

doi:10.15199/48.2024.01.30

Dwugąździowy przekształtnik prądu stałego z tranzystorami SiC MOSFET do bateryjnego magazynu energii o napięciu 1.5 kV

Streszczenie. Artykuł omawia budowę i badania dwukierunkowego przekształtnika prądu stałego łączącego obwody średniego (1,5 kV) i niskiego napięcia (800 V) w systemie szybkiego ładowania z magazynem energii. System został przetestowany z mocą znamionową do 260 kW i pokazano, że zastosowanie najnowocześniejszych modułów mocy SiC MOSFET pozwala osiągnąć wysoką sprawność (do 98,7%) przy pracy z częstotliwościami przełączania do 25 kHz i istotnie zmniejszonymi elementami biernymi.

Abstract. This paper describes the design and tests of a two-phase interleaved DC-DC converter connecting 1.5 kV and 800 V DC links in the fast charging system. The converter was validated experimentally up to 260 kW, and it is shown that using state-of-the-art SiC-based power modules allows to reach high efficiency (up to 98.7%) at notable frequencies (up to 25 kHz) and with reduced passive components. (**Two-phase DC-DC converter with SiC MOSFETs for a 1.5 kV rated energy storage.**)

Słowa kluczowe: baterijny magazyn energii, przekształtnik prądu stałego, SiC MOSFET, moduł mocy.

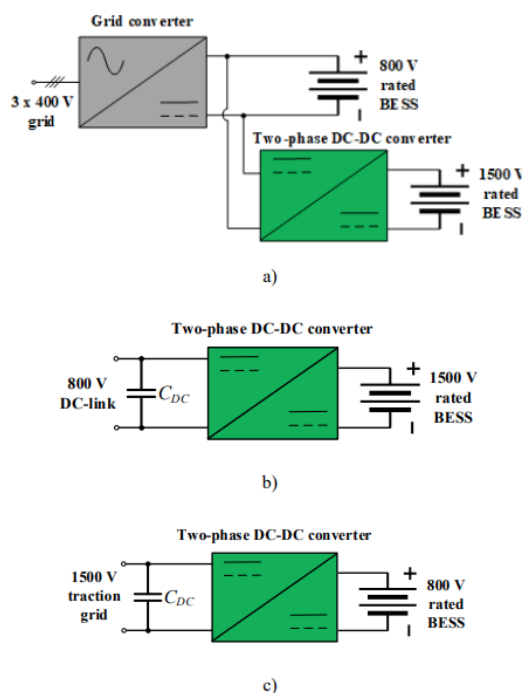
Keywords: battery storage system, DC-DC converter, SiC MOSFET, power module.

Wstęp

Dzięki postępom w zakresie technologii elementów mocy z węgla krzemu średniego napięcia i stale rosnącej ich dostępności, wykorzystanie tych elementów w coraz większej liczbie układów średniej i dużej mocy, w tym w zastosowaniach trakcyjnych i magazynowaniu energii, wydaje się nieuchronne [1]. Można spodziewać się, że podobnie jak w obszarze niższego napięcia (napięcia blokowania do 1,2 kV) tranzystory SiC MOSFET osiągną znaczny udział w rynku, wypierając tranzystory krzemowe IGBT, ale także opanowując nisze dotąd niedostępne dla tych elementów (np. napięcia przebicia > 6.5 kV) [2]. Należy jednak zauważyć, że rozwój elementów średniego napięcia jest jednak opóźniony o kilka lat w stosunku do elementów niskonapięciowych. Co więcej, koszt tych przyrządów jest nadal wysoki. Niemniej jednak, na rynku można spotkać szereg komercyjnie dostępnych modułów mocy SiC MOSFET w klasie napięciowej 3,3 kV i wyższych, które są przeznaczone do urządzeń energoelektronicznych o mocy 100 kW i wyższych. Przykładem może być badany przez autorów moduł mocy Hitachi (MSM450FS33A), który wykazuje wiele zalet w stosunku do konwencjonalnych krzemowych modułów IGBT, zwłaszcza rozpatrując takie parametry jak poziom energii wytracanych przy przełączaniu [2-4]. Wydaje się, że wykorzystanie takich elementów w przekształtnikach współpracujących z baterijnymi magazynami energii średniego napięcia umożliwi budowę systemów o lepszych parametrach, przede wszystkim wyższej sprawności. Warto nadmienić, że poprawa tego parametru o choćby 1%, poprawia sprawność całego cyklu ładowania/rozładowania o 2%. Dlatego można tu mówić o istotnym poprawieniu właściwości systemu.

Projektowanie wysokosprawnych przekształtników energoelektronicznych dużej mocy w zakresie setek kilowatów nie jest zadaniem trywialnym, zwłaszcza, gdy rozpatrywane są szybko przełączające elementy SiC MOSFET. Pozwalają uzyskać niższe straty mocy i wyższe częstotliwości, ale niestety użycie ich wiąże się z kilkoma dodatkowymi problemami, które należy rozwiązać [5]. Przede wszystkim szybkie zmiany napięcia i prądu prowadzą do generowania zakłóceń elektromagnetycznych, co może wpływać nie tylko na sam przekształtnik, w tym układ sterowania, ale także na otoczenie. Ponadto, elementy pasożytnicze (indukcyjności i pojemności) przy niskich rezystancjach przewodzenia powodują, że obwody

mocy są słabo tłumionymi obwodami rezonansowymi. Wreszcie, wobec braku gotowych rozwiązań, konieczne jest często wykonanie projektu sterowników bramkowych, co jest zadaniem bardzo wymagającym [6].

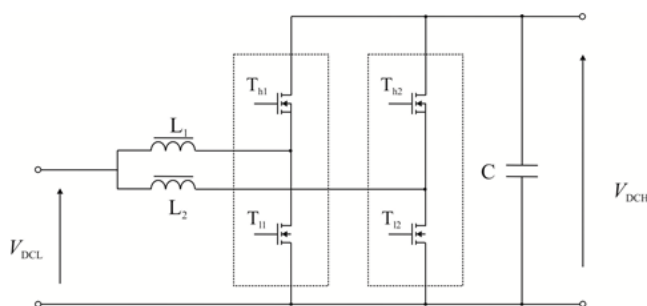


Rys.1. Możliwe zastosowania omawianego przekształtnika prądu stałego: interfejs do baterii wysokonapięciowej w systemie szybkiego ładowania (a), między baterią wysokonapięciową i obwodem niskiego napięcia (np. wyjście falownika) (b), jako interfejs baterii 800V i systemu zasilania trakcyjnego (c).

W literaturze przedmiotu można znaleźć pojedyncze przykłady przekształtników średniego napięcia o dużej mocy: falowniki [7], izolowane przekształtniki prądu stałego (DC-DC), również w konfiguracji wielofazowej [8-9], a także bardziej wyrafinowane struktury wielopoziomowe [10]. Jednak nadal brakuje przykładów przekształtników prądu stałego, które współpracują z systemem magazynowania energii o napięciu powyżej 1kV i wspierających szybkie ładowanie pojazdów elektrycznych. Gdy rozważany jest tego typu system (rys. 1a), należy zastosować

dwukierunkową topologię przekształtnika prądu stałego. Tranzystory SiC MOSFET o napięciu przebicia 3,3 kV pozwalają wykorzystać układ obniżająco-podwyższający z prostowaniem synchronicznym, zdolny do obniżenia napięcia z jednej strony (1500 V) i podwyższania napięcia w drugim kierunku (z obwodu niskonapięciowego 800 V). Ponadto, aby ograniczyć obciążenie półprzewodników mocy, a także obniżyć tętnienia prądu wejściowego, co jest kluczowe dla systemów magazynowania z bateriami elektrochemicznymi, można wykorzystać układ dwugałęziowy z przesunięciem fazowym [11]. Właśnie tego typu układ, pokazany na rys. 2, jest omawiany w tym przypadku, przy czym przeznaczony jest do pracy przy maksymalnej mocy 260 kW. Co więcej, tego typu układ może też być wykorzystany między baterią 1,5 kV a obwodem napięcia stałego 800 V (rys. 1b) lub w przypadku bardziej konwencjonalnych magazynów o napięciu 800 V włączanych do sieci trakcyjnych o wartości 1,5 kV, na przykład we francuskim systemie kolejowym lub niektórych liniach metra lub tramwajów (rys. 1c). Wydaje się, że nie jest to pełna lista możliwych zastosowań pokazanego na rysunku 2 przekształtnika.

Artykuł omawia przed wszystkim zasadę pracy i sterowania łącznikami dwugałęziowego przekształtnika obniżająco-podwyższającego o mocy 260 kW. Pokazano system sterujący mocą oraz jego praktyczną realizację w procesorze sygnałowym. Omówiono prototyp układu i przedstawiono wyniki eksperymentów we współpracy z baterijnym magazynem energii.

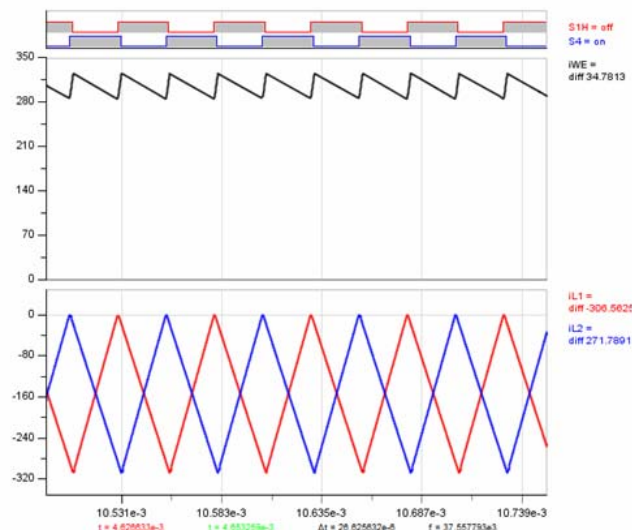


Rys.2. Schemat dwugałęziowego układu obniżająco-podwyższającego.

Dwugałęziowy przekształtnik prądu stałego w trybie przewodzenia krytycznego i nieciąglego

Z uwagi na dużą moc układu i ograniczone prądy znamionowe modułu mocy SiC MOSFET (450 A), głównym celem zastosowania dwóch gałęzi w przekształtniku prądu stałego (rys. 2) jest potrzeba podzielenia prądu/mocy. Ponadto, przesunięcie fazowe sygnałów sterujących poszczególnymi gałęziami może przynieść znaczną redukcję tętnień w prądzie po stronie niskonapięciowej (sumarycznym prądzie dławików L_1 i L_2) oraz prądzie po stronie wysokonapięciowej, a więc napięciu kondensatora C. Ponieważ straty łączeniowe tranzystorów MOSFET z SiC przypadają przede wszystkim na proces załączenia, z uwagi na rozładowywanie się pojemności wyjściowej C_{OSS} w rezystancyjnym kanale tranzystora, przyjęto, że obydwie gałęzie dla mocy znamionowej będą pracować w trybie przewodzenia krytycznego (Critical Conduction Mode, CRCM). W ten sposób straty na załączanie są istotnie ograniczone z uwagi na załączanie przy zerowym prądzie. Natomiast w procesie wyłączenia pojemność C_{OSS} znacząco zmniejsza straty w kanale [12], co powoduje, że nawet przy prądzie szczytowym równym podwójnej wartości średniej, nie są one dotkliwe. Można w ten sposób osiągnąć wysokie częstotliwości przełączania i zmniejszyć

wielkość dławików bez poświęcania wysokiej sprawności. Rys. 3 pokazuje przykład przebiegów czasowych w układzie uzyskanych w wyniku symulacji w programie Gecko dla omawianego przekształtnika włączanego między obwody napięcia stałego 1,5 kV i 800 V. Przy pracy dwóch gałęzi z mocą 260 kW (co daje 130 kW na gałąź) uzyskuje się tryb CRCM dla częstotliwości 20 kHz i dławików L_1/L_2 o indukcyjności 60 μ H. Sygnały sterujące łącznikami poszczególnych gałęzi są przesunięte o połowę okresu, a tętnienia prądu wejściowego są na poziomie ok. 4,4%, pomimo trójkątnego prądu w dławikach. Gdy zadany prąd rozładowania magazynu spadnie, układ przejdzie w tryb pracy nieciąglej, co będzie powodowało utrzymanie wysokiej sprawności.

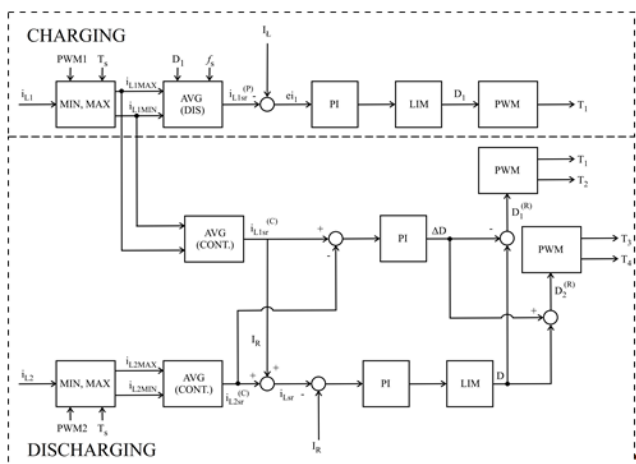


Rys. 3. Wyniki symulacji układu dwufazowego przekształtnika prądu stałego w programie Gecko dla mocy nominalnej – od góry: sygnały sterujące dolnych tranzystorów i prądy w dławikach fazowych (60 μ H/20 kHz).

Mikroprocesorowy układ sterowania

Tak, jak wspomniano na wstępie, zadaniem omawianego przekształtnika DC-DC jest sprzęganie baterijnego magazynu energii o napięciu 1.5 kV z obwodem 800 V. W trybie ładowania magazynu zakłada się maksymalną moc przekształtnika sieciowego równą 40 kW, natomiast w trybie rozładowania moc szczytową 260 kW (co daje sumarycznie 300 kW na zaciskach baterii pojazdu 800V – patrz rys. 1a). W takim układzie główną zmienną regulowaną przez system sterowania jest prąd wejściowy lub wyjściowy, w razie potrzeby można także zastosować nadrzędny regulator napięcia. Jednakże w tej pracy, założono że o procesie ładowania/rozładowania decyduje suma prądów w dławikach L_1 i L_2 (Rys. 4). Ponadto, aby zachować równy podział mocy między gałęziami przekształtnika zastosowano dodatkowy regulator PI zapewniający równość wartości średnich w prądach dławika poprzez oddziaływanie na wyliczone wcześniej przez regulatory prądu współczynniki wypełnienia.

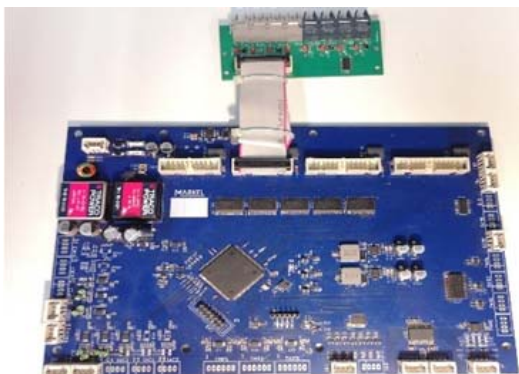
Ze względu na fakt, że przekształtnik został zaprojektowany dla małych wartości indukcyjności i pracuje w trybie przewodzenia krytycznego lub nieciąglego, głównym wyzwaniem w realizacji praktycznej jest określenie wartości średnich prądów dławików. Jednakże, bazując na bieżących wartościach okresu przełączania T_s , współczynnika wypełnienia impulsu D, oraz próbkowanych wartości mierzonego prądu dławika, możliwe jest określenie tych wartości z zadowalającą dokładnością – patrz rys. 4. Tak uzyskane wartości, w kolejnym kroku, są podawane na wejścia regulatorów proporcjonalno-całkujących.



Rys. 4. Schemat algorytmu sterowania, uwzględniający balansowanie prądów dławików.

Algorytm sterowania jest realizowany na specjalnej płycie sterującej, wykorzystującej procesor TMS320F28388S (rys. 5a) współpracujący z dedykowanym interfejsem użytkownika (rys. 5b).

a)



b)



Rys. 5. Zdjęcie płyty sterującej opartej o procesor TMS320F28388S (a), oraz widok interfejsu użytkownika (b).

Prototyp dwugałęziowego przekształtnika prądu stałego o mocy 260 kW

Układ przekształtnika prądu stałego wykorzystuje opracowane w firmie Markel bazowe bloki mocy z modułami MSM450FS33A (Rys. 6). Oprócz modułów SiC MOSFET zastosowano dedykowane kondensatory obwodu pośredniczącego o napięciu znamionowym 2,2 kV oraz laminowane szyny przewodzące (Tab. I). Obydwa moduły są zamontowane na chłodzonych cieczą indywidualnych dedykowanych radiatorach. Ponadto, na modułach mocy są umieszczone sterowniki bramkowe, wyposażone we

wszystkie niezbędne zabezpieczenia. Komunikują się ze sterownikiem nadrzędnym za pomocą przewodów światłowodowych, odbierając impulsy sterujące i wysyłając sygnały błędów. W szafie typu rack montowane są oba bloki konstrukcyjne wraz z dwoma zestawami dławików, przełączników i rezystorów rozładowczych (patrz Rys. 7).

Table I Podstawowe elementy prototypu przekształtnika.

Moduły mocy SiC MOSFET	MSM450FS33A	3.3 kV/450 A
Sterowniki bramkowe	MD2E8WK-33	+16/-8 V/9 A
Dławiki	DFHF-0.06/450	2 x 60 μ H/ 450 A
Kondensatory niskiego napięcia	316833901	750 μ F/900 V
Kondensatory wysokiego napięcia	416856907	2 x 220 μ F/ 2.2 kV



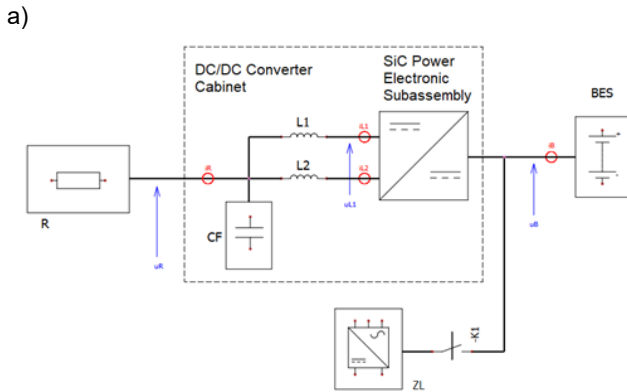
Rys. 6. Moduł mocy MSM450FS33ALT zamontowany na dedykowanym radiatorze razem z kondensatorem obwodu pośredniczącego DC oraz sterownikiem bramkowym.

Badania eksperymentalne

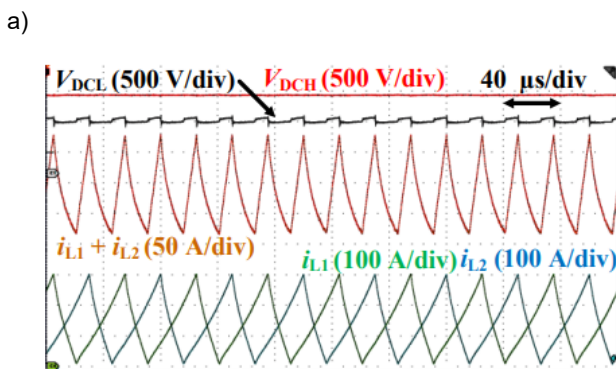
Po wstępnych testach każdej z gałęzi, cały przekształtnik prądu stałego został zbadany z wykorzystaniem zestawu baterii oraz konfigurowalnego obciążenia rezystancyjnego (Rys. 7). Głównym celem była weryfikacja działania systemu w warunkach rzeczywistych we współpracy z akumulatorami (400 szt. połączonych szeregowo ogniów LiFePO4 105Ah z dedykowanym systemem aktywnego równoważenia i zarządzania baterią) ze szczególnym uwzględnieniem sprawności oraz zdolności do poprawnej regulacji prądów w poszczególnych gałęziach. Za pomocą sond napięciowych i prądowych oraz oscyloskopu cyfrowego rejestrowano określone przebiegi, ponadto mierzono moc wejściową i wyjściową analizatorem mocy.

Pomiary przedstawione na rys. 8 ilustrują przypadek pracy przekształtnika DC-DC w trybie obniżającym przy mocy znamionowej 260 kW. Ze względu na charakterystykę akumulatora, napięcie po stronie wysokiego napięcia obniżyło się do 1250 V, natomiast napięcie po stronie niskiego napięcia, określone przez dostępne obciążenie rezystancyjne (rys. 7a), wyniosło prawie 880 V. W takich warunkach przekształtnik pracował z częstotliwością 20 kHz w trybie zbliżonym do CRCM w celu zmniejszenia strat wyłączania tranzystorów SiC MOSFET (Rys. 9a). Dwie gałęzie były kontrolowane z wykorzystaniem przesunięcia fazowego w celu wyeliminowania tętnień prądu wejściowego i wyjściowego. Całkowita strata mocy wyniosła około 3,3 kW, co dało sprawność na poziomie 98,7%.

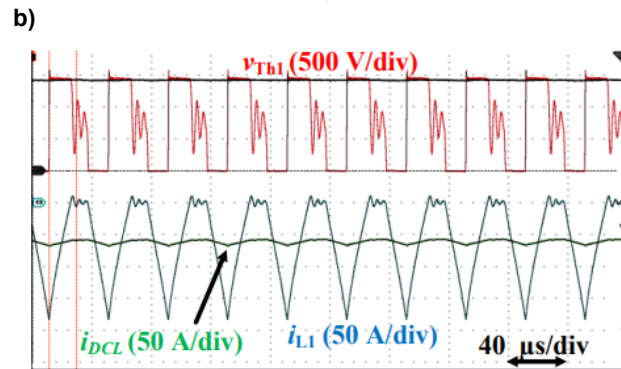
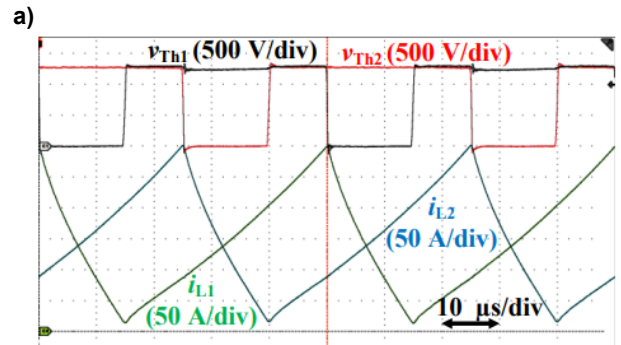
Kolejnym badaniem punktem pracy był tryb podwyższający napięcie przy małej mocy (40 kW), tylko z jedną gałęzią – patrz wyniki na rys. 9b. Przy tak małej mocy przekształtnik pracował w trybie DCM. Podsumowując, przekształtnik działa zgodnie z założeniami, w tym także system sterowania, a cały układ został pomyślnie zwalidowany.



Rys. 7. Schemat (a) oraz zdjęcie (b) układu eksperymentalnego.



Rys. 8. Oscylogramy napięcia wejściowego i wyjściowego, razem z prądami dławików pracujących w nominalnym punkcie pracy 260 kW, $f_s=20$ kHz (a), zrzut ekranu z analizatora mocy (b).



Rys. 9. Oscylogramy napięć na tranzystorach oraz prądy dławików obu gałęzi dla CRM przy 260 kW, $f_s=20$ kHz (a) i DCM przy 400 kW i $f_s=25$ kHz (b) w trybie jednogałęziowym.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono nowatorskie rozwiązanie przekształtnika DC-DC z wykorzystaniem zaawansowanych półprzewodników mocy, tranzystorów SiC MOSFET o napięciu znamionowym 3,3 kV. Przekształtnik może przesyłać energię pomiędzy obwodami prądu stałego (lub zestawami baterii) o napięciach 800 V/1,5 kV z wysoką sprawnością (do 98,7% @ 260 kW), pracując z wysoką częstotliwością łączeń 20 kHz. Praca dwugałęziowa z przesunięciem fazowym zapewnia wysoką jakość przebiegów wejściowych i wyjściowych, pomimo stosunkowo małych i tanich elementów pasywnych: dławików i kondensatorów. Zaproponowany układ sterowania umożliwia ładowanie/rozładowanie akumulatorów wymaganym prądem (lub napięciem) oraz zapewnia właściwe zbilansowanie prądów między gałęziami opracowanego przekształtnika.

Ta praca jest częścią projektu pt. "Energoelektroniczny układ zarządzania energią w procesach szybkiego ładowania zasobników energii" współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach konkursu "Ścieżka dla MAZOWSZA".

Autorzy: mgr inż. Radosław Sobieski, dr inż. Rafał Miśkiewicz, Markel Sp. z o. o., ul. Techniczna 2, 05-500 Piaseczno, E-mail: radek.sobieski@markel.pl, rafal.miskiewicz@markel.pl; mgr inż. Rafał Kopacz, dr hab. Inż. Jacek Rąbkowski, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, Koszykowa 75, 00-662, Warszawa, E-mail: rafal.kopacz@pw.edu.pl, jacek.rabkowski@pw.edu.pl.

LITERATURA

- [1] X. She, A. Q. Huang, L. Ó, and B. Ozpineci, "Review of Silicon Carbide Power Devices and Their Applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 10, pp. 8193-8205, 2017.
- [2] L. Zhang, X. Yuan, X. Wu, C. Shi, J. Zhang, and Y. Zhang, "Performance Evaluation of High-Power SiC MOSFET Modules in Comparison to Si IGBT Modules," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 2, pp. 1181-

- 1196, 2019 T. Ishigaki et al., "3.3 kV/450 A Full-SiC nHPD2 (next High Power Density Dual) with Smooth Switching", PCIM Europe 2017; International Exhibition and Conference for Power Electronics Intelligent Motion Renewable Energy and Energy Management, pp.1-6,2017.
- [3] J. Rabkowski, R. Sobieski, M. Zdanowski, S. Piasecki, "3.3 kV/450 a SiC MOSFET Module—Modelling and Experiments", In Proceedings of the 20th European Conference on Power Electronics and Applications, Riga, Latvia, 17–21 September 2018; pp. 1–10.
- [4] L. Wang, Q. Zhu, W. Yu, and A. Q. Huang, "A medium-voltage medium-frequency isolated DC–DC converter based on 15-kV SiC MOSFETs," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 5, no. 1, pp. 100–109, nMar. 2017.
- [5] A. Anurag, S. Acharya, Y. Prabowo, G. Gohil, and S. Bhattacharya, "Design considerations and development of an innovative gate driver for medium-voltage power devices with high dv/dt ," *IEEE Trans. PowerElectron.*, vol. 34, no. 6, pp. 5256–5267, Jun. 2019.
- [6] Y. Li et al., "500 kW Forced Air-Cooled Silicon Carbide (SiC) Three-Phase DC/AC Converter With a Power Density of 1.246 MW/m³ and Efficiency >98.5%," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, no. 5, pp. 5013-5027, Sept.-Oct. 2021.
- [7] J. Fabre et al., "Characterization and Implementation of Resonant Isolated DC/DC Converters for Future MVdc Railway Electrification Systems," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 7, no. 2, pp. 854-869, June 2021.
- [8] T. Lagier et al., "Experimental validation and comparison of a SiC MOSFET based 100 kW 1.2 kV 20 kHz three-phase dual active bridge converter using two vector groups," 2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe), Lyon, France, 2020
- [9] J. Fabre, P. Ladoux, E. Solano, G. Gateau and J. -M. Blaquièrre, "MVDC Three-Wire Supply Systems for Electric Railways: Design and Test of a Full SiC Multilevel Chopper," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 6, pp. 5820-5830, Nov.-Dec. 2017.
- [10] M. Forouzesh, Y. P. Siwakoti, S. A. Gorji, F. Blaabjerg, and B. Lehman, "Step-Up DC–DC Converters: A Comprehensive Review of Voltage-Boosting Techniques, Topologies, and Applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 12, pp. 9143-9178, 2017.
- [11] R. Sobieski, Praca doktorska, Politechnika Warszawska, 2023
- [12] J. Rabkowski, F. Gonzalez-Hernando, M. Zdanowski, I. Villar and U. Larrañaga, "Real EOFF as a factor in design of soft-switched DC-DC converters with SiC MOSFET power modules," *2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ECCE50734.2022.9947303.