

przyczynia się do poprawy parametrów jakości energii oraz do zwiększenia sprawności procesu przekształcania energii elektrycznej w porównaniu z pokazanymi wcześniej układami [1][3]. Kolejną zaletą falownika kaskadowego jest obniżona emisja zaburzeń elektromagnetycznych [2][5][6], co może okazać się istotne w aplikacjach blisko finalnych odbiorców energii.

W opisywanych w literaturze metodach sterowania falowników kaskadowych, używanych do sprzęgania dwóch źródeł napięcia DC, udział energii pobieranej z poszczególnych źródeł jest zawsze stały [1][3][7], przez co nie jest możliwe reagowanie na zmiany dostępności energii z poszczególnych źródeł. W artykule zaproponowano nową metodę sterowania falownikiem kaskadowym, opartą na klasycznej modulacji hybrydowej, która pozwala na elastyczne sterowanie przepływem energii zarówno pomiędzy źródłami DC, jak i między tymi źródłami a siecią.

Falownik o topologii kaskadowej

Pięciopoziomowy falownik kaskadowy zbudowany z dwóch modułów falownikowych H-bridge przyłączonych do dwóch źródeł napięcia stałego przedstawiono na rysunku 2a. Wyjścia modułów połączone są ze sobą szeregowo. Wygenerowane napięcie wyjściowe jest sumą napięć poszczególnych modułów i może przyjąć pięć różnych poziomów.

W tabeli 1 przedstawiono analizę dostępnych stanów wyjścia falownika przy założeniu, że prąd obciążenia ma ten sam kierunek co napięcie wyjściowe. Stany falownika decydują o kierunku przepływu energii. Z przeprowadzonej analizy wynika, że w falowniku kaskadowym występują wszystkie możliwe warianty (kierunki) przepływu energii elektrycznej pomiędzy źródłami DC a wyjściem falownika.

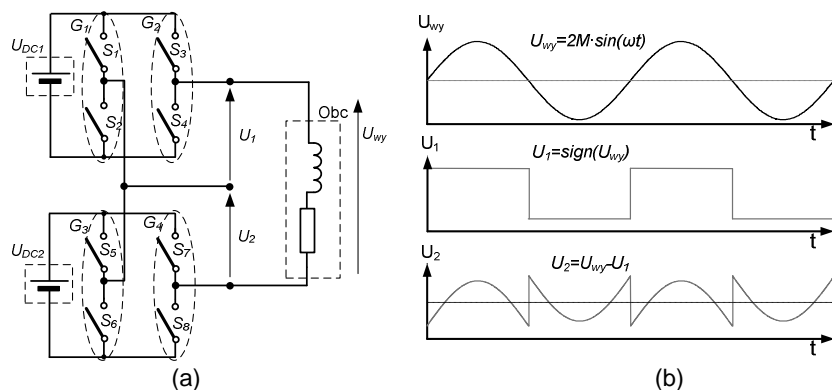
Tabela 1 Analiza stanów falownika kaskadowego pięciopoziomowego

U_{wy}/U_{DC}	U_1/U_{DC}	U_2/U_{DC}	Ozn.	Analiza energetyczna
+2	1	1	+2	Dwa źródła oddają energię
+1	1	0	+1 ₁	Energia pobierana z U_{DC1}
	0	1	+1 ₂	Energia pobierana z U_{DC2}
0	1	-1	0 ₁	Energia przesyłana z U_{DC1} do U_{DC2}
	0	0	0	Obciążenie zwarte, brak wymiany energii
	-1	1	0 ₂	Energia przesyłana z U_{DC2} do U_{DC1}
-1	-1	0	-1 ₁	Energia pobierana z U_{DC1}
	0	-1	-1 ₂	Energia pobierana z U_{DC2}
-2	-1	-1	-2	Dwa źródła oddają energię

Proponowany sposób sterowania falownikiem.

Zaproponowany sposób sterowania bazuje na klasycznej modulacji hybrydowej [1], w której jeden z modułów falownikowych sterowany jest sygnałem niskiej częstotliwości natomiast drugi moduł sterowany jest sygnałem zmodulowanym wysokiej częstotliwości. Sygnał sterujący niskiej częstotliwości powstaje z porównania sygnału referencyjnego z zerem (funkcja signum). Sygnał wysokiej częstotliwości jest sygnałem PWM zmodulowanym różnicą sygnału referencyjnego i sygnału niskiej częstotliwości (rys. 2b)

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012



Rys. 2 Schemat falownika kaskadowego (a) przebiegi modulujące występujące w procesie modulacji hybrydowej (b).

Stosunki mocy czynnej pobieranej z poszczególnych źródeł DC do całkowitej mocy pobieranej przez odbiornik AC zależą od głębokości modulacji M i określone są zależnościami:

$$(1) \quad \frac{P_1}{P_C} = \frac{2}{M \cdot \pi}$$

$$(2) \quad \frac{P_2}{P_C} = 1 - \frac{2}{M \cdot \pi}$$

Gdzie: M - głębokość modulacji, P_1 - moc oddawana ze źródła $DC1$, P_2 - moc oddawana ze źródła $DC2$, P_C - całkowita moc czynna pobierana przez odbiornik AC.

Z powyższych przedstawionych wzorów wynika, że pierwszy moduł falownikowy, sterowany niską częstotliwością, dostarcza do obciążenia większą część energii, natomiast drugi moduł falownikowy ma jedynie funkcję wspomagającą. Ponieważ moduły falownikowe są jednakowe, możliwe jest odwrócenie ich ról poprzez zmianę sygnałów sterujących, co stanowi podstawę sposobu sterowania falownikiem zaproponowanego w artykule. W proponowanym rozwiązaniu sygnały sterujące (nisko- i wysokoczęstotliwościowe) powstające w procesie modulacji hybrydowej są naprzemiennie przełączane pomiędzy dwoma mostkami falownika w wyliczonych okresach czasu. Okresy wyliczane są na podstawie żądanej proporcji energii pobieranej z poszczególnych źródeł. Aby nie generować zbyt wielu dodatkowych przełączeń tranzystorów, okresy przełączania sygnałów zaokrąglane są do wielokrotności okresu przebiegu wysokiej częstotliwości PWM. Aby to osiągnąć wylicza się współczynnik wypełnienia D zgodnie ze wzorem (3). Następnie przyjmuje się dwie liczby naturalne N i K takie, że po podzieleniu liczby N przez K otrzymuje się ułamek właściwy o wartości zbliżonej do wartości obliczonego współczynnika D .

Przez N okresów sygnału wysokiej częstotliwości PWM sygnał sterujący niskiej częstotliwości podawany jest na pierwszy moduł falownika natomiast na drugi moduł falownika podawany jest sygnał zmodulowany wysokiej częstotliwości. Później sygnały sterujące zostają przełączone pomiędzy mostkami falownika i przez następne $K-N$ okresów sygnału wysokiej częstotliwości PWM sygnał sterujący niskiej częstotliwości podawany jest na drugi moduł falownika natomiast na pierwszy moduł falownika

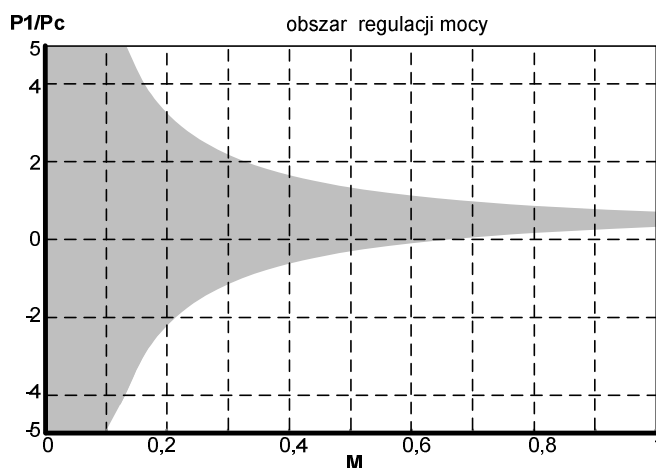
podawany jest sygnał zmodulowany wysokiej częstotliwości. Proces przełączania sygnałów następnie się powtarza.

Obszar możliwej regulacji stosunku mocy pobieranej ze jednego źródła DC do mocy całkowitej ograniczony krzywymi (1) i (2) przedstawiony został na rysunku 4. Przykładowo, dla głębokości modulacji równej 0,8, moc pobierana z pierwszego źródła DC może być regulowana w zakresie od 20,4% do 79,5% całkowitej mocy wyjściowej falownika. Dla głębokości modulacji $M < 2/\pi$ możliwe jest dowolne kształtowanie bilansu energetycznego układu włącznie z sytuacją, w której tylko jedno źródło dostarcza energię do odbiornika.

$$(3) \quad D = \frac{\frac{P_1}{P_c} + \frac{2}{M \cdot \pi} - 1}{\frac{4}{M \cdot \pi} - 1} \cong \frac{N}{K}$$

gdzie:

P_1/P_c – wartość zadanego podziału energii pobieranej z pierwszego źródła DC do energii całkowitej M – głębokość modulacji, D, N, K – współczynniki



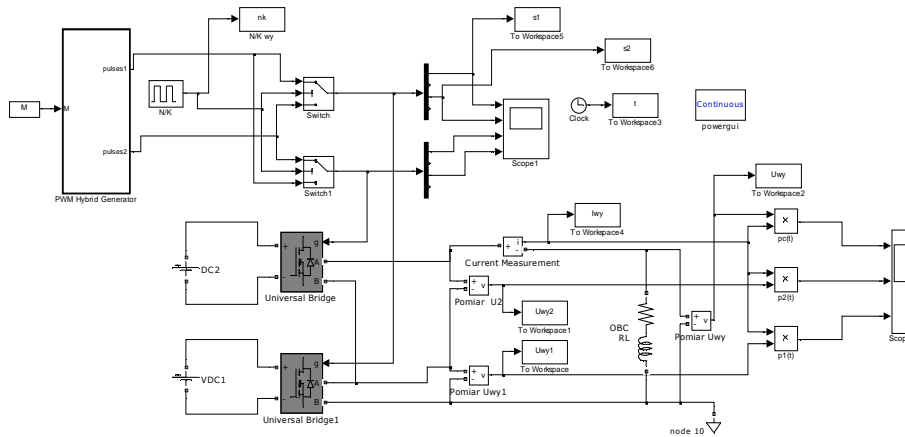
Rys. 3 obszar regulacji stosunku mocy P_1 do P_c .

Badania symulacyjne

Działanie falownika kaskadowego z zaproponowanym sterowaniem przetestowano w badaniach symulacyjnych przeprowadzonych w programie Matlab Simulink. Schemat układu symulacyjnego przedstawia rysunek 4. Jako obciążenie przyjęto dwójnik RL o parametrach $R=10 \Omega$ i $L=30\text{mH}$, zastosowana częstotliwość PWM wyniosła 8kHz.

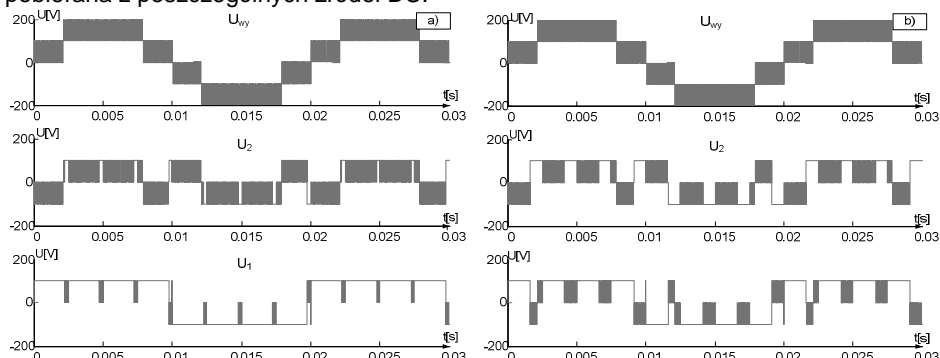
Przykładowe przebiegi napięcia wyjściowego na obciążeniu i napięć na wyjściach pojedynczych modułów falownikowych zaprezentowano na rysunku 5, dla założonego podziału mocy P_1/P_c równego: a) 75% b) 60%. Jak można zauważyć napięcie na wyjściu falownika pozostaje niezmiennie przy regulacji bilansu mocy. Zmieniają się natomiast kształty napięć wyjściowych poszczególnych modułów falownika.

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012



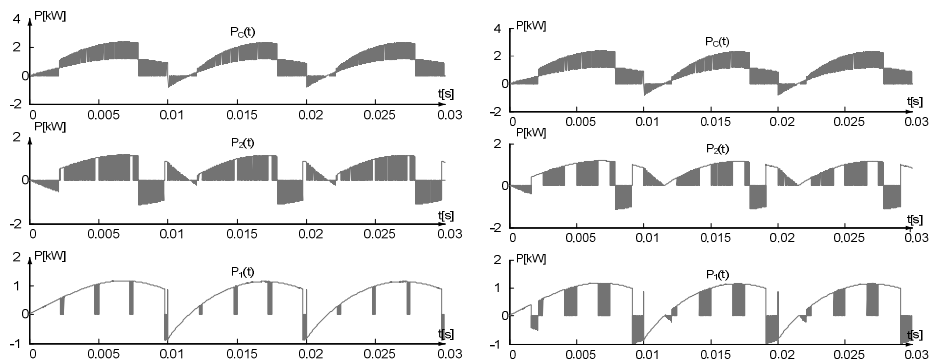
Rys 5 Schemat układu symulacyjnego.

Zmiany napięć wyjściowych na pojedynczych modułach mają bezpośrednie przełożenie na wartość średnią mocy chwilowej. Przebiegi czasowe mocy chwilowych zarejestrowanych na zaciskach modułów falownikowych zaprezentowano na rysunku 7. Zastosowanie zaproponowanej metody sterowania falownikiem nie zmienia mocy pobieranej przez odbiornik, natomiast zmienione zostają proporcje, w jakich energia jest pobierana z poszczególnych źródeł DC.



Rys.6 Przebiegi napięć na wyjściu falownika kaskadowego i poszczególnych jego modułów a) dla $P_1/P_c=75\%$ b) $P_1/P_c=60\%$

W przeprowadzonych symulacjach stosunek mocy pobieranej z poszczególnych źródeł DC do mocy całkowitej wyliczony na podstawie uzyskanych przebiegów jest zgodny z wartością zadaną. Należy jednak pamiętać, że w symulacji uwzględniono zostały jedynie moce na zaciskach falownika kaskadowego. Nie uwzględniono energii potrzebnej do zasilania układu sterowania oraz energii strat na przewodzenie i przełączanie tranzystorów.



Rys.7 Przebiegi napięć na wyjściu falownika kaskadowego i poszczególnych jego modułów a) dla $P_1/P_c=75\%$ b) $P_1/P_c=60\%$

Podsumowanie

Zaproponowany sposób sterowania falownikiem kaskadowym umożliwia sterowanie rozpięciem mocy w układzie poprzez niesymetryczne obciążanie źródeł DC. W pewnych warunkach możliwe jest również przesyłanie energii tylko z jednego źródła DC do obciążenia AC lub do obciążenia AC i drugiego źródła DC (praca prostownikowa).

Głównym obszarem zastosowania metody mogą być układy sprzęgania kilku rozproszonych źródeł energii elektrycznej z siecią elektroenergetyczną, napędy pojazdów elektrycznych i zasobniki energii elektrycznej.

Prezentowany sposób sterowania jest prosty w implementacji, ponieważ bazuje na charakterystykach statycznych falownika kaskadowego.

W planie dalszych prac znajduje się zastosowanie opracowanej metody w zamkniętym układzie regulacji, oraz opracowanie nowych metod sterowania pozwalających zwiększyć niezależność od zmian napięć DC oraz poprawiających dokładność regulacji.

Literatura

1. M. T. Hartman.: *Wielopoziomowe falowniki napięcia*, Fundacja rozwoju Akademii morskiej w Gdyni, - 2006.
2. P.C. Loh, D.G. Holmes, Y. Fukuta, T. A. Lipo.: *Reduced common mode carrier-based modulation strategies for cascaded multilevel inverters*, Industry Applications Conference, 37th IAS Annual Meeting 2002.
3. D.G. Holmes, T.A. Lipo.: *Pulse Width Modulation for Power Converters*, Principles and Practice, IEEE Press Series on Power Engineering, Wiley-IEEE Press, 2003.
4. J. Rusiński.: *Szeregowo-równoległy kompensator aktywny w układzie sprzęgania źródeł rozproszonych z siecią elektroenergetyczną* / X krajowa konferencja naukowa. Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym - SENE 2011. Łódź, Polska, - 2011.
5. A. Kempki, R. Smoleński, P. Leżyński.: *Conditions of CM voltage cancellation in multilevel voltage inverters with conventional and improved carrier-based SVPWM*. Przegląd Elektrotechniczny .- 2008, nr 11.
6. R. Smoleński, A. Kempki, J. Bojarski, P. Leżyński.: *Determination of flux density produced by multilevel inverters in CM voltage filter*. COMPEL : The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. Vol. 30, no 3, - 2011.

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

7. E. Kot, P. Leżyński, G. Benysek.: *Ocena jakości kształtowania przebiegów napięć wyjściowych wielopoziomowego falownika napięcia o topologii kaskadowej*, Przegląd Elektrotechniczny, -2009, nr 2.
8. J.I. Leon, S. Vazquez, L.G. Franquelo, J.J. Padilla, J.M. Carrasco.: *DC-Voltage-Ratio Control Strategy for Multilevel Cascaded Converters Fed With a Single DC Source*, Transactions on Industrial Electronics, IEEE VOL. 56, NO. 7, - 2009.
9. N. Pluschke, T. Grasshoff.: *More Efficiency for 3-Level Inverters*, Power Electronics Europe, www.semikron.com, Issue 2 March 2010.

Autorzy: *Mgr inż. Piotr Leżyński, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej, ul. Podgórna 50, 65 246 Zielona Góra E-mail: p.lezynski@iee.uz.zgora.pl*
Dr hab. inż. Adam Kempki Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej, ul. Podgórna 50, 65-246 Zielona Góra E-mail: a.kempski@iee.uz.zgora.pl



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



Lubuskie

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Autor *Piotr Leżyński*, jest stypendystą w ramach Poddziałania 8.2.2 „Regionalne Strategie Innowacji”, Działania 8.2 „Transfer wiedzy”, Priorytetu VIII „Regionalne Kadry Gospodarki” Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Unii Europejskiej i z budżetu państwa