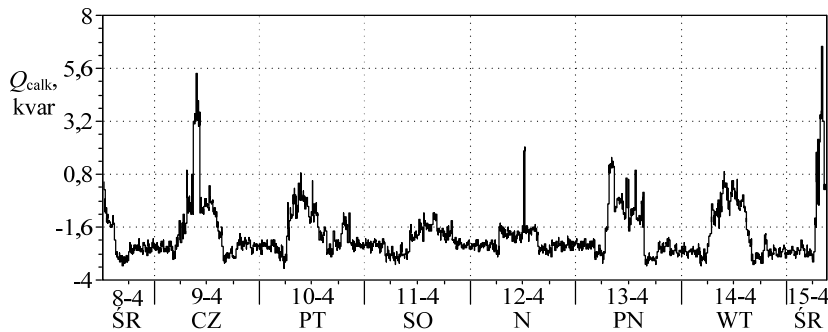
2. CHARAKTERYSTYKA ZMIENNOŚCI MOCY BIERNEJ ODBIORNIKÓW W BUDYNKACH BIUROWYCH

Odbiorniki w budynkach o charakterze biurowym to przede wszystkim komputery, drukarki oraz drobny sprzęt elektroniczny ale także UPS-y, serwery, klimatyzacja i wentylacja. Wszystkie te urządzenia mogą powodować problemy związane z jakością energii elektrycznej. Istotna tutaj jest duża zmienność pobieranej mocy czynnej i biernej oraz generowanie wyższych harmonicznych prądu. Co prawda w większości są to urządzenia małej mocy ale mogą być ich setki a nawet tysiące w jednym miejscu. Specyficzny dla budynków biurowych jest także rozkład obciążenia w ciągu tygodnia. Na rysunku 1 pokazano całkowitą moc $P_{\text{całk}}$ (wartości średnie 10 minutowe) dla analizowanego budynku w okresie jednego tygodnia. Jak widać obciążenie osiąga wartości maksymalne w ciągu dnia natomiast spada i ma wartość stałą w ciągu nocy.



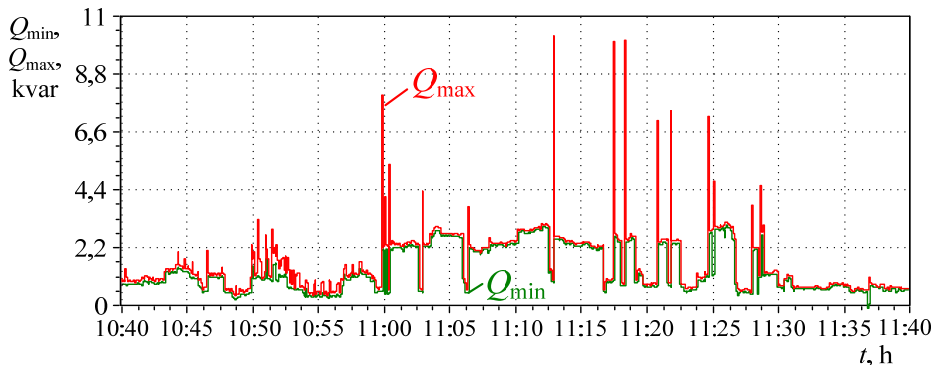
Rys. 1. Przebieg średniej mocy czynnej dla mierzonego budynku w okresie 1 tygodnia

W przypadku mocy biernej zwrócić można uwagę na dwa aspekty specyficzne dla analizowanych sieci. Pierwszy z nich to charakter pobieranej mocy biernej w ciągu doby. Odbiorniki w biurach w ciągu dnia pobierają moc bierną o charakterze indukcyjnym. W nocy natomiast gdy większość z urządzeń biurowych jest w tzw. czuwaniu pobierają one moc bierną pojemnościową. Ponieważ opłaty za moc bierną pojemnościową nakładane są niezależnie od pobranej mocy czynnej wartości te mogą być istotne [9]. Na rysunku 2 pokazano przebieg wartości średniej mocy biernej Q_{calc} w okresie 7 dni.



Rys. 2. Przebieg średniej mocy biernej Q_{calc} dla mierzonego budynku w okresie 1 tygodnia

Drugim z aspektów na jaki zwrócono uwagę w przypadku pomiaru mocy biernej jest jej zmienność w czasie. Standardowe kompensatory mocy biernej potrzebują od kilku do kilkudziesięciu sekund na przełączenie pomiędzy kolejnymi sekcjami baterii kondensatorów co wynika bezpośrednio z czasu potrzebnego na ich rozładowanie [8]. Na rysunku 3 pokazano wartości maksymalne i minimalne mocy biernej w okresie jednej godziny. Jak widać wartości te mogą różnić się znacznie w niewielkich odstępach czasu co może być problemem w przypadku konieczności kompensacji.



Rys. 3. Przykładowy przebieg wartości maksymalnej Q_{max} i minimalnej Q_{min} mocy biernej w okresie 1 godziny

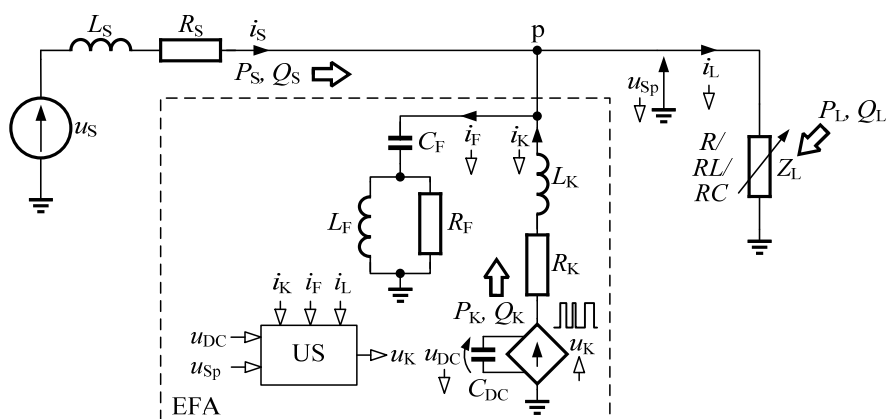
3. MODEL SYMULACYJNY 1-FAZOWEGO SYSTEMU ENERGETYCZNEGO Z FILTREM EFA

Możliwość kompensacji dynamicznych zmian mocy biernej zostanie przebadana symulacyjnie dla 1-fazowego systemu energetycznego z wykorzystaniem 1-fazowego energetycznego filtra aktywnego (EFA) [1]. Uproszczony model symulacyjny systemu przedstawiono na rysunku 4. Filtr EFA jest włączony równolegle do sieci w punkcie p między źródło u_S z linią zasilającą (R_S , L_S) a odbiornik pasywny o impedancji Z_L przestrajanej w czasie w celu wymuszenia zmian mocy biernej. Filtr EFA wprowadza do sieci prąd kompensujący i_K , co sprawia, że prąd pobierany z sieci ulega korekcie zgodnie z zależnością:

$$i_S = i_L + i_K. \quad (1)$$

Układ sterujący (US) falownikowym stopniem wyjściowym EFA bazuje na algorytmie p-q, co umożliwi kompensację mocy biernej odbiornika liniowego oraz nieliniowego, a także eliminację harmonicznych prądu dla przypadku odbiornika nieliniowego [4, 7, 10]. Dołączona równolegle do wyjścia falownika gałąź pasywna (L_F , C_F , R_F) wraz z impedancją linii (R_S , L_S) stanowi filtr, którego zadaniem jest wyeliminowanie składowej wyższych harmonicznych prądu sieci wprowadzanej przede wszystkim przez falownik [2].

Napięcie falownika u_K jest wyznaczane na podstawie prądu obciążenia i_L , prądu kompensacji i_K oraz napięcia sieci u_{Sp} w punkcie przyłączenia filtra EFA, z uwzględnieniem prądu i_F pobieranego przez gałąź (L_F , C_F , R_F) a także napięcia u_{DC} na zasobniku pojemnościowym falownika o pojemności C_{DC} . Napięcie falownika u_K jest przekształcane w odpowiedni prąd kompensujący i_K w gałęzi kształtującej (L_K , R_K)



Rys. 4. Uproszczony model symulacyjny 1-fazowego systemu energetycznego z filtrem EFA, źródłem napięcia sieci z niezerową impedancją linii zasilającej oraz odbiornikiem o zmiennej mocy biernej

W efekcie kompensacji sinusoidalny prąd i_S jest w fazie z napięciem u_S , co oznacza korekcję współczynnika mocy do pożądanego $PF = 1$: moc czynna źródła P_S jest równa mocy czynnej pobieranej przez odbiornik P_L i jednocześnie moc bierna

źródła $Q_S = 0$, co jest możliwe gdy filtr EFA wyda moc bierną Q_K równą mocy biernej Q_L odbiornika. Moc czynna P_K wydana przez filtr EFA powinna być równa zero.

3.1. Układ sterujący

Uproszczony schemat blokowy układu sterującego przedstawiono na rysunku 5. Częstotliwość kluczowania falownika a zarazem częstotliwość przetwarzania sygnałów w układzie sterującym wynosi $f_{PWM} = 20$ kHz. Do odfiltrowania składowych wyższych harmonicznych z napięcia sieciowego u_{Sp} zastosowano filtr dolnoprzepustowy Butterwortha 2-go rzędu (FDP1) o częstotliwości granicznej 1 kHz. Filtr skutecznie eliminuje składowe kluczowania równocześnie nie zmieniając amplitudy i fazy harmonicznej podstawowej o częstotliwości 50 Hz, stanowiącej wzorec napięcia sieciowego dla wyznaczanych przebiegów. Wzorec prądu kompensującego i_{Kw} jest obliczany na podstawie zależności:

$$i_{Kw} = i_L - i_{Lp} + i_{Fq}, \tag{2}$$

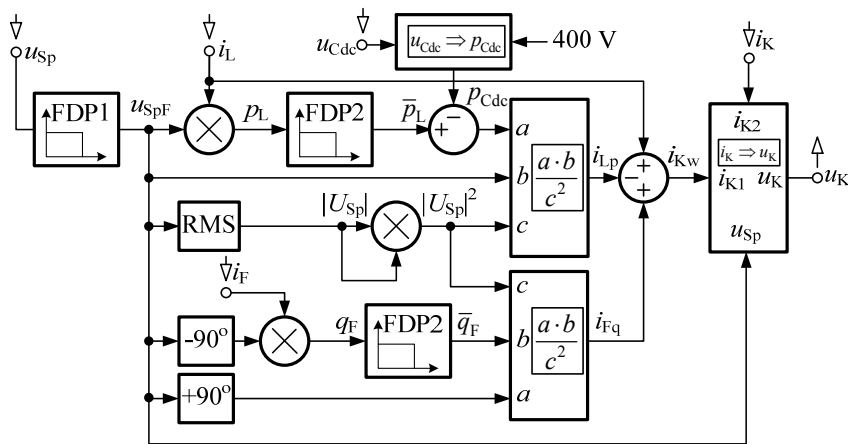
gdzie:

i_{Lp} – składowa czynna prądu odbiornika liczona na podstawie składowej stałej \bar{p}_L mocy czynnej odbiornika, skorygowanej o wartość p_{Cdc} (regulator napięcia u_{Cdc} – blok „ $u_{Cdc} \Rightarrow p_{Cdc}$ ”) uwzględniającą straty mocy na falowniku:

$$i_{Lp} = \frac{u_S (\bar{p}_L - p_{Cdc})}{|U_S^2|}, \tag{3}$$

i_{Fq} – składowa bierna prądu pobieranego przez gałąź (L_F, C_F, R_F) filtru składowej wyższych harmonicznych wyznaczona na podstawie składowej stałej \bar{q}_F mocy biernej tej gałęzi.

Uwzględnienie składowej i_{Fq} w algorytmie zapewnia dodatkowo kompensację mocy biernej pobieranej przez gałąź (L_F, C_F, R_F).



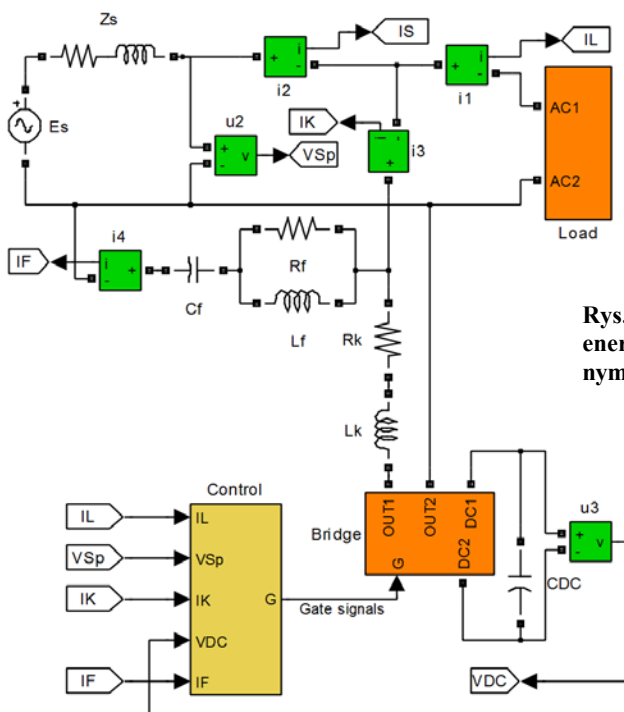
Rys. 5. Uproszczony model symulacyjny 1-fazowego systemu energetycznego z filtrem EFA, źródłem napięcia sieci z niezerową impedancją linii zasilającej oraz odbiornikiem o zmiennej mocy biernej

Do wydzielenia składowej stałej mocy \bar{q}_F oraz \bar{p}_L zastosowano starannie dobrany filtr dolnoprzepustowy (FDP2), który zapewnia eliminację harmonicznych począwszy od 50 Hz z relatywnie dużym tłumieniem przy możliwie najmniejszym czasie ustalania odpowiedzi filtru. W efekcie przeprowadzonych analiz analitycznych i symulacyjnych wytypowano filtr Czebyszewa II 4-go rzędu o częstotliwości granicznej 23 Hz. Filtr wykazuje tłumienie na poziomie 50 dB począwszy od harmonicznej 50 Hz z czasem ustalania się odpowiedzi skokowej ok. 25 ms (czas osiągnięcia 90% amplitudy ustalonej) z niewielkim przejściowym przeregulowaniem ok. 10%.

Wzorec napięcia falownika u_{Kw} jest wyznaczany w bloku nadającego regulatora „ $i_K \Rightarrow u_K$ ” na podstawie prądu kompensującego i_K i jego wzorca i_{Kw} .

3.2. Model symulacyjny w środowisku Matlab-Simulink

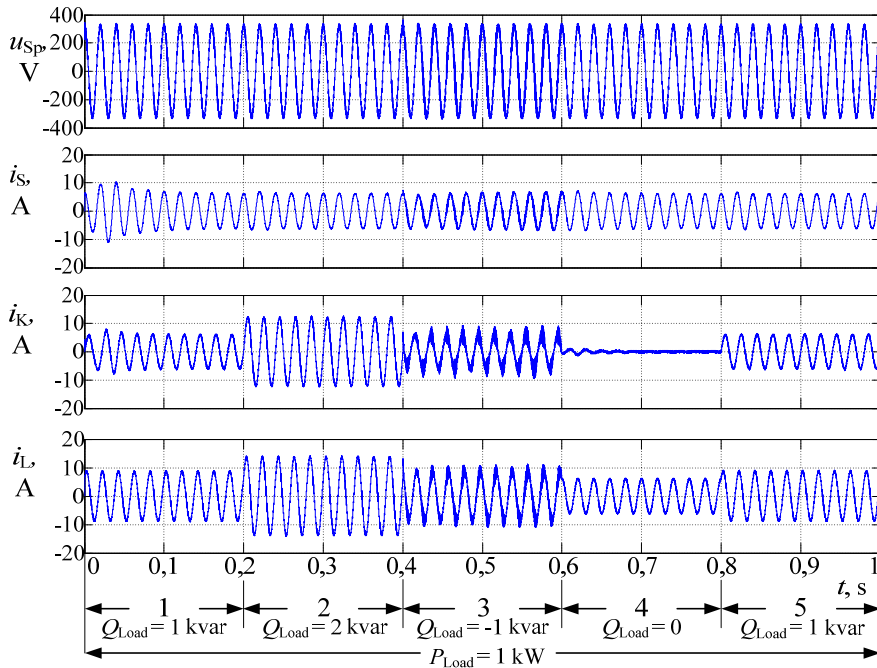
Model symulacyjny 1-fazowego systemu mocy zaimplementowano w środowisku Matlab-Simulink i zawiera: sinusoidalne źródło sieciowe (E_s), impedancję linii (Z_s), 4-tranzystorowy falownik (Bridge) z kondensatorem podtrzymującym (C_{dc}), gałąź kształtującą prąd kompensujący (L_k, R_k), gałąź (L_f, C_f, R_f) filtra składowej wyższych harmonicznych, układ sterujący falownikiem (control) oraz odbiornik (Load) o mocy biernej Q_L zmieniającej się w kolejnych stanach 1÷5 trwających 0,2 s, zgodnie z sekwencją: 1) 1 kvar, 2) 2 kvar, 3) -1 kvar, 4) 0 i 5) 1 kvar. Moc czynna odbiornika w każdym stanie 1÷5 wynosi $P_L = 1$ kW. Schemat modelu przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Model 1-fazowego systemu energetycznego z filtrem aktywnym w środowisku Matlab-Simulink

4. WYNIKI SYMULACJI

Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi prądów: odbiornika i_L , źródła i_S i filtru EFA i_K a także napięcia u_{Sp} w punkcie przyłączenia EFA do sieci, dla kolejnych stanów 1÷5 mocy biernej odbiornika.

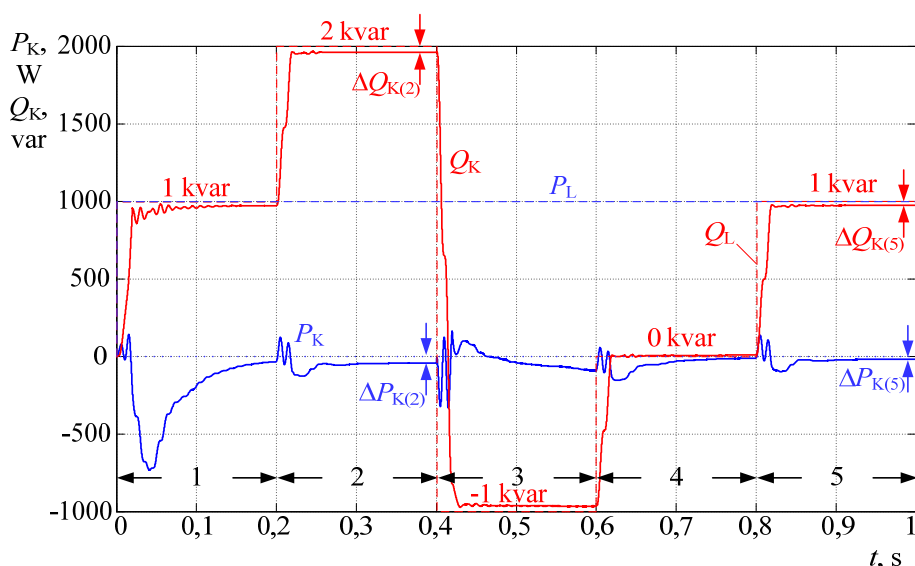


Rys. 7. Przebiegi prądów: i_S , i_K , i_L oraz napięcia u_{Sp} w punkcie przyłączenia do sieci dla całej sekwencji zmian mocy biernej Q_L odbiornika czyli w kolejnych stanach 1÷5

Bezpośrednio po starcie systemu (wejście w stan 1) w czasie przejściowym ok. 50 ms filtr EFA zaczyna generować przebieg prądu kompensującego z zauważalnym przeregulowaniem i_K , które przekłada się na przeregulowanie prądu sieci i_S . Zjawisko to nie występuje przy skokowej zmianie mocy biernej przy przejściu między następnymi stanami. Dla obciążenia mocą bierną pojemnościową (stan 3) prąd kompensujący i_K ma zwiększoną zawartość składowej kluczowania, która przenosi się w ograniczonym stopniu dalej do sieci, dzięki działaniu filtru wyższych harmonicznych.

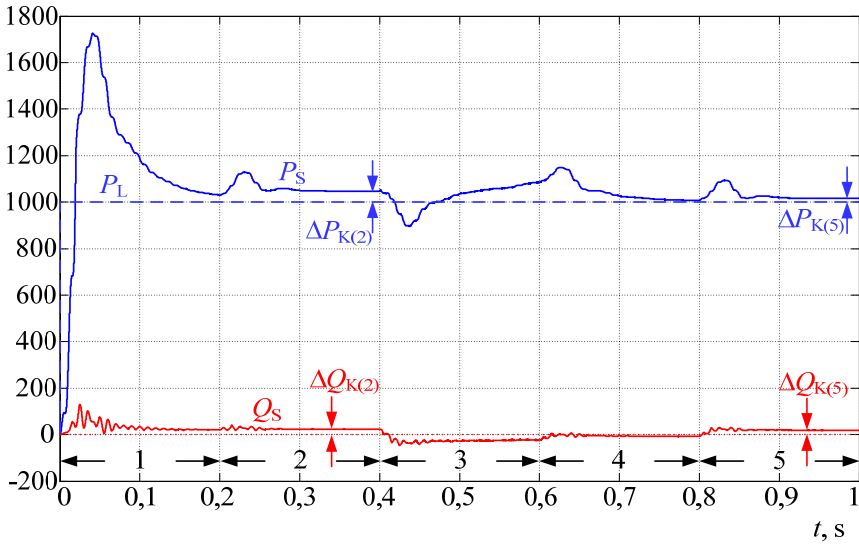
Na rysunku 8 pokazano zmiany mocy czynnej P_K i biernej Q_K filtru EFA w kolejnych stanach 1÷5. Zgodnie z oczekiwaniami moc bierna Q_K filtru wydawana do sieci zmienia się nadszanie za zmianą mocy biernej Q_L obciążenia z czasem ustalania się wynoszącym ok. 20 ms (1 okres napięcia sieciowego). W stanach 1÷3 i 5 wartość mocy Q_K cechuje niewielki niedobór ΔQ_K w stosunku do mocy Q_L wynoszący ok. 1-2% mocy Q_L .

W stanie 4, w którym $Q_L = 0$, moc $Q_K = 0$, co świadczy o prawidłowej kompensacji mocy biernej pobieranej przez gałąź filtra wyższych harmonicznyc. Bardziej gwałtowne są natomiast stany przejściowe mocy czynnej P_K falownika towarzyszące zmianom mocy biernej odbiornika (przejście do kolejnych stanów 2÷5). Jeszcze większe przeregulowanie przejściowe tej mocy ma miejsce przy zmianie mocy czynnej odbiornika na starcie systemu, co jest wtedy przyczyną przeregulowań prądu i_K oraz i_S (rys. 7). Znacznie dłuższy jest też czas ustalania się mocy czynnej P_K filtra – rzędu 50 ÷ 200 ms w zależności od rodzaju zmiany mocy obciążenia. Moc P_K w stanie 4 ($Q_L = 0$) ustala się na poziomie zerowym, natomiast w pozostałych stanach ($Q_L \neq 0$) na poziomie ujemnym ΔP_K bliskim zeru a $-\Delta P_K$ stanowi ok. 1-3% modułu mocy biernej odbiornika $|Q_L|$.



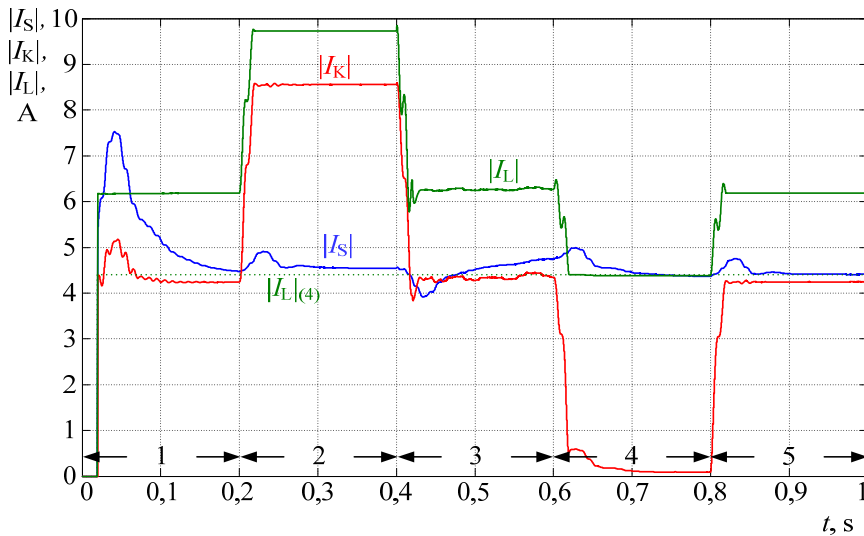
Rys. 8. Przebiegi zmian mocy czynnej P_K i biernej Q_K filtru EFA w kolejnych stanach 1÷5

Na rysunku 9 zademonstrowano przebieg zmian mocy czynnej P_S i biernej Q_S źródła w kolejnych stanach 1÷5. Moc czynna P_S źródła jest sumą moc strat $-P_K$ na falowniku oraz mocy czynnej odbiornika P_L , co powoduje, że moc P_S ustala się w każdym ze stanów 1÷3 i 5 ($Q_L \neq 0$) na wartości P_L zawyżonej o $-\Delta P_K$ a w stanie 4 ($Q_L = 0$) na wartości równej P_L ($\Delta P_K = 0$). Moc bierna Q_S jest różnicą mocy biernej odbiornika Q_L oraz mocy biernej Q_K wydanej i wprowadzonej do sieci przez filtr EFA. Ponieważ wartość mocy Q_K w stanie 1÷3 i 5 ($Q_L \neq 0$) jest mniejsza od oczekiwanej Q_L o ΔQ_K stanowiący 1-2% wartości Q_L , więc ostatecznie moc bierna źródła ustala się na poziomie resztkowym ΔQ_K . W stanie 4 ($Q_L = 0$) moc $Q_S = 0$, co dodatkowo świadczy o prawidłowej kompensacji mocy biernej gałęzi (L_F, C_F, R_F).



Rys. 9. Przebiegi zmian mocy czynnej P_S i biernej Q_S źródła w kolejnych stanach 1÷5

Rysunek 10 przedstawia zmiany wartości skutecznych prądów: sieci $|I_S|$, odbiornika $|I_L|$ i filtru EFA $|I_K|$ w kolejnych stanach 1÷5, które potwierdzają prawidłowe działanie dynamicznej kompensacji mocy biernej odbiornika.



Rys. 10. Zmiany wartości skutecznych prądów: sieci $|I_S|$, odbiornika $|I_L|$ i filtru EFA $|I_K|$ w kolejnych stanach 1÷5

Wartość skuteczna $|I_S|$ w każdym stanie ustala się do minimalnego poziomu $|I_L|_{(4)}$ osiąganego w stanie 4, w którym odbiornik jest czysto rezystancyjny i pobiera tylko moc czynną. Bez stosowania kompensacji ($|I_K| = 0$), $|I_S|$ zmieniałoby się tak jak $|I_L|$. Wartości $|I_K|$ w kolejnych stanach ustalają się po czasie rzędu 20 ms (1 okres napięcia sieci).

5. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono model symulacyjny jednofazowego energetycznego filtru aktywnego z układem sterowania bazującym na zmodyfikowanej metodzie p-q. Dodatkowo zastosowano pasywny filtr wyższych harmoniczných służący do filtracji składowych generowanych przez falownik związanych z przełączaniem tranzystorów. W układzie sterowania zastosowano nadążny regulator PI do generowania napięcia wzorcowego przekształtnika, regulator PI napięcia u_{Cdc} oraz uwzględniono moc bierną podłączonego filtru pasywnego. Odpowiedni dobór filtrów sygnałowych uśredniających chwilową moc czynną oraz bierną oraz parametrów użytych regulatorów PI pozwolił na osiągnięcie dobrych właściwości dynamicznych układu, które zostały potwierdzone wynikami symulacyjnymi przeprowadzonymi w środowisku Matlab-Simulink. W odpowiedzi na zmiany mocy biernej obciążenia filtr EFA reaguje nadążną zmianą mocy biernej wydawanej do sieci z czasem ustalania nie większym niż 20 ms. Tak krótki czas reakcji na zmianę mocy biernej stanowi daje sporą przewagę nad klasycznymi kompensatorami bazującymi na baterii kondensatorów. Dodatkową korzyścią zaprezentowanego filtru EFA w stosunku do klasycznych kompensatorów jest duża dokładność kompensacji, bowiem nieskompensowana pozostałość mocy biernej kształtuje się jedynie na poziomie ok. 1-2% mocy kompensowanej. Ponadto dużą zaletą jest możliwość kompensacji nie tylko mocy biernej indukcyjnej ale również pojemnościowej, jaką generują np. odbiorniki w budynku biurowym w porze nocnej. Zaproponowany model filtru aktywnego może znaleźć zastosowanie w aplikacji praktycznej w zastosowaniu jako niskobudżetowy filtr EFA do kompensacji dynamicznych zmian mocy biernej obwodu 1-fazowego złożonego z kilku - kilkunastu odbiorników biurowych.

LITERATURA

1. Adrikowski T.: Konceptyjny model symulacyjny jednofazowego energetycznego filtru aktywnego w środowisku OrCAD-Capture & Pspice. Prace Naukowe Pol. Śl., Elektryka 2013 z. 3/4, s. 77–88.
2. Adrikowski T., Buła D., Pasko M.: Zastosowanie algorytmu p-q do sterowania 1-fazowym energetycznym filtrem aktywnym. Konferencja „Postępy w Elektrotechnice Stosowanej”, Kościelisko 2014.
3. Adrikowski T., Buła D., Pasko M.: Analiza wybranych parametrów jakości energii elektrycznej w budynkach biurowych. IC-SPETO'2015, Gliwice-Ustroń, s. 83–84, 2015.
4. Akagi H., Watanabe E. H., Aredes M., Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning, Wiley-IEEE Press, Series Power Engineering, 2007.

5. Baggini A.: Handbook of Power Quality, John Wiley & Sons, 2008.
6. Ciura Sz.: Opłaty dystrybucyjne związane z poborem mocy biernej przez odbiorców, „Energia Elektryczna” nr 2/2011.
7. Costa-Castelló R., Grino R., Cardoner Parpal R., Fossas E.: High-Performance Control of a Single-Phase Shunt Active Filter, IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol.17 (2009), no.6, s. 1318–1329.
8. Das J. C.: Power System Harmonics and Passive Filter Designs, Wiley-IEEE Press, 2015.
9. PN-EN 61000-3-2, Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Dopuszczalne poziomy emisji harmonicznego prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika mniejszy lub równy 16 A).
10. Santos T., Pinto J.G., Neves, P., Goncalves D., Afonso J.L.: Comparison of three control theories for single-phase Active Power Filters. 35th IECON 2009, s. 3637–3642.

Przyjęto do druku dnia 14.12.2015 r.

DYNAMIC REACTIVE POWER COMPENSATION WITH THE USE OF 1-PHASE ACTIVE POWER FILTER

Tomasz ADRIKOWSKI, Dawid BUŁA, Marian PASKO

ABSTRACT *A certain group of electrical power loads consumes fast time-varying reactive power. To this group belong office circuits containing computers. This circuit gets the reactive power with high dynamic changes at the level of minutes or seconds and fractions of seconds, making it impossible to efficiently compensate by compensators with standard battery based on capacitors. They need several to tens of seconds to switch between each sector of capacitor banks which directly results from the time required for their discharge.*

The subject of considerations will be the application of a one-phase active filter to compensate the dynamic changes of the reactive power. A modified pq algorithm will be used to control of the one-phase active filter. Considerations will be supported by simulations carried out in the MATLAB-Simulink environment.

Keywords: *one-phase active power filter, extension p-q theorem, dynamic reactive power compensation, power factor correction*



Dr inż. Tomasz ADRIKOWSKI – adiunkt w Instytucie Elektrotechniki i Informatyki na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej. Autor i współautor ponad 50 publikacji z zakresu filtracji sygnałów analogowych, syntezy układów elektronicznych, a także aktywnej filtracji wyższych harmonicznych i poprawy wybranych parametrów jakości energii elektrycznej w sieciach zasilających.

Dr inż. Dawid BUŁA – adiunkt w Instytucie Elektrotechniki i Informatyki na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej. Autor i współautor ponad 50 publikacji z zakresu filtracji wyższych harmonicznych w sieciach zasilających oraz realizacji układów służących do poprawy jakości energii elektrycznej.



Prof. dr hab. inż. Marian PASKO – profesor zwyczajny w Politechnice Śląskiej, Kierownik Zakładu Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie. Autor i współautor ponad 350 publikacji, w tym: 6 monografii, 15 podręczników akademickich oraz 15 skryptów. Zasadniczym obszarem jego badań naukowych są zagadnienia związane z poprawą jakości energii elektrycznej układów pracujących w warunkach deformacji napięć i prądów oraz zagadnienia dotyczące analizy i syntezy układów liniowych, teorii wrażliwości, przetwarzania i filtracji sygnałów, modelowania układów elektrycznych i elektronicznych.