

Szymon Piasecki¹, Jarosław Załęski², Marek Jasiński¹

¹ Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, Politechnika Warszawska, Warszawa

² Zakład Energoelektroniki TWERD Sp. z o.o., Toruń

EKSPERYMENTALNE PORÓWNANIE MODUŁÓW ŁADOWANIA POJAZDÓW ELEKTRYCZNYCH WYKONANYCH W TECHNOLOGII KRZEMOWEJ I WĘGLIKA KRZEMU

EXPERIMENTAL COMPARISON OF EV CHARGING MODULES WITH SILICON AND SILICON CARBIDE POWER TRANSISTORS

Streszczenie: Artykuł przedstawia porównanie sprawności modułów ładowarek o mocy 50 kW, składających się z przekształtników AC/DC i DC/DC. Zaprezentowane moduły zostały opracowane i wdrożone przez firmę Zakład Energoelektroniki Twerd Sp. z o.o. jako moduły szybkiego ładowania pojazdów elektrycznych zapewniające separację galwaniczną między obwodami AC i DC poprzez wysokoczęstotliwościowy transformator. Pierwszy z modułów wykonany jest w tradycyjnej technologii krzemowej (tranzystory IGBT) i topologii umożliwiającej jednokierunkowy przesył energii. Drugi moduł w swojej konstrukcji wykorzystuje tranzystory mocy z węgla krzemu (SiC) i umożliwia dwukierunkowy transfer energii. W artykule przybliżono topologie analizowanych przekształtników oraz zaprezentowano eksperymentalne porównanie sprawności obu modułów współpracujących z baterią pojazdu elektrycznego.

Abstract: The article presents a comparison of the efficiency of 50 kW charger modules, consisting of AC/DC and DC/DC converters. The presented modules were developed and implemented by Zakład Energoelektroniki Twerd Sp. z o.o. as fast charging modules for electric vehicles ensuring galvanic separation between AC and DC circuits through a high-frequency transformer. The first module is made in traditional silicon technology (IGBT transistors) and a topology that enables unidirectional energy transfer. The second module uses silicon carbide (SiC) power transistors in its design and enables bi-directional energy transfer. The article presents the topologies of the analyzed converters and presents an experimental comparison of the efficiency of both modules cooperating with the electric vehicle battery.

Słowa kluczowe: ładowarka EV, szybka ładowarka DC, SiC MOSFET, Si IGBT, wysoka sprawność, dwustopniowy przekształtnik AC-DC

Keywords: EV charger, DC/DC, fast DC charger, SiC MOSFET, Si IGBT, high efficiency, two-stages AC/DC converter

1. Wstęp

Postępujący rozwój środków transportu opartych o napęd elektryczny jest faktem [1-3]. Jedną z barier w rozwoju elektromobilności jest brak infrastruktury ładowania, co stanowi istotną czynnik hamujący upowszechnienie środków transportu ekologicznego i przekonanie użytkowników do pojazdów elektrycznych. Ze względu na krótki czas ładowania optymalnym rozwiązaniem jest szybka ładowarka DC, która umożliwia bezpośrednie ładowanie baterii pojazdu z pominięciem ograniczeń wynikających z mocy ładowarki pokładowej. Ładowarki DC są standardowo zainstalowane w wolnostojących stacjach ładowania, a ich mocy wnoszą od 40 kW do 150 kW [4]. Rozbudowa infrastruktury ładowania pojazdów elektrycznych (EV) ma istotny wpływ na sieć elektroenergetyczną [5]. Ładowarki EV stają się stałym ele-

mentem systemu energetycznego, dlatego coraz większego znaczenia nabiera jakość energii pobieranej z sieci oraz sprawność tych urządzeń. Nie bez znaczenia są również dodatkowe funkcjonalności tych systemów, takie jak kompensacja mocy biernej i wyższych harmonicznych oraz możliwość dwukierunkowego przesyłu energii. Taka praca ładowarki pozwoli na wykorzystanie stacji ładowania w inteligentnej infrastrukturze energetycznej, umożliwiającej wykorzystanie baterii pojazdów jako mobilnego magazynu energii, stabilizującego sieć elektryczną w dużej mierze opartą na źródłach odnawialnych [6-7]. Jest to kluczowa funkcjonalność przyszłych systemów energetycznych z koncepcją wtórnego wykorzystania baterii pojazdów (B2U) [8].

Przetwarzanie energii i dostosowywanie jej do potrzeb parametrów sieci oraz baterii pojazdu jest możliwe dzięki energoelektronice zastosowanej w ładowarkach. Optymalizacja wydajności modułu ładowarki i rozszerzenie jego funkcjonalności o dwukierunkową pracę są kluczem do rozwoju inteligentnej infrastruktury energetycznej [9]. Dobór odpowiedniej topologii przekształtnika i optymalizacja jego parametrów pracy oraz zastosowanych podzespołów to główne czynniki wpływające na właściwości ładowarki. W artykule przedstawiono badania dotyczące zespołów przekształtników AC/DC/DC o mocy 50 kW, zaprojektowanych jako moduły ładowania pojazdów elektrycznych. Pojedynczy moduł, składający się z przetwornic AC/DC i DC/DC, może być wykonany w różnych technologiach, w zależności od realizowanej funkcjonalności. W artykule porównano ładowarkę jednokierunkową AC/DC/DC wykonaną w tradycyjnej technologii krzemowej z tranzystorami IGBT oraz ładowarkę dwukierunkową AC/DC/DC wykonaną w technologii węglkowo-krzemowej (SiC) z tranzystorami MOSFET.

2. Moduł ładowania EVC1000

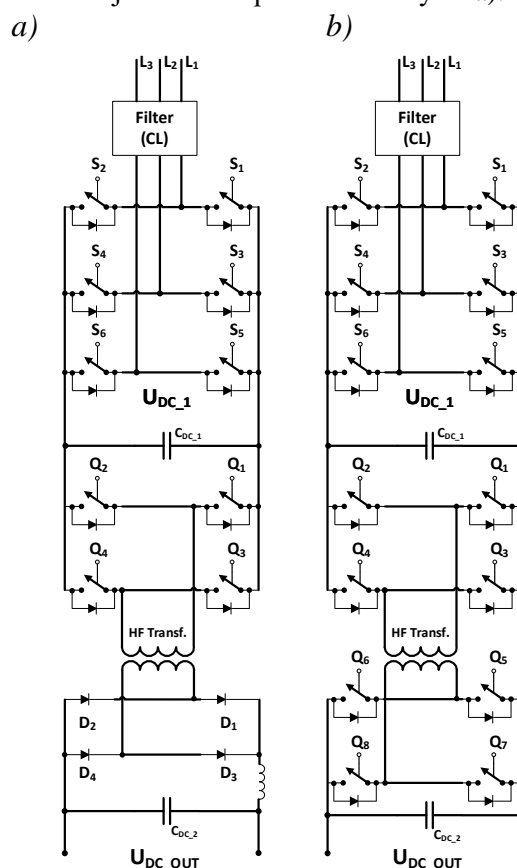
Analizowanym układem jest moduł ładowarki EVC1000 DC o mocy 50 kW, przeznaczony do montażu w stacjach ładowania pojazdów elektrycznych, widok modułu zainstalowanego w stacji ładowania przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Moduł ładowania EVC1000 zainstalowany w stacji ładowania EV

Ładowarka składa się w głównej części z przetwornicy AC/DC wyposażonej w filtr LC oraz przetwornicy DC/DC zapewniającej regulację napięcia baterii oraz separację galwaniczną pomiędzy stronami AC i DC realizowaną poprzez transformator wysokiej częstotliwości. Moduł ładowarki EVC1000 może być wykonany w dwóch wersjach, w zależności od oczekiwanych funkcjonalności, zapewniając jednokierunkowy lub dwukierunkowy przepływ energii między siecią a baterią pojazdu.

Ładowarka jednokierunkowa składa się z dwupoziomowego przekształtnika AC/DC z filtrem LC oraz przetwornicy DC/DC. Przekształtnik DC/DC to pojedynczy mostek aktywnym z prostownikiem diodowym wykonanym (*ang. Single Active Bridge, SAB*) wykonany w technologii krzemowej z wykorzystaniem modułów IGBT firmy Fuji, schemat blokowy jednokierunkowej ładowarki pokazano na rys. 2a).



Rys. 2. Schemat blokowy ładowarki: a) jednokierunkowej; b) dwukierunkowej

Ładowarka dwukierunkowa również składa się z dwupoziomowego, aktywnego przekształtnika AC/DC z filtrem LC jako stopnia wejściowego oraz przetwornicy DC/DC. Jednak w tym przypadku przekształtnik DC/DC to podwójny mo-

stek aktywny (ang. *Dual Active Bridge, DAB*), a oba układy wykorzystują moduły mocy MOSFET wykonane z węgla krzemu produkcji firmy Infineon. Schemat topologii ładowarki dwukierunkowej pokazano na rys. 2b).

Tab. 1. Parametry techniczne przekształtnika AC/DC zastosowanego w ładowarce jednokierunkowej i dwukierunkowej

Typ ładow.	Jednokierunkowa	Dwukierunkowa
Tech. tranz. mocy	krzemowa (Si)	węglkowo-krzemowa (SiC)
Topologia	dwupoziomowy przekształtnik AC/DC	dwupoziomowy przekształtnik AC/DC
Mod. tranz.	Fuji 2MBI300VN-120	Infineon FF11MR12W1M1 B11BOMA1
Prąd znam. AC	78 A	78 A
Napięcie znam. AC	3x 400V	3x 400V
Filtr sieciowy	LC	LC
Częstotliwość łączeń	8 kHz	12 kHz
Prąd znam. DC	80 A	80 A
Napięcie znam. DC	670 V	670 V

Tab. 2. Parametry techniczne przekształtnika DC/DC zastosowanego w ładowarce jednokierunkowej i dwukierunkowej

Typ Ładow.	jednokierunkowa	dwukierunkowa
Tech. tranz. mocy	krzemowa (Si)	węglkowo-krzemowa (SiC)
Topologia	pojedynczy mostek aktywny (SAB)	podwójny mostek aktywny (DAB)
Mod. tranzystorowe	Fuji 2MBI450VN-120	Infineon FF8MR12W2M1B 11BOMA1
Prąd znam. - wejściowy	0 .. 80 A	0 .. 80 A
Nap. znam. - wejściowe	670 V	670 V
Cz. łączeń	12 kHz	20 kHz
Prąd znam. - wyjściowy	0 .. 125 A	0 .. 125 A
Nap. znam. - wyjściowe	50 .. 500 V	50 .. 500 V

Parametry przekształtników AC/DC dla obu analizowanych wersji przetworników zestawiono w tabeli 1, natomiast parametry przekształtników DC/DC w tabeli 2.

Obie ładowarki wykonane są w tej samej obudowie (widocznej na rys. 1), a ich głównym obszarem zastosowania są stacje ładowania pojazdów elektrycznych, w tym stacje V2G oraz systemy z magazynowaniem energii.

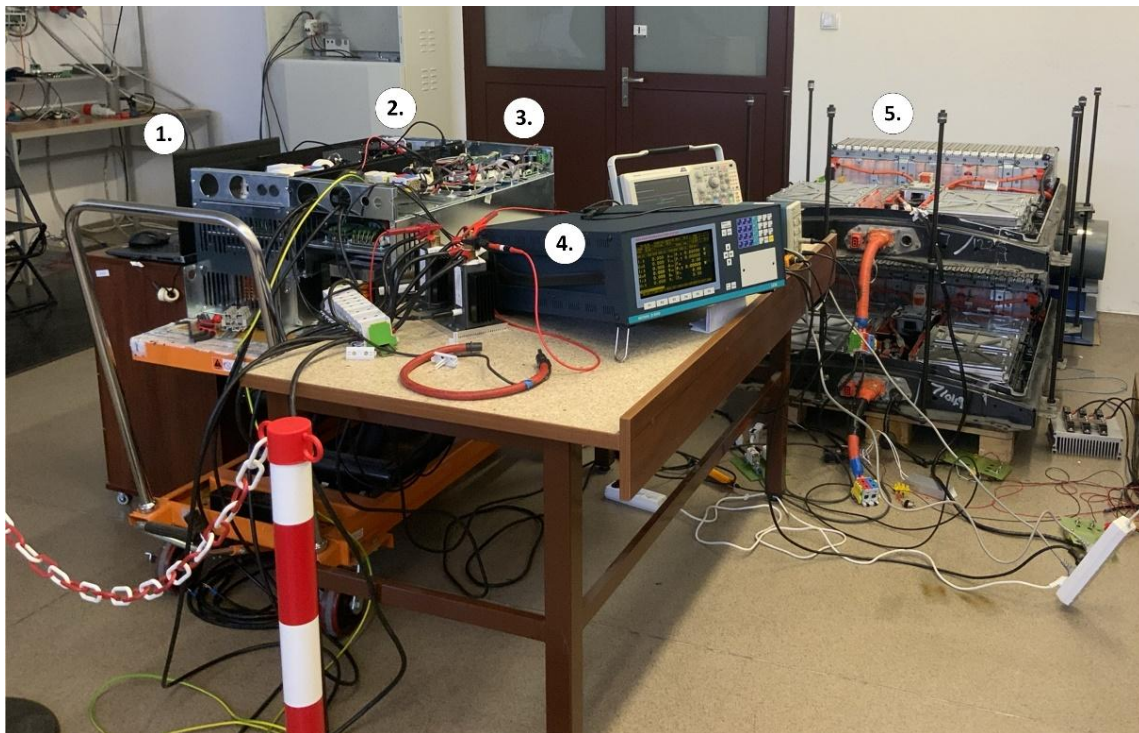
3. Stanowisko eksperymentalne

Na potrzeby rozwoju produktu i analizy właściwości ładowarki stworzono dedykowane stanowisko doświadczalne wyposażone w magazyn energii, układ pomiarowy, układ sterowania oraz analizator mocy. Widok stanowiska przedstawiono na rys. 3. Umożliwia ono badanie zarówno stanów dynamicznych, jak i uzyskanie charakterystyk statycznych, zarejestrowanych podczas długotrwałej pracy systemu. Do rejestracji stanów dynamicznych oraz przebiegów prądów i napięć po stronie sieci, jak i baterii zastosowano oscyloskop z izolowanymi sondami pomiarowymi. Do modelowania pracy ładowarki w rzeczywistych warunkach wykorzystano magazyn energii, zbudowany z baterii litowo-jonowych zdemontowanych z pojazdów elektrycznych (Nissan Leaf I).

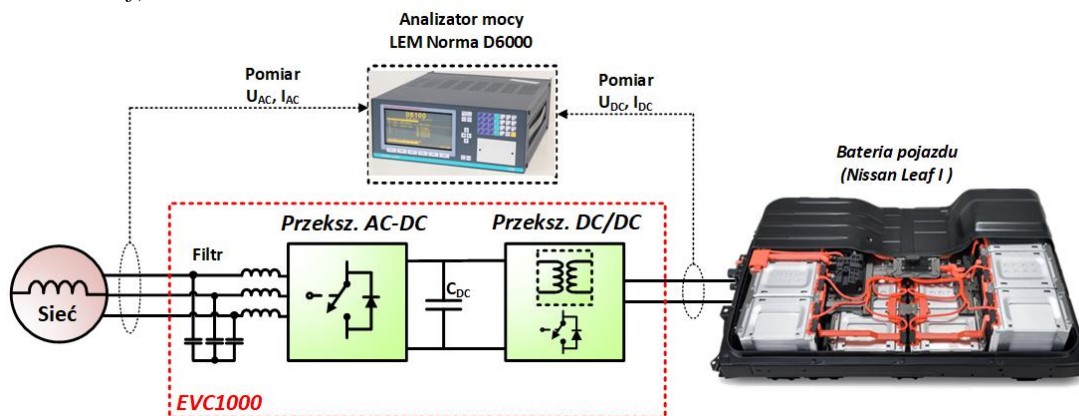
Celem prowadzonych prac badawczych był dokładny pomiar sprawności modułów ładowarek i porównanie właściwości dwóch technologii tranzystorów mocy w produkcie o zbliżonej konstrukcji i przeznaczeniu. Aby uzyskać wiarygodne pomiary całkowita sprawność ładowarki (obejmująca przetwornice AC/DC i DC/DC) została zmierzona w konfiguracji jak przedstawiono na rys. 4 i zdefiniowana jako stosunek mocy wyjściowej do mocy wejściowej: $\eta = (P_{OUT}/P_{IN}) * 100\%$.

W celu stworzenia charakterystyk sprawności ładowarek wykonano pomiary analizatorem mocy dla różnych prądów ładowania (i rozładowywania) akumulatorów.

Charakterystykę sprawności ładowarki jednokierunkowej uzyskano dla trybu ładowania, natomiast dla ładowarki dwukierunkowej zarejestrowano punkty pomiarowe zarówno dla trybu ładowania, jak i rozładowania. Ze względu na rodzaj zastosowanego akumulatora badania przeprowadzono w zakresie napięcia akumulatora 360-410 V.



Rys. 3. Widok stanowiska eksperymentalnego stworzonego na potrzeby prac badawczych: 1. - platforma sterująca; 2. - ładowarka jednokierunkowa EVC1000 wykonana w technologii IGBT; 3. - dwukierunkowa ładowarka EVC1000 wykonana w technologii SiC; 4. - analizator sieci LEM NORMA D6000; 5. - magazyn energii z baterii pojazdów elektrycznych (Nissan Leaf)



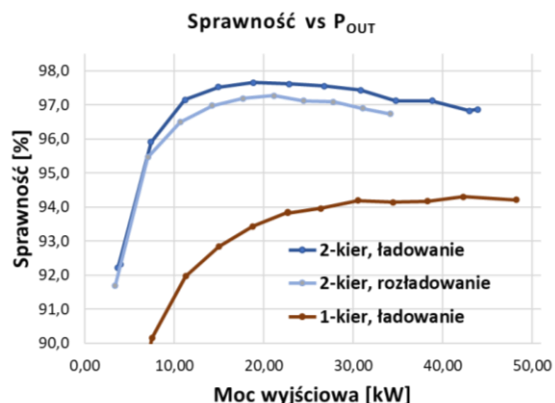
Rys. 4. Konfiguracja analizatora mocy na potrzeby pomiaru sprawności analizowanych ładowarek

Uzyskaną sprawność w funkcji mocy wyjściowej przedstawiono na rys. 5, natomiast straty mocy w funkcji zmierzonej mocy wyjściowej na rys. 6. Jak widać sprawność dwukierunkowej ładowarki wykorzystującej tranzystory mocy SiC jest prawie o 3% wyższa niż w przypadku tradycyjnego rozwiązania opartego na modułach krzemowych IGBT. Jak zilustrowano na rys. 6, zastosowane rozwiązanie pozwala zredukować straty mocy o ponad 1 kW.

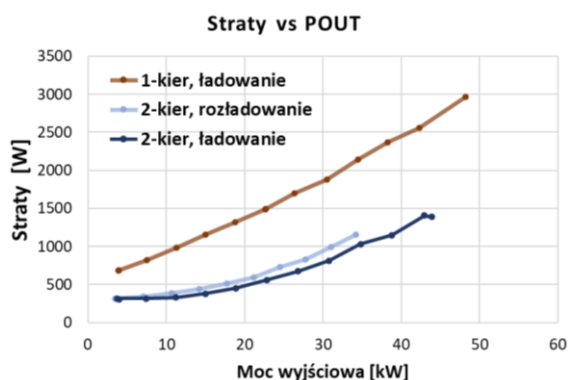
4. Podsumowanie i wnioski

Uzyskane wyniki obrazują poprawną pracę obu analizowanych modułów ładowania oraz zapewnienie podstawowej, wymaganej funkcjonalności, jaką jest ładowanie akumulatora pojazdu elektrycznego mocą do 50 kW. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów widoczna jest jednak znacząca przewaga modułu ładowania dwukierunkowego, wykorzystującego tranzystory mo-

cy z węgla krzemu – zarówno pod względem wydajności, jak i funkcjonalności.



Rys. 5. Sprawność w funkcji mocy wyjściowej (P_{OUT}) analizowanych ładowarek dla różnych trybów pracy, od góry: sprawności ładowarki dwukierunkowej z tranzystorami mocy SiC w trybie ładowania (kolor ciemnoniebieski); sprawności dwukierunkowej ładowarki z tranzystorami mocy SiC w trybie rozładowywania (kolor jasnoniebieski); sprawności jednokierunkowej ładowarki z tranzystorami mocy IGBT w trybie ładowania (kolor brązowy). Zakres napięcia akumulatora 360-410 V



Rys. 6. Straty mocy w funkcji mocy wyjściowej (P_{OUT}) analizowanych ładowarek dla różnych trybów pracy, od góry: straty mocy jednokierunkowej ładowarki z tranzystorami mocy IGBT w trybie ładowania (kolor brązowy); straty mocy ładowarki dwukierunkowej z tranzystorami mocy SiC w trybie rozładowywania (kolor jasnoniebieski); straty mocy ładowarki dwukierunkowej z tranzystorami mocy SiC w trybie ładowania (kolor ciemnoniebieski). Zakres napięcia akumulatora 360-410 V

Zwiększenie sprawności o 1 kW pozwala na obniżenie kosztów użytkowania stacji, obrazowo można przyjąć, że dla ładowarki z tranzystorami SiC co 30 cykl ładowania pojazdu elektrycznego jest bezpłatny. Jed-

nak w celu uzyskania pełnej informacji o analizowanych modułach należałoby rozszerzyć badania sprawności o pełen zakres napięcia wyjściowego deklarowany przez producenta, wynoszący 50 - 500 V DC. Ze względu na rodzaj zastosowanej baterii i jej parametry pracy niemożliwe było przeprowadzenie takich badań, jednak autorzy planują ich rozbudowę w przyszłości. Dodatkowo niewątpliwą zaletą zastosowania tranzystorów SiC jest redukcja hałasu dzięki zwiększonej częstotliwości przełączania. Ponadto zastosowana topologia umożliwia pracę dwukierunkową. Cecha ta daje możliwość integracji z przyszłym systemem energetycznym, w którym powszechne będzie stosowanie standardu V2G. W opinii autorów cecha ta niewątpliwie decyduje o przewadze dwukierunkowego modułu ładowania nad modułem jednokierunkowym. Koszt ładowarki dwukierunkowej w sprzedaży bezpośredniej jest o około 250 Euro wyższy niż jednokierunkowej, ze względu na wyższą cenę tranzystorów SiC, jednak szereg zalet tej ładowarki rekompensuje tę różnicę. Jednakże, jeśli potrzebne jest ekonomiczne i sprawdzone rozwiązanie, topologia oparta na technologii Si i jednokierunkowy przepływ mocy jest nadal zadowalającą alternatywą, ponieważ zapewnia sinusoidalny prąd w punkcie przyłączenia oraz dobrą dynamikę i wysoką moc procesu ładowania. W opinii autorów funkcjonalność jednokierunkowej ładowarki zostanie zastąpiona wysokosprawną topologią dwukierunkową jeśli sytuacja budżetowa i rynkowa będą bardziej dojrzałe. Kolejnym istotnym czynnikiem jest rozwój w segmencie infrastruktury ładowania pojazdów elektrycznych i budowa inteligentnych systemów energetycznych.

7. Literatura

- [1]. Ministerstwo Energii "Plan Rozwoju Elektromobilności w Polsce - Energia do przyszłości", 2018.
- [2]. V. Henze "BloombergNEF's annual battery price survey finds" raport Bloomberg, dostępny pod adresem: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack->

prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/

[3]. T. Möller, A. Padhi, D. Pinner, A. Tschiesner "The future of mobility is at our doorstep", *raport McKinsey*, dostępny pod adresem: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-future-of-mobility-is-at-our-doorstep>

[4]. D. Dobrzański "Przegląd i charakterystyka standardów złączy szybkiego ładowania pojazdów EV", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 3/2017, str. 91 -96, 2017.

[5]. C. Leone, M. Longo, "Modular Approach to Ultra-fast Charging Stations", *J. Electr. Eng. Technol.* (2021). <https://doi.org/10.1007/s42835-021-00757-x>.

[6]. K. Fotyga, B. Mroczek, „Charakterystyki pracy dwukierunkowej przetwornicy DC/DC do pojazdów elektrycznych i architektura jej komunikacji w systemie operatora sieci elektroenergetycznej” , *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 3/2017 (115), str. 83 -89, 2017.

[7]. H. Tu, H. Feng, S. Srdic and S. Lukic, "Extreme Fast Charging of Electric Vehicles: A Technology Overview," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 5, no. 4, pp. 861-878, Dec. 2019, doi: 10.1109/TTE.2019.2958709.

[8]. R. Reinhardt, S. Gassó Domingo, B. Amante García, I. Christodoulou, "Macro environmental analysis of the electric vehicle battery second use market" *2017 14th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, DOI: 10.1109/EEM.2017.7982031

[9]. Y. Fang, S. Cao, Y. Xie; P. Wheeler "Study on bidirectional-charger for electric vehicle applied to power dispatching in smart grid", *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*, DOI: 10.1109/IPEMC.2016.7512726

Autorzy

Szymon Piasecki – adiunkt w Instytucie Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej. Obszary działalności naukowej obejmują zagadnienia związane z przekształtnikami sieciowymi, głównie dla elektromobilności i OZE.

Jarosław Załęski - Od 1995 roku kierownik działu badawczo-rozwojowego w Zakładzie Energoelektroniki TWERD, w którym od 2012 roku zajmuje stanowisko Dyrektora Technicz-

nego. Od 2009 jest odpowiedzialny za koordynowanie i wdrożenie przemienników częstotliwości z funkcją zwrotu energii do sieci dla układów napędowych i OZE. Jest autorem 5 rozwiązań podlegających krajowym i międzynarodowym zgłoszeniom patentowym.

Marek Jasiński - Dr inż. Marek Jasiński, prof. PW ukończył studia magisterskie i doktoranckie na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Obecnie jego badania koncentrują się na sterowaniu przekształtnikami energoelektronicznymi przy odkształconym napięciu sieci i podwyższonej impedancji linii elektroenergetycznych oraz na optymalizacji topologii przekształtników i ich sterowania w różnych typach elektrowni pozyskujących energię z rozproszonych źródeł odnawialnych. Brał udział w ponad 20 projektach badawczych, rozwojowych i przemysłowych (w tym pięciu jako lider projektu). W tych projektach współpracował z przemysłem m.in. z TWERD Zakład Energoelektroniki, TRUMPF Huettinger, ABB, PSE.

Informacje dodatkowe

Praca finansowana w ramach VII projektu polsko-tajwańskiego, *POLTAJ VII, Path 1*, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz projektu „*Typoszereg stacji szybkiego ładowania pojazdów elektrycznych prądem stałym DC o mocach 50-200kW*” finansowanego przez Kujawsko-Pomorską Agencję Innowacji w ramach projektu „Fundusz Badań i Wdrożeń”.