

Emil KOT¹
Piotr LEŻYŃSKI²
Grzegorz BENYSEK¹

KASKADA FALOWNIKÓW NAPIĘCIA DO SPRZĘGANIA ROZPROSZONYCH ŹRÓDEŁ ENERGII

W artykule opisane zostały właściwości wielopoziomowego falownika napięcia o topologii kaskadowej, dzięki któremu możliwe jest sprzęganie rozproszonych źródeł energii z systemem energetycznym. Przedstawiona kaskada falowników umożliwia kształtowanie napięcia o tych samych parametrach, co kaskady typu H-Bridge lecz przy mniejszej liczbie zastosowanych łączników energoelektronicznych i źródeł zasilania. Zastosowana metoda modulacji w układzie sterowania falownikiem zmniejsza straty związane z komutacją łączników energoelektronicznych.

1 OKREŚLENIE WŁAŚCIWOŚCI KASKADY FALOWNIKÓW NAPIĘCIA

Znane z literatury wielopoziomowe falowniki napięcia o topologii kaskadowej charakteryzują się budową modułową dzięki której w łatwy sposób można zmieniać zakres napięciowy falownika bez konieczności stosowania dodatkowych transformatorów dopasowujących.

Jednak w porównaniu z innymi topologiami wielopoziomowych falowników napięcia typu „diode clamped” lub „capacitor clamped” [1], kaskada falowników wymaga stosowania izolowanych galwanicznie źródeł zasilania.

Każdy mostek musi mieć zatem własne, separowane źródło zasilania, w którym stałe napięcie zasilające wynosi U_D . Wygodnie jest zatem zrealizować omawiany falownik z identycznych mostków o tym samym napięciu stałym – jednakże nie jest to regułą. Napięcia te mogą być różne i mogą pochodzić np. z baterii akumulatorów, prostowników, ogniw paliwowych czy baterii słonecznych itp. Czyli dzięki obwodom separującym, do zasilania poszczególnych mostków można stosować źródła prądu stałego o różnej impedancji wewnętrznej. Ta właściwość predysponuje omawiany układ do zastosowań m. in. w systemach energetycznych z niekonwencjonalnymi źródłami energii elektrycznej. Zaletą stosowania niezależnych źródeł zasilania jest utrzymanie wartości

¹ Uniwersytet Zielonogórski Instytut Inżynierii Elektrycznej
ul. Podgórna 50, 65–246 Zielona Góra, tel. 068 3282253, e.kot@iee.uz.zgora.pl

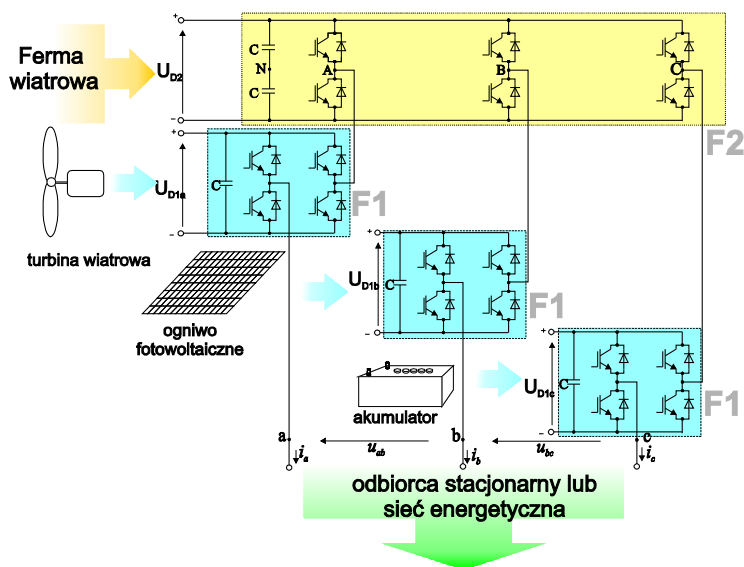
² Student Wydziału Elektrotechniki Informatyki i Telekomunikacji Uniwersytetu Zielonogórskiego, ul. Podgórna 50, 65–246 Zielona Góra

napięcia na elementach źródłowych na żądanym poziomie bez konieczności stosowania dodatkowych układów stabilizujących.

2 METODA STEROWANIA KASKADY FALOWNIKÓW NAPIĘCIA

Układ rozpatrywanej kaskady falowników przedstawiony na rysunku 1, umożliwia kształtowanie napięcia wyjściowego o dwóch, trzech, czterech, pięciu oraz sześciu poziomach [2].

Sposób powstawania poszczególnych napięć dla omawianych przypadków przedstawia rysunek 2.



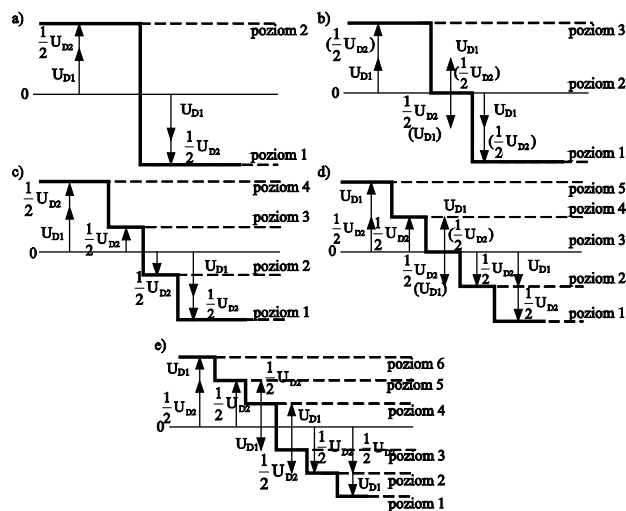
Rys.1. Trójfazowa kaskada falowników napięcia jako sprzęg odnawialnych źródeł energii

Dla zachowania stałej proporcji pomiędzy poszczególnymi poziomami w napięciu wyjściowym, przy wyborze algorytmu sterowania należy uwzględnić stosunek napięć zasilania poszczególnych mostków w jednej gałęzi falownika. I tak, dla kształtowania napięcia o trzech poziomach stosunek napięć powinien wystąpić $U_{D1}/U_{D2}=2$, czterech $U_{D1}/U_{D2}=1$, pięciu $U_{D1}/U_{D2}=0,5$ a sześciu $U_{D1}/U_{D2}=0,25$.

W tabeli 1 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń jakie uwzględniono podczas analizy porównawczej dla kaskady falowników napięcia z najprostszymi, pod względem ilości wykorzystania sygnałów nośnych, układami sterowania realizującymi trzy metody kształtowania napięcia wyjściowego [2].

Na podstawie wyników zawartych w tabeli, można zauważyć, że przebieg czasowy napięcia o pięciu poziomach najlepiej odwzorowuje sinusoidalny sygnał zadany, czego dowodem jest najniższa obliczona wartość współczynnika $WTHD_0$ wynosząca 0,55%. Wazony współczynnik zawartości wyższych harmonicznych, będący miarą jakości napięcia wyjściowego określa wpływ wyższych harmonicznych będących w bliskim

sąsiedztwie podstawowej harmonicznej. Mała wartość $WTHD_0$ wskazuje, na możliwość zastosowania mniejszego filtra biernego do zredukowania wyższych harmonicznych w kształtowanym napięciu wyjściowym.



Rys.2. Powstawanie wyjściowego napięcia fazowego u_o : a) dwóch, b) trzech, c) czterech, d) pięciu i e) sześciu poziomach wg [1]

Tab. 1. Porównanie właściwości kaskady falowników

		Metoda sterowania I	Metoda sterowania II	Metoda sterowania III	
1	Liczba poziomów przypadających na jeden okres napięcia biegunowego u_{aN}	4	5	6	
2	Podział napięć zasilających U_{D1}/U_{D2}	1	1/2	1/4	
3	Udział łączników falownika przełączających się z częstotliwością sygnału nośnego	Wszystkie,	Tylko łączniki falownika F1	Wszystkie,	
4	Ważony współczynnik zawartości wyższych harmonicznych $WTHD_0 u_a$ wyrażony w [%] przy zał. $f_c=2kHz$, $k=340$ i $M=1$	0,72	0,55	0,86	
5	Przekładnia napięciowa falownika wyrażona w [%]	75	66	60	
6	Pobór mocy czynnej z poszczególnych źródeł zasilających moduły falownika	P_{1i}/P_o	0,2	0,15	0,05
		P_2/P_o	0,4	0,6	0,85

Uwaga. P_o – całkowita moc wyjściowa; P_2 i P_{1i} - moce wejściowe falowników F2 i F1; $i=1, 2, 3$;

Mała przekładnia napięciowa badanego układu w przypadku kształtowania napięcia wyjściowego o pięciu- i sześciu- poziomach, jest niewątpliwie jego wadą i związana jest z nierównomiernym podziałem wartości napięć na elementach źródłowych U_D .

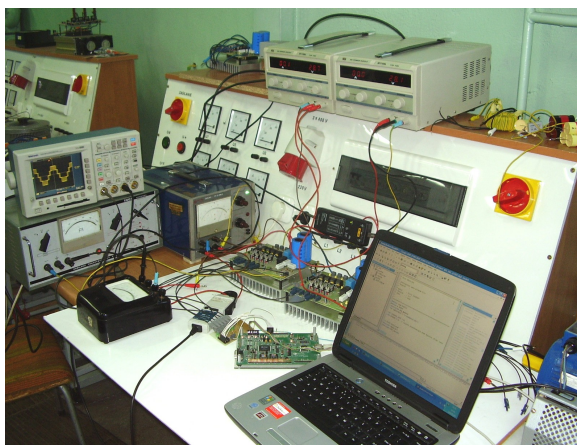
Im większa będzie różnica wartości napięć zasilających pomiędzy U_{D1} i U_{D2} , tym moce wejściowe P_1 i P_2 odpowiednio falowników F1 i F2 wchodzących w skład kaskady będą bardziej różnić się od siebie.

Przy zastosowaniu podziału napięć $U_{D1}/U_{D2}=0,5$ zaprojektowano układ sterowania tak, aby możliwa była mniejsza częstotliwość przełączania łączników falownika F2, przetwarzającego proporcjonalnie większą część energii kaskady. Ma to znaczenie w szczególności w układach dużych mocy i przyczynia się do zwiększenia całkowitej sprawności układu.

Spośród innych możliwych układów sterowania (opartych na zastosowaniu dwóch metod modulacji - PWM i schodkowej) proponowany sposób wraz z zastosowanym podziałem napięć zasilających $U_{D1}/U_{D2}=0,5$ umożliwia kształtowanie pięciopozomowego przebiegu czasowego napięcia wyjściowego o najmniejszym współczynniku zawartości wyższych harmonicznych.

3 WYBRANE WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

W celu sprawdzenia i weryfikacji obliczeń analitycznych, zaprojektowano i zbudowano jedną gałąź kaskady falowników napięcia. Stanowisko pomiarowe przedstawia rysunek 3. Układ sterowania został zrealizowany za pomocą procesora DSP firmy Analog Devices, według Metody II, patrz tabela 1 (napięcie wyjściowe pięciopozomowe). Jako obciążenie zastosowano odbiornik liniowy RL.



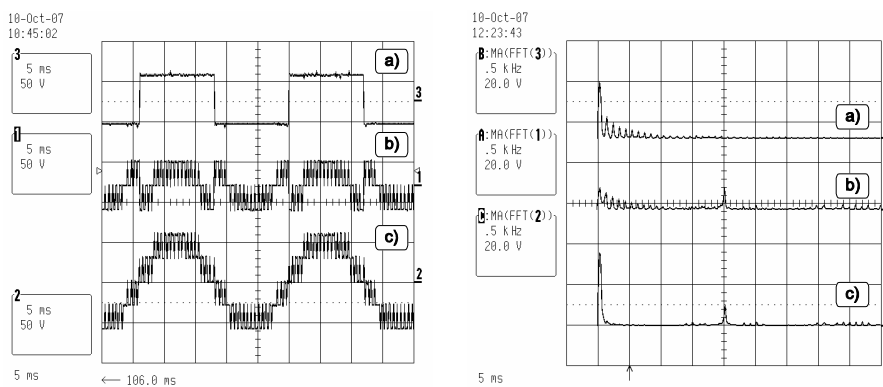
Rys. 3 Stanowisko laboratoryjne do badań kaskady falowników napięcia

Przykładowe zarejestrowane przebiegi czasowe napięć pokazano na rysunek 4. Zauważyć tu można, że częstotliwość przełączania łączników falownika F2 wynosi 50Hz, zaś łączniki falownika F2 przełączają się z częstotliwością sygnału nośnego $f_c=2\text{kHz}$.

Analizując przebiegi napięć wyjściowych można stwierdzić, że F1 pełni rolę falownika pomocniczego, przetwarzającego mniejszą w porównaniu z falownikiem F2 moc pochodzącą ze źródła zewnętrznego (np. zmierzona moc wejściowa falowników F1 i F2 wyniosła odpowiednio $P_1=0,2\text{p.u.}$ oraz $P_2=0,8\text{p.u.}$). W związku z powyższym

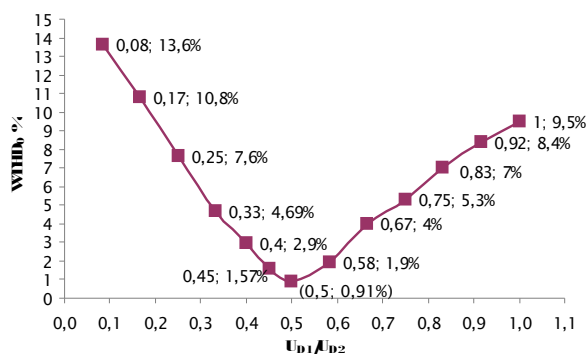
można stwierdzić, że Falownik F2 (przełączany z częstotliwością sieci) odpowiedzialny jest za przenoszenie większej mocy, natomiast falownik F1 stanowi tylko dodatkowe źródło napięcia, służące do poprawy jakości napięcia wyjściowego całej kaskady falowników.

Oprócz tego, falownik F1 przyczynia się do zwiększania harmonicznej podstawowej i poprawy kształtu napięcia wyjściowego (zmniejsza współczynnik zawartości wyższych harmonicznych).



Rys.4 Napięcia wyjściowe kaskady falowników dla $M=0,9$ oraz ich widma amplitudowe: a) przebieg czasowy napięcia u_{AN} ; b) przebieg czasowy napięcia u_{Aa} ; c) przebieg czasowy napięcia u_{aN}

Przeanalizowano również (na bazie badań eksperymentalnych) wpływ zmian stosunku napięć zasilających U_{D1}/U_{D2} na wartość ważonego względem pierwszej harmonicznej współczynnika zawartości wyższych harmonicznych. Na podstawie krzywej z rysunku 5 można jednoznacznie stwierdzić, że ze względu na kształt napięcia wyjściowego, tzn. najmniejszy współczynnik $WTHD_0$, wskazane jest utrzymywanie stosunku napięć zasilających na poziomie $U_{D1}=0,5U_{D2}$. Wiąże się to niestety ze zmniejszeniem przekładni napięciowej.



Rys. 5. Zależność ważonego współczynnika zawartości wyższych harmonicznych, pięciopozomowego napięcia wyjściowego od zmian stosunku napięć zasilających U_{D1} i U_{D2}

4 PODSUMOWANIE

W artykule opisano właściwości wielopoziomowego falownika napięcia o topologii kaskadowej, dzięki któremu możliwe jest m.in. sprzężanie rozproszonych źródeł energii z systemem energetycznym. Przedstawiona metoda sterowania kaskadą falowników umożliwia przełączanie łączników energoelektronicznych falownika F2 z częstotliwością sieci. Taki sposób sterowania zmniejsza straty związane z komutacją łączników energoelektronicznych. W badanym układzie moc czynna pobierana przez poszczególne falowniki F1 i F2 jest ściśle związana z wartościami napięć zasilania oraz z współczynnikiem głębokości modulacji M.

W badaniach eksperymentalnych, przy zachowaniu stałego współczynnika $M=0,9$, wykazano, że falownik F2 odpowiedzialny jest za przenoszenie większej części energii, natomiast falownik F1 stanowi dodatkowe źródło napięcia służące do poprawy kształtu napięcia wyjściowego falownika.

W literaturze tematu spotkać można rozwiązania o podobnych właściwościach, np. falowniki tandemowe; lecz w odniesieniu do zasilania silników elektrycznych [3].

5 LITERATURA

1. Holmes D. G., Lipo. A. : *Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice*, IEEE Press Series on Power Engineering, Wiley-IEEE , 2003
2. Kot E.: *Analiza pracy kaskady wielopoziomowego, trójfazowego falownika napięcia w zmodyfikowanej topologii*, Rozprawa Doktorska, Instytut elektrotechniki Warszawa-Międzylesie 2008 (materiały w przygotowaniu).
3. Trzynadlowski A.M., Patriciu N., Blaabjerg, Pedersen J. K.,: *A Hybrid, Current-Source/Voltage-Source Power Inverter Circuit* IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 16, no.6, November 2001, pp. 866-871

CASCADED VOLTAGE CONVERTERS TO INTER-CONNECT DISTRIBUTED ENERGY RESOURCES

Properties of the multilevel cascade voltage inverter were investigated. Considered topology allows to interconnect distributed energy resources with the power system additionally enables to shape the output voltages with the same parameters like H-Bridge structure, but for lower number of switches and supplying sources. Applied control strategy allows to lower the commutation losses.