

Marek ADAMOWICZ<sup>1</sup>, Janusz SZEWCZYK<sup>2,3</sup>,  
Jędrzej PIETRYKA<sup>2</sup>

Politechnika Gdańska, Katedra Mechatroniki i Inżynierii Wysokich Napięć (1)  
Politechnika Gdańska, Katedra Automatyki Napędu Elektrycznego (2)  
MMB Drives Sp. z o. o.(3)

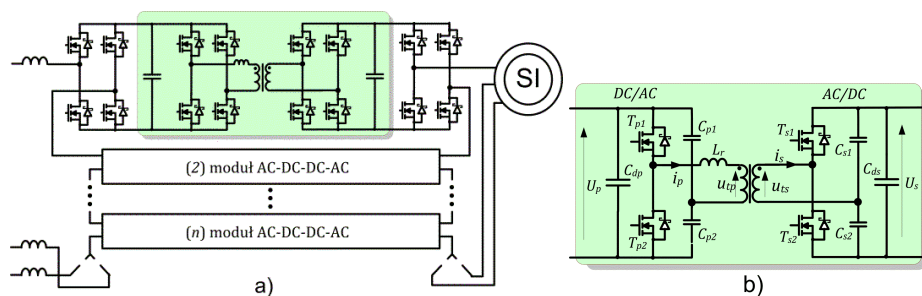
## Przetwornica DC-DC z przyrządami z węgliku krzemu (SiC) dla modułowych kaskadowych przekształtników średniego napięcia

**Abstract.** The paper presents different topologies and control methods of bi-directional DC-DC converters designed for modular multilevel medium-voltage converters. Two topologies of bi-directional DC-DC converters: the dual-active-bridge (DAB) DC-DC converter and the dual-half-bridge (DHB) DC-DC converter are compared in the paper. Preliminary experimental results of SiC-based 50 kHz DHB DC-DC converter are presented in the paper.

**Słowa kluczowe:** modułowe przekształtniki SN, dwukierunkowa przetwornica DC-DC, węglik krzemu, SiC MOSFET, SiC JFET

### Wstęp

W ostatnich latach można zaobserwować nieustający wzrost zapotrzebowania na napędy średniego napięcia (SN). Rynek napędów SN jest napędzany głównie przez znaczny wzrost globalnego zużycia energii elektrycznej, a tym samym wzrost inicjatyw związanych z oszczędzaniem energii elektrycznej. Jedną z korzyści wymiany przemysłowych napędów nN na napędy SN jest to, iż w napędach nN prawie zawsze jest wymagany transformator obniżający napięcie. Wyeliminowanie transformatora z obwodu wejściowego w napędach SN pozwala na znaczącą redukcję wielkości i wagi urządzenia. Będące w fazie opracowań przekształtniki średniego napięcia nowej generacji (Rys. 1) [1, 2] są budowane z połączonych kaskadowo modułów AC-DC-DC-AC



Rys. 1. Modułowy dwukierunkowy kaskadowy przekształtnik SN z zastosowaniem w podstawowym module podwójnej pełnomostkowej przetwornicy DC-DC (a) oraz przetwornicy półmostkowej (b).

zawierających falowniki tranzystorowe oraz transformatory wysokiej częstotliwości zapewniające izolację galwaniczną. Podstawowym składnikiem każdego modułu jest dwukierunkowa izolowana przetwornica DC-DC która może zawierać podwójny mostek aktywny typu 'H' (z ang. *DAB – Dual Active Bridge*) pokazany na rys. 1a bądź dwa półmostki (z ang. *DHB – Dual Half Bridge*) pokazane na rys. 1b. Na rysunku 1 w sposób umowny przyjęto następujące oznaczenia:  $U_p$  – napięcie strony pierwotnej,  $U_s$  – napięcie strony wtórnej,  $C_{p1,2}$  oraz  $C_{s1,2}$  – kondensatory dzielnika napięcia odpowiednio strony pierwotnej i wtórnej,  $C_{dp}$ ,  $C_{ds}$  – kondensatory obwodów napięcia stałego odpowiednio strony pierwotnej i wtórnej.

Metody sterowania przetwornicami typu DAB zostały szeroko opisane w literaturze [1, 2, 3, 4, 5]. Zmiana kąta przesunięcia fazowego sygnałów sterujących dwoma mostkami przetwornicy DAB daje możliwość stabilizacji napięcia wyjściowego, a przy określonym obciążeniu, regulację mocy czynnej w układzie sterowania charakteryzującym się jednym stopniem swobody. Zwiększenie ilości stopni swobody w układzie sterowania poprzez zmianę wypełnienia impulsów bądź tzw. metodę podwójnego przesunięcia pozwala dodatkowo realizować zadanie minimalizacji mocy biernej krążącej w obwodzie mostka DC-AC [3, 4, 5].

Zastosowanie w dwukierunkowych przetwornicach DC-DC przyrządów półprzewodnikowych z węgla krzemu: diod Schottky'ego, tranzystorów SiC MOSFET oraz i SiC JFET [6] pozwala na znaczące zwiększenie częstotliwości pracy w przetwornicach dużej mocy i zmniejszenie ich gabarytów. Topologia dwukierunkowej przetwornicy półmostkowej (DHB) pokazana na rysunku 1.b. charakteryzuje się mniejszą liczbą tranzystorów, a co istotne w przypadku przyrządów z węgla krzemu – mniejszą liczbą specjalizowanych układów sterowania bramkowego [6]. Przy tych samych warunkach napięć: wejściowego i wyjściowego oraz przy tej samej mocy, przetwornica typu DHB będzie się charakteryzowała dwukrotnie mniejszym napięciem oraz dwukrotnie większym prądem uzwojeń transformatora. Może być to korzystną własnością, jeżeli przewidzieć do realizacji przetwornicy transformatory planarne dużej mocy (<30 kW). Zaletą wprowadzonych w ostatnich latach transformatorów planarnych o mocach do 30 kW jest kompaktowa budowa, powtarzalność konstrukcji i łatwość montażu. Nieliczne prace dotyczące przetwornic DHB pokazują duży potencjał zastosowania tych układów w napędach SN oraz układach zintegrowanych (energoelektronicznych) transformatorów dystrybucyjnych (z ang. *SST – Solid State Transformer*) [8] dla sieci SN.

Celem badań przedstawionych w referacie jest zdobycie wiedzy dotyczącej dwukierunkowego przekształcania energii elektrycznej z wysoką sprawnością za pomocą podwójnej półmostkowej (DHB) przetwornicy DC-DC z tranzystorami z węgla krzemu i transformatorem planarnym pod kątem jej wykorzystania w wielopoziomowych modułowych przekształtnikach SN.

### **Porównanie przetwornicy DC-DC pełnomostkowej (DAB) i półmostkowej (DHB)**

Jak zostało pokazane na rysunku 1, izolowana przetwornica dwukierunkowa DC-DC zawiera dwa mostki (pełne w przypadku DAB i półmostki w przypadku DHB) spełniające rolę dwukierunkowych przekształtników DC-AC i AC-DC, a pomiędzy nimi znajduje się transformator wysokiej częstotliwości. Jak wspomniano w poprzednim rozdziale, najprostsza metoda sterowania mocą przetwornicy polega na wygenerowaniu sygnału prostokątnego wypełnieniu  $D=0,5$  i zadanej częstotliwości, sterującego tranzystorami pierwszego mostka przetwornicy a następnie sygnału przesuniętego w fazie o kąt  $\varphi$  do wysterowania tranzystorów drugiego mostka. Wartość napięcia wyjściowego  $U_s$  a zatem również moc  $P$  przetwornicy zależy od wartości kąta przesunięcia  $\varphi$ . W tabeli 1 przedstawiono podstawowe własności oraz zależności charakteryzujące pełnomostkową (DAB) i półmostkową (DHB) dwukierunkową przetwornicę DC-DC.

## VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

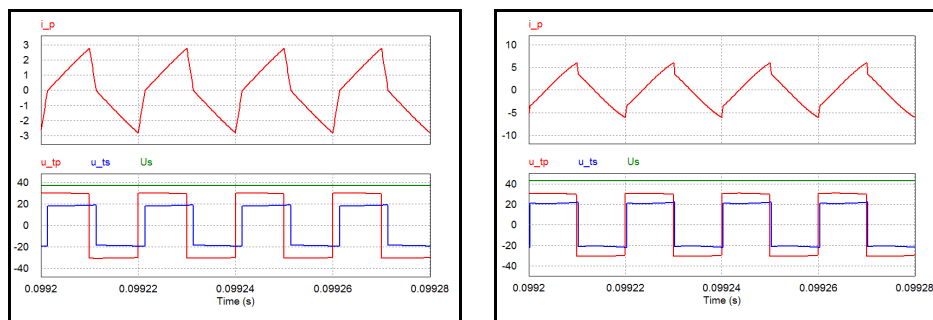
Tabela 1. Podstawowe zależności przetwornicy typu DAB oraz typu DHB

	Przetwornica pełnomostkowa (DAB)	Przetwornica półmostkowa (DHB)
Moc	$P = \frac{N \cdot U_p U_s \cdot \varphi(\pi -  \varphi )}{2\pi^2 f_s L_r},$ $-\frac{\pi}{2} < \varphi < \frac{\pi}{2}$	$P = \frac{N \cdot U_p U_s \cdot \varphi(\pi -  \varphi )}{4\pi^2 f_s L_r}, \quad -\frac{\pi}{2} < \varphi < \frac{\pi}{2}$
Przekładnia	$n = \frac{U_p}{U_s}$	$n = \frac{U_p}{U_s}$
Współczynnik wypełnienia impulsów	$D = 0,5$	$D = 0,5$
Zmiany strumienia $\Delta B$	$\Delta B = \frac{U_p D}{N A_e f_s}$	$\Delta B = \frac{(U_p / 2) D}{N A_e f_s}$
Liczba tranzystorów	8	4

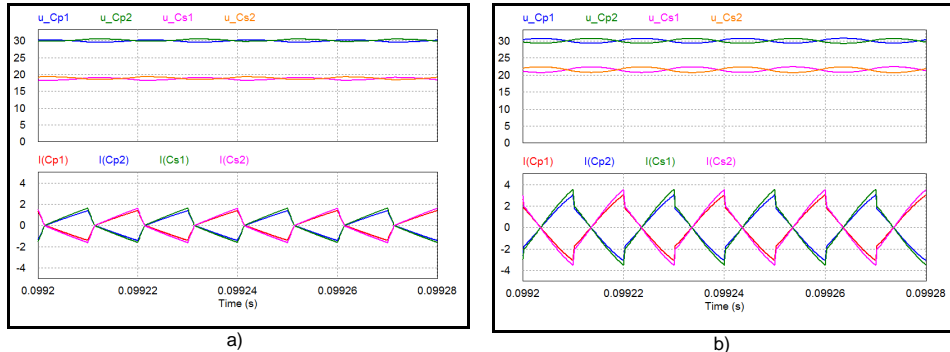
gdzie:  $N$  – przekładnia transformatora,  $A_e$  – przekrój rdzenia transformatora

### Wyniki badań symulacyjnych przetwornicy DHB DC-DC

Przed wstępnym uruchomieniem modelu laboratoryjnego na niskim napięciu ( $U_p=60V$ ) przeprowadzono badania symulacyjne przetwornicy DHB DC-DC ze sterowaniem przesunięciem kąta  $\varphi$ , z wykorzystaniem programu *PSIM*. W przeprowadzonych badaniach zwrócono uwagę zwłaszcza na rozkład i składową przenienną napięć  $u_{Cp1}$ ,  $u_{Cp2}$ ,  $u_{Cs1}$ ,  $u_{Cs2}$  na kondensatorach dzielników napięciowych po stronie pierwotnej i wtórnej oraz amplitudę prądów ładowania i rozładowania kondensatorów. Badania przeprowadzono w układzie z dławikiem  $L_r=20\mu H$  oraz bez dławika. W symulacjach przyjęto następujące wartości:  $f_s=50$  kHz,  $C_{dp}=C_{ds}=500$   $\mu F$ ,  $C_{p1}=C_{p2}=C_{s1}=C_{s2}=10$   $\mu F$ .



Rys. 2. Przebiegi symulacyjne prądu strony pierwotnej  $i_p$ , napięć strony pierwotnej  $u_p$  i wtórnej  $u_{tp}$  transformatora oraz napięcia wyjściowego przetwornicy typu DHB w układzie z dławikiem i bez dławika  $L_r$  w najprostszym układzie sterowania ze zmianami kąta  $\varphi$ .

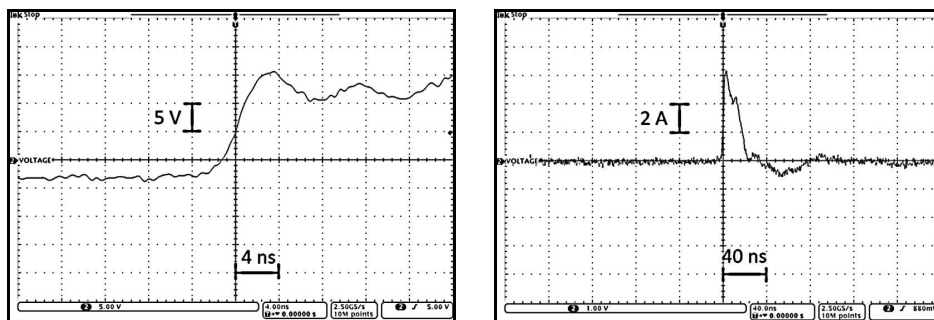


Rys. 3. Przebiegi napięć  $u_{Cp1}$ ,  $u_{Cp2}$ ,  $u_{Cs1}$ ,  $u_{Cs2}$  na kondensatorach dzielników napięciowych półmostków po stronie pierwotnej i wtórnej oraz amplitudy prądów ładowania i rozładowania kondensatorów  $i_{Cp1}$ ,  $i_{Cp2}$ ,  $i_{Cs1}$ ,  $i_{Cs2}$ , w układzie z dławikiem (a) i bez dławika  $L_r$  (b).

Jak widać na rys. 2 oraz rys. 3 dodanie dławika  $L_r=20 \mu H$  po stronie pierwotnej transformatora ma swoje wady i zalety, gdyż z jednej strony powoduje wygładzenie pulsacji napięcia na kondensatorach dzielników napięcia obydwu mostków przetwornicy, a z drugiej strony powoduje zmniejszenie przesyłanej mocy przez przetwornicę. Stała wartość indukcyjności dławika  $L_r$  będzie powodować zawężenie zakresu sterowania przetwornica DHB DC-DC. Dla rozwiązania tego problemu, w literaturze zaproponowano ostatnio układ przetwornicy DHB DC-DC z adaptacyjnie nastawianą wartością indukcyjności szeregowej  $L_r$ [8].

### Badania laboratoryjne

Na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej opracowany został model laboratoryjny dwukierunkowej przetwornicy DHB DC-DC z zastosowaniem przyrządów półprzewodnikowych mocy z węgla krzemu oraz transformatora planarnego. Maksymalną dopuszczalną moc układów półmostkowych zwiększono stosując równoległe połączenie tranzystorów SiC MOSFET 1200V (2-30A) w układzie DC-AC po stronie pierwotnej oraz tranzystorów SiC JFET 1200V (2-30A) w układzie AC-DC po stronie wtórnej. Dla obydwóch rodzajów tranzystorów SiC opracowano uniwersalną, konfigurowalną kartę układów sterowania bramkowego z wysokowydajnym (do 8A), szybkim driverem umożliwiającym wystawienie do 4 tranzystorów pracujących równoległe (rys. 10). Na rys. 4. pokazane zostały sygnały bramkowe napięcia i prądu w czasie załączania tranzystora SiC MOSFET.

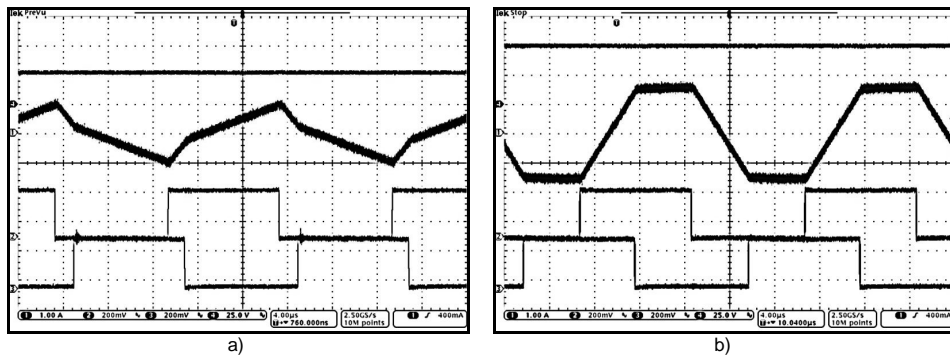


Rys. 4. Sygnały bramkowe napięcia i prądu opracowanego uniwersalnego drivera podczas załączania tranzystora SiC MOSFET.

## VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

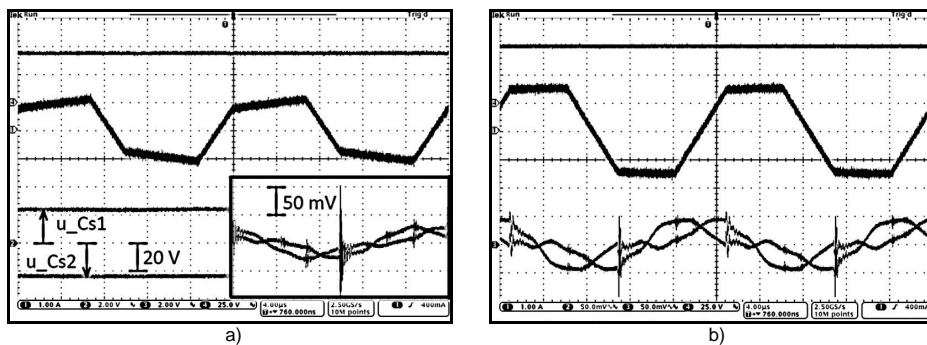
Do wstępnych badań laboratoryjnych opracowano model przetwornicy DC-DC półmostkowej z wykorzystaniem transformatora planarnego HIMAG 2kW typ 134403 o przekładni 14:12, częstotliwości znamionowej 50 kHz i napięciu znamionowym strony pierwotnej 350 V. Ze względu na doświadczenia autorów z problemami kompatybilności elektromagnetycznej przekształtników z tranzystorami SiC [6] we wstępnych badaniach stronę pierwotną układu zasilono z obniżonego napięcia  $U_p = 60V$ . Przeprowadzono badania układu z dołączonym oraz bez dołączonego dławika szeregowego  $L_r = 100 \mu H$ .

Na rys. 5 przedstawiono przebiegi napięcia wyjściowego  $U_s$ , prądu strony pierwotnej transformatora  $i_p$  oraz sygnałów sterujących (z procesora sygnałowego) tranzystorami gałęzi półmostka po stronie pierwotnej i wtórnej dla dwóch wartości kąta przesunięcia fazowego sygnałów  $\varphi = 0,5$  rad oraz  $\varphi = 1,57$  rad w układzie z dławikiem szeregowym  $L_r$ .

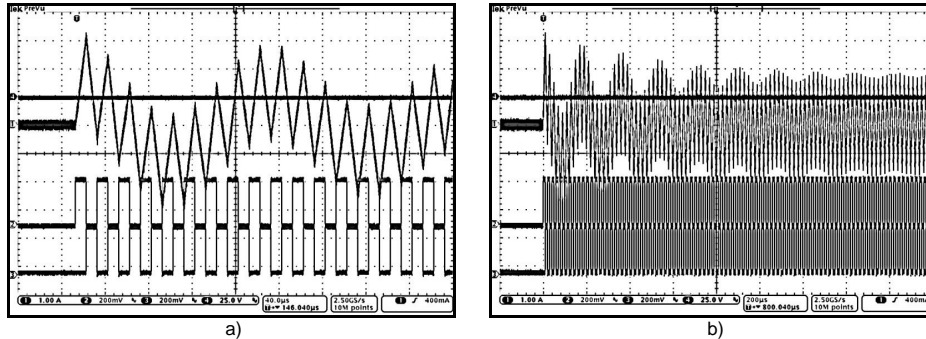


Rys. 5. Przebiegi sterowania napięciem wyjściowym poprzez zmianę kąta przesunięcia fazowego  $\varphi$  w układzie DHB z dławikiem  $L_r$ : napięcia strony wtórnej  $u_{dc2}$  (25V/dz), prądu strony pierwotnej (1A/dz) oraz sygnałów sterujące (z procesora sygnałowego ADSP 21-2363) tranzystorów  $T_{s1}$  oraz  $T_{p1}$ ,  $f_s = 50$  kHz (4 $\mu$ s/dz),  $D = 0,5$ ,  $\varphi = 0,5$  rad (a) oraz  $\varphi = 1,57$  (b).

Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi napięć na kondensatorach dzielnika po stronie wtórnej oraz ich odpowiednie składowe przemienne w układzie z dławikiem  $L_r$ . Można zauważyć, że amplituda pulsacji nie zależy od kąta przesunięcia  $\varphi$ .



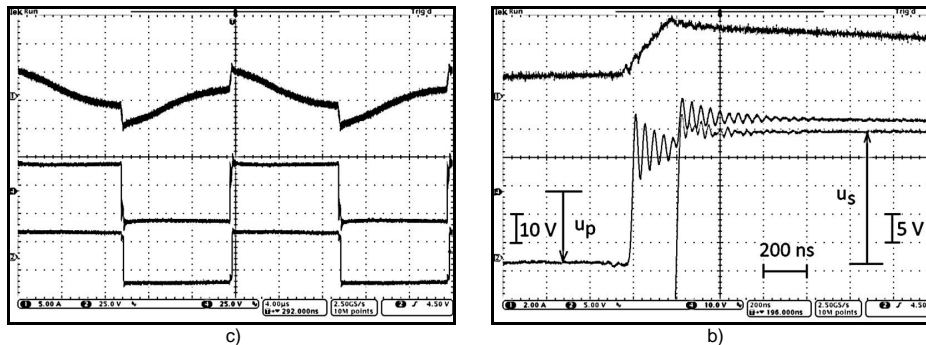
Rys. 6. Przebiegi napięcia wyjściowego (25V/dz) prądu strony pierwotnej transformatora (1A/dz) oraz napięć na kondensatorach dzielnika  $C_{s1}$ ,  $C_{s2}$  po stronie wtórnej (20V/dz) oraz przebiegi ich składowej przemiennej (50 mV/dz),  $f_s = 50$  kHz (4 $\mu$ s/dz),  $D = 0,5$  dla dwóch kątów przesunięcia fazowego:  $\varphi = 0,5$  rad (a) oraz  $\varphi = 1,57$  (b).



Rys. 7. Rozruch układu DHB z zadanym kątem przesunięcia fazowego  $\varphi=0$ : napięcie strony wtórnej  $U_s=0$ , prąd strony pierwotnej (1A/dz), załączenie sygnałów sterujących tranzystorami  $T_{s1}$  oraz  $T_{p1}$ ,  $f_s=50$  kHz,  $D=0,5$  skala czasu: 40  $\mu$ s/dz (a) oraz 200  $\mu$ s/dz (b).

Na rysunku 7 pokazano przebiegi rozruchu przetwornicy DHB DC-DC z dławikiem  $L_r$ . Rozruch odbywał się z zerowym kątem przesunięcia, tzn. przy zerowym napięciu wyjściowym. Rozruch trwał około 2 ms przy prądzie rozruchowym nieprzekraczającym 2,5 wartości ustalonej – co świadczy o zadowalających wynikach przeprowadzonej próby.

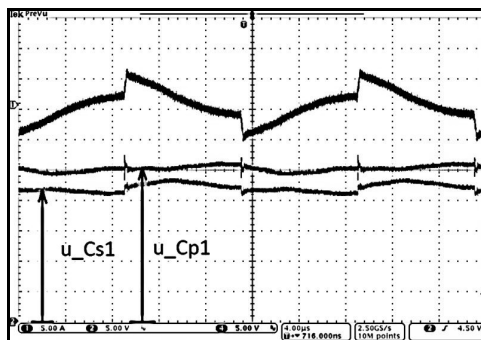
Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono wyniki badań przetwornicy DHB DC-DC w układzie bez dławika szeregowego  $L_r$ . Na obydwu rysunkach widać wzrost amplitudy oraz pogorszenie kształtu prądu już przy niewielkim kącie  $\varphi=0,1$  rad. Na rys. 8.a widać oscylacje w przebiegach napięć strony pierwotnej i wtórnej transformatora. Można zauważyć, że w odniesieniu do uzyskanej szybkości przełączania tranzystorów SiC oscylacje mają zadowalającą wartość, co wynika z opracowania czterowarstwowych obwodów drukowanych dla obydwu gałęzi półmostków z zachowaniem możliwie najkrótszych połączeń w obwodach sterowania bramkowego tranzystorów SiC (rys. 10).



Rys. 8. Przebiegi prądu strony pierwotnej  $i_p$  (5A/dz) oraz napięcie strony pierwotnej  $u_{tp}$  i wtórnej  $u_{ts}$  transformatora w układzie przetwornicy DHB DC-DC bez dławika szeregowego  $L_r$ .

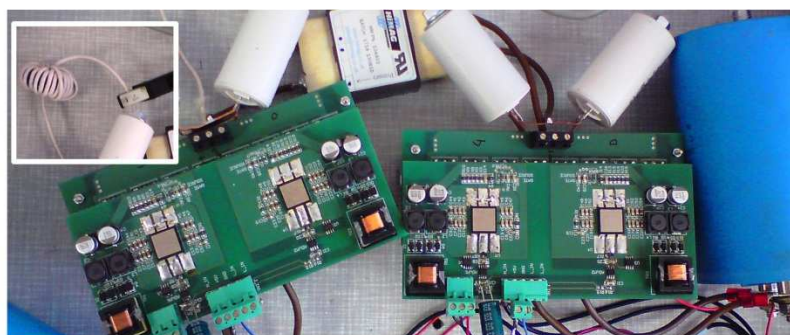
Na rys. 9 można zaobserwować wzrost amplitudy składowej zmiennej napięcia na kondensatorze  $C_{p1}$  dzielnika strony pierwotnej oraz kondensatorze  $C_{s1}$  dzielnika strony wtórnej badanej przetwornicy w układzie bez indukcyjności szeregowej  $L_r$ . W chwilach największych stromości zmian prądu  $i_p$  w napięciach na kondensatorach pojawiają się szpilki o amplitudzie w przybliżeniu równej amplitudzie pulsjacji napięcia.

## VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012



Rys. 9. Przebiegi prądu  $i_p$  strony pierwotnej transformatora (5A/dz) oraz napięć na kondensatorach  $C_{p1}$  oraz  $C_{s1}$  (5V/dz) w układzie przetwornicy DHB DC-DC bez dołączonego dławika szeregowego  $L_r$ .

Na rysunku 10 pokazany został widok opracowanego stanowiska laboratoryjnego, na którym przeprowadzono wstępne badania przy obniżonym napięciu  $U_p = 60$  V. Docelowo przewiduje się badanie układu z transformatorem planarnym o mocy powyżej 15 kW, przy napięciu wejściowym powyżej 300V.



Widok góry modelu laboratoryjnego podwójnego półmostkowego (DHB) przekształtnika DC-DC ( $f=50$  kHz) z transformatorem planarnym oraz szybkimi tranzystorami SiC MOSFET (DC-AC) oraz SiC JFET (AC-DC)



Karta sterownika z procesorem sygnałowym ADSP-21363

Uniwersalna karta układów sterowania bramkowego SiC MOSFET oraz SiC JFET

Gałąź półmostka z tranzystorami SiC MOSFET 1200V pracującymi parami równoległe  $I_{MAX}=2 \times 30A$

Rys. 10. Opracowany w Katedrze Automatyki Napędu Elektrycznego Politechniki Gdańskiej model laboratoryjny dwukierunkowego półmostkowego (DHB – Double Half Bridge) przekształtnika DC-DC z transformatorem planarnym 2kW

### Wnioski

1. W referacie przedstawiono wstępne wyniki badań opracowanej dwukierunkowej półmostkowej przetwornicy (DHB) DC-DC zasilanej z obniżonego napięcia i



pracującej z częstotliwością 50 kHz. Przeznaczeniem przetwornicy jest zastosowanie w modułowych przekształtnikach SN.

2. W układzie zastosowano tranzystory SiC MOSFET i SiC JFET oraz Diody SiC Schottky'ego. Tranzystory zostały połączone parami i docelowo umożliwiają pracę równoległą z maksymalnym prądem 2·30A. Przewiduje się, że napięcie zasilania przetwornicy będzie z przedziału 300 V do 400V a docelowa moc powyżej 15kW.
3. Dzięki zastosowaniu czterowarstwowych obwodów drukowanych zminimalizowano odległości, a tym samym parametry pasożytnicze w obwodach tranzystorów z węgla krzemu.
4. Opracowanie uniwersalnego konfigurowalnego układu sterowania bramkowego pozwoliło na zastosowanie różnych rodzajów tranzystorów SiC w poszczególnych półmostkach modelu laboratoryjnego.
5. Istotną rolę w topologii badanej dwukierunkowej, półmostkowej przetwornicy DC-DC odgrywa dławik szeregowo połączony z transformatorem wysokiej częstotliwości. Im większy dławik tym mniej mocy można przesłać przetwornicą. Przy braku dławika w układzie laboratoryjnym można było nawet kilkukrotnie podwyższyć napięcie strony wtórnej względem pierwotnej – co okazało się niemożliwe z dławikiem 100 µH. Istotną rolę może odegrać opracowanie dławika o adaptacyjnie nastawianej indukcyjności.

#### Literatura

1. Akagi H.: "The Next-Generation Medium-Voltage Power Conversion Systems", Journal of the Chinese Institute of Engineers, vol. 30, n. 7, 2007, pp. 1117-1135.
2. Jiang D., Xue J., Kao M. H., Fred Wang: "High Density Modular Multilevel Cascade Converter for Medium-Voltage Motor Drive", 2011 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), 2011, 482-485.
3. Myoungho Kim, Rosekeit M., Seung-Ki Sul, De Doncker R.W.A.A.: "A dual-phase-shift control strategy for dual-active-bridge DC-DC converter in wide voltage range", IEEE Conf. ECCE Asia (ICPE & ECCE), 2011, 364 – 371.
4. Yanhui Xie, Jing Sun, Freudenberg, J.S., "Power Flow Characterization of Bidirectional Galvanically Isolated High-Power DC/DC Converter Over a Wide Operating Range", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 25, n. 1, 2010, 54 – 66.
5. Hua Bai, Ziling Nie, Mi, C.C., "Experimental Comparison of Traditional Phase-Shift, Dual-Phase-Shift, and Model-Based Control of Isolated Bidirectional DC-DC Converters", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 25, n. 6, 2010, 1444 – 1449.
6. Adamowicz M., Pietryka J., Gizewski S., Rutkowski M., Krzemiński Z.: „Układy sterowania bramkowego tranzystorów z węgla krzemu SiC JFET w falownikach napięcia”, Przegląd Elektrotechniczny, R. 88, n. 4b (2012), 1-6.
7. Jaehong Kim, Hong-Seok Song, Kwanghee Nam, "Asymmetric Duty Control of a Dual-Half-Bridge DC/DC Converter for Single-Phase Distributed Generators", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 26, n. 3, 2011, 973 – 982.
8. Fan H., Li H.: "High-Frequency Transformer Isolated Bidirectional DC-DC Converter Modules With High Efficiency Over Wide Load Range for 20 kVA Solid-State Transformer", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 26, n. 12, 2011, 3599 – 3608.

**Autorzy:** dr inż. Marek Adamowicz, Politechnika Gdańska, Katedra Mechatroniki i Inżynierii Wysokich Napięć, ul. Własna Strzecha 18A, 80-233 Gdańsk, e-mail: [madamowi@ely.pg.gda.pl](mailto:madamowi@ely.pg.gda.pl), mgr inż. Janusz Szewczyk, mgr inż. Jędrzej Pietryka, Politechnika Gdańska, Katedra Automatyki Napędu Elektrycznego, ul. Sobieskiego 7, 80-216 Gdańsk, [jszewcz@ely.pg.gda.pl](mailto:jszewcz@ely.pg.gda.pl), [jpietryk@ely.pg.gda.pl](mailto:jpietryk@ely.pg.gda.pl)