

Filtr aktywny UPQC sterowany sygnałem konduktancji zastępczej obciążenia

Streszczenie: Zaproponowano nową metodę sterowania pracą szeregowo-równoległych filtrów aktywnych (ang.: Unified Power Quality Conditioner, UPQC). Wykorzystano ideę konduktancji zastępczej obciążenia według Fryzego. Oprócz standardowej funkcjonalności UPQC możliwa jest równoczesna regulacja przepływu energii zarówno między źródłem a grupą obciążeń podlegających kompensacji, a także wewnątrz tej grupy, gdy część obciążeń staje się generatorami energii. Dodatkową funkcją tak sterowanego UPQC może być zasilanie obciążenia DC z kondensatora sprzęgającego jego przekształtniki, czyniąc z niego równocześnie prostownik PFC. I odwrotnie, pobierając energię z zewnętrznego źródła energii DC filtr UPQC może zasilać kompensowane obciążenia AC. Z tego powodu omawiany filtr UPQC może być użyty do zbudowania lokalnego centrum dystrybucji energii, na przykład w systemach zawierających mikroźródła OZE.

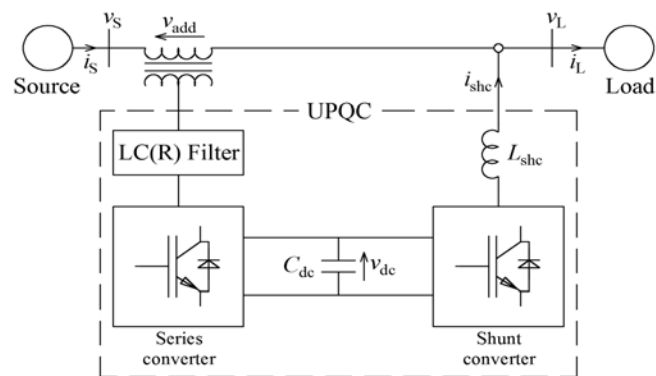
Abstract: The article proposes a new method of controlling the operation of Unified Power Quality Conditioner (UPQC). The idea of Fryze's load equivalent conductance was used. Applying this method it is possible performing the classical tasks of UPQC filter and, concurrently, regulating the energy flow both between the source and the group of loads being compensated, as well as within this group when some loads become generators. An additional UPQC function may be supplying DC load via the DC-link capacitor coupling the both UPQC's converters. In such a case the UPQC plays also as a PFC rectifier. Conversely, by drawing energy from an external DC energy source the UPQC can supply the AC-side loads. For this reason, the UPQC can be used to create a local energy distribution center, for example for systems containing renewable micro-sources. **(UPQC active power filter controlled with the use of the load equivalent conductance signal)**

Słowa kluczowe: UPQC, SAPF, mikroźródła energii elektrycznej.

Keywords: UPQC, SAPF, renewable energy sources.

Wstęp

Odształcenia przebiegów napięć i prądów w obwodach elektrycznych zwiększają straty energii, skracają żywotność urządzeń, zwiększają prawdopodobieństwo ich wadliwego działania. Spośród wielu urządzeń nakierowanych na poprawę tego stanu rzeczy należy wyróżnić szeregowo-równoległe energoelektroniczne filtry aktywne, znane pod nazwą UPQC [1]. Działają one kompleksowo, poprawiając zarówno kształt napięcia na zaciskach obciążenia jak i kształt prądu w linii zasilającej. Generalnie rzecz ujmując filtr UPQC jest złożeniem przekształtnika równoległego z przekształtnikiem szeregowym (rys. 1).



Rys. 1. Podstawowa struktura filtra UPQC

Sterowanie filtrem UPQC na podstawie sygnału konduktancji zastępczej obciążenia

Ogólny sposób sterowania filtrem UPQC zwykle wynika z metody sterowania jego przekształtnika równoległego, kompensującego składową nieaktywną prądu obciążenia [2, 3]. W badanym układzie adaptowano pewną metodę sterowania równoległym filtrem aktywnym [4, 5] do potrzeb pracy układu UPQC. Algorytm działania przekształtnika równoległego został oparty na równaniu łączącym wielkość mocy czynnej P obciążającej źródło z konduktancją zastępczą kompensowanego obciążenia $G = P/V^2$.

Konduktancja ta jest obliczana jako funkcja energii zgromadzonej w kondensatorze C_{dc} filtra UPQC:

$$(1) \quad G_{T_m} = \frac{C_{dc} (V_{C0}^2 - v_{dc}^2(T_{m-1}))}{2T_{st} V_s^2}$$

gdzie: G_{T_m} – sygnał konduktancji zastępczej obciążenia w okresie T_m przebiegu napięcia źródła, $m=1,2,3,\dots$, C_{dc} – pojemność kondensatora stałoprądowego obwodu UPQC, V_{C0} – napięcie początkowe na kondensatorze C_{dc} , v_{dc} – napięcie na kondensatorze C_{dc} na końcu okresu T_{m-1} przebiegu napięcia źródła, T_{st} – zadawany przez użytkownika czas uzyskiwania stanu ustalonego w obwodzie źródło-UPQC-obciążenie po każdej zmianie mocy czynnej obciążającej źródło, V_s – rms napięcia źródła.

Na podstawie (1) określany jest wzorzec wymaganego przebiegu prądu źródła dla każdego kolejnego okresu T_m :

$$(2) \quad i_{s,T_m}^*(t) = G_{T_{m-1}} v_{1s}(t)$$

gdzie: $i_{s,T_m}^*(t)$ – wzorzec prądu źródła dla okresu T_m , $G_{T_{m-1}}$ – sygnał całkowitej konduktancji zastępczej obciążającej źródło w okresie T_{m-1} , $v_{1s}(t)$ – sygnał harmonicznej podstawowej przebiegu napięcia źródła.

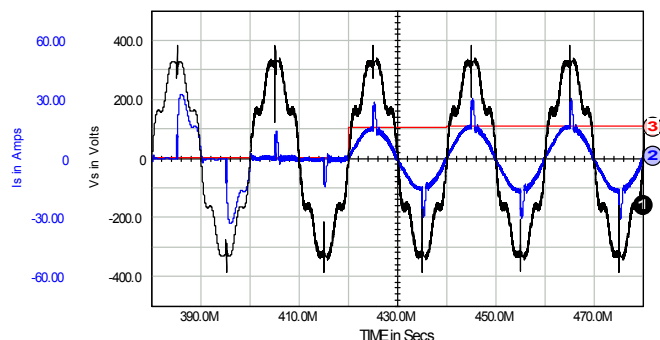
Podczas kompensacji w przebiegu napięcia $v_{dc}(t)$ kondensatora C_{dc} można wyróżnić zarówno składową zmienną jak i składową stałą. Składowa zmienna związana jest z kompensacją składowych nieaktywnych prądu obciążenia i napięcia źródła. Podczas kompensacji składowych nieaktywnych UPQC oddziałuje na źródło jedynie mocą nieaktywną, więc zarówno składowa stała napięcia $v_{dc}(t)$ jak i sygnał konduktancyjny G_{T_m} pozostają stałe. Sytuacja ulega zmianie podczas zmian mocy czynnej obciążającej źródło, na przykład na skutek zmian mocy czynnej obciążenia, zmian widma napięcia źródła, zmian mocy rozpraszanej w UPQC, czy wymiany energii pomiędzy UPQC a zewnętrznym obwodem DC dołączonym na zaciski kondensatora C_{dc} . Wystąpi wówczas zmiana składowej stałej napięcia $v_{dc}(t)$, skutkująca zmianą sygnału G_{T_m} (1) oraz zmianą sygnału wzorcowego (2) prądu źródła.

Podstawowa funkcjonalność UPQC

Przeprowadzono weryfikację symulacyjną omawianej koncepcji sterowania filtrem UPQC. Użyto oprogramowania IsSpice. Przyjęto następujące parametry obwodu: źródło – podstawowa harmoniczna 230V/50Hz oraz harmoniczne 5. i 7., obie o rms 32V; rezystancja i indukcyjność wewnętrzna źródła wynoszą odpowiednio 2mΩ i 100μH; obciążenie – tyrystorowy dwupołkowy łącznik mocy pracujący z kątem fazowym obu tyrystorów $\pi/2$, obciążony rezystorem 10Ω; filtr UPQC – kondensator $C_{dc} = 8\text{mF}$ z napięciem początkowym $V_{C0} = 600\text{V}$; parametry filtra pasywnego LC(R) przekształtnika szeregowego oraz indukcyjność L_{PR} przekształtnika równoległego (rys. 1) przyjęto w taki sposób, aby częstotliwości przełączeń w obu przekształtnikach były rzędu odpowiednio 15kHz i 40kHz; czas uzyskiwania stanu ustalonego T_{st} przyjęto równy jednemu okresowi przebiegu napięcia źródła czyli 20ms [1]. Zarówno przebieg prądu źródła jak i napięcia na obciążeniu kształtowane są przez regulatory histerezowe o szerokościach pętli histerez odpowiednio 1A i 5V.

Proces włączenia filtra UPQC

Ponieważ przekształtnik równoległy steruje przepływem energii w całym obwodzie, zatem jest on uruchamiany jako pierwszy, tu w chwili $t=400\text{ms}$, przebieg 2 na rysunku 2.

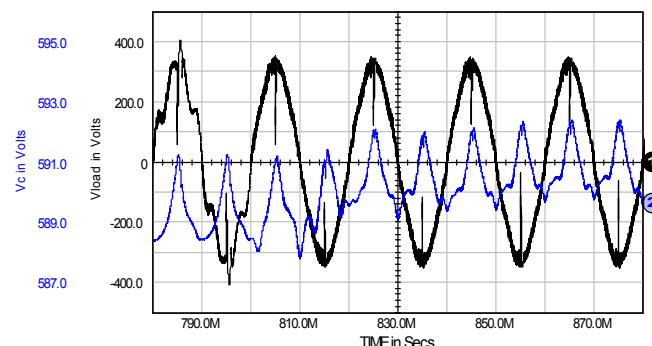


Rys. 2. Włączenie przekształtnika równoległego UPQC (1- napięcie źródła, 2 - prąd źródła, 3 - sygnał konduktancji) (45mS/dz)

W przedziale (400, 420) ms następuje pomiar całkowitej konduktancji zastępczej obciążającej źródło według zależności (1). Począwszy od chwili $t=420\text{ms}$ źródło obciążone zostaje prądem zgodnie z (2). W wyniku kompensacji wartość skuteczna prądu źródła maleje z 15,6A do 12,9A, a jego THD zostaje zmniejszone z 59% do 14%. Wobec uwzględnienia w zależności (1) jedynie energii gromadzonej w kondensatorze C_{dc} , w przebiegu sygnału konduktancyjnego mogą wystąpić pewne oscylacje, które jednak mogą zostać pominięte [4].

W dalszej kolejności, to jest w chwili $t=780\text{ms}$, następuje włączenie przekształtnika szeregowego (rys. 3). Korzystając z energii kondensatora C_{dc} napięcie $v_{add}(t)$ szeregowego transformatora dodatkowego kształtowane jest w taki sposób, aby prowadzić napięcie obciążenia w pobliżu podstawowej harmonicznej napięcia źródła z uchybem nie większym niż pewne ΔU , tu $\Delta U = 5\text{V}$. Jak wiadomo, kompensacja wyższych harmonicznych nie wymaga użycia mocy czynnej, zatem nie następuje statyczna zmiana sygnału konduktancyjnego. Równocześnie kompensacja tych samych harmonicznych powoduje odpowiadający ich energii spadek mocy czynnej obciążenia. W rezultacie następuje wzrost wartości średniej napięcia $v_{dc}(t)$ kondensatora C_{dc} (przebieg 2 na rysunku 3), a następnie spadek sygnału konduktancyjnego wraz z odpowiadającym mu spadkiem mocy czynnej źródła.

Kompensujące działanie przekształtnika szeregowego spowodowało obniżenie wielkości współczynnika THD napięcia zasilającego obciążenie z wartości 15,0% do 3,2%.



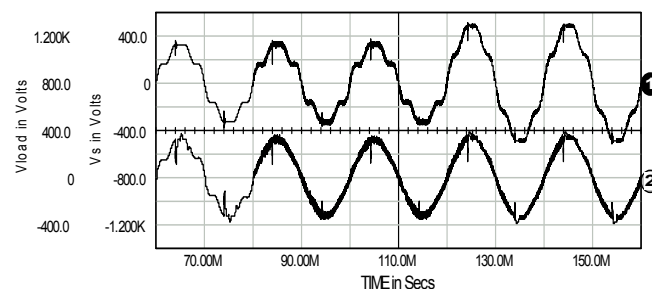
Rys. 3. Włączenie przekształtnika szeregowego UPQC (1 - napięcie na obciążeniu, 2 - napięcie $v_{dc}(t)$ na kondensatorze C_{dc})

Całkowitym efektem działania UPQC jest uzyskanie zarówno poprawy kształtu przebiegu napięcia $v_L(t)$ na zaciskach obciążenia względem napięcia $v_S(t)$ na zaciskach źródła (por. przebieg 1 na rysunku 3 z przebiegiem 1 na rysunku 2) jak i poprawy kształtu przebiegu prądu źródła (zob. przebieg 2 na rysunku 2). W omawianym przypadku uzyskano oczekiwaną poprawę, odnotowując spadek mocy pozornej źródła z wartości 3,57kVA do 2,99kVA oraz wzrost współczynnika mocy z wartości 0,68 do 0,96.

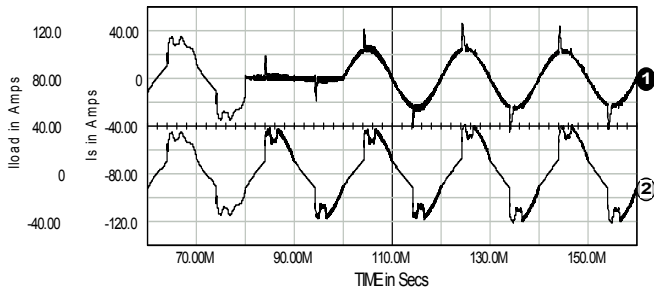
Stabilizacja napięcia na obciążeniu

Kompensacja zarówno wyższych harmonicznych jak i wzrostów/spadków napięcia źródła może być prowadzona bez jakiegokolwiek modyfikacji algorytmu sterującego pracą UPQC. Stosując omawianą metodą sterowania nie ma potrzeby klasyfikowania przyczyny powstania odchyłki napięcia źródła względem przebiegu wzorcowego, którym jest sygnał podstawowej harmonicznej napięcia źródła. W każdym przypadku warunkiem wystarczającym jest, aby regulator histerezowy wprowadzał przez transformator dodatkowy odpowiednie napięcie korygujące $v_{add}(t)$.

Na kolejnych rysunkach 4, 5, i 6 pokazano przykładową kompensację 50% wzrostu amplitudy podstawowej harmonicznej napięcia źródła, która pojawiła się w chwili $t=120\text{ms}$. Wcześniej, w chwili $t=80\text{ms}$ włączono oba przekształtniki filtra UPQC. Nastąpił natychmiastowy zanik odkształceń napięcia na obciążeniu, jako efekt działania przekształtnika szeregowego (rys. 4). Równocześnie przekształtnik równoległy dokonał „zablokowania” prądu źródła na jeden okres T w celu określenia całkowitej konduktancji (mocy) obciążającej źródło (zob. rysunek 5 oraz zal. (1)). Od chwili $t=120\text{ms}$ następuje skuteczna kompensacja podskoku napięcia źródła (rys. 4).

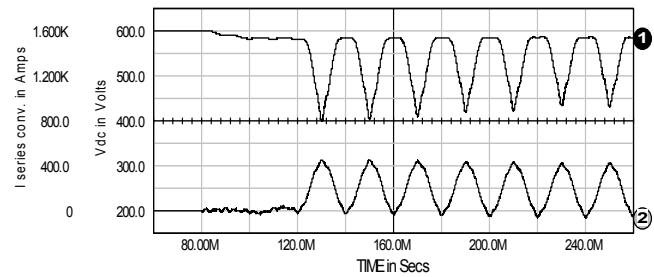


Rys. 4. Kompensacja 50% wzrostu napięcia źródła (1 - napięcie źródła, 2 - napięcie na obciążeniu)



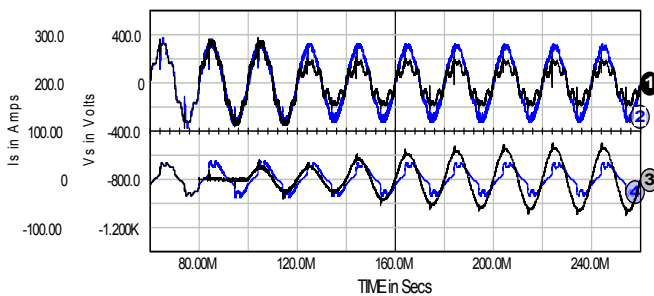
Rys. 5. Kompensacja 50% wzrostu napięcia źródła (prąd źródła: 1 - prąd źródła, 2 - prąd obciążenia)

Wytworzenie w trakcie kompensacji podskoku/spadku napięcia odpowiednio dużego napięcia korygującego w transformatorze dodawczym może wymagać wygenerowania dużego prądu w obwodzie przekształtnika szeregowego (tu rzędu 250A rms). Z przepływem tak dużego prądu wiąże się duże rozpraszanie energii w tym przekształtniku. W omawianym przypadku kompensowanie zwyżki napięcia źródła „kosztuje” około 700W dodatkowej straty mocy w filtrze UPQC.



Rys. 6. Kompensacja 50% wzrostu napięcia źródła (1 - napięcie $v_{dc}(t)$ na kondensatorze C_{dc} , 2 - prąd przekształtnika szeregowego)

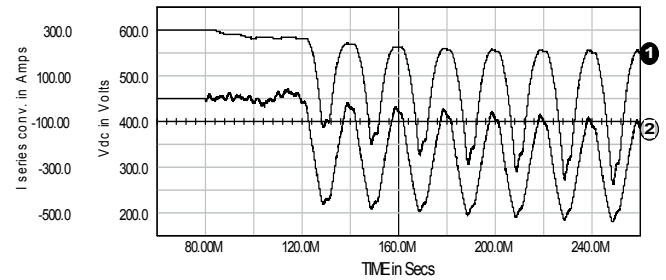
Na rysunku 7 pokazano kompensację 50% spadku amplitudy podstawowej harmonicznej napięcia źródła. Spadek energii źródła spowodował zmniejszenie wartości średniej napięcia $v_{dc}(t)$ (przebieg 1 na rysunku 8) oraz wzrost sygnału konduktancyjnego (1). Ten spadek energii uzupełniany jest ze źródła dzięki zwiększeniu prądu źródła z 18,2A w przedziale czasu (100, 120) ms do 46,5A w przedziale (240, 260) ms. W granicach tych przedziałów czasu napięcie źródła wynosi odpowiednio 230V i 120V, napięcie na obciążeniu 228V i 206V, a prąd obciążenia 22,4A i 20,3A.



Rys. 7. Kompensacja 50% spadku napięcia źródła (1 - napięcie źródła, 2 - napięcie na obciążeniu, 3 - prąd źródła, 4 - prąd obciążenia)

Wymagany znaczny prąd przekształtnika szeregowego, wraz ze związaną z nim wysoką zmiennością napięcia kondensatora, pokazane są na rysunku 8. Energetyczny „koszt” kompensowania spadku napięcia źródła może być przybliżony relacją mocy czynnej obciążenia względem

mocy czynnej źródła o wartościach odpowiednio 3,53kW oraz 5,36kW – obie te wartości w przedziale czasu (240, 260) ms. W tym przedziale współczynniki mocy obciążenia oraz źródła wynoszą odpowiednio 0,83 i 0,96.

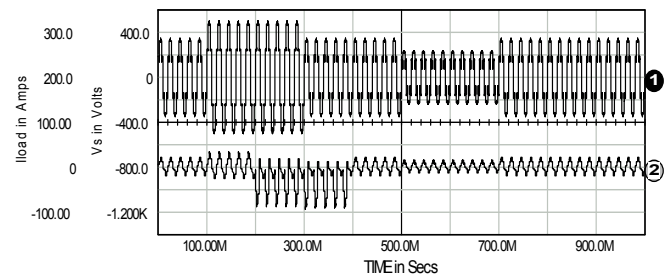


Rys. 8. Kompensacja 50% spadku napięcia źródła 1 - napięcie $v_{dc}(t)$ na kondensatorze C_{dc} , 2 - prąd przekształtnika szeregowego)

Rozszerzenie funkcjonalności UPQC

Omawiany sposób sterowania filtrem UPQC pozwala na rozszerzenie jego funkcjonalności o możliwość utworzenia swego rodzaju lokalnego centrum dystrybucji energii. W dalszej części artykułu rozpatrywane jest złożone obciążenie pasywno-aktywne o zmiennej mocy.

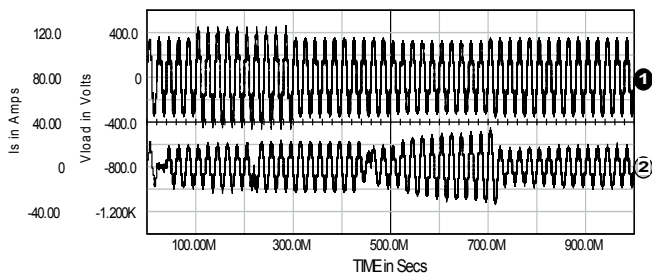
Praca UPQC podczas naprzemiennie pasywnego oraz generatorowego trybu pracy obciążenia zmiennoprądowego. Na rysunku 9 przedstawiono przebieg napięcia źródła oraz prądu obciążenia. W napięciu źródła występują harmoniczne 5. i 7., o amplitudach 50V każda. Podstawowa harmoniczna napięcia w kolejnych przedziałach czasu ma zmienianą amplitudę, kolejno: 325V, 433V, 325V, 217V oraz 325V. Wartości nominalnej podstawowej harmonicznej napięcia źródła, tj. 325V, odpowiada moc czynna obciążenia 2,7kW. W przedziale czasu (200, 400) ms prąd obciążenia jest odkształcony wręcz nierealistycznie silnie, aby pokazać wysokie możliwości kompensujące filtru UPQC. Występuje tu ujemna składowa stała wynosząca -28A, a składowa o częstotliwości podstawowej jest odwrócona względem podstawowej harmonicznej napięcia źródła. Zatem w tym przedziale czasu obciążenie, traktowane jako całość, pracuje w trybie generatorowym. W związku ze zmianą napięcia źródła w przedziale (200, 400) ms, oraz niepełną kompensacją tej zmiany przez filtr UPQC, moc czynna obciążenia (w trybie generatorowym) zmienia się i wynosi -5,5kW w przedziale czasu (200, 300) ms i -5,1kW w przedziale (300, 400) ms. Wartość średnia w przedziale (200, 400) ms ma wartość ujemną i wynosi - 5,3kW.



Rys. 9. Przebiegi do skompensowania (1 - napięcie źródła, 2 - prąd obciążenia)

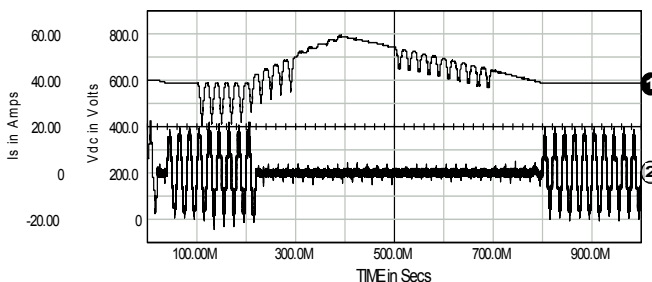
W trakcie pracy generatorowej obciążenia sygnał konduktancyjny (1) przechodzi do wartości ujemnych, co powoduje odwrócenie fazy wzorca prądu źródła (2) i odwrócenie kierunku przepływu energii. Na rysunku 10 pokazano przebiegi napięcia obciążenia oraz prądu źródła.

Widoczne jest odwrócenie fazy prądu źródła w czasie pracy generatorowej obciążenia. Przyjęto ograniczenie mocy w stanie odwrotnego kierunku transmisji energii do wartości nie większej niż 3,5kW.



Rys. 10. Przebiegi skompensowane (1 - napięcie obciążenia, 2 - prąd źródła)

Możliwe jest zaproponowanie innych scenariuszy sterowania przepływem energii pomiędzy źródłem a obciążeniem czasowo aktywnym. Na rysunku 11 pokazano wariant z magazynowaniem w kondensatorze C_{dc} „nadmiaru” energii generowanej w obciążeniu względem energii w tym samym czasie w nim konsumowanej (przedział czasu (200, 400) ms). Następnie, po ustaniu pracy generatorowej obciążenia, ów nadmiar energii przekazywany jest do obciążenia i/lub zużywany jest w filtrze UPQC wskutek prowadzenia kompensacji.

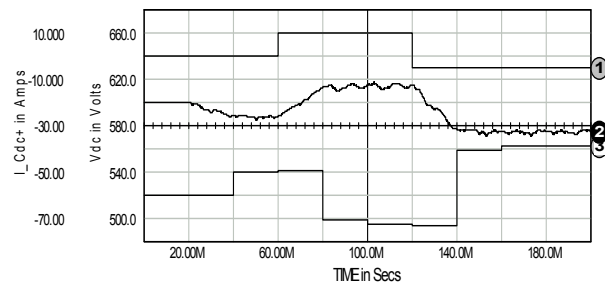


Rys. 11. Przebieg napięcia i prądu (1 - napięcie $v_{dc}(t)$ kondensatora C_{dc} , 2 - prąd źródła)

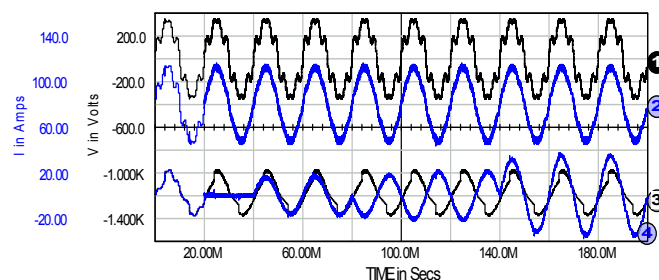
W przebiegu napięcia kondensatora (1 na rysunku 11) „zakodowane” są wszystkie funkcje realizowane przez UPQC: kompensowanie prądu nieaktywnego obciążenia, kompensowanie odkształceń oraz podbić/zapadów napięcia źródła, magazynowanie i zwrot energii generowanej w obciążeniu – zarówno po stronie AC jak i DC (zobacz też rysunek 12).

Kompensacja podczas pasywnego i generatorowego trybu pracy dodatkowego obciążenia stałoprądowego. Równolegle do kondensatora C_{dc} może zostać dołączone obciążenie lub źródło energii. Filtr UPQC spełnia wówczas równocześnie funkcję prostownika PFC lub falownika-buforu energetycznego, mogącego zasilać urządzenia po stronie zmiennoprądowej. Na rysunku 12 przedstawiono przebieg prądu takiego dodatkowego źródła/obciążenia (przebieg 1). W przedziale (60, 120) ms dostarczana jest energia do kondensatora C_{dc} , co powoduje zwiększenie jego napięcia powyżej wartości początkowej V_{C0} (przebieg 2). Skutkuje to przejściem sygnału konduktancyjnego (przebieg 3) do wartości ujemnej. W rezultacie następuje przekazywanie energii ze strony stałoprądowej na stronę zmiennoprądową filtru UPQC. Energia ta zasila kompensowane obciążenie zmiennoprądowe, a jej nadwyżka przekazywana jest w linię zasilającą (przebieg 4 na rysunku 13). Równocześnie

zachowane są wszystkie funkcje kompensujące filtru UPQC, co obrazują przebiegi 2 i 4 na rysunku 13.



Rys. 12. Przebiegi napięć i prądów źródła i obciążenia stałoprądowego kondensatora C_{dc} (1 - przebieg prądu źródła DC dołączonego do kondensatora C_{dc} , 2 - przebieg napięcia $v_{dc}(t)$ kondensatora C_{dc} , 3 - sygnał konduktancyjny w skali 50mS/dz)



Rys. 13. Przebiegi napięcia i prądu źródła i obciążenia (1 - napięcie źródła, 2 - napięcie obciążenia, 3 - prąd obciążenia, 4 - prąd źródła)

Podsumowanie

W artykule przedstawiono metodę sterowania filtrem aktywnym UPQC za pomocą sygnału konduktancji zastępczej obciążenia. Pokazano możliwość użycia tak sterowanego filtru UPQC w charakterze lokalnego centrum dystrybucji energii, co może być przydatne w systemach wykorzystujących mikroźródła energii, w tym również źródła odnawialne. Podczas pracy UPQC jego wszystkie operacje wykonywane są automatycznie, bez potrzeby dokonywania jakiegokolwiek zmiany algorytmu sterującego jego działaniem.

Autorzy: dr hab. inż. Andrzej Szromba, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: aszromba@pk.edu.pl; mgr inż. Bartłomiej Sysło, Aptiv Services Poland S.A., doktorant studiów III st. Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej PK, e-mail: syslo.bartlomiej@gmail.com

LITERATURA

- [1] Khadkikar V., Enhancing electric power quality using UPQC: a comprehensive overview, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 5, 2012
- [2] Asiminoaei L., Blaabjerg F., Hansen S., Detection is key. Harmonic detection methods for active power filter applications, *IEEE Industry Applcat. Magazine*, 2007
- [3] Green T., Marks J., Control techniques for active power filters, *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, vol. 152, no. 2, 2005
- [4] Szromba A., Conductance-controlled global-compensation-type shunt active power filter, *Archives of Electrical Engineering*, vol. 64(2), pp. 259-275, 2015
- [5] Szromba A., Mysiński W., Voltage-source-based conductance-signal-controlled shunt active power filter, *19th European Conference on Power Electronics and Applications*, Warsaw, 2017