#### IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

# Tomasz SAK<sup>1</sup>

Instytut Elektrotechniki w Warszawie, Zakład Przekształtników Mocy (1)

# Wysokosprawny przekształtnik napięcia DC/AC o sinusoidalnym napięciu wyjściowym

**Streszczenie**. W artykule przedstawiono nowy układ przekształtnika DC/AC. Składa się on z trzech połączonych równolegle trójpoziomowych trójfazowych falowników napięcia (3x3F3PFN) NPC z diodami poziomującymi współpracujący z dławikami sprzężonymi magnetycznie w układzie 18-pulsowym. Taka konfiguracja redukuje częstotliwość łączeń tranzystorów do minimum z zachowaniem małego współczynnika THD napięcia wyjściowego.

Słowa kluczowe: dławiki sprzężone, trójpoziomowy falownik napięcia, przekształtnik DC/AC

#### Wstęp

Stosowane obecnie przekształtniki DC/AC budowane są głównie jako urządzenia bazujące na elementach półprzewodnikowych sterowalnych, wykonanych w różnych topologiach. Znajdują zastosowanie wszędzie tam, gdzie potrzebne jest przekształcanie energii. Aby sprostać potrzebom rynkowym oraz wymogom jakości energii stawianym przez zasilane urządzenia stosuje się układy coraz bardziej złożone. Niezmiennym czynnikiem w obecnych urządzeniach energoelektronicznych przekształcających energię jest częstotliwość łączeń elementów sterowalnych. Wysoka częstotliwość łączeń powoduje generowanie zakłóceń elektromagnetycznych oraz zwiększa straty łączeniowe tranzystorów.

Artykuł przedstawia nowe rozwiązanie, wyniki badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych przekształtnika DC/AC zbudowanego z 3x3F3PFN współpracujących z dławikami sprzężonymi w układzie 18-pulsowym [1] o mocy 15kW. Schemat takiego układu przedstawia rysunek 1. Połączenie specjalnie nawiniętych dławików i odpowiednio sterowanych trójpoziomowych falowników napięcia o częstotliwości łączeń tranzystorów równej częstotliwości wyjściowej umożliwiło uzyskanie 36 schodkowego napięcia wyjściowego o niskim THD napięcia na poziomie około 5%. Badany układ zgłoszono do Urzędu Patentowego RP pt.: Sposób i układ do przekształcania energii elektrycznej z wykorzystaniem falowników wielopoziomowych połączonych równolegle" o numerze zgłoszenia P.414956.



Rys. 1. Schemat przekształtnika DC/AC w układzie trzech równolegle połączonych trójpoziomowych falowników napięcia współpracujących z dławikami sprzężonymi w układzie 18-pulsowym.

#### Dławiki sprzężone w układzie 18-pulsowym

W celu zapewnienia poprawnej pracy najistotniejszym elementem jest dostosowanie obwodu magnetycznego do danej konfiguracji. W tym artykule przedstawiono konfigurację sprzężonych dławików w układzie 18-pulsowym. Zespół dławików składa się z dwóch układów dławików sprzężonych, które przekształcają dziewięć fazowych napięć pochodzących z trzech trójfazowych trójpoziomowych falowników napięcia w układ trójfazowy. Jednym z dławików jest przesuwnik fazowy PF( $\lambda$ ), a drugim dzielnik prądowy DP(n) [2]. Oba rodzaje dławików wykonane zostały w postaci oddzielnych obwodów magnetycznych na każdą fazę. Sposób połączenia uzwojeń poszczególnych dławików przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Schemat połączeń dławików sprzężonych w układzie 18-pulsowym.

Każdy z układów dławików musi posiadać określony stosunek liczby zwojów, taki aby indukowane napięcia w uzwojeniach wymusiły strumień magnetyczny, który będzie kształtował prąd na wyjściu układu. Stosunek poszczególnych uzwojeń widocznych na rysunku 2 przedstawiają równania (1) i (2).

(1) 
$$\frac{Na}{Nb} = \frac{\sin(60^{\circ} - 20^{\circ})}{\sin(20^{\circ})} = 1,88$$

(2) 
$$\frac{Nc}{Nd} = 2\cos(20^{\circ}) = 1,88$$

W dławiku PF( $\lambda$ ) występuje uzwojenie *Na+Nb*, gdzie ilość zwojów tego uzwojenia stanowi suma algebraiczna uzwojeń *Na* i *Nb*. Taka przekładnia zwojowa dławika umożliwia uzyskanie 20° elektrycznych przesunięcia fazy na wyjściu dławika. Końce uzwojeń *Na* i *Na+Nb* każdej fazy układu zasila się z dwóch źródeł napięciowych o różnicy 40° elektrycznych kąta fazowego. Wartości prądów wpływających do dławika od poszczególnych faz falowników są sobie równe co obrazuje wykres wektorowy na rysunku 3a.

W dławiku DP(n) dzięki założonemu stosunkowi zwojów uzyskuje się różny podział prądów płynący przez uzwojenia tego dławika. Wartość prądu płynącego przez uzwojenie *Nc* jest proporcjonalna do wartości prądu płynącego przez uzwojenie *Nd* z zachowaniem stosunku ze wzoru (2). Wykres wektorowy prądów płynących przez dławik DP(n) przedstawiony jest na rysunku 3b. Zachowanie proporcji uzwojeń obu

# IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

rodzajów dławików, moduły prądów fazowych kolejnych falowników są sobie równe a ich suma jest wartością wyjściowego prądu fazowego, co przedstawia równanie (3) i (4).



Rys. 3. Wykres wskazowy prądów fazy A: a) w układzie dławików PF(λ), b) w układzie dławików DP(n), c) prąd wyjściowy układu.

(3) 
$$|I_{F0A}| = |I_{F1A}| = |I_{F2A}|$$

(4) 
$$I_A = I_{F0A} + I_{F1A} + I_{F2A}$$

### Generacja napięć prostokątnych

Przekształtnik 3x3F3PFN jest sterowany w taki sposób, żeby napięcia fazowe falowników F0, F1, F2 były przesunięte względem siebie o 20° elektrycznych. Dodatkowo każdy z falowników trzypoziomowych generuje wektor zerowy, który trwa 10° elektrycznych i występuje przy zmianie biegunowości napięcia fazowego. Dzięki niemu możliwe jest generowanie przez dławiki sprzężone napięcia o 36 schodkach [3] widocznego na rysunku 4c. Na rysunku 4a przedstawione są trzy przebiegi napięć fazy A kolejnych falowników wraz z zaznaczeniem charakterystycznych przesunięć fazowych. Sygnały sterujące tranzystorami w trzech falownikach są impulsami prostokątnymi o częstotliwości sieci zasilającej, co przedstawia rysunek 4b.



Rys. 4. Przebiegi czasowe: a) napięć fazy A poszczególnych falowników, b) sygnału sterującego górnymi tranzystorami T1 i T2 fazy A falownika F0, c) wyjściowego napięcia fazowego.

#### Badania eksperymentalne

W celu przeprowadzenia badań eksperymentalnych przekształtnika 3x3F3PFN współpracujących z dławikami sprzężonymi powstał model laboratoryjny widoczny na rysunku 5. Układ został zasilony przez trójfazowy dwupoziomowy prostownik aktywny regulujący napięcie w obwodzie DC-link o wartości 495VDC. Wartość tego napięcia wynika ze wzoru (5).

(5) 
$$U_{DC} = \frac{3\pi \cdot \sqrt{2} \cdot U_s}{18 \cdot 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \sin(180^\circ / 18)} = 1,5076 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_s = 1,23 \cdot U_s$$

gdzie  $U_s$  jest skuteczną wartością wyjściowego napięcia międzyprzewodowego układu równą 400VAC na którą były zaprojektowane dławiki.



Na samej górze znajdują się trzy jednakowe trzypoziomowe falowniki napięcia o mocy 7,5kW każdy. Sygnały sterujące pracą przekształtników doprowadzone zostały za pomocą światłowodów ze sterownika. Algorytm sterowania został zaimplementowany do układu programowalnego typu Cyclone III znajdującego się na sterowniku widocznym na dole fotografii.

U góry umiejscowione są dławiki typu DP(n) – dzielniki prądu, poniżej dławiki typu PF( $\lambda$ ) – przesuwnik fazy.

Rys. 5. Model laboratoryjny przekształtnika DC/AC 3x3F3PFN (a) współpracujących z sprzężonymi dławikami w układzie 18-pulsowym (b).

Badany model zbudowano według schematu z rysunku 6. Został przebadany pod kątem różnego charakteru obciążenia i układu trój- i jednofazowego. Pomiary zarejestrowane na wejściu układu za pomocą oscyloskopu posłużyły na określenie mocy wejściowej P1. Moc wejściowa P1 wyliczona zgodnie z definicją jako średnia iloczynu napięcia w obwodzie DC i prądu *Mean(U<sub>DC</sub>\*l<sub>in</sub>)*. Na wyjściu układu znajdował się oscyloskop do rejestracji przebiegów oraz trójfazowy analizator mocy niezbędny do pomiaru mocy czynnej P2 i wyliczania zawartości harmonicznych napięcia i prądu w czasie rzeczywistym.



Rys. 6. Schemat blokowy eksperymentalnego układu z zaznaczeniem miejsca pomiaru mocy czynnej P1 i P2.

Na podstawie licznych pomiarów sporządzono wykres wartości współczynnika względnego THD napięcia i prądu fazy B w funkcji wartości skutecznego prądu fazowego, który to przedstawia rysunek 7. Skala wartości prądu odpowiada znamionowej mocy układu. Obciążenie miało charakter rezystancyjny i pracowało w układzie symetrycznym. Z analizy wykresu widać, że wartość współczynnika THD napięcia zawiera się w granicy 5%, co potwierdzają wcześniejsze badania symulacyjne. Wraz ze wzrostem obciążenia wartość THD napięcia minimalnie rośnie, co prawdopodobnie jest związane z nieliniowością elementu magnetycznego.



Rys. 7. Wykres współczynnika względnego THD wyjściowego napięcia i prądu fazowego w funkcji wartości skutecznej prądu fazowego dla odbiornika symetrycznego o charakterze rezystancyjnym.

Kolejnym eksperymentem było sprawdzenie zachowania się układu podczas pracy z obciążeniem impulsowym w postaci trójfazowego mostka diodowego obciążonego rezystancją. Zarejestrowana wartość współczynnika THD napięcia wyniosła 5,5% a prądu 26,7% przy znamionowej mocy obciążenia. Przebieg oscyloskopowy napięcia i prądów przedstawia rysunek 8. Wyniki badań potwierdzają wysoką jakość kształtu wyjściowego napięcia międzyprzewodowego, mimo mocno odkształconego prądu obciążenia. W celu porównania tych przebiegów na rysunku 9 zilustrowano przebiegi napięcia i prądów ciągłych przy obciążeniu symetrycznym o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym przy  $cos \varphi = 0.99$ 



Rys. 8. Przebiegi oscyloskopowe trzech prądów fazowych i napięcia międzyfazowego na wyjściu układu obciążonego rezystancją przez trójfazowym mostek diodowy o mocy znamionowej 15kW.



Rys. 9. Przebiegi oscyloskopowe trzech prądów fazowych i napięcia międzyfazowego na wyjściu układu o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym o mocy znamionowej 15kW.

Ostatnim badaniem było sprawdzenie pracy układu podczas niesymetrii obciążenia. W tym celu obciążenie o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym podłączone zostało do fazy B i C. Zarejestrowane przebiegi przedstawione są na rysunku 10. Układ został przebadany w szerokim zakresie obciążenia, łącznie z próbami przechodzenia z układu obciążenia symetrycznego trójfazowego do niesymetrycznego jednofazowego.

# IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016



Rys. 10. Przebiegi oscyloskopowe dwóch prądów fazowych fazy B i C, oraz napięcia międzyfazowego przy obciążeniu niesymetrycznym o mocy 8kW.

Na podstawie pomiarów mocy czynnej w punktach P1 i P2 widocznych na schemacie blokowym eksperymentalnego układu została wyznaczona charakterystyka sprawności dla różnych charakterów obciążeń. W wyniku analiz tych charakterystyk nie zauważono większych różnic w kształcie i wartości współczynnika sprawności. Na rysunku 11 przedstawiona została charakterystyka sprawności układu dla obciążenia symetrycznego w postaci trójfazowego mostka diodowego obciążonego zmienną rezystancją. Pomiary sprawności wykonane zostały przy stałym napięciu w obwodzie DC równym 495VDC.



Rys. 11. Charakterystyka sprawności układu przy obciążeniu symetrycznym w postaci trójfazowego mostka diodowego obciążonego rezystancją.

Z charakterystyki sprawności można zauważyć, że najwyższą wartość osiągnięto w zakresie około 70% mocy znamionowej osiągając prawie 98%. W większości na tak wysoką sprawność wpływają bardzo niskie straty łączeniowe tranzystorów.

## Podsumowanie

Badania eksperymentalne poprzedzone symulacjami potwierdzają poprawną pracę układu co obrazują wyniki badań widoczne na rysunkach 8, 9, 10 Rozwiązanie to zapewnia generowanie prądów i napięć o niskiej zawartości harmonicznych na wyjściu układu. Zaletą takiego rozwiązania są małe straty łączeniowe tranzystorów, które są sterowane wyłącznie impulsami prostokątnymi o częstotliwości sieci zasilającej co wpłynęło bezpośrednio na dużą sprawność układu przekraczającą 97%. Pomierzone wartości THD napięcia analizatorem mocy wynosiły maksymalnie 5,7%. Moc gabarytowa dławików sprzężonych z wyliczeń analitycznych [1] stanowi ok. 20% mocy znamionowej odpowiednich transformatorów wielopulsowych.

#### Literatura

- 1. Tunia Henryk, *Układy elektromagnetyczne prostowników wielopulsowych*, Przegląd elektrotechniczny 2005.
- A. Laka, J.A. Barrena, J.Chivite-Zabalza, M. Rodriguez, P. Izurza-Moreno Isolated Double-Twin VSC Topology Using Three-Phase IPTs for High-Power Applications, IEEE Trans. Power Electron., vol.29, no. 11, pp. 5761-5769, Nov. 2014
- 3. Strzelecki Ryszard, Mysiak Piotr, Sak Tomasz *Solutions of Inverters Systems In Shore-to-Ship Power Supply Systems*, in Proceedings of the 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics- CPE'2015, Lisbon 2015.
- 4. Ryszard Strzelecki, Tomasz Sak, Natalia Strzelecka patent na wynalazek pod tytułem "Sposób I układ do przekształcania energii elektrycznej z wykorzystaniem falowników wielopoziomowych połączonych równolegle" P.414956, 2015

Autor: mgr inż. Tomasz Sak; Zakład Przekształtników Mocy; Instytut Elektrotechniki w Warszawie, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa, e-mail: <u>t sak@iel.waw.pl</u>

Realizacja pracy w ramach projektu GEKON przy współpracy z ELHAND



