

STEROWANIE WIELOPOZIOMOWYM FILTREM AKTYWNYM Z SELEKTYWNA KOMPENSACJĄ HARMONICZNYCH

Piotr BANACH¹, Artur CICHOWSKI²

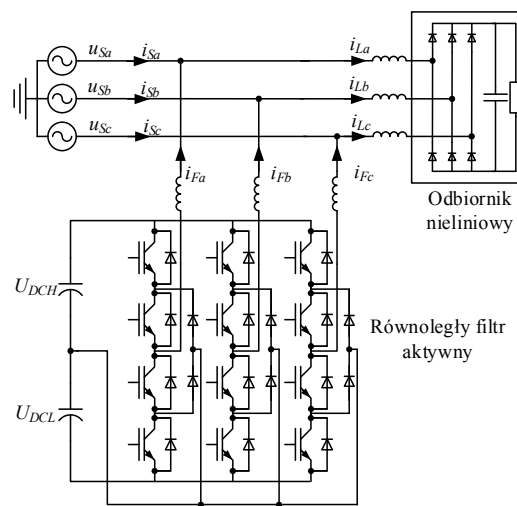
1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58-348-63-09 e-mail: piobanac@student.pg.gda.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58-348-63-09 e-mail: artur.cichowski@pg.gda.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono metodę sterowania wielopoziomowym równoległym filtrem aktywnym z możliwością selektywnej kompensacji wybranych harmonicznych prądu z uwzględnieniem ograniczeń prądowych przekształtnika. Falownik wielopoziomowy umożliwia dokładniejsze generowanie napięcia wyjściowego przy mniejszej częstotliwości modulacji oraz umożliwia zmniejszenie wymiarów filtrów sieciowych względem klasycznego falownika dwupoziomowego. Użycie algorytmu selektywnej kompensacji pozwala na zastosowanie przekształtnika o mniejszej mocy i skompensowanie tylko wybranych wyższych harmonicznych. Przedstawiono wyniki symulacji wykonanej w programie Matlab proponowanej metody sterowania, którą oparto na algorytmie adaptacyjnym na przykładzie wybranej harmonicznej.

Słowa kluczowe: filtr aktywny, selektywna kompensacja harmonicznych, falownik wielopoziomowy NPC.

1. WPROWADZENIE

Rosnąca liczba nieliniowych odbiorników energii elektrycznej podłączanych do systemu dystrybucyjnego powoduje szereg problemów związanych z pogorszeniem jakości energii elektrycznej. Doprowadziło to do opracowania standardów dopuszczających maksymalne poziomy zniekształceń harmonicznych [1]. Klasyczne rozwiązania oparte na filtrach pasywnych w wielu sytuacjach są już niewystraszające, szczególnie z powodu dużych rozmiarów, wagi czy problemu z występowaniem rezonansów. Przyczyniło się to do wzrostu zainteresowania energoelektronicznymi filtrami aktywnymi w różnych konfiguracjach i topologiach [2], w tym układami falowników wielopoziomowych [3], w szczególności z diodami poziomującymi (*ang. Neutral Point Clamped, NPC*). Cechują się one korzystnymi właściwościami takimi jak mniejsze tętnienia prądu przy tej samej częstotliwości modulacji, dokładniejsze odtwarzanie napięcia zadanego, możliwość stosowania półprzewodników na niższe napięcie, mniejsze straty przełączania, mniejsze wymiary filtrów sieciowych i filtrów przeciwzakłóceńowych. Obecnie równoległy filtr aktywny jest najczęściej stosowanym przekształtnikiem służącym do poprawy parametrów jakości energii. Podłączony jest równoległe poprzez dławiki sieciowe do tego samego przyłącza co odbiornik lub grupa odbiorników nieliniowych (rys. 1).



Rys. 1. Schemat ideowy podłączenia wielopoziomowego 3L-NPC równoległego filtra aktywnego

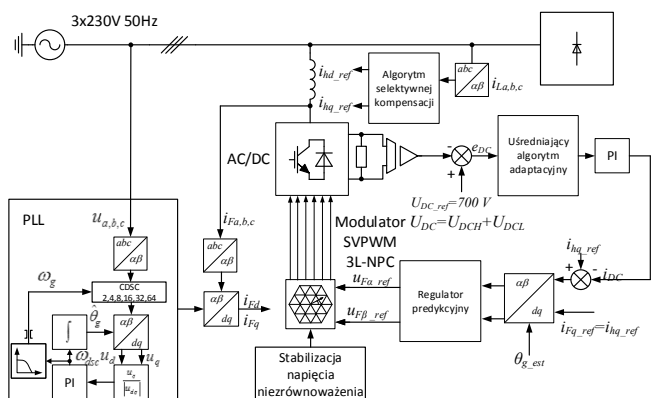
W zależności od przyjętej strategii sterowania w większości opracowań zakłada się, że przekształtnik posiada wystarczającą moc do skompensowania występujących parametrów jakości energii elektrycznej (harmoniczne prądu, moc bierna czy asymetria obciążenia). Obecnie istnieje niewiele prac poświęconych sterowaniu filtrami aktywnymi i zagadnieniu selektywnej kompensacji harmonicznych uwzględniających ograniczenia przekształtnika [4], [5], [6]. Metodę kompensacji opartą na priorytetach przydziału mocy przekształtnika przedstawiono w pracach [5] i [6], jednak nie uwzględnia ona kompensacji tylko wybranych harmonicznych. Natomiast w pracy [4] opisano kompleksowy optymalizacyjny algorytm selektywnej kompensacji zakładający ile mocy przekształtnika może zostać przeznaczona do skompensowania odpowiednio: harmonicznych prądu, mocy biernej czy symetryzacji obciążenia przy uwzględnieniu ograniczeń przekształtnika. Wadą tego rozwiązania jest wolna odpowiedź algorytmu optymalizacyjnego wynosząca około 1 s, która została spowodowana transmisją i przetworzeniem danych na komputerze PC w programie Matlab. Podejście to mimo dużego potencjału cechuje się niekorzystnym opóźnieniem w wyznaczaniu prądów w stanach przejściowych. W literaturze również obserwuje

się brak opracowań zakładających kompensację tylko wybranych harmonicznym do określonego poziomu.

W artykule przedstawiono adaptacyjną selektywną metodę kompensacji wybranych harmonicznym przy uwzględnieniu ograniczeń prądowych przekształtnika.

2. STRUKTURA STEROWANIA RÓWNOLEGLYM FILTREM AKTYWNYM

Na rysunku 2 przedstawiono schemat algorytmu sterowania wielopoziomowego falownika napięcia pracującego w konfiguracji filtra aktywnego, w którym można wyróżnić główne bloki odpowiedzialne za: synchronizację z siecią zasilającą, układ regulacji napięcia w obwodzie pośredniczącym, blok wyznaczania prądu kompensującego, bloki regulatorów prądowych, blok modulacji wektorowej falownika wielopoziomowego.



Rys. 2. Schemat blokowy zaimplementowanego algorytmu sterowania

2.1. Synchronizacja z siecią zasilającą

W algorytmie sterowania zastosowano pętlę synchronizacji fazowej (*ang. Phase Locked Loop, PLL*) do synchronizacji z siecią elektroenergetyczną. W przypadku, gdy napięcie zasilające jest odkształcone, wyznaczany kąt podstawowej harmonicznym kolejności zgodnej obciążony jest błędem. Dlatego dodatkowo zastosowano algorytm CDSC (*ang. Cascaded Delayed Signal Cancellation*) [7], który umożliwia w efektywny sposób wyznaczenie składowej podstawowej kolejności zgodnej napięcia sieci w ortogonalnym układzie odniesienia $\alpha\beta$. W pracy [8] autorzy przedstawili badania synchronizacji przy pomocy PLL z siecią elektroenergetyczną używając metodę CDSC i obniżając *THD* napięcia z poziomu 2,23 % do 0,006 %.

2.2. Wyznaczanie prądów referencyjnych

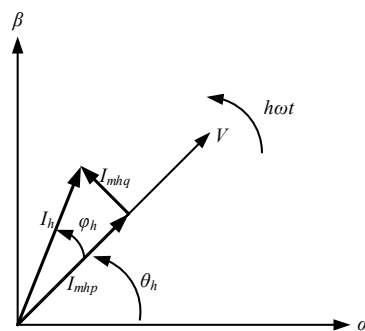
Do wyznaczania prądów kompensujących danych harmonicznym opracowano algorytm adaptacyjny najmniejszych kwadratów w prostokątnym układzie odniesienia $\alpha\beta$, który dostarcza amplitudę do poszukiwanej częstotliwości harmonicznym. Zasada działania algorytmu opiera się na wiedzy, że każdą harmoniczną można wyrazić zależnością:

$$i_h(t) = I_{mh} \sin(h\omega t + \varphi_h) \quad (1)$$

oraz przekształcając powyższe wyrażenie na podstawie tożsamości trygonometrycznych sumy kątów uzyskuje się:

$$i_h(t) = I_{mh} (\sin(h\omega t)\cos(\varphi_h) + \cos(h\omega t)\sin(\varphi_h)) \quad (2)$$

gdzie: $i_h(t)$ – wartość chwilowa harmonicznym h -tego rzędu, I_{mh} – amplituda h -tej harmonicznym, $h\omega t$ – prędkość kątowa h -tej harmonicznym, φ_h – faza h -tej harmonicznym.



Rys. 3. Wykres wskazowy składowych danej harmonicznym

W ten sposób uzyskujemy dwie amplitudy I_{mhp} oraz I_{mhq} przesuniętą względem pierwszej o 90° (rys. 3). Odpowiadają one wektorom wag w algorytmie adaptacyjnym dla poszczególnych składowych napięcia w układzie współrzędnych $\alpha\beta$. Algorytm adaptacyjny wyznacza wektor wag w następnym kroku na podstawie zależności:

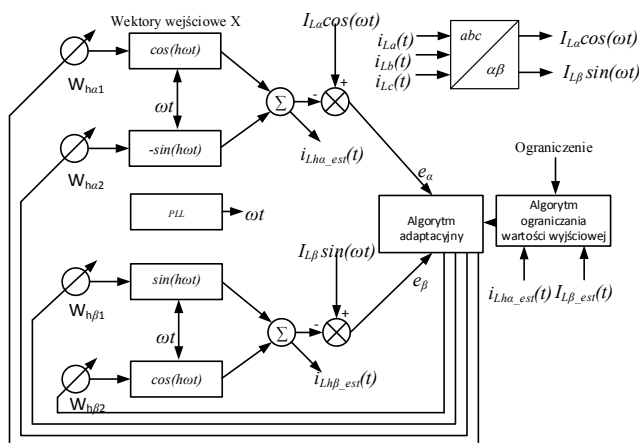
$$y_{est}[k] = W[k] \cdot X[k] \quad (3)$$

$$e[k] = y[k] - y_{est}[k] \quad (4)$$

$$W[k+1] = W[k] + \mu X[k]e[k] \quad (5)$$

gdzie: y_{est} – wartość estymowana, W – wektor wag, X – wektor wejściowy, e – błąd dopasowania, μ – stała określająca szybkość i stabilność adaptacji, y – wartość zmierzonego sygnału.

Wartość współczynnika μ dobrano symulacyjnie. Im jest on większy tym szybciej następuje proces uczenia się algorytmu, jednak przy przekroczeniu zbyt pewnej wartości algorytm staje się niestabilny. Wektor wejściowy X wyznaczany jest na podstawie kąta położenia wektora napięcia (lub jego wielokrotności zależnej od rzędu harmonicznym), który wyznaczany jest poprzez algorytm pętli synchronizacji fazowej.



Rys. 4. Algorytm adaptacyjny dostrajania pojedynczej harmonicznym

Wartość estymowanej harmonicznym skalowana jest do dopuszczalnego poziomu w następujący sposób [9]:

$$\begin{aligned} &\text{jeśli } |y_{h_est}[k+1]| > C \\ &\text{to} \\ &y_{h_est}[k+1] = y_{h_est}[k+1] \frac{C}{|y_{h_est}[k+1]|} \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie: y_{h_est} – wartość chwilowa estymowanej harmonicznej,
 C – stała określająca dopuszczalną wartość maksymalną.

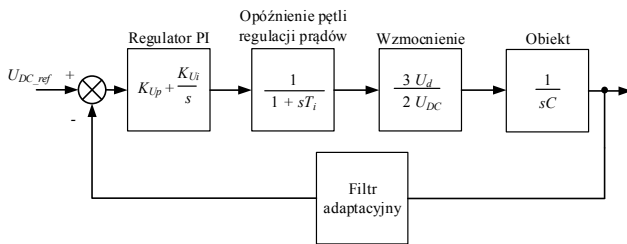
2.3. Regulacja napięcia w obwodzie pośredniczącym

Regulator PI umożliwi poprawną pracę filtra aktywnego w sposób samowystarczalny, bez konieczności podłączania zewnętrznego źródła napięcia do obwodu pośredniczącego. W przypadku występowania fluktuacji napięcia składowe wysokoczęstotliwościowe przenoszą się przez prąd referencyjny przekształtnika wprowadzając dodatkowe zniekształcenia w prądach kompensujących. W celu wyeliminowania oscylacji zastosowano uśredniający filtr adaptacyjny [3]. Nastawy regulatora dla schematu regulacji z rysunku 5 zostały dobrane na podstawie kryterium symetrii [10]:

$$K_{pUdc} = \frac{2u_d C}{3\alpha T_i U_{DC}} \quad (7)$$

$$K_{iUdc} = \frac{K_{pUdc}}{\alpha^2 T_i} \quad (8)$$

gdzie: K_{pUdc} , K_{iUdc} – człon proporcjonalny i całkujący regulatora, u_d – wartość składowej napięcia sieci w osi d , C – pojemność kondensatorów w obwodzie pośredniczącym, U_{DC} – napięcie w obwodzie pośredniczącym, T_i – opóźnienie pętli regulacji prądu, α – współczynnik korygujący zapas fazy regulatora.



Rys. 5. Uproszczony schemat blokowy układu regulacji napięcia w obwodzie pośredniczącym

2.4. Predykcyjny regulator prądów

W układzie sterowania filtra aktywnego zastosowano w regulator predykcyjny prądu w układzie odniesienia $\alpha\beta$ wyrażony zależnością [11]:

$$u_{F\alpha\beta}[k+1] = 2u_{\alpha\beta}[k] - u_{F\alpha\beta}[k] + \frac{L}{T_s} (i_{F\alpha\beta ref}[k] - i_{F\alpha\beta}[k]) \quad (9)$$

gdzie: $u_{F\alpha\beta}(t)$ – napięcie zadane na modulator SVPWM, $u_{\alpha\beta}(t)$ – składowe napięcia sieci, L – indukcyjność dławika sieciowego, T_s – okres próbkowania, $i_{F\alpha\beta ref}(t)$ – zadany prąd kompensujący, $i_{F\alpha\beta}(t)$ – wartość chwilowa prądu przekształtnika.

Regulator oparty jest na modelu falownika z filtrem sieciowym, którego zmiana parametrów może wpływać na dokładność. Mimo to charakteryzuje się lepszą dynamiką od klasycznych regulatorów PI i wartość zadaną osiąga z dwuokresowym opóźnieniem.

2.5. Wektorowa modulacja szerokości impulsów dla falownika wielopoziomowego

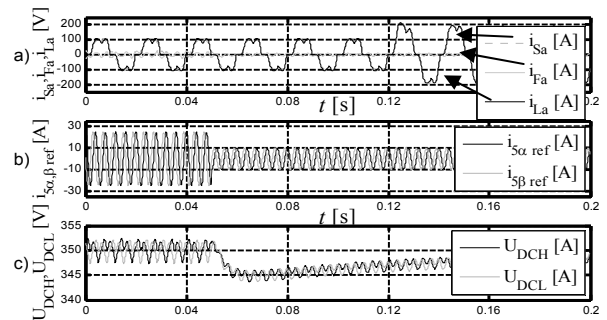
Do generowania napięć wyjściowych zastosowano wektorową modulację szerokości impulsów, w której poszczególne czasy impulsów wyznaczone są za pomocą funkcji kształtu [12]. Metoda ta została rozbudowana z modulacji dwufazowej do trójfazowej. W porównaniu do klasycznych rozwiązań nie wymaga ona stosowania funkcji trygonometrycznych, a dzięki temu jej czas wykonywania jest szybszy w realizacji na procesorach sygnałowych nieposiadających wbudowanego wsparcia sprzętowego do obliczania funkcji trygonometrycznych. Metodę tą cechuje również niezależność przy wyliczaniu czasów trwania impulsów od fluktuacji napięcia w punkcie neutralnym falownika wielopoziomowego z diodami poziomującymi oraz możliwość kompensacji napięcia niezrównoważenia na kondensatorach.

3. BADANIA SYMULACYJNE

Badania symulacyjne zostały wykonane w programie Matlab, natomiast algorytm sterowania został napisany w języku C w sposób umożliwiający łatwe przeniesienie na procesor sygnałowy.

Tablica 1. Parametry układu i symulacji

1	Parametr	Wartość	Jednostka
2	Pojemność kondensatorów	2350	[μ F]
3	Indukcyjność dławika	6	[mH]
4	Częstotliwość próbkowania	10	[kHz]
5	Napięcie pośredniczące	700	[V]
6	Ograniczenie harmonicznej	10	[A]

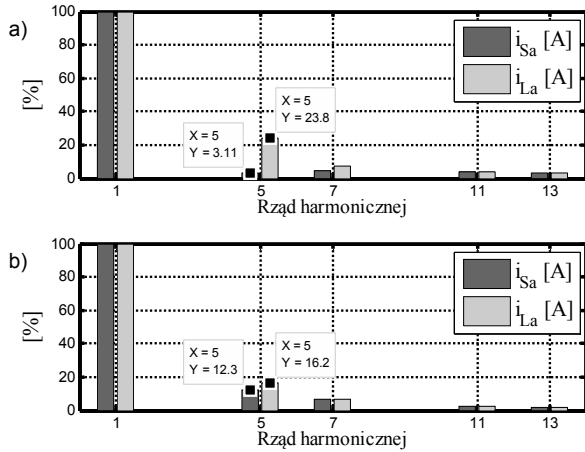


Rys. 6. a) Przebiegi prądu sieci, prądu odbiornika i prądu filtra; b) estymowana piąta harmoniczna, c) napięcie kondensatorach.

Na rysunku 6 a) przedstawiono przebiegi symulacji prądów. W chwili od 0 do 0,05 s występuje stan ustalony i kompensowana jest tylko piąta harmoniczna (bez ograniczeń), od 0,05 do 0,2 zostaje włączane ograniczanie piątej harmonicznej do 10 A w algorytmie adaptacyjnym. W chwili 0,12 następuje skok obciążenia o 100 %. Algorytm adaptacyjny szybko dostraja się do wymuszonego ograniczenia oraz jest niewrażliwy na skok obciążenia. Na rysunku 6 b) przedstawiono estymowaną piątą harmoniczną, natomiast na rysunku 6 c) przebiegi na górnym i dolnym kondensatorze w obwodzie prądu stałego. THD prądu obciążenia wynosi 25,39 %, natomiast po kompensacji piątej

harmonickej 10,40 %, po włączeniu ograniczenia prądu THD prądu sieci wynosi 14,3 %.

Na rysunku 7 a) przedstawiono widmo harmonicjnych przed włączeniem algorytmu ograniczania poziomu kompensacji, natomiast rysunek 7 b) przedstawia wyłączone ograniczanie, które spowodowało wzrost piątej harmonickej o około 9 % względem podstawowej.



Rys. 7. a) Widmo głównych harmonicjnych a) przed włączeniem ograniczenia b) po włączeniu ograniczenia

4. WNIOSKI KOŃCOWE

W artykule przedstawiono metodę sterowania równoległym filtrem aktywnym z adaptacyjnym algorytmem selektywnej kompensacji harmonicjnych na przykładzie kompensacji wybranej harmonickej. Nałożenie ograniczeń na wybraną harmoniczną umożliwia jej kompensację tylko do przyjętego poziomu. Umożliwia to zaprojektowanie przekształtnika o ograniczonej mocy zastępującego filtry pasywne. W planach na dalsze badania selektywnej kompensacji jest uruchomienie algorytmu sterowania na procesorze sygnałowym na stanowisku badawczym z falownikiem trójpoziomowym z diodami poziomującymi.

5. BIBLIOGRAFIA

1. IEEE519-2014: IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.

2. Akagi, H.: Active Harmonic Filters, Proceedings of the IEEE, Vol. 93, Issue 12, December 2005, s. 2128-2141.
3. He, Y., Liu, J., Tang, J., Wang, Z., Zou, Y.: Research on control system of DC voltage for active power filters with three-level NPC inverter, Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Austin 2008, s. 1173-1178.
4. Alfonso-Gil J.C., Perez E., Arino C., Beltran, H.: Optimization Algorithm for Selective Compensation in a Shunt Active Power Filter. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, No. 6, June 2015 s. 3351-3361.
5. Singh B., Verma V.: Solanki J.: Neural Network-Based Selective Compensation of Current Quality Problems in Distribution System, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 1, February 2007, s. 53-60.
6. Singh B., Verma V.: Selective Compensation of Power-Quality Problems Through Active Power Filter by Current Decomposition, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 2, April 2008, s. 792-99.
7. Wang Y.F., Li, Y.W., Grid Synchronization PLL Based on Cascaded Delayed Signal Cancellation, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 26, 2011, s. 1987-1997.
8. Cichowski A., Banach P., Śleszyński W.: Formowanie napięć wyjściowych trójfazowego przekształtnika sieciowego, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 6, 2014, s. 29-34.
9. Kozacky, W.J., Ogunfunmi, T.: An active noise control algorithm with gain and power constraints on the adaptive filter. EURASIP 2013.
10. Bajracharya C., Molinas M., Suul A. J., Undeland T.: Understanding of tuning techniques of converter controllers for VSC-HVDC, Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, Finland 2008.
11. Wojciechowski D., Strzelecki R., Bałkowski B.: Równoległy filtr aktywny sterowany predykcijnie, Prace Instytutu Elektrotechniki 2007, Instytut Elektrotechniki Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007
12. Szczepankowski P., Nieznański J., Śleszyński W.: Zastosowanie funkcji kształtu elementu skończonego w modulacji szerokości impulsów na przykładzie modulacji dwufazowej z kompensacją napięcia niezrównoważenia w trójpoziomym falowniku napięcia 3L-NPC, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 5, 2011, s. 208-213.

CONTROL OF MULTILEVEL ACTIVE POWER FILTER WITH SELECTIVE HARMONIC COMPENSATION

In this paper a control method of multilevel active power filter (APF) with selective harmonic compensation (SHC) is presented. The parallel APF is one of the most popular topology of the power quality improvement devices and is connected between power coupling point and nonlinear load to compensate current harmonics. Nowadays multilevel converters become increasingly popular because of its advantages such as: low output voltage THD, lower current ripple, low grid filters size and weight, possibility of using lower voltage of semiconductors. There are a lot of papers concerning SHC, but most of them do not consider maximum current limit of the inverter.

The APF uses Phase Locked Loop to synchronise with the grid and to eliminate harmonics in the grid voltage a Cascaded Delayed Signal Cancellation is implemented. The reference current is estimated by adaptive filter using least means squares learning method with estimated value limitation. In order to generate compensation current a predictive controller is implemented. Output voltages generation and stabilization of neutral point voltage of the multilevel inverter is based on a shape-function space vector modulator. The simulation in Matlab is prepared.

Keywords: active power filter, selective compensation, multilevel inverter NPC.