

Janusz Biliński, Sylwester Buta

Przetwornice statyczne dużej mocy z elementami SiC do pojazdów trakcyjnych

Wysoka efektywność energetyczna i zwiększona częstotliwość pracy przetwornicy statycznej pozwalają na zminimalizowanie wymiarów układu chłodzenia i zmniejszenie zużycia energii. Nową jakość wnoszą przetwornice statyczne, wykorzystujące technologię SiC. Zmniejszenie masy urządzeń i ich wielkości jest bardzo znaczące (ok. 40–50%). Wyższa częstotliwość przełączania zmniejsza wymiar elementów magnetycznych (ok. 80%), a większa wydajność przekształtnika minimalizuje wymiary układu chłodzenia. Całkowita wydajność przetwornicy jest bardzo wysoka (94–96%). W pracy przedstawiono porównanie parametrów elementów Si i SiC, które są ważne dla nowoczesnych rozwiązań pojazdów elektrycznych. W artykule przedstawiono również parametry przetwornicy pomocniczej SiC, zaprojektowanej i wykonanej jako najnowocześniejszy produkt dla liniowych lokomotyw elektrycznych.

Słowa kluczowe: węgiel krzemu, przetwornice statyczne, pojazdy trakcyjne, IGBT.

Technologia elementów z węgla krzemu (SiC)

Nowoczesne elektryczne pojazdy trakcyjne, eksploatowane na liniach kolejowych na całym świecie, wykorzystują falowniki trakcyjne do napędu i przetwornice statyczne do zasilania pokładowego wyposażenia pojazdu. W przypadku nowoczesnych lokomotyw przetwornice statyczne zapewniają większą moc niż tradycyjne elektromaszynowe przetwornice wirujące. Urządzenia te, powszechnie stosowane w elektrycznych jednostkach trakcyjnych, są obecnie projektowane i produkowane w technologii tranzystorów tranzystorowych IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Technologia ta osiąga wysoką niezawodność i sprawność elektryczną, jest szeroko stosowana od połowy lat 90. Obecnie jest uznawana za standard rynkowy i stosowana przez większość producentów komponentów elektronicznych [1, 2, 4, 5–8, 10, 11, 13–15, 19].

Zgodnie z przewidywaniami instytutów badawczych, producentów części i kompletnych pojazdów, w niedalekiej przyszłości technologia IGBT zostanie zastąpiona technologią SiC [12, 20, 21].

Elementy mocy oparte na nowej technologii SiC są zbudowane na półprzewodnikach z węgla krzemu (SiC – *Silicon Carbide*), natomiast obecna technologia oparta jest na półprzewodnikach krzemowych. Intensywne prace badawczo-rozwojowe prowadzone przez producentów podzespołów umożliwiły dostępność elementów SiC o niezawodności podobnej do tej, jaką charakteryzują się podzespoły konwencjonalne. Dzięki temu stopniowo zredukowano koszty produkcji, które obecnie umożliwiają komercyjne wykorzystanie tych podzespołów w energoelektronice.

W zastosowaniach trakcyjnych najważniejszymi parametrami urządzeń energoelektrycznych są: niska waga, małe rozmiary i wysoka wydajność. Nowy materiał półprzewodnikowy ma znacznie lepsze właściwości fizyczne niż krzem (Si), co pozwala na zbu-

dowanie na jego bazie najlepszych elementów mocy: diod i tranzystorów. Można zauważyć, że w porównaniu do powszechnie stosowanych elementów krzemowych, elementy mocy SiC:

- ♦ mają krótsze czasy przełączania,
- ♦ mają niższe spadki napięcia podczas przewodzenia,
- ♦ mogą pracować przy wyższych temperaturach złącza.

Obecnie dostępne są trzy rodzaje elementów półprzewodnikowych do zastosowań trakcyjnych z wykorzystaniem nowej technologii węgla krzemu, co przedstawiono na rys. 1:

- ♦ węgiel krzemu z diodami Schottky'ego,
- ♦ moduły hybrydowe (krzemowe IGBT z diodami SiC Schottky'ego),
- ♦ Moduły „Full-SiC” (SiC MOSFET + diody SiC).

Na rys. 2 przedstawiono porównanie parametrów elementów IGBT Si i SiC dla zastosowań w urządzeniach trakcji elektrycznej.

Wykorzystanie zalet komponentów SiC najnowszej generacji wymaga również nowego podejścia do projektowania urządzeń, co przedstawiono na rys. 3.

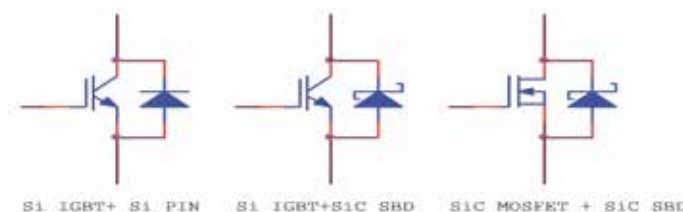
Straty mocy w układach transformatorowych stosowanych w nowej technologii są znacznie niższe, co pozwala na obniżenie zużycia energii, ale także na zmniejszenie wagi i wielkości układów chłodzenia. Można również zwiększyć częstotliwość przełączania elementów półprzewodnikowych oraz zmniejszyć masę i rozmiar elementów pasywnych [3, 9, 16–18].

Zastosowanie nowej technologii SiC w falownikach trakcyjnych pozwala na zwiększenie ich sprawności energetycznej o 1–1,5%. Jednocześnie wyższa częstotliwość przełączania zmniejsza straty mocy w silniku napędowym, zmniejszając moc pobieraną przez pojazd [3, 9].

Nowa jakość to również przetwornice statyczne wykorzystujące komponenty z węgla krzemu – ich wymiary i ciężar można zmniejszyć nawet o ok. 50%. Wyższa częstotliwość przełączania pozwala na zmniejszenie wymiarów elementów magnetycznych do ok. 80%, a niższe straty zmniejszają wymiary układów chłodzenia. Całkowita sprawność energetyczna falowników jest bardzo wysoka i wynosi od 94 do 96%.

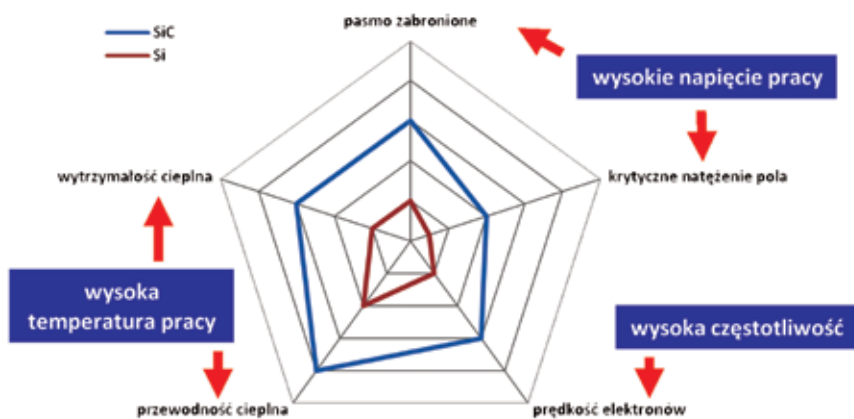
Przetwornica pomocnicza z elementami mocy SiC

Nowe podejście do przetwornic statycznych mocy zostało zastosowane w projekcie przetwornicy PSM-175-SiC MEDCOM dla lokomotywy elektrycznej „Dragon 2” firmy NEWAG.

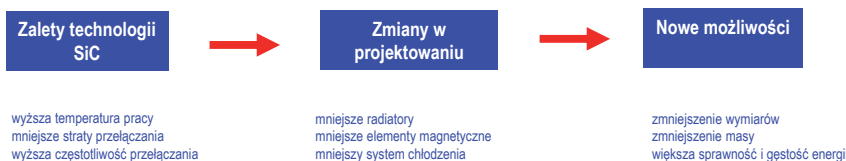


Rys. 1. Typy elementów półprzewodnikowych SiC – IGBT, hybrydowy IGBT (tranzystor z diodą SiC), pełny SiC (SiC MOSFET z diodą SiC)

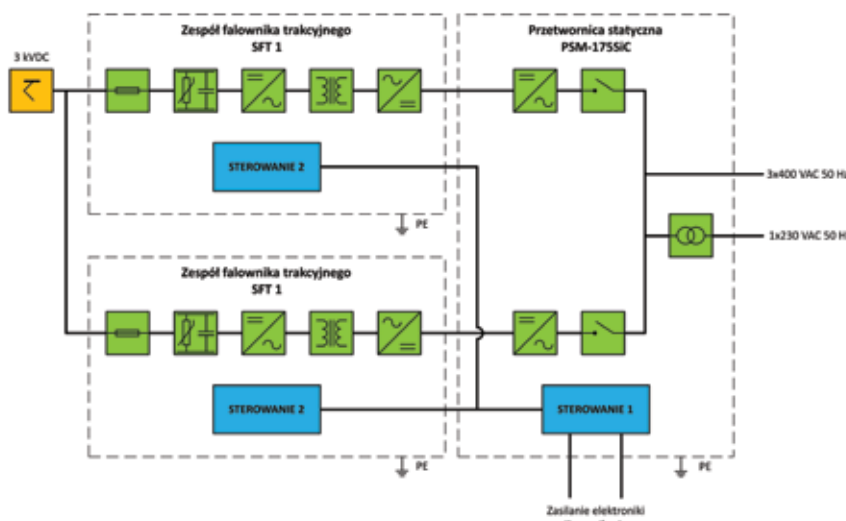
	Si	vs.	SiC	
pasmo zabronione	1,1 eV		3,3 eV	wysoka częstotliwość przełączania
krytyczne natężenie pola	300 kV/cm		2 000 kV/cm	wysoka temperatura pracy
prędkość elektronów	niewielka		duża	wysokie napięcie
przewodzenie ciepła	150 W/mK		490 W/mK	



Rys. 2. Porównanie podstawowych parametrów elementów IGBT Si i SiC



Rys. 3. Nowe podejście do projektowania urządzeń z elementami SiC



Rys. 4. Schemat blokowy przetwornicy statycznej PSM-175-SiC MEDCOM

Przetwornica statyczna PSM-175-SiC MEDCOM przeznaczona jest do wytwarzania napięcia 3x400 V 50 Hz i napięcia jednofazowego 230 V, niezbędnego do zasilania obwodów pomocniczych w lokomotywie. Przetwornica PSM-175-SiC MEDCOM przekształca napięcie wejściowe 3 kV DC na napięcie sinusoidalne 3x400 V. Przetwornica wyposażona jest w specjalne wysokosprawne transformatory, zapewniające galwaniczną izolację obwodu sieci trakcyjnej od obwodów obciążenia. W lokomotywie zainstalowane są 2 całkowicie redundantne falowniki 175 kVA. Podczas normalnej pracy włączony jest tylko jeden falownik statyczny. W przypadku awarii falownika lub kontenera napędowego, z którego jest zasilana przetwornica, główny układ sterowania włącza drugą przetwornicę, aby zapewnić ciągłe zasilanie odbiorców. Schemat blokowy przetwornicy PSM-175-SiC MEDCOM przedstawiono na rys. 4.

Zestaw 2xPSM-175-SiC MEDCOM składa się z kilku modułów:

- ♦ bezpiecznika, pełniącego funkcję zabezpieczenia nadprądowego,
- ♦ bloku kondensatorów DC,
- ♦ modułu przetwornicy statycznej DC/DC SiC z transformatorami,
- ♦ bloku prostownika,
- ♦ bloku falownika SiC,
- ♦ stycznika wyjściowego,
- ♦ systemu sterowania składającego się z pakietowego źródła zasilania, obwodów we/wy,
- ♦ zestawu czujników do pomiaru parametrów przetwornicy statycznej,
- ♦ transformatora 400/230 do zasilania obwodów 230 VAC.

Przetwornica statyczna PSM-175-SiC MEDCOM jest zbudowana przy użyciu najnowszej technologii SiC. Zarówno blok przetwornicy DC/DC, obniżający napięcie z 3 kV na 0,6 kV, jak i sama przetwornica wykorzystuje moduły z węgla krzemu. Przekształtnik jest sterowany przez technologię DSP (*Digital Signal Processor*). Zastosowanie modułów mocy z węgla krzemu zwiększyło częstotliwość przełączania i znacznie zmniejszyło straty mocy w samych modułach SiC, jak również w transformatorach i dławikach. Widok przetwornicy PSM-175-SiC MEDCOM przedstawiono na fot. 1.

Parametry techniczne przetwornicy PSM-175-SiC MEDCOM przedstawiono w tabeli 1.

Przetwornica statyczna pracuje niezawodnie przy napięciu zasilającym zgodnym z wymaganiami normy EN 50163:2006 i jest zabezpieczona przed zwarciem i przeciążeniem wyjścia. Przetwornica spełnia wymagania norm UIC i EN dotyczących bezpieczeństwa i kompatybilności elektromagnetycznej. Diagnostyka i sterowanie falownika odbywa się poprzez interfejs CANBus.

Każda lokomotywa elektryczna „Dragon 2” będzie wyposażona w zestaw dwóch całkowicie redundantnych przetwornic PSM-175-SiC MED-

Tab. 1. Parametry przetwornicy statycznej PSM-175-SiC MEDCOM

Parametr	Wartość
Typ	PSM-175-SiC
Producent	MEDCOM
Napięcie wejściowe DC	3000V DC wg PN-EN50163
Wyjście AC 1	3x400 V/50 Hz/175 kVA, THDu <5%
Wyjście AC 2	230 V/50 Hz/3,5 kVA
Przebieżalność	150%, 5 s
Asymetria obciążenia	max 10%
Interfejs	CAN Open
Temperatura pracy	-30°C ÷ +40°C
Chłodzenie	powietrzne wymuszone – falownik, cieczowe – blok DCDC
Stopień ochrony	IP54/IP56
Masa [kg]	470 kg±10% (2 przetwornice w obudowie)
Wymiary (2xPSM-175-SiC))	950 × 1017 × 1950 mm (W × D × H)
Elektroniczne zabezpieczenia przeciwzwarceniowe i przeciążeniowe	

COM o mocy 175 kVA każda. W celu optymalnego wykorzystania przestrzeni i układu chłodzenia cieczą przetwornice DC/DC zostały zainstalowane w kontenerach z falownikami napędowymi, natomiast przetwornice DC/AC znajdują się w osobnym kontenerze, w którym zastosowano wymuszone chłodzenie powietrzem. Oprócz kompaktowej konstrukcji i wysokiej sprawności PSM-175 SiC MEDCOM charakteryzuje się również wysoką stabilnością napięcia ($\pm 5\%$). Uruchomienie nawet najbardziej wymagających odbiorników (w tym sprężarek i wentylatorów) nie powoduje zmniejszenia wartości napięcia lub deformacji napięcia generowanego przez urządzenie. Co więcej, produkt został zaprojektowany w taki sposób, aby można go było dostosować do różnych źródeł mocy wejściowej – w tym zespołu silnik spalinowy z generatorem. Dzięki temu przetwornica może być stosowana w pojazdach hybrydowych, np. na liniach częściowo zelektryfikowanych.

Cechy przetwornicy PSM-175-SiC MEDCOM można przedstawić następująco:

- ♦ redukcja wagi (ok. 45%) – wyższa częstotliwość przełączania pozwala na zmniejszenie rozmiarów elementów magnetycznych, obniżenie strat, uproszczenie układu chłodzenia i zmniejszenie rozmiarów radiatora i wentylatora,

- ♦ zmniejszenie zużycia energii (5%) – to większa sprawność konwertera i mniejszy układ chłodzenia,
- ♦ redukcja szumów – przetwornica pracuje z częstotliwością wyższą niż 20 kHz poza zakresem słyszalności, mniejszy system chłodzenia dodatkowo redukuje hałas,
- ♦ redukcja wymiarów – to mniejsze radiatory i mniejsze magnesy.

Podsumowanie

Pojazdy elektryczne są ważną częścią techniki na całym świecie, dlatego tak ważne jest oszczędzanie energii. Elementy mocy oparte na technologii SiC pozwalają na znaczne zmniejszenie strat energii, zwiększając sprawność przekształtników. W porównaniu z technologią IGBT oczekiwane obniżenie strat dynamicznych wynosi ok. 50%. Ponadto elementy mocy oparte na technologii SiC mają znacznie wyższe parametry dynamiczne, co pozwala na stosowanie wyższych częstotliwości, stosowanie mniejszych i lżejszych elementów magnetycznych. W efekcie można zmniejszyć masę i rozmiar urządzeń o ponad 40% w porównaniu do tradycyjnych konstrukcji. W przypadku trakcji zwiększona częstotliwość przełączania zmniejsza straty w silnikach trakcyjnych, co dodatkowo obniża koszty energii zużywanej przez pojazd.

Poprawa efektywności w połączeniu ze zmniejszeniem ciężaru i rozmiaru wyposażenia jest obecnie jednym z kluczowych ulepszeń, do których dążą producenci pojazdów elektrycznych. Komponenty oparte na technologii SiC zmniejszają masę całego pojazdu, zmniejszając zużycie energii. Ogólna sprawność przetwornicy SiC wynosi około 94–96%. Dodatkową zaletą, szczególnie ważną dla pasażerów pojazdów, jest redukcja hałasu wytwarzanego przez urządzenia oparte na komponentach SiC, co zapewnia większy komfort podróży.

Zastosowanie komponentów półprzewodnikowych w technologii SiC w układzie napędowym i zasilaniu obwodów pomocniczych zmniejsza zużycie energii o około 5–15% w porównaniu z tradycyjną technologią krzemową. Zastosowanie technologii SiC to prawdziwa rewolucja technologiczna w projektowaniu innowacyjnych urządzeń energoelektronicznych dla transportu publicznego.

Bibliografia:

1. Aggeler D., *Bidirectional Galvanically Isolated 25 kW 50 kHz 5 kV/700V Si-SiC Super Cascode/Si-IGBT DC-DC Converter*, PhD thesis, ETH Zurich, Switzerland 2010.
2. Neudeck P. G., *Silicon Carbide Technology, The VLSI Handbook*, NASA Glenn Research Center by CRC Press LLC, 2006.
3. Hagesawa E., et al., *Hybrid SiC Power Module With Low Power Loss*, Power Electronics Europe, Issue 6, 2012, pp. 20–23.
4. Mrinal K., et al., *10 kV, 120 A SiC Half H-Bridge Power MOSFET Modules Suitable for High Frequency, Medium Voltage Applications*, 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Phoenix, AZ, USA, 17–22 Sept. 2011, vol.4, 2011, pp. 2689–2692.
5. Singh R., et al., *1200 V-class 4H-SiC "Super" Junction Transistors with Current Gains of 88 and Ultra-fast Switching capability*, Materials Science Forum, vols. 717–720, 2012, pp. 1127–1130.



Fot. 1. Widok przetwornicy PSM-175-SiC MEDCOM



6. Sundaresan S. G., et al., 12.9 kV SiC PiN diodes with low on-state drops and high carrier lifetimes, *Materials Science Forum*, vols. 717–720, 2012, pp. 949–952.
7. Sundaresan S. G., et al., Integrated SiC Anode Switched Thyristor Modules for Smart-Grid Applications, *Materials Science Forum*, vols. 717–720, 2012, pp. 1159–1162.
8. Baginski P., *Power Modules for Charger Applications*, 2016: <https://www.vincotech.com/support-and-documents/technical-library.html> (access 20.07.2017).
9. *Circuits Today, JFET and MOSFET Comparison*, 2017: <http://www.circuitstoday.com/jfet-and-mosfet-comparison> (access 20.07.2017).
10. Frisch M., *Advantages of SiC Schottky Diodes in Fast Switching Power Electronics Solutions*, 2010: <https://www.vincotech.com/support-and-documents/technical-library.html> (access 20.07.2017).
11. Frisch M., Temesi E., *Topologies Benefits of NPC Inverter*, 2010: <https://www.vincotech.com/support-and-documents/technical-library.html> (access 20.07.2017).
12. *How2Power Today, Dual SiC MOSFET Modules Promise High Efficiency*, 2009: <https://www.how2power.com/newsletters/0911/products/PowerexSiC.pdf> (access 20.07.2017).
13. Liu J., Wong K. L., Scott A., Mokken J., *Performance Evaluations of Hard-Switching Interleaved DC/DC Boost Converter with New Generation Silicon Carbide MOSFETs*, 2016: https://www.mouser.jp/pdfDocs/Cree-Power_Article_4.pdf (access 20.07.2017).
14. Mitsubishi Electric, *Mitsubishi Electric to Begin Shipment of Silicon Carbide Power Module Samples*, 2012: <http://www.mitsubishielectric.com/news/2012/0709.html> (access 20.07.2017).
15. Mitsubishi Electric, *Mitsubishi Electric Delivers World's First SiC Auxiliary Power Supply Systems for Railcars*, 2013: <http://www.mitsubishielectric.com/news/2013/0326-a.html> (access 20.07.2017).
16. ROHM Semiconductor, *SiC Power Device Technology*, 2013: https://www.rohm.com/documents/11308/2420552/SiC_power_device-catalog.pdf (access 20.07.2017).
17. ROHM Semiconductor, *SiC Power Devices and Modules. Application Note*, 2014: https://d1d2qsbl8m0m72.cloudfront.net/en/products/databook/applnote/discrete/sic/common/sic_appli-e.pdf (access 20.07.2017).
18. ROHM Semiconductor, *Silicon Carbide Schottky Barrier Diodes, White Paper*, 2016: https://www.rohm.com/documents/11308/12928/ROHM_SiC+Diodes_wp.pdf (access 20.07.2017).
19. Singh R., *Silicon Carbide Thyristors usher in the Smart Grid Revolution*, 2012: https://www.genesicsemi.com/images/references/trade_journals/bodo_02-12.pdf (access 20.07.2017).
20. Taranowich S., *Si vs. GaN vs. SiC: Which process and supplier are best for my power design?*, 2013, EDN Network, Power Management Design Center: <https://www.edn.com/design/power-management/4409627/Si-vs-GaN-vs-SiC-Which-process-and-supplier-are-best-for-my-power-design-> (access 20.07.2017).
21. Yole Development, *Power SiC 2017: Materials, Devices, Modules, And Applications report*, 2017: http://www.yole.fr/STATUS_SIC_MARKET_TECHNOLOGY_TRENDS.aspx (access 20.07.2017).

Autorzy:

Janusz Biliński – MEDCOM Sp. z o.o

Sylwester Buta – MEDCOM Sp. z o.o

High Power Static Converters for Traction Vehicles Powered by SiC Technology

High energy efficiency and increasing the working frequency of the converter will make it possible to minimize the size of the cooling system and reduce energy consumption. Auxiliary converters using the SiC technology are a new quality. The reduction of weight and size is very significant (ca. 40–50%). Higher switching frequency reduces the size of magnetic components (ca. 80%), and higher converter efficiency minimizes the size of the cooling system. The overall efficiency of the converter is extremely high (94–96%). This paper presents comparison of Si and SiC parameters which are important for modern solutions, dedicated for railway traction vehicles. Paper presents also parameters of SiC auxiliary converter, designed and manufactured as state-of-the-art product for modern mainline electric locomotives.

Key words: Silicon carbide, Static converters, Traction motors, Insulated gate bipolar transistor.

Tadeusz Dyr, Karolina Ziółkowska

Rozwój infrastruktury ekonomicznej jako czynnik konkurencyjności regionów

ISBN 978-83-62805-47-1

Liczba stron: 192

Format: B5

Oprawa: twarda

Rok wydania: 2017

Cena 39,00 zł (w tym 5% VAT)

W publikacji tej, na tle rozważań teoretycznych, przedstawiono wyniki badań, przeprowadzonych z wykorzystaniem modeli ekonometrycznych i narzędzi statystycznych, dotyczących zróżnicowania przestrzennego konkurencyjności regionów i rozwoju infrastruktury ekonomicznej oraz współzależności występujących pomiędzy tymi kategoriami. Stawiać może ona zatem źródło wiedzy dla ekspertów, w tym pracowników administracji publicznej, zajmujących się problematyką rozwoju regionalnego oraz programowania inwestycji infrastrukturalnych. Odbiorcami mogą być także pracownicy naukowi i studenci kierunków takich jak ekonomia, gospodarka przestrzenna, logistyka i transport oraz inne osoby zainteresowane zagadnieniami konkurencyjności regionów.

TADEUSZ DYR, KAROLINA ZIÓLKOWSKA

Rozwój infrastruktury ekonomicznej
jako czynnik konkurencyjności
regionów

Pełna oferta wydawnicza:

www.inw-spatium.pl