

# Zwiększenie częstotliwości łączeń w falownikach dzięki nowym elementom półprzewodnikowym z węgla krzemu (SiC)

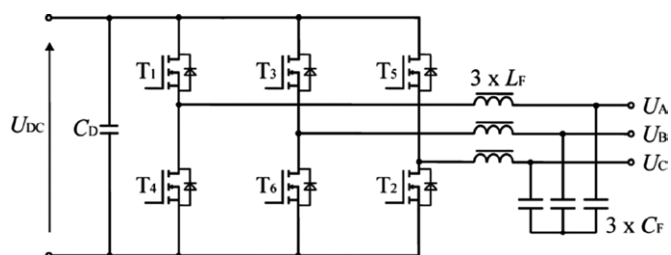
Doskonałe właściwości statyczne i dynamiczne tranzystorów SiC MOSFET mogą być wykorzystane do przesunięcia obecnej bariery częstotliwości łączeń, występującej w dotychczas stosowanych krzemowych (Si) elementach półprzewodnikowych falowników napięcia w zakres nawet powyżej 100 kHz.

## Wstęp

Wieloletnie prace badawcze w zakresie wytwarzania półprzewodnikowych przyrządów mocy na bazie węgla krzemu (SiC) doprowadziły na początku drugiej dekady XX wieku do wprowadzenia do sprzedaży diod i tranzystorów wykonanych w tej technologii. Od tego momentu obserwuje się coraz większe zainteresowanie takimi elementami w szeregu zastosowań, co nie dziwi z uwagi na bardzo dobre właściwości w porównaniu z klasycznymi diodami i tranzystorami krzemowymi. Diody typu SiC Schottky cechują się bardzo małym ładunkiem pojemnościowym, który przekłada się na istotnie obniżone straty łączeniowe w tych przyrządach. Z kolei tranzystory – w ostatecznym rozrachunku dominuje tu struktura MOSFET – wykazują niskie rezystancje przewodzenia, a także, dzięki niewielkim pojemnościom pasożytniczym, krótkie czasy przełączeń. W efekcie straty mocy przewodzenia oraz łączeniowe w elementach półprzewodnikowych są istotnie niższe. Dzięki temu przed projektantami urządzeń energoelektronicznych, w tym falowników, otwierają się nowe możliwości, pozwalające m.in. na zwiększenie sprawności energetycznej projektowanych układów, ale także podwyższenie częstotliwości łączeniowej tranzystorów. W ten sposób istnieje możliwość ograniczenia wymiarów elementów biernych (dławików i kondensatorów), będących nieodzownymi podzespołami układów przekształtnikowych.

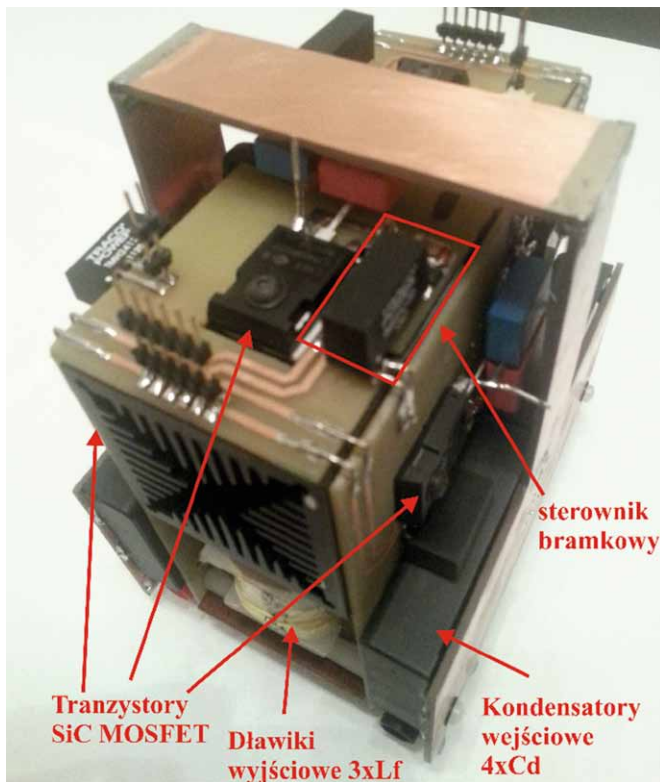
## Demonstrator falownika 6 kVA / 150 kHz

Przykładem przekształtnika energoelektronicznego wykorzystującego bardzo dobre właściwości elementów z SiC może być prototyp układu falownika napięcia o mocy znamionowej 6 kVA, zbudowany z wykorzystaniem tranzystorów MOSFET pracujących przy częstotliwościach łączeń do 150 kHz.



Rys. 1. Schemat dwupoziomowego, trójfazowego falownika napięcia z filtrem LC

W tym przypadku wykorzystano elementy dyskretno o parametrach 1200 V/80 mΩ, bez zewnętrznych diod zwrotnych. Oznacza to, że tranzystory współpracują z diodami wewnętrznymi, które w tym przypadku mają tylko nieznacznie gorsze właściwości dynamiczne od diod SiC Schottky'ego. Z uwagi na duży spadek napięcia prądu wsteczne i tak płyną przez kanały MOSFET-ów o niskiej rezystancji. Dzięki dużej częstotliwości pracy elementów półprzewodnikowych występujących w prezentowanym falowniku napięcia uzyskano znaczną redukcję gabarytów oraz masy dławików filtra wyjściowego oraz kondensatora wejściowego układu. Spodziewane niskie straty mocy przekładają się także na niewielkie rozmiary radiatora. Zmniejszenie powyższych parametrów pozwala zredukować wymiary urządzenia, które osiąga wysokie wskaźniki gęstości mocy układu. Przedstawiony na poniższej fotografii prototyp falownika o mocy znamionowej 6 kVA posiada wymiary 115 mm × 130 mm × 85 mm, czyli objętość równą 1,27 dm<sup>3</sup>. Oznacza to, że osiągnięto gęstość mocy na poziomie około 4,7 kW/dm<sup>3</sup>.



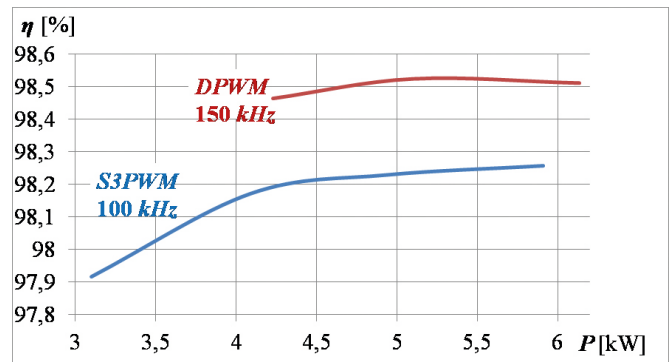
Rys. 2. Fotografia prototypu dwupoziomowego, trójfazowego falownika napięcia z elementami półprzewodnikowymi z węgla krzemu

### Badania laboratoryjne

Przedstawiony prototyp falownika został poddany serii badań przy zasilaniu napięciem stałym i obciążeniu o charakterze rezystancyjnym. Badania te uwzględniały pracę układu sterowania w pętli otwartej przy zastosowaniu modulacji szerokości impulsów zaimplementowanej w nadrzędnym układzie sterowania z mikroprocesorem sygnałowym typu TMS320F28335. Testowano dwie metody modulacji: sinusoidalną z dodatkiem trzeciej harmonicznej (S3PWM) oraz modulację z funkcją nieciągłą (DPWM), która polega na nieprzełączaniu w fazie z najwyższą wartością bezwzględną prądu wyjściowego.

Układ cechuje się dosyć dużą sprawnością energetyczną, co potwierdzają pomiary wykonane za pomocą precyzyjnego analizatora mocy, pokazane na rysunku 3. Założona sprawność >98% została osiągnięta przy  $f_s = 100$  kHz (98,26%) i modulacji S3PWM. Zastosowanie modulacji nieciągłej (DPWM) umożliwia uzyskanie sprawności powyżej 98,5%, przy czym częstotliwość przełączeń elementów półprzewodnikowych układu może być podwyższona do  $f_s = 150$  kHz.

W takich warunkach jakość prądu i napięcia wyjściowego jest zbliżona, co pokazują charakterystyki pokazane na rysunku 4. Falownik cechuje się poprawną pracą przy częstotliwości łączeń równej 150 kHz, a mimo niewielkich wartości indukcyjności  $L$  i pojemności  $C$  filtra wyjściowego (80  $\mu$ H/3  $\mu$ F) jakość uzyskanych przebiegów jest zadowalająca nawet przy zastosowaniu

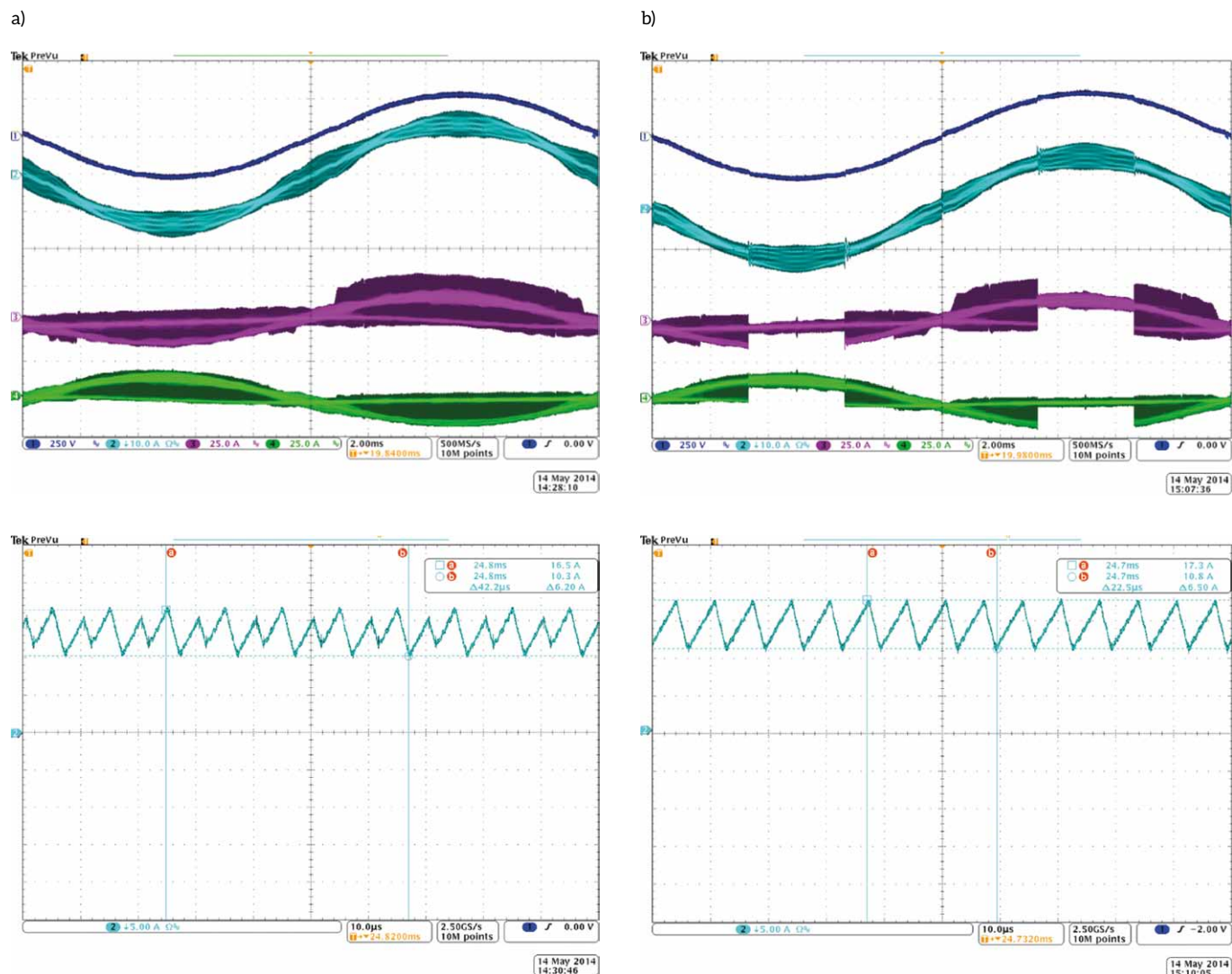


Rys. 3. Rezultaty przeprowadzonego pomiaru sprawności energetycznej falownika w przypadku zastosowania modulacji sinusoidalnej z dodatkiem trzeciej harmonicznej S3PWM (100 kHz) oraz modulacji z funkcją nieciągłą DPWM (150 kHz)

modulacji nieciągłej. Widoczne także na oscylogramach prądu w tranzystorach ilustrują różnice między modulacją S3PWM i DPWM, gdzie tranzystory są nieprzełączane przez 1/3 okresu napięcia wyjściowego.

### Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań falownika o mocy 6 kVA pokazują, że można zaprojektować układy o wysokiej częstotliwości pracy tranzystorów bez znacznej utraty sprawności energetycznej pod warunkiem, że zastosuje się tranzystory w nowej technologii SiC. Można uznać, że w stosunku do układów z krzemowymi tranzystorami typu IGBT częstotliwość łączeń może być nawet 10-krotnie wyższa, a przy zastosowaniu zaawansowanych technik sterowania (jak pokazana metoda DPWM) współczynnik ten może być również większy. Wydaje się, że proporcjonalne zwiększenie częstotliwości łączeniowej tranzystorów można będzie uzyskać także dla układów o wyższych prądach znamionowych zbudowanych z wykorzystaniem modułów mocy. Jednak dotychczasowe doświadczenia autorów wskazują, że stosowane obecnie obudowy modułów mocy – opracowywane zazwyczaj dla krzemowych struktur IGBT – stanowią ograniczenie z uwagi na zbyt dużą indukcyjność pasożytniczą doprowadzeń wewnętrznych. W efekcie



**Rys. 4.** Rezultaty badań laboratoryjnych: typowe przebiegi wartości chwilowej prądów oraz napięć (od góry: napięcie wyjściowe, prąd dławika, prądy w tranzystorach jednej gałęzi, zbliżenie na prąd dławika) w przypadku zastosowania modulacji sinusoidalnej z dodatkem trzeciej harmonicznej S3PWM (a) oraz modulacji z funkcją nieciągłą DPWM (b)

w obwodzie mocy powstają wysokoczęstotliwościowe oscylacje, które wymuszają zwolnienie procesów łączeniowych, a więc powodują niepełne wykorzystanie potencjału stosowania nowych technologii struktur półprzewodnikowych. Niezbędne jest więc zastosowanie innowacyjnych rozwiązań w zakresie polepszania obudów i metod łączenia struktur półprzewodnikowych w modułach, charakteryzujących się coraz mniejszymi indukcyjnościami pasożytniczymi doprowadzeń wewnętrznych. Istotne wydaje się także położenie nacisku na projektowanie niski indukcyjnych obwodów mocy (tzw. busbarów) oraz użycie odpowiednich kondensatorów, również cechujących się niską indukcyjnością. Z kolei w przypadku elementów magnetycznych zwrócić należy uwagę na pojemności pasożytnicze uzwojeń, pogarszające właściwości układów w warunkach bardzo szybko zmieniających się napięć. ■



Dane kontaktowe:

Mariusz Zdanowski  
 Politechnika Warszawska  
 Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej

Radosław Sobieski  
 Markel Sp. z o.o.  
 ul. Okulickiego 7/9  
 05-500 Piaseczno  
 tel. 22-428 10 29  
 e-mail: markel@markel.pl