

DOI: 10.5604/20830157.1212271

## DWUKIERUNKOWA PRZETWORNICA DC/DC Z WYKORZYSTANIEM ELEMENTÓW SiC

Wojciech Matelski, Leszek Wolski, Stanisław Abramik

Instytut Elektrotechniki, Oddział w Gdańsku

**Streszczenie.** W artykule opisane zostały prace nad rozwojem przetwornicy o wysokiej częstotliwości łączeń z wykorzystaniem półprzewodników z węgla krzemu. Układ przystosowano do współpracy z magazynem energii, będącym częścią mikro sieci prądu stałego zawierającej źródła OZE. Przedstawiona została budowa urządzenia oraz działanie opracowanego algorytmu sterowania. W pracy zawarto wyniki badań eksperymentalnych przetwornicy o częstotliwości łączeń 500 kHz, współpracującej z superkondensatorowym zasobnikiem energii.

**Słowa kluczowe:** przekształtniki DC/DC, magazynowanie energii, półprzewodniki SiC, mikro sieci

### BIDIRECTIONAL DC/DC CONVERTER BUILT WITH THE USE OF SiC ELEMENTS

**Abstract.** The article presents development process of the high frequency DC/DC converter built on the basis of silicon carbide elements. The device has been designed for energy storage applications, as a part of a DC microgrid with renewable energy sources. The structure and basics of the proposed control algorithm of the converter have been presented. The work contains the results of experimental tests of the converter operating with 500 kHz switching frequency in application with a supercapacitor.

**Keywords:** DC/DC converters, energy storage, SiC semiconductors, microgrids

### Wstęp

Półprzewodniki z węgla krzemu to nowa i wciąż rozwijająca się technologia. W stosunku do obecnie stosowanych na masową skalę elementów krzemowych, półprzewodniki SiC charakteryzują się znacząco lepszymi właściwościami: posiadają krótsze czasy przełączeń, mniejsze straty energii przy przełączaniu, wyższą wytrzymałość termiczną oraz mniejsze rozmiary od elementów krzemowych o porównywalnych parametrach elektrycznych [7].

Duża ilość publikacji dotyczy wysokiej sprawności przekształtników budowanych z elementów SiC. Chętnie wybieraną strukturą w tego typu badaniach jest klasyczny układ trójfazowego, dwupoziomowego falownika napięcia. Takie rozwiązanie przyjęto w pracy [12]. Do budowy przekształtnika wykorzystano tranzystory typu JFET oraz diody Schottky'ego. Przy częstotliwości łączeń 10 kHz i obciążeniu 4 kW, uzyskano sprawność na poziomie ponad 98%. W kolejnych artykułach [4, 11], opisano wykorzystanie nowszych tranzystorów, tym razem typu MOSFET, również we współpracy z diodami Schottky'ego. W efekcie, podczas oddawania mocy odpowiednio 5 i 6 kW oraz częstotliwości łączeń 100 kHz, uzyskano sprawność na poziomie ponad 98%. Nieco inny był kontekst badań zaprezentowany w [5], gdzie w miejsce zewnętrznych diod zwrotnych falownika wykorzystano pasożytnicze diody znajdujące się w strukturze tranzystorów SiC MOSFET. Obciążony mocą 10 kW układ pracował z częstotliwością 10 kHz i uzyskano poziom sprawności sięgający 98%.

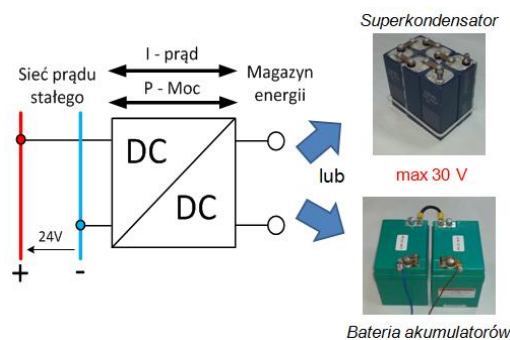
Technologia półprzewodników z węgla krzemu przyspieszyła rozwój układów określanymi jako transformatory inteligentne, z ang. *solid state transformer* SST. Rozwiązanie SST to sprzęg elektroenergetyczny sieci dystrybucyjnej średniego napięcia z niskonapięciową siecią odbiorczą, bez konieczności stosowania dużych rozmiarów transformatora sieciowego. Separacja galwaniczna zapewniana jest przez transformator wysokoczęstotliwościowy. W pracy [2] opisano dwukierunkową przetwornicę zbudowaną z tranzystorów SiC JFET oraz MOSFET. Zaproponowano topologię półmostka, stanowiącą moduł funkcjonalny kaskadowych przekształtników średniego napięcia zbudowanych przy użyciu łączników o napięciu pracy 1200 V. Natomiast w artykule [9] zaprezentowano realizację układu SST o mocy 25 kW przy użyciu tranzystorów SiC o napięciu blokowania 10 kV i częstotliwości łączeń 50 kHz.

Od 2013 roku w Gdańskim Oddziale Instytutu Elektrotechniki IEL-OG prowadzone były badania związane z aplikacją półprzewodników SiC. W pracy [8] opisano izolowaną przetwornicę typu DC/DC o topologii mostkowej. Zaprojektowany układ o mocy 1 kW miał pełnić rolę sprzęgu źródła energii odnawialnej z istnie-

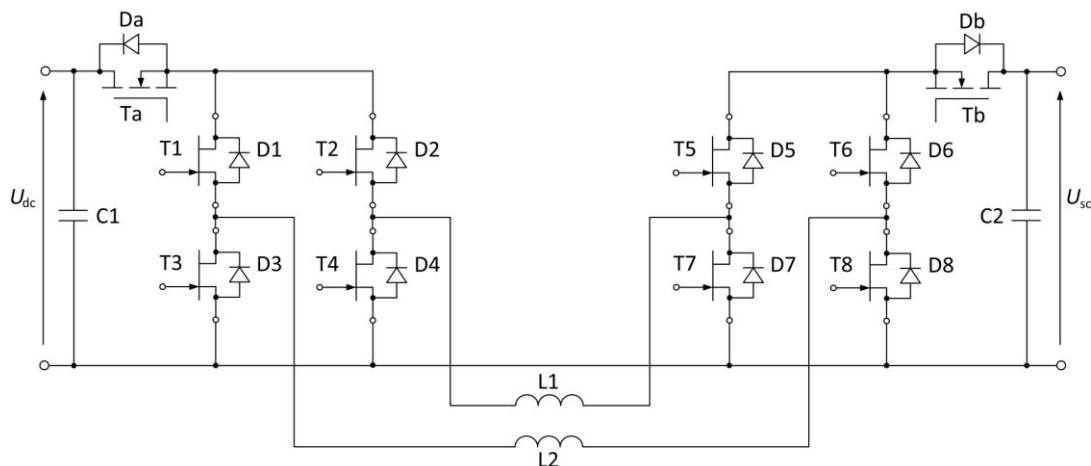
jącą w IEL-OG mikro siecią prądu stałego o napięciu 24 V. Przetwornica powstała w dwóch wersjach, różniących się typem zastosowanych tranzystorów z węgla krzemu. Sprawdzono konstrukcję zbudowaną z tranzystorów MOSFET SCT2080KE firmy ROHM SEMICONDUCTOR, natomiast w drugim podejściu wykorzystano tranzystory JFET SJDP120R085 firmy SemiSouth. Początkowo zakładano pracę układu z częstotliwością łączeń 1 MHz, a ostatecznie, przy użyciu tranzystorów typu JFET, udało się uzyskać satysfakcjonujące efekty przy częstotliwości łączeń na poziomie 700 kHz. Wykorzystując zdobyte doświadczenia, w 2014 roku rozpoczęto prace nad nową wersją przetwornicy wysokoczęstotliwościowej [1, 6], będącej przedmiotem niniejszego artykułu. Stosowane w poprzednich badaniach półprzewodniki SiC nie były już dostępne w komercyjnej sprzedaży, dlatego w projekcie nowej wersji przetwornicy przyjęto tranzystory JFET innego producenta. W nowej konstrukcji zastosowano również diody antyrownoległe z węgla krzemu. Poprzednie prace [8] wykazały ponadto, że praca z bardzo wysoką częstotliwością może zakłócać działanie układu sterowania przetwornicy, z tego względu w nowej wersji zaprojektowano konstrukcję mechaniczną oraz obwoły sterowania umożliwiające niezakłócone działanie urządzenia pracującego z częstotliwością 500 kHz.

### 1. Koncepcja przetwornicy wysokoczęstotliwościowej

Opisywany układ to dwukierunkowa przetwornica typu DC/DC o mocy 1 kW, zbudowana z diod i tranzystorów z węgla krzemu. Urządzenie przeznaczone jest do pracy jako sprzęg mikro sieci prądu stałego zawierającej źródła OZE z magazynem energii w postaci baterii akumulatorów lub superkondensatorów. Rolę przetwornicy w omawianym systemie o napięciu szyny prądu stałego wynoszącym 24 V przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Rola przetwornicy w mikro sieci 24 V DC



Rys. 2. Schemat obwodów mocy wysokoczęstotliwościowej przetwornicy DC/DC

Układ umożliwia dwukierunkowy przepływ energii z sieci prądu stałego do magazynu energii i odwrotnie. Ładowanie magazynu jest możliwe, gdy na szynie DC występuje nadwyżka energii, powodująca wzrost napięcia powyżej ustalonej wartości maksymalnej. W sytuacjach, kiedy moc uzyskiwana ze źródeł OZE jest niewystarczająca, aby utrzymać znamionowe napięcie sieci DC, możliwy jest pobór niedoboru mocy z magazynu energii i tym samym stabilizacja napięcia sieci na zadanym poziomie. Najważniejsze dane przetwornicy zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry przetwornicy wysokoczęstotliwościowej

Moc wyjściowa	1 kW
Zakres napięcia wejściowego	12 – 28 V
Napięcie wyjściowe	24 V
Częstotliwość łączeń	500 kHz z przes. sygn. ster.

## 2. Budowa układu

Schemat obwodów mocy przetwornicy DC/DC przedstawiono na rys. 2. Do budowy przetwornicy wykorzystano półprzewodniki z węgla krzemu SiC, dzięki czemu możliwa jest praca z bardzo wysoką częstotliwością łączeń, wpływając na wielkość niezbędnych elementów biernych. Tym samym zmniejszeniu ulega rozmiar i waga urządzenia, co ma istotne znaczenie w przypadku urządzeń większej mocy, jak np. przetwornice instalowane w samochodach elektrycznych [3]. Ponadto elementy SiC charakteryzują się wyższą sprawnością oraz posiadają lepsze właściwości odnośnie odprowadzania ciepła. Dzięki temu rozmiar przekształtnika, w stosunku do urządzeń zbudowanych z elementów krzemowych, może być znacząco zmniejszony. Podzespoły wykorzystane do budowy przetwornicy zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie podzespołów obwodu mocy przetwornicy SiC

Podzespół	Opis
Tranzystory T1 – T8	SiC JFET IJW120R070T1 firmy Infineon 1200 V, 25 A (@100°C)
Diody D1 – D8	SiC Schottky IDW30S120 firmy Infineon 1200 V, 15 A (< 135°C)
Dławiki L1 i L2	0,89 μH
Kondensatory C1 i C2	2,2 μF
Tranzystory Ta i Tb	Si MOSFET IRFB3077PbF firmy International Rectifier 75 V, 120 A
Drivery tranzystorów SiC	Single JFET Driver IC 1EDI30J12CP firmy Infineon

W konstrukcji urządzenia (rys. 2) wyróżnić można dwa identyczne podukłady, połączone równolegle. Pierwszą część stanowi obwód: T1 i D1 – T3 i D3 – L2 – T6 i D6 – T8 i D8, drugi podukład tworzą elementy: T2 i D2 – T4 i D4 – L1 – T5 i D5 – T7 i D7. Dzięki takiej strukturze, dla uzyskania założonej

mocy wyjściowej, można zastosować łączniki o niższej wartości prądu znamionowego. Dodatkowo, przy uwzględnieniu przesunięcia w fazie sygnałów sterujących podukładami, zwielokrotnieniu ulega efektywna częstotliwość napięcia wyjściowego. Ogranicza to poziom tętnień prądu odbiornika, co dodatkowo pozwala zmniejszyć wymagania co do wartości elementów biernych w układzie [10]. W prezentowanym rozwiązaniu efektywna częstotliwość tętnień napięcia wyjściowego wynosi 1 MHz.

W przetwornicy zastosowane zostały tranzystory SiC typu JFET, które charakteryzują się stanem przewodzenia przy braku sterowania bramkowego. Aby wprowadzić je w stan blokowania, należy podać ujemne napięcie bramka-źródło na poziomie  $V_{GS} = -19$  V. Dla układu z rys. 2 stwarza to niebezpieczeństwo zwarcia w gałęzi poprzecznej przekształtnika. Szczególne zagrożenie związane jest z procesem rozruchu układu. Z tego względu w obwodzie głównym przetwornicy zastosowano dodatkowe tranzystory zabezpieczające  $T_a$  i  $T_b$  (normalnie wyłączone). W sytuacji, gdy na zaciskach przetwornicy pojawi się napięcie zanim układy driverów wprowadzą tranzystory JFET w stan blokowania, dodatkowe tranzystory zapewniają przerwę w obwodzie mocy. Podczas dalszej, normalnej pracy przetwornicy łączniki  $T_a$  i  $T_b$  przewodzą w sposób ciągły.

Zaciski przetwornicy po stronie tranzystora  $T_a$  przeznaczone są do podłączenia napięcia sieci DC 24 V. Do zacisków po stronie tranzystora  $T_b$  dołączony jest magazyn energii.

## 3. Działanie przetwornicy dwukierunkowej

Dzięki zastosowaniu odpowiedniej struktury przetwornica posiada możliwość dwukierunkowego obniżania i podwyższania napięcia, co umożliwia przepływ energii w obu kierunkach niezależnie od relacji napięcia wejściowego do wyjściowego.

Sterując tranzystorami T1 – T8 w odpowiednich grupach, uzyskuje się napięcie o zadanej wartości, a przez to przepływ energii w pożądanym kierunku. W zależności od aktywności grup pracujących tranzystorów wyróżnić można pięć trybów pracy przetwornicy, w tym cztery aktywne. Wszystkie tryby pracy zestawiono w tabeli 3, gdzie: ON – przewodzenie tranzystora w sposób ciągły, OFF – tranzystor w stanie blokowania, PWM – praca z zadanym współczynnikiem wypełnienia.

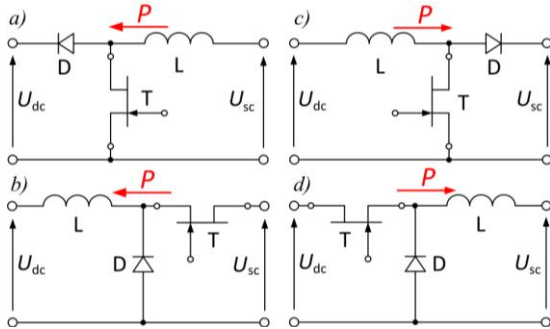
Tabela 3. Zestawienie aktywnych trybów pracy przetwornicy

Tryb pracy	Tranzystor							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
DCUP	OFF		PWM		ON		OFF	
DCDOWN	OFF		OFF		PWM		OFF	
SCUP	ON		OFF		OFF		PWM	
SCDOWN	PWM		OFF		OFF		OFF	

Na rys. 3 w sposób uproszczony przedstawiono konfigurację przetwornicy z rys. 2 w poszczególnych trybach pracy zgodnie ze stanami z tabeli 3. Podczas tworzenia schematów rozpatrywano tylko jeden z dwóch równoległych podukładów.

Przedstawiony na rysunkach tranzystor T realizuje przełączanie typu PWM. Tranzystory w stanie ON traktowane są jako zwarcie, a łączniki w stanie OFF jako przerwa w obwodzie.

Dodatkowo na schematach oznaczono kolorem czerwonym kierunek przepływu mocy  $P$  w układzie. Przyjęto następującą konwencję strzałkowania (mającą wpływ na nazewnictwo trybów pracy z tabeli 3): przy przepływie mocy od magazynu energii (czyli od strony SC) do szyny prądu stałego (do strony DC) przyjmuje się kierunek w lewo.



Rys. 3. Uproszczony schemat przetwornicy w poszczególnych trybach pracy: a) DCUP, b) DCDOWN, c) SCUP, d) SCDOWN

Zgodnie ze schematami przedstawionymi na rys. 3 w pracy układu wyróżnić można dwie elementarne konfiguracje spotykane wśród przetwornic prądu stałego. Pierwszą z nich przedstawiono na rys. 3b i 3d. Są to tryby obniżania napięcia DCDOWN i SCDOWN. Praca w takim układzie obejmuje sytuacje, gdy transport energii odbywać się ma w kontrolowany sposób do odbiornika o niższym napięciu niż potencjał źródła. Jest to układ obniżający napięcie – z ang. *buck* lub DOWN converter. Wartość średnią napięcia odbiornika, w stanie ustalonym, w zależności od napięcia wejściowego, dla układu z rys. 3b opisać można zależnością:

$$U_{dc} = \gamma \cdot U_{sc} \quad (1)$$

gdzie:  $\gamma$  – współczynnik wypełnienia prądu tranzystora T.

Druga konfiguracja, obejmująca schematy z rys. 3a i 3c, dotyczy trybów podwyższania napięcia DCUP i SCUP. Praca w takim układzie następuje w sytuacjach, gdy przepływ energii kierowany jest do odbiornika o potencjale wyższym od źródła. Jest to przetwornica podwyższająca napięcie – z ang. *boost* lub UP converter. Wartość napięcia odbiornika, w stanie ustalonym, w zależności od napięcia wejściowego, dla układu z rys. 3a opisać można zależnością:

$$U_{dc} = U_{sc} \frac{1}{1 - \gamma} \quad (2)$$

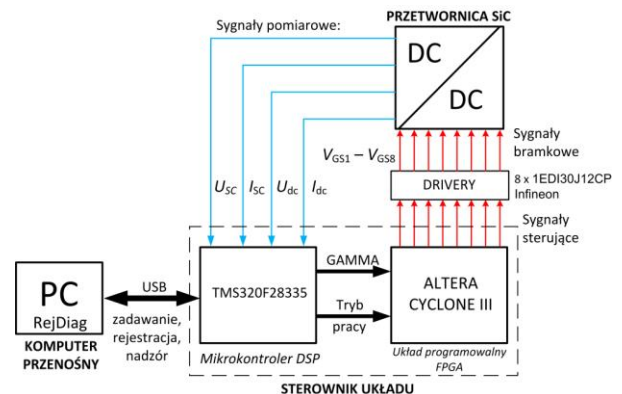
Podsumowując, pierwszy człon nazwy trybu pracy zawiera informację o kierunku przepływu energii, drugi natomiast określa charakter pracy przetwornicy.

#### 4. Układ sterowania

Działanie przetwornicy kontroluje specjalny sterownik mikroprocesorowy STER\_F28335, składający się z procesora TMS320F28335, współpracującego z układem programowalnym ALTERA CYCLONE III. Jest to elastyczny system, opracowany w IEL-OG, służący do sterowania przekształtników energoelektronicznych o różnorodnych strukturach. Rozwiązanie to przetestowano m.in. w aplikacjach falowników sieciowych, oraz wysokonapięciowych przetwornicach DC/DC z superkondensatorowymi zasobnikami energii. Mikrokontroler DSP firmy Texas Instruments to szybki układ realizujący obliczenia z częstotliwością do 150 MHz, posiadający zestaw dedykowanych podukładów, takich jak: przetworniki ADC, czy różnorodne

moduły komunikacyjne. Mikrokontroler wraz z zaimplementowanymi układami regulacji stanowi sterowanie nadrzędne przetwornicy. Układ programowalny FPGA zajmuje się bezpośrednią generacją sygnałów PWM, odciążając w ten sposób główną jednostkę obliczeniową. Dodatkowo praca układu sterowania może być kontrolowana z poziomu komputera klasy PC poprzez złącze USB.

Oprogramowanie kontrolne RejDiag, uruchamiane z poziomu komputera, również opracowane w Gdańskim Oddziale Instytutu Elektrotechniki, wyposażone jest w szereg funkcji uruchomieniowych oraz kontrolno - rejestrujących. Schemat blokowy układu sterowania przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Schemat blokowy układu sterowania przetwornicą

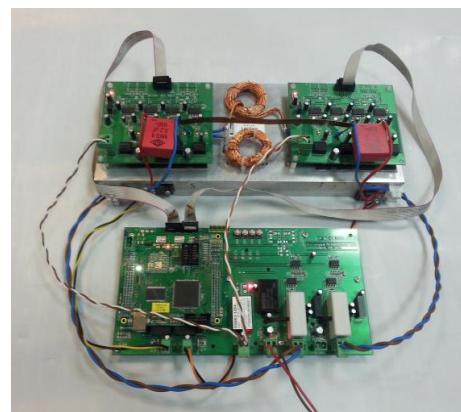
Do współpracy ze sterownikiem STER\_28335 konieczne było opracowanie dedykowanej płyty bazowej, zapewniającej m.in. zasilanie układu sterowania oraz realizację pomiarów prądów i napięć przetwornicy. Układ wyposażony został w szereg dodatkowych funkcji rozszerzających jego możliwości komunikacyjne i pomiarowe, co umożliwi ewentualne późniejsze modyfikacje. Widok zbudowanej płyty bazowej przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Płyta bazowa dla sterownika STER\_F28335 i przetwornicy SiC

W układzie prowadzony jest monitoring prądów i napięć na wejściu i wyjściu przetwornicy. Wartość prądu mierzona jest za pomocą przetworników typu LEM, a pomiary napięć zrealizowano z wykorzystaniem rezystancyjnych dzielników napięcia.

Na rys. 6 przedstawiono widok skonstruowanej wysokoczęstotliwościowej przetwornicy DC/DC zbudowanej z półprzewodników z węglika krzemu wraz z podłączonym układem sterowania.



Rys. 6. Widok zbudowanej przetwornicy wraz z podłączonym układem sterowania

## 5. Wyniki badań laboratoryjnych

Działanie wysokoczęstotliwościowej przetwornicy DC/DC przetestowano we współpracy z superkondensatorem 40/28 firmy Newcond. Wykonywano próby ładowania i rozładowania zasobnika energii. Dane superkondensatora zestawiono w tabeli 4. Widok stanowiska laboratoryjnego przedstawiono na rys. 7.

Tabela 4. Parametry superkondensatora firmy Newcond produkcji rosyjskiej

Parametr	Wartość
Typ	40/28
Napięcie znamionowe	28 V
Prąd maksymalny	4000 A
Pojemność	104 F
Rezystancja wewnętrzna	0,0055 $\Omega$
Waga	26 kg
Energia	40,77 kJ
Moc	35,64 kW

Na zdjęciu z rys. 7 przedstawiono dwie przetwornice o konstrukcji opisanej w niniejszym artykule (drugą przeznaczono do współpracy z baterią akumulatorów). Oba układy zamknięto w metalowych, niebieskich obudowach. Obwody sterowania odseparowano od obwodów mocy i przytwierdzono do zewnętrznej części pokryw przetwornicy.

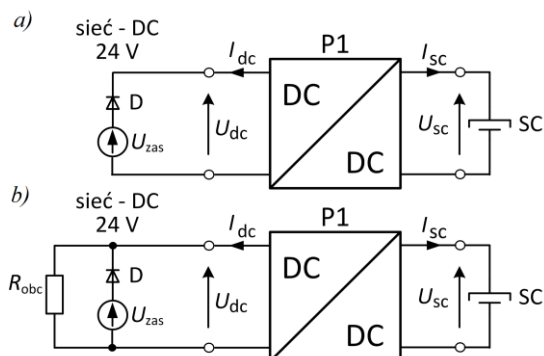


Rys. 7. Stanowisko testowe do badań przetwornic DC/DC

W badaniach wykorzystywany był regulowany zasilacz prądu stałego  $U_{zas}$  symulujący napięcie sieci DC. Poprzez zmiany wartości tego napięcia wymuszano reakcję przetwornicy. Dodatkowo wyjście zasilacza zabezpieczono przy pomocy szeregowo włączonej diody D. W przypadku procesu

rozładowania, energia z magazynu pobierana była przez obciążenie w postaci opornika o rezystancji  $R_{obc}$ . Pracę przetwornicy nadzorowano z poziomu aplikacji RejDiag, uruchomionej na komputerze podłączonym do sterownika przez port USB. Przy pomocy tego programu dokonano rejestracji przebiegów wejściowych i wyjściowych przetwornicy. Schematy układów badawczych przetwornicy przedstawiono na rys. 8a i 8b. Na schematach zaznaczono wielkości podlegające rejestracji podczas prób oraz ich dodatnią polaryzację.

Schemat układu badawczego dotyczącego ładowania superkondensatora przedstawiono na rys. 8a. Ze względu na ograniczenia czasu rejestracji, badania ładowania przeprowadzono w dwóch próbach. Wyniki zostały przedstawione na rys. 9 i 10.

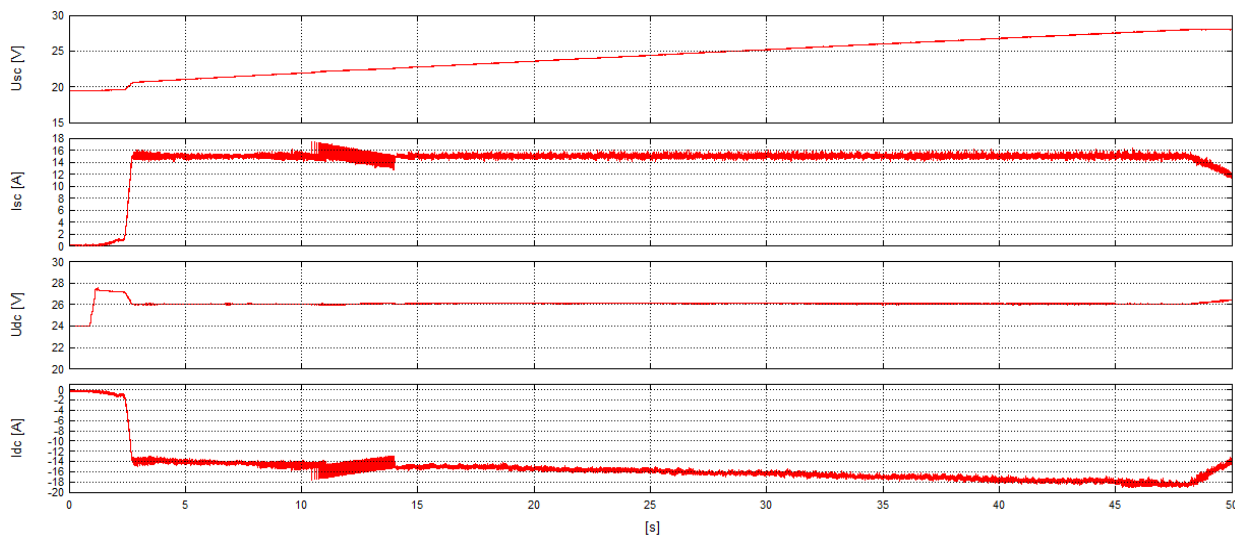


Rys. 8. Schemat układu badawczego przetwornicy dwukierunkowej SiC: a) ładowanie superkondensatora; b) rozładowanie superkondensatora

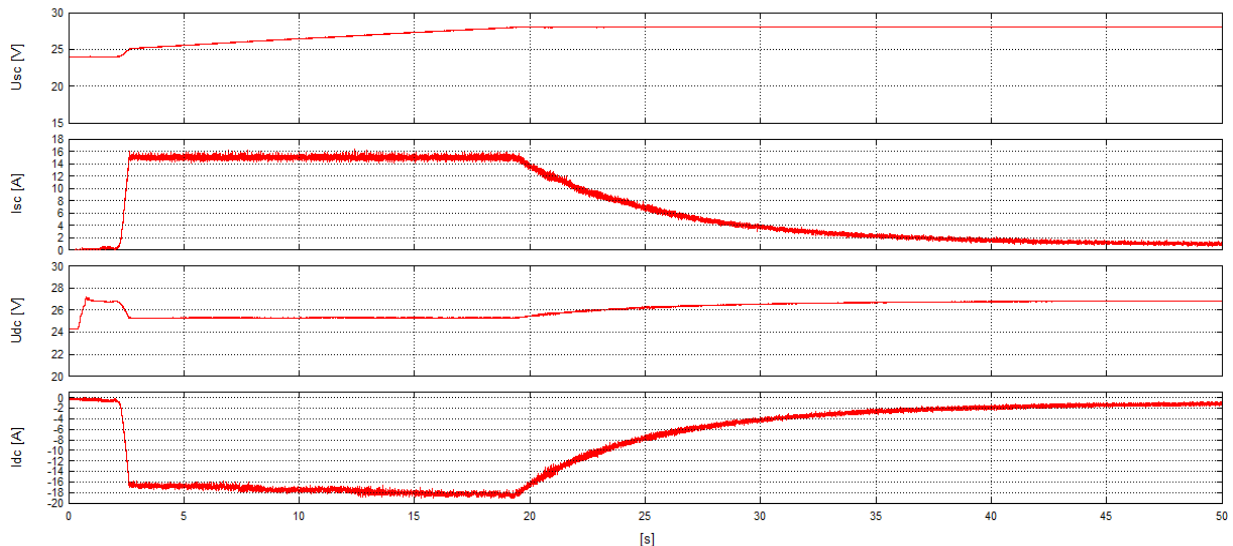
Proces ładowania (rys. 9) rozpoczyna się, gdy napięcie  $U_{dc}$  przekroczy wartość progową 24,5 V, wyzwalając zadziałanie przetwornicy P1. Prąd  $I_{sc}$ , który jest wielkością regulowaną, osiąga i utrzymuje zadaną wartość równą 15 A. W tym czasie napięcie  $U_{sc}$  narasta liniowo do momentu osiągnięcia wartości zadanej, określonej na poziomie 28 V. Tętnienia prądu  $I_{sc}$ , pojawiające się po ok. 12 s próby, wynikają ze zbliżenia wartości napięcia superkondensatora do napięcia  $U_{dc}$ . Układ oscyluje między pracą w trybie obniżania SCDOWN i podwyższania napięcia SCUP.

Po naładowaniu superkondensatora do zadanej wartości napięcia 28 V (co na rys. 10 następuje po ok. 19 s) przetwornica przechodzi z trybu ładowania magazynu stałym prądem w tryb ładowania przy stałym napięciu, a prąd  $I_{sc}$  maleje wykładniczo.

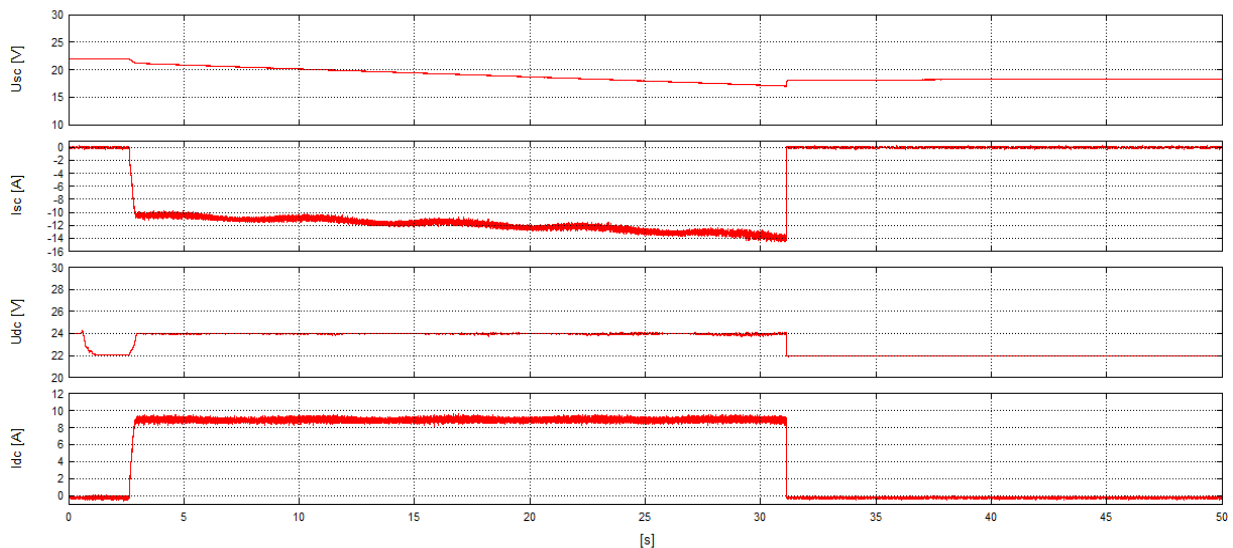
Schemat układu badawczego związany z rozładowywaniem superkondensatora przedstawiono na rys. 8b. Rezystancja obciążenia wynosiła 3  $\Omega$ . Wyniki badania procesu rozładowania przedstawiono na rys. 11.



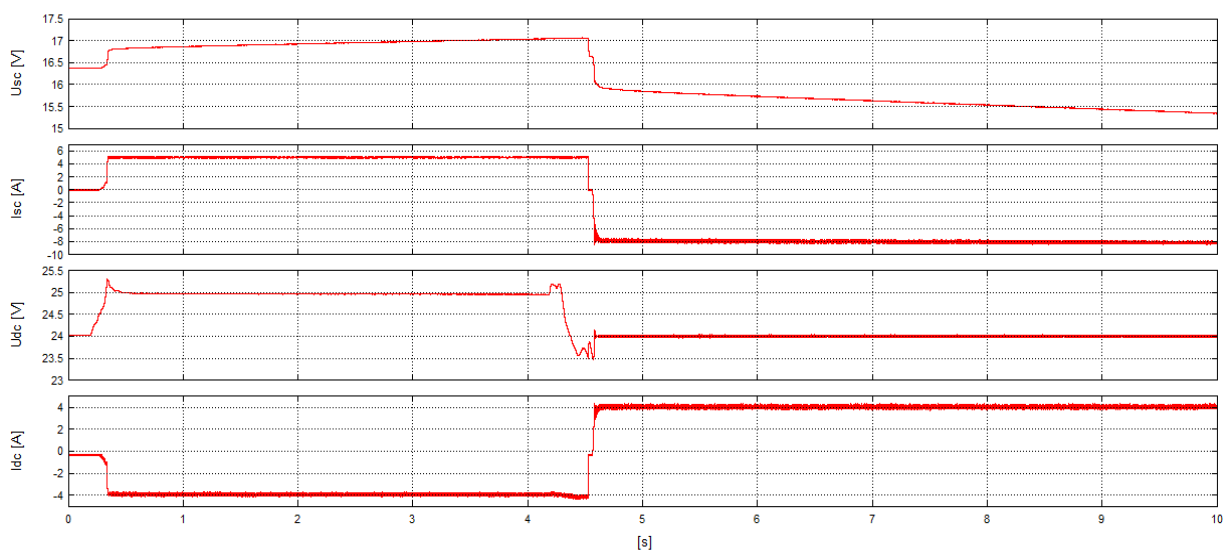
Rys. 9. Przebiegi charakteryzujące pracę przetwornicy dwukierunkowej SiC podczas ładowania superkondensatora – tryb ładowania stałym prądem 15 A



Rys. 10. Przebiegi charakteryzujące pracę przetwornicy dwukierunkowej SiC podczas ładowania superkondensatora – tryb ładowania stałym napięciem 28 V



Rys. 11. Przebiegi charakteryzujące pracę przetwornicy dwukierunkowej SiC podczas rozładowania superkondensatora



Rys. 12. Przebiegi charakteryzujące przejście z trybu pracy ładowania do rozładowania superkondensatora

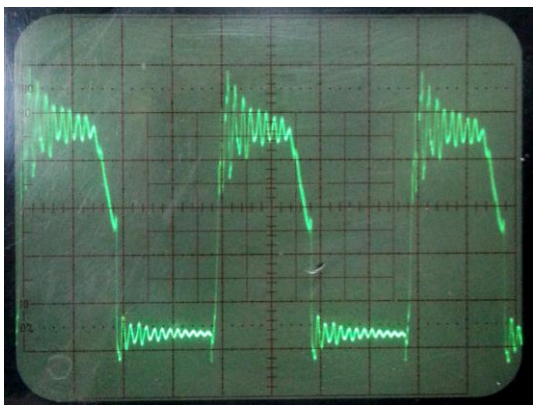
Rozładowanie superkondensatora rozpoczyna się (rys. 11), gdy napięcie  $U_{dc}$  spada poniżej ustalonej wartości minimalnej 23,5 V. Podczas tego procesu regulowany jest prąd  $I_{dc}$ , a zadaniem układu jest uzyskanie i utrzymanie na szynie DC napięcia 24 V. Prąd rozładowania  $I_{dc}$  utrzymuje stałą wartość. Po ok. 31 s napięcie  $U_{sc}$  spada do wartości minimalnej i w tym momencie

proces rozładowania zostaje natychmiast przerwany. Napięcie  $U_{dc}$  nie jest już podtrzymywane i spada do wartości ok. 22 V.

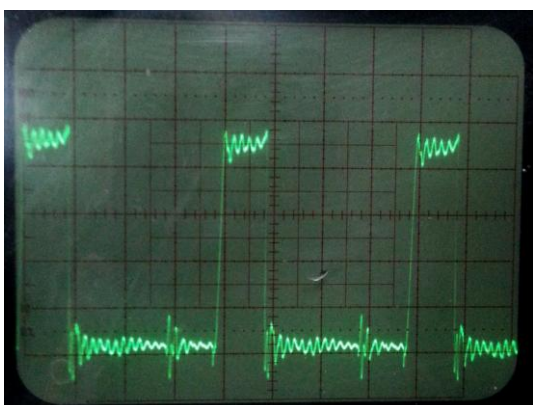
W próbach, których wyniki przedstawiono na rys. 9–11, celowo spowolniono dynamikę układu regulacji, aby lepiej zaprezentować charakter zachodzących zjawisk. Pełną dynamikę reakcji przetwornicy zademonstrowano na rys. 12, gdzie przedstawiono proces zmiany kierunku przepływu energii. Układ

badawczy odpowiadał schematowi z rys. 8b. Poprzez zmiany napięcia  $U_{zas}$  symulującego napięcie mikro sieci DC, wymuszono przejście ze stanu ładowania do stanu rozładowania superkondensatora.

W trakcie badań dokonano również rejestracji procesów załączania i wyłączania tranzystorów. Układ zasilany ze źródła o napięciu 24 V pracował z częstotliwością 500 kHz w trybie SCDOWN. Rejestracji podlegało napięcie dren-źródło  $u_{DS}$  przy różnych współczynnikach wypełnienia  $\gamma$ . Przykładowe przebiegi w postaci zrzutów z ekranu oscyloskopu przedstawiono na rys. 13 i 14.



Rys. 13. Napięcie  $u_{DS}$  tranzystora T2 podczas pracy dla  $\gamma = 0,5$  (ustawienia oscyloskopu - X: 0,5  $\mu$ s/DZ; Y: 5 V/DZ)



Rys. 14. Napięcie  $u_{DS}$  tranzystora T1 podczas pracy dla  $\gamma = 0,75$  (ustawienia oscyloskopu - X: 0,5  $\mu$ s/DZ; Y: 5 V/DZ)

## 6. Podsumowanie

Korzystając z doświadczeń oraz wyników badań zawartych w opracowaniu [8] dotyczącym transformatorowej przetwornicy z tranzystorami z węgla krzemu, zbudowany został model przetwornicy beztransformatorowej z funkcją podwyższania i obniżania napięcia. Poprzednia konstrukcja z tranzystorami SiC pracującymi w układzie mostkowym, umożliwiała jednokierunkowy przepływ energii, a osiągnięta stabilna częstotliwość łączy wynosiła 700 kHz.

Nowa konstrukcja, zawierająca dwie równoległe pracujące przetwornice z przesuniętym fazowo sterowaniem, zapewni dwukierunkowy przepływ energii w szerokim zakresie napięć, przy zachowaniu wysokiej jakości energii wyjściowej. Częstotliwość pracy układu wynosi obecnie 500 kHz w każdej z równoległych przetwornic, co wynikowo daje częstotliwość pracy układu na poziomie 1 MHz. Przedstawione wyniki potwierdzają poprawne działanie przetwornicy w aplikacjach z magazynami energii. Uzyskane doświadczenia w pracach nad układami o wysokich częstotliwościach łączy tranzystorów umożliwią opracowanie w przyszłości komercyjnych przetwornic DC/DC dla zastosowań w tzw. małej energetyce (prosumenckiej) związanej z lokalnymi źródłami OZE.

Rzeczywistą weryfikacją poprawności pracy przetwornicy będzie zainstalowanie układu w istniejącym w Oddziale Gdańskim IEL modelowym systemie mikro sieci OZE.

## Literatura

- [1] Abramik S. i inni: Wielowrotnik Energetyczny dla Wieloźródłowego Systemu OZE. Opracowanie nr OG/913/RE-162/2015: Energetyka Rozproszona – Generacja, Przetwarzanie i Magazynowanie Energii, Gdańsk, 2015, 48–70.
- [2] Adamowicz M., Strankowski P., Pietryka J., Szewczyk J., Guziński J.: SiC-Based Phase-Shift Dual Half Bridge DC-DC Converter as a Key Component of Multilevel Cascaded MV Converters. Przegląd Elektrotechniczny 9/2014, 203–210.
- [3] Calderon-Lopez G., Forsyth A. J.: High Power Density DC-DC Converter with SiC MOSFETs for Electric Vehicles. 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014), 1–6, Manchester, 2014.
- [4] Gizewski S.: Trójfazowy falownik napięcia z tranzystorami SiC JFET. Przegląd Elektrotechniczny 4b/2012, 76–79.
- [5] Huawu L., Hongfei W., Yangjun L., Yan X., Kai S.: A High Efficiency Inverter Based on SiC MOSFET Without Externally Anti-parallelled Diodes. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition – APEC, 2014.
- [6] Lowiec E. i inni: Wysokoczęstotliwościowa Przetwornica DC/DC z Wykorzystaniem Elementów SiC. Opracowanie nr OG/902/RE-162/2014: Energetyka Rozproszona – Generacja, Przetwarzanie i Magazynowanie Energii, Gdańsk, 2014, 54–71.
- [7] Nowak M., Barlik R., Rąbkowski J.: Poradnik Inżyniera Energoelektronika Tom 2. WNT, Warszawa, 2014.
- [8] Perz J. i inni: Przetwornica Wielkiej Częstotliwości. Opracowanie nr OG/892/RE-162/2013: Energetyka Rozproszona – Generacja, Przetwarzanie i Magazynowanie Energii, Gdańsk, 2013, 27–42
- [9] Rothmund D., Ortiz G., Guilloid Th., Kolar J. W.: 10kV SiC-Based Isolated DC-DC Converter for Medium Voltage-Connected Solid-State Transformers. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition – APEC, 2015.
- [10] Undeland T. M., Mohan N., Robbins W. P.: Power Electronics – Converters, Applications, and Design. John Wiley and Sons, Inc., New York, 2003.
- [11] Zdanowski M., Rąbkowski J., Barlik R.: Trójfazowy, Dwupoziomowy Falownik Napięcia z Tranzystorami Z-FET z Węgla Krzemu (SiC). Przegląd Elektrotechniczny, 11/2014, 104–107.
- [12] Zhang H., Tolbert L. M., Han J. H., Chinthavali M., S., Barlow F.: 18 kW Three Phase Inverter System Using Hermetically Sealed SiC Phase-Leg Power Modules. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition – APEC, 2010.

### Mgr inż. Wojciech Matelski

e-mail: wojciech.matelski@iel.gda.pl

Ukończył studia w 2013 roku na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej o specjalności Przetwarzanie i Użytkowanie Energii Elektrycznej. Zatrudniony w Oddziale Gdańskim Instytutu Elektrotechniki. W swojej pracy zajmuje się symulacją obwodów energoelektronicznych oraz problemami napędu elektrycznego i energetyki odnawialnej. Obecnie jest uczestnikiem studiów doktoranckich w Instytucie Elektrotechniki.



### Mgr inż. Leszek Wolski

e-mail: leszek.wolski@iel.gda.pl

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej kierunku Przetwarzanie i Użytkowanie Energii Elektrycznej z 1996 r. Od 1995 r. pracuje w Gdańskim Oddziale Instytutu Elektrotechniki. Zajmuje się projektowaniem i programowaniem układów mikroprocesorowych, technikami komunikacyjnymi, alternatywnymi źródłami energii oraz sterowaniem falownikowych przekształtników energii.



### Dr inż. Stanisław Abramik

e-mail: stanislaw.abramik@iel.gda.pl

Ukończył Wydział Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej w 1997 roku. W 2003 roku obronił pracę doktorską i uzyskał stopień doktora nauk technicznych w zakresie elektrotechniki i Docteur de l'Institut National Polytechnique de Toulouse. Od 2004 pracuje w Oddziale Gdańskim Instytutu Elektrotechniki. Aktualnie zajmuje się energetyką odnawialną, energooszczędnym oświetleniem LED oraz pojazdami elektrycznymi.



otrzymano/received: 13.05.2016

przyjęto do druku/accepted: 01.07.2016