

Marek T. HARTMAN¹

WYBRANE ELEMENTY ANALIZY PORÓWNAWCZEJ WIELOPOZIOMOWYCH FALOWNIKÓW NAPIĘCIA

W artykule przedstawiono przykładowe elementy analizy porównawczej wielopoziomowych falowników napięcia w czterech podstawowych topologiach: NPC- z punktem neutralnym, DCI- z diodami poziomującymi, FCC – z kondensatorami o zmiennym potencjale oraz IHBI- izolowane mostki. Zwrócono uwagę na wybór kryteriów porównania topologii falownika z uwagi na rozwiązanie konkretnego problemu technicznego.

1 WSTĘP

Rozwój technologii wytwarzania elementów półprzewodnikowych (tyrystorów GTO, IGCT; oraz tranzystorów IGBT-HV) spowodował gwałtowne poszukiwania takich rozwiązań układowych, które poprawiałyby kształt napięć wyjściowych i umożliwiały pracę falowników przy średnich napięciach zasilania. Wymagania te spełniają wielopoziomowe falowniki napięcia. Obecne spotykane topologie napięciowych falowników wielopoziomowych można podzielić na cztery główne grupy:

- falowniki z punktem neutralnym zasilania **NPC** (ang. *neutral-point clamped inverter*)
- falowniki z diodami poziomującymi **DCI** (ang. *diode-clamped inverter*)
- falowniki z kondensatorami o zmiennym potencjale **FCI** (ang. *flying-capacitor inverter*)
- falowniki z izolowanymi mostkami często łączonymi szeregowo w postaci tzw. kaskady falowników **IHBI** (ang. *isolated H-bridge inverter*)

Każda z tych topologii charakteryzuje się inną liczbą użytych elementów półprzewodnikowych jak również elementów biernych. Analiza porównawcza układów wielopoziomowych falowników napięcia pod kątem przyjętych kryteriów, może być ciekawa i pomocna w wyborze danej topologii falownika do konkretnego przypadku zastosowania.

¹Akademia Morska w Gdyni Katedra Elektroenergetyki Okrętowej, 81-225 Gdynia, ul. Morska 81-87, Tel.(058) 6109515, email: mhartman@am.gdynia.pl

2 PORÓWNANIE TOPOLOGII WIELOPOZIOMOWYCH FALOWNIKÓW NAPIĘCIA

Na podstawie znajomości zasady działania danego układu można porównać topologie falowników wielopoziomowych napięcia według przyjętych kryteriów. Kryteria te mogą być różne ale zawsze istotne dla konkretnego przedsięwzięcia. I tak, przyjmując jako kryterium wymaganą liczbę elementów półprzewodnikowych i biernych występujących w danej topologii falownika w zależności od ilości poziomów napięcia wyjściowego, dla jednej fazy układu trójfazowego, uzyskuje się wyniki przedstawione w tabeli 1 [6]

Tab. 1. Liczba wymaganych elementów do realizacji jednej fazy trójfazowego falownika napięcia wg [6] gdzie: n_p jest liczbą poziomów napięcia wyjściowego ($n_p > 2$)

	Falownik typu DCI (NPC dla $n_p = 3$)	Falownik typu FCI	Falownik typu IHBI
liczba łączników	$2(n_p - 1)$	$2(n_p - 1)$	$2(n_p - 1)$
liczba diod poziomujących	$(n_p - 1)(n_p - 2)$	0	0
liczba kondensatorów o zmiennym potencjale	0	$\frac{1}{2}(n_p - 1)(n_p - 2)$	0
liczba kondensatorów na źródle zasilania	$(n_p - 1)$	$(n_p - 1)$	$\frac{1}{2}(n_p - 1)$

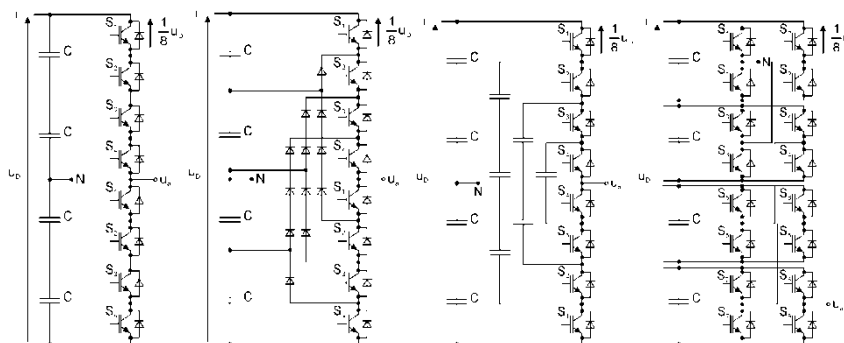
Podstawowe porównanie cech wybranych topologii falowników wielopoziomowych wraz z szacunkową oceną kosztów ich realizacji podano w pracach [3,4,5]. Analizę porównawczą Autorzy tych prac przeprowadzili przy następujących założeniach:

1. Wartość napięcia stałego zasilająca falownik wynosi $U_D = 6,2$ kV.
2. Układy falowników powinny dostarczyć do obciążenia międzyprzewodowe napięcie przemiennie o wartości skutecznej 4,2 kV.

3. Jako łączniki w poszczególnych topologiach falowników są wykorzystane moduły z tranzystorami IGBT (3,3 kV, 1200A). Aby spełnić wymogi pewnej pracy tranzystorów w stanach dynamicznych i blokowania, w każdej gałęzi falownika włączono 4 takie moduły.

Jako topologie falowników wybrano:

1. Klasyczny układ dwupoziomowego falownika z modułami połączonymi szeregowo (rys. 1a bez poziomu zerowego). Tę konfigurację oznaczono jako „FK-P2”.
2. Układ falownika typu NPC z 4 modułami połączonymi szeregowo w jednej gałęzi. Jest to układ trzypoziomowy (rys.1a z wykorzystaniem poziomu zerowego). Jest to oznaczenie „NPC-P3”.
3. Układ falownika typu DCI z 4 kondensatorami i 4 modułami tranzystorów w gałęzi (rys. 1b). Układ taki umożliwia kształtowanie fazowego napięcia wyjściowego na 5 poziomach. Oznaczono go jako „DCI-P5”.
4. Układ falownika typu FCI z punktem neutralnym (rys.1c). Napięcia na kondensatorach umożliwiają kształtowanie fazowego napięcia wyjściowego na pięciu poziomach. Jest to układ „FCI-P5”.
5. Układ falownika typu IHBI zbudowany jako kaskada 4 modułów mostkowych (rys. 1d). Układ taki umożliwia kształtowanie fazowego napięcia wyjściowego na dziewięciu poziomach. Oznaczona go jako „IHBI-P9”



Rys.1. Pojedyncze gałęzie wielopoziomowych falowników napięcia;
a) FK-P2 oraz NPC-P3, b) DCI-P5, c) FCI-P5, d) IHBI-P9 wg [3,4,5]

Ocenę subiektywną Autorów prac [3,4,5] dotyczącą każdej z rozważanych topologii falowników przedstawiono w tabelach 2 oraz 3

Tab. 2. Porównanie struktur wielopoziomowych falowników napięcia wg [3,4,5]

	<i>Falownik FK-P2</i>	<i>Falownik NPC-P3/DCI-P5</i>	<i>Falownik FCI-P5</i>	<i>Falownik IHBI-P9</i>
<i>Liczba poziomów napięć biegunowych przypadających na jeden okres</i>	2	3 – NPC 5 - DCI	5	9
<i>Przepięcia w napięciu wyjściowym falownika</i>	<i>Bez stabilizacji poziomu napięcia</i>	<i>Bez stabilizacji poziomu napięcia</i>	<i>Bezpośrednie stabilizowanie poziomu napięcia</i>	<i>Bezpośrednie stabilizowanie poziomu napięcia</i>
<i>Przepięcia na łącznikach</i>	<i>Duże</i>	<i>Małe</i>	<i>Małe</i>	<i>Małe</i>
<i>THD</i>	<i>Bardzo duży</i>	<i>Mały</i>	<i>Mały</i>	<i>Bardzo mały</i>
<i>Wstępne ładowanie kondensatorów</i>	<i>Proste</i>	<i>Proste</i>	<i>Skomplikowane</i>	<i>Skomplikowane</i>
<i>Zabezpieczenie układu falownika</i>	<i>Łatwe</i>	<i>Łatwe</i>	<i>Skomplikowane</i>	<i>Skomplikowane</i>
<i>Sterowanie falownika</i>	<i>Proste</i>	<i>Skomplikowane</i>	<i>Skomplikowane</i>	<i>Skomplikowane</i>
<i>Stabilizacja napięcia na kondensatorach w punkcie zerowym</i>	<i>Nie występuje</i>	<i>Wymagane</i>	<i>Wymagane</i>	<i>Nie występuje</i>
<i>Filtr wyjściowy</i>	<i>Bardzo duży</i>	<i>Mały</i>	<i>Mały</i>	<i>Bardzo mały</i>

Tabela 3. Liczba użytych elementów wchodzących w skład jednej fazy falownika z rys. 1

	Falownik FK-P2	Falownik NPC-P3	Falownik DCI-P5	Falownik FCI-P5	Falownik IHBI-P9
Moduły z tranzystorami IGBT	8	8	8	8	16
Diody poziomujące	0	4	12	0	0
Źródła zasilania	1	1	1	1	4
Układ przeciwprzepięciowy (ang. snubber)	8	8	8	0	0
Kondensatory (o zmiennym potencjale)	0	0	0	6	0
Kondensatory na źródle zasilania	4	4	4	4	4

Autorzy prac [3,4,5] dokonali subiektywnej oceny kosztów realizacji danej topologii falownika. Przyjęli oni następujące założenia, co do wartości względnych kosztów poszczególnych elementów:

1. Koszt jednego tranzystora IGBT wynosi 1 jednostkę wartości względnej (p.u)
2. Koszt diody mocy wraz z układem przeciwprzepięciowym wynosi 0,5 p.u
3. Koszt diod poziomujących (dla falownika DCI) wynosi 0,3 p.u
4. Koszt kondensatora wynosi 0,5 p.u (1,5kV, 5mF)
5. Koszt elementów układu przeciwprzepięciowego wynosi 0,1 p.u dla jednego łącznika
6. Koszt zastosowanych przyrządów półprzewodnikowych (o niższej wartości napięcia: 1600V) w falowniku typu IHBI wynosi 0,5 p.u

Wyniki obliczeń kosztów realizacji danej topologii falownika przedstawia tabela 4 wg [3,5]

Tab. 4. Porównanie szacunkowych kosztów realizacji poszczególnych topologii falowników na podstawie [3,5] (bez filtrów wyjściowych)

	Falownik FK-P2	Falownik NPC-P3	Falownik DCI-P5	Falownik FCI-P5	Falownik IHBI-P9
Koszty łączników energoelektronicznych	24	24	24	24	24
Koszty kondensatorów na źródle zasilania	6	6	6	6	12
Dodatkowe koszty (diod/kondensatorów)	-	3,6	10,8	9	-
Koszty układów przeciwprzepięciowe	2,4	2,4	2,4	-	-

W tabeli 4 nie zawarto kosztów filtra wyjściowego falownika. Najbardziej kosztownym jest filtr wyjściowy dla falownika dwupoziomowego (FK-P2) z uwagi na największą zawartość harmonicznych w napięciu wyjściowym. Przyjmuje się, że głównym kosztem takiego filtra jest koszt cewki indukcyjnej. Szacuje się, że koszt takiego filtra jest równy kosztowi elementów jednej fazy falownika [5].

Na podstawie znajomości zasady działania oraz topologii wielopoziomowych falowników napięcia, przedstawione w tabelach 2, 3 oraz 4 przykładowe wyniki szacunków pozwalają wyciągnąć następujące wnioski i spostrzeżenia:

- We wszystkich topologiach wielopoziomowych falowników napięcia niezbędne jest zastosowanie filtrów wyjściowych zmniejszających szybkość narastania napięcia oraz tłumiących wyższe harmoniczne. W wielu przypadkach niezbędne jest także tłumienie prądu płynącego w przewodzie neutralnym (ang. *common mode*). Im więcej jest poziomów w napięciu wyjściowym, tym mniejsze są parametry gabarytowo-masowe filtra biernego wymaganego do poprawienia kształtu napięcia wyjściowego.
- Większa liczba poziomów w napięciu wyjściowym falownika napięcia oznacza, że mniejsza jest szybkość narastania (du/dt) napięcia podczas zmiany poziomów napięcia wyjściowego, a tym samym mniejsze są straty mocy w izolacji maszyn i transformatorów przyłączonych do wyjścia falownika.
- Zastosowanie topologii falowników typu DCI, FCI czy IHBI w sieciach średnich napięć umożliwia pracę pojedynczego łącznika falownika typu IGBT przy obniżonym napięciu, np. $1/8 U_D$. W przypadku klasycznej (dwupoziomowej)

topologii falownika napięcia wymagane jest stosowanie szeregowego połączenia łączników dla zmniejszenia napięć blokowania na poszczególnych łącznikach.

Autorzy prac [1,3] podają, że dla przemysłowych układów wielopoziomowych falowników w sieciach średnich napięć maksymalna liczba poziomów w napięciu biegunowym (fazowym) nie przekracza 4.

Większą liczbę poziomów oraz większy zakres napięciowy praktycznie można uzyskać w falownikach kaskadowych, np. falownikach typu IHBI. Budowa modułowa oraz separowane źródła zasilania falowników ISHB sprawiają, że są one bezpieczniejsze pod względem porażenia prądem elektrycznym oraz łatwe w eksploatacji.

Równie interesujące porównanie struktur falowników wielopoziomowych przedstawiono w pracy [2]. Autorzy dokonali porównań możliwości zastosowania falowników wielopoziomowych w systemie transmisyjnym wysokich napięć AC/AC. Jako przykład rozpatrzono konwersję AC/DC oraz DC/AC, tak aby uzyskać przekształcenie napięć z 128 kV do 11 kV. Członem przekształtnika typu DC/AC były szeregowo połączone moduły falowników wielopoziomowych o różnej topologii. Zestawienie cech charakterystycznych oraz ilości niezbędnych elementów każdej z topologii rozpatrywanych falowników przedstawiono w tabeli 5.

Tab. 5. Porównanie cech charakterystycznych falowników wielopoziomowych w wybranym przykładzie przekształtnika DC/AC wg [2]

<i>Liczba:</i>	<i>Falownik typu DCI</i>	<i>Falownik typu FCI</i>	<i>Falownik typu IHBI</i>
<i>Modułów falowników</i>	7	7	7
<i>Poziomów napięć w module falownika</i>	5	9	3
<i>Poziomów napięć w przebiegu wyjściowym</i>	29	57	15
<i>Elementów składających się na 1 łącznik</i>	2	1	4
<i>Łączników typu IGBT</i>	112	112	112
<i>Kondensatorów</i>	14	63	7
<i>Diod poziomujących</i>	28	-	-

3 ZAKOŃCZENIE

Przedstawione w artykule przykładowe wyniki porównań wybranych cech topologii wielopoziomowych falowników napięcia mogą służyć jako materiał pomocny w wyborze konkretnego rozwiązania układowego. Nie ma uniwersalnej topologii falownika napięcia, która górowałaby nad innymi rozwiązaniami. Każda z przedstawionych topologii wielopoziomowych falowników ma swoje wady i zalety. Najczęściej potrzeba rozwiązania konkretnego problemu technicznego przesądza o wyborze danej topologii falownika. Warto jednak znać wstępne koszty podjętej decyzji i porównać je z innymi rozwiązaniami. Temu m.in. służy ten artykuł.

4 LITERATURA

1. Anderson B.R. Xu L., Horton P.J., Cartwright P. *Topologies for VSC transmission*. Power Engineering Journal, June 2002, pp.142-150
2. Gerry D., Wheeler P., Clare J., Bassett R.J., Oates C.D.M., Crookes R.W. *Multi-level, multi-cellular structures for high voltage power conversion*. Proceedings of EPE 2001 Conference, Graz, pp.1-5.
3. Shakweh Y., Lewis E.A. *Assessment of Medium Voltage PWM VSI Topologies For Multi-Megawatt Variable Speed Drive Applications*, Proceedings of IEEE-PESC '99 Conference, Charleston, South Carolina, USA, pp.965-970.
4. Shakweh Y., Lewis E.A. *The universal medium voltage adjustable speed drive*. Proceedings of EPE'99 Conference, Lausanne, pp.1-8
5. Shakweh Y. *MV inverter stack topologies*. Power Engineering Journal, June 2001, pp.139-149
6. Sirisukpraset S. *Optimised harmonic stepped-waveform for multilevel inverter*. M.Sc Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia 1999

CHOSEN ELEMENTS OF COMPARISON ANALYSE OF MULTILEVEL VOLTAGE INVERTERS

Same results of comparison analyse of multilevel voltage inverters in four topologies namely NPC, DCI, FCC and IHBI have been presented in this paper. It has been emphases that comparison criteria should be chosen in the eye of the inverter practical application.