

Badania wysokosprawnego dwukierunkowego izolowanego sprzęgu AC/DC o szerokim zakresie regulacji napięcia stałego

Streszczenie. W artykule zaprezentowano wybrane wyniki badań opracowanego dwukierunkowego sprzęgu pomiędzy niskonapięciową siecią trójfazową prądu przemiennego, a obwodem napięcia stałego o regulowanej wartości w szerokim zakresie. Przedstawiono przegląd możliwych podobnych rozwiązań z literatury w kontekście opracowanego układu, a następnie omówiono właściwości elektryczne sprzęgu o znamionowej mocy 25 kW na podstawie wyników badań eksperymentalnych. Przekształtnik jest przystosowany do pracy równoległej (zwiększenie mocy) i charakteryzuje się przemysłowymi standardami wykonania, przez co może być wykorzystany w aplikacjach OZE i elektromobilności.

Abstract. The article presents selected results of research on the developed bidirectional coupling between a low-voltage three-phase AC grid and a DC voltage circuit with galvanic isolation and the DC voltage value adjustable in a wide range. A review of possible similar solutions from the literature in the context of the developed system is presented, and then the electrical properties of the coupler with a nominal power of 25 kW are discussed, based on the results from the experimental research. The converter is suitable for parallel operation (power multiplication) and is characterized by industrial standards, which can be used in renewable energy and electromobility applications. (Research on a high-efficiency bi-directional isolated AC/DC coupler with a wide range of DC voltage regulation).

Słowa kluczowe: dwukierunkowy przekształtnik sieciowy, podwójny mostek aktywny, badania eksperymentalne, odnawialne źródła energii, magazynowanie energii, elektromobilność, izolowany przekształtnik DC/DC.

Keywords: Active Front End converter, Dual Active Bridge, experimental research, renewable energy sources, energy storage, electromobility, isolated DC/DC converter.

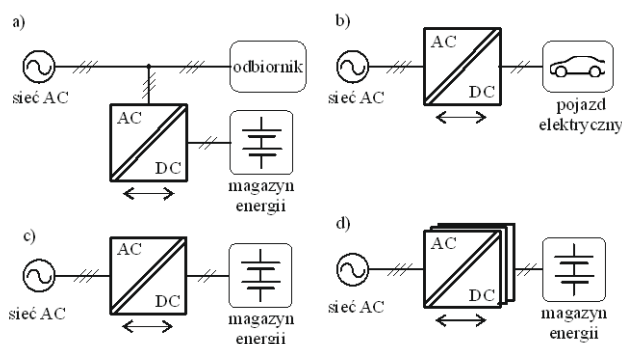
Wstęp

Transformacja energetyczna zmierzająca do zastąpienia paliw kopalnych źródłami „zeroemisyjnymi” wymaga zastosowania energoelektronicznych systemów przekształcania energii. Wiąże się to z koniecznością znacznego zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) względem innych stabilnych i uznawanych za „zielone” źródeł, takich jak energetyka jądrowa [1]. Duży udział OZE oznacza konieczność integracji licznych, rozproszonych jednostek wytwarzania oraz bilansowania wysokiej dynamiki tych źródeł, ze względu na ich niestabilność i zależność od warunków pogodowych oraz pory dnia i roku [2]. W takim przypadku konieczne jest stosowanie systemów magazynowanie energii, które muszą być dołączane do sieci AC poprzez dwukierunkowe przekształtniki energoelektroniczne o odpowiednich parametrach napięciowych i prądowych [3]. Podobnie jest w przypadku aplikacji dotyczących elektryfikacji transportu, gdzie niezbędne są wydajne systemy ładowania mobilnych magazynów energii. Udział przekształtników energoelektronicznych jest także niezbędny w koncepcji inteligentnych mikrosieci prądu przemiennego [4] czy też coraz bardziej powszechnych mikrosieci prądu stałego [5].

Analizując powyższe przemysłowe zastosowania układów energoelektronicznych, zobrazowane na Rys. 1, można określić najważniejszy zakres funkcjonalności, którym powinny się cechować urządzenia. Są to m.in.:

- możliwość współpracy z siecią AC i DC,
- dwukierunkowy, regulowany przepływ energii,
- regulacja współczynnika mocy,
- regulacja napięcia stałego w szerokim zakresie,
- wysoka sprawność energetyczna,
- nieskomplikowana topologia = niezawodność,
- szeroki zakres przesyłanej mocy,
- izolacja galwaniczna obwodów.

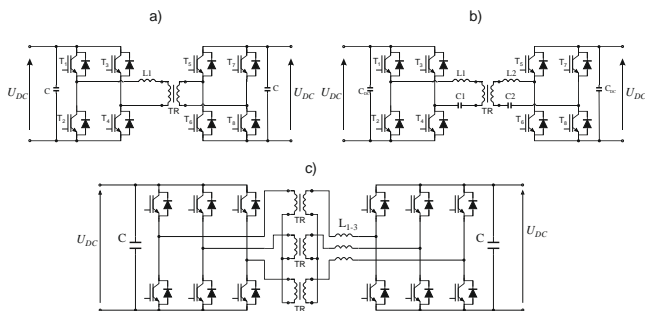
W artykule zaprezentowane zostanie rozwiązanie, które spełnia powyższe wymagania. Przegląd rozwiązań literaturowych pozwolił szerzej spojrzeć na potencjalne rozwiązania konkurencyjne. W kolejnych rozdziałach zaprezentowane zostaną wyniki badań potwierdzające funkcjonalność i kluczowe parametry elektryczne.



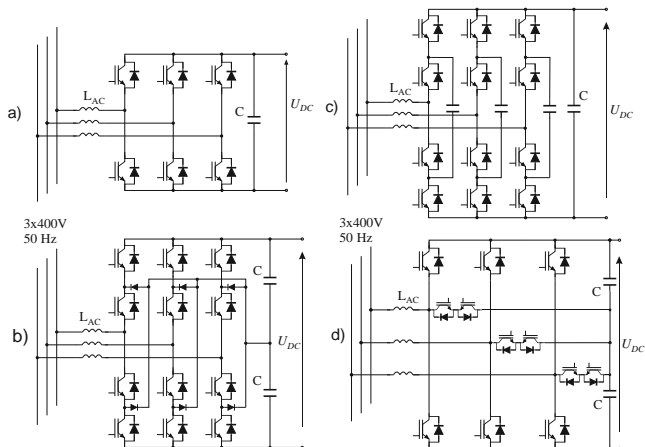
Rys. 1. Ilustracja zastosowań dwukierunkowego sprzęgu energoelektronicznego o szerokim zakresie napięcia stałego: a) odbiornik z magazynem energii; b) pojazd elektryczny; c) magazyn energii z pojedynczym sprzęgiem; d) magazyn ze sprzęgiem o zwiększonej mocy.

Przegląd rozwiązań

W literaturze opisanych jest wiele topologii przekształtników DC/DC. Wybór odpowiedniej związany jest z konkretnym zastosowaniem. W [6] opisano topologie, które znajdują zastosowanie w fotowoltaice, podczas gdy w [7][8] omówiono rozwiązania odpowiednie do zastosowania w pojazdach elektrycznych. Przekształtniki przeznaczone do uzdatniania energii z magazynów energii opisane są w [9]. Jedną z uniwersalnych topologii jest podwójny mostek aktywny (ang. Dual Active Bridge - DAB), pokazany na Rys. 2a. Dwukierunkowy przepływ mocy, izolacja galwaniczna, a także intuicyjne sterowania to jego największe zalety [10][11]. Innym sposobem zmniejszenia strat mocy poprzez redukcję prądu AC oraz strat łączeniowych [12] jest zastosowanie DAB z obwodem rezonansowym (CLLLC) (Rys. 2b) [13]. Wadą takiego rozwiązania jest zwiększenie stopnia skomplikowania, a także trudność w doborze parametrów do pracy układu w szerokim zakresie napięć. W zastosowaniach o zwiększonej mocy proponowana jest także trójfazowa topologia podwójnego mostka aktywnego [14][15] (Rys. 2c).



Rys. 2. Topologie izolowanych przekształtników DC/DC: a) DAB; b) CLLLC; c) trójfazowy DAB



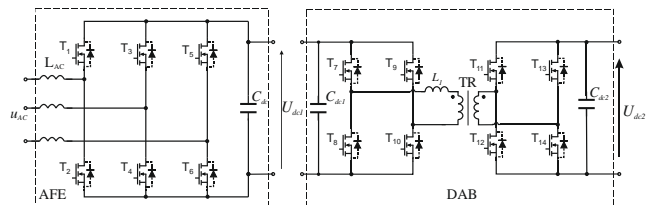
Rys. 3. Topologie dwukierunkowych przekształtników sieciowych: a) dwupoziomowy AFE, b) NPC, c) FCC, d) typu T.

Topologia dwupoziomowa AFE (z ang. Active Front-End) charakteryzuje się prostotą sterowania oraz wysoką niezawodnością, która wynika z niskiej liczby wymaganych komponentów aktywnych. To rozwiązanie wymaga jednak zastosowania łączników o relatywnie wysokich wartościach napięć znamionowych. Możliwe jest alternatywne zastosowanie topologii wielopoziomowych [16], takich jak NPC (z ang. Neutral Point Clamped), przekształtnik typu T (z ang. T-type) [17][18], czy też FCC (z ang. Flying Capacitor Converter) [19], gdzie odpowiednie są niższe klasy napięciowe łączników. Wiąże się to jednak ze znacznym zwiększeniem stopnia skomplikowania obwodu, co widać na Rys. 3.

Opis proponowanego rozwiązania

Prezentowany układ jest odpowiedzią na oczekiwania przemysłu, a zatem łączy w sobie jednocześnie sprawdzone i niezawodne topologie przekształtników, które zapewniają bardzo dobre parametry oraz korzystny stosunek jakości do rachunku ekonomicznego. Dotyczy to zarówno topologii wybranej jako sprzęg z siecią (AFE), jak i przekształtnika prądu stałego do oddziaływania z magazynami energii.

Przekształtnik DC/DC (Rys. 4.) został zaprojektowany w topologii klasycznego podwójnego mostka aktywnego (DAB). Zadaniem przekształtnika DC/DC jest zapewnienie stabilnego napięcia szyny DC (U_{dc1}), przy jednoczesnej możliwości zmiany napięcia U_{dc2} strony wtórnej w szerokim zakresie. Dopuszczalny zakres wartości tego napięcia umożliwia pracę układu z różnymi typami magazynów energii (np. litowo-jonowy, kwasowo-ołowiowy oraz superkondensatorowy) (Tabela 1).



Rys. 4. Schemat obwodowy izolowanego sprzęgu AC/DC o szerokim zakresie dopuszczalnego napięcia U_{dc2} .

W celu minimalizacji prądu cyrkulującego przy pracy z dużym rozstrojeniem napięciowym zastosowana została modulacja EPS (z ang. Extended Phase-Shift) [20].

Sterowanie przekształtnikiem zostało zrealizowane przy pomocy układu programowalnego XC7A35T FPGA z rodziny Xilinx Artix-7.

Tabela 1. Parametry projektowe przekształtnika DC/DC.

Parametr	Opis	Wartość
Napięcie szyny DC	U_{dc1}	740–780 V
Napięcie DC strony pierwotnej	U_{dc2}	150–575 V
Przekładnia transformatora	n	8 : 5
Moc znamionowa DC	P_{dc}	25 kW
Częstotliwość łączeń modułu DC/DC	$f_{s,DAB}$	50 kHz
Sprawność energetyczna	η	> 98%

Dwukierunkowy przekształtnik AC/DC zaprojektowany został w topologii dwupoziomowej trójgałęzowej (Rys. 4), zgodnie ze specyfikacją przedstawioną w Tabeli 2.

Zadaniem przekształtnika AC/DC jest kontrolowanie wartości i kierunku przepływu mocy przy nastawianym współczynniku mocy.

W algorytmie zastosowano moduł synchronizacji z siecią oparty o podwójny integrator drugiego rzędu (DSOGI-PLL). Kąty przez niego wygenerowane pozwalają na niezależną regulację mocy czynnej i biernej. W celu uzyskania odporności na zaburzenia zastosowano regulatory prądu proporcjonalno-multirezonansowe [21].

Algorytm sterowania przekształtnika AFE zaimplementowany został przy użyciu hybrydowego sterownika składającego się z procesora TMS320F28377D oraz układu programowalnego FPGA Lattice LFE5U-12F.

Tabela 2. Parametry projektowe przekształtnika uAFE / AFE.

Parametr	Opis	Wartość
Napięcie AC	U_{ac}	3x400 V
Częstotliwość sieci	f_{ac}	50 Hz
Napięcie DC	U_{dc1}	740–780 V
Moc znamionowa AC	S_{ac}	12.5 kVA / 25 kVA
Częstotliwość łączeń	$f_{s,AFE}$	40 kHz
Sprawność energetyczna	η	> 98%

Przekształtniki zostały wyposażone w dwa interfejsy komunikacyjne. Pierwszy z nich, RS-485, wykorzystywany jest do komunikacyjny z nadrzędną jednostką kontrolującą, podczas gdy drugi, światłowodowy, umożliwia synchronizację równoległe pracujących modułów w przyszłych badaniach.

Wybrane wyniki badań eksperymentalnych

Badania dwóch przekształtników uAFE w połączeniu z przekształtnikiem DAB zostały przeprowadzone zgodnie ze schematem połączeń pokazanym na Rys. 5. Komponenty zaznaczone przerywaną linią były w badaniach zmiennymi – w jednych konfiguracjach były podłączane, a w innych nie. Zestawienie pięciu zbadanych konfiguracji przedstawiono w Tabeli 3.

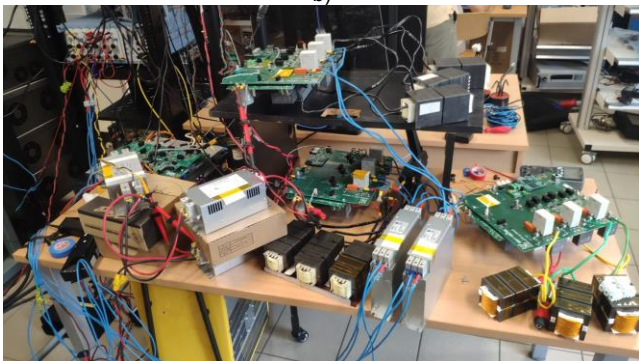
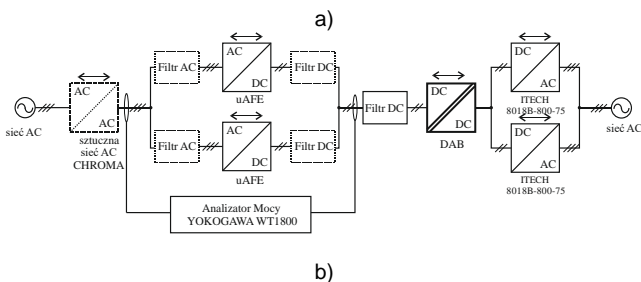
Tabela 3. Konfiguracje badań 2 x uAFE + DAB.

Numer konfiguracji	Filtr AC AFE	Filtr DC AFE	Źródło AC
1	tak	-	Chroma
2	-	-	Chroma
3	-	tak	Chroma
4	tak	tak	Chroma
5	tak	tak	Sieć

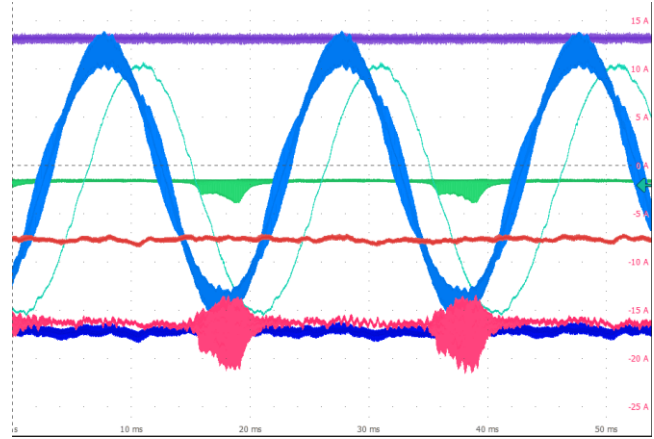
Przykładowe przebiegi prądów i napięć z przeprowadzonych badań przedstawione są na Rys. 6, natomiast przykładowe wyniki pomiarów analizatorem mocy są pokazane na Rys. 7. Zarówno przebiegi na oscyloskopie jak i pomiary analizatorem mocy były poddane działaniu dodatkowych, niskoczęstotliwościowych składowych wynikających z braku synchronizacji między sygnałami sterującymi poszczególnych przekształtników.

Podsumowane wyniki dla przepływu mocy w obydwu kierunkach przedstawiono na Rys. 8. Wskazują one, że stosowanie filtrów common mode (CM) w celu eliminacji strat wynikających z prądów błądzących DC oraz prądów CM AC nie daje znaczących rezultatów. W konfiguracji nr 2, gdzie żaden filtr nie jest użyty, sprawność jest prawie tak samo wysoka jak w konfiguracji nr 3, gdzie dodany jest filtr DC. Ten pozorny brak wpływu filtrów CM wynika z dwóch nakładających się, przeciwnych efektów: niepożądane prądy są tłumione przez filtry, co prowadzi do obniżenia strat w dławikach i tranzystorach AFE, a jednocześnie do bilansu mocy dochodzą straty w samych filtrach CM, co prowadzi do obniżenia sprawności. Niemniej, głównym zadaniem filtrów CM jest eliminacja wyższych harmonicznych, co powinno prowadzić do poprawienia kompatybilności elektromagnetycznej urządzenia i tę właśnie kwestię autorzy pogłębią w przyszłych badaniach przedstawionych prototypów.

Przesunięcie między prądem (niebieski) i napięciem (turkusowy) wynika z faktu, że sondy pomiarowe były zamontowane bezpośrednio na uAFE (pomiędzy przekształtnikiem a filtrem CM). Aby uzyskać zerową wartość mocy biernej oddawanej do sieci, należało wprowadzić przesunięcie fazowe, którego wartość wynika z pojemności kondensatorów filtrów CM.



Rys. 5. Stanowisko pomiarowe 2 x uAFE + DAB: a) schemat blokowy; b) fotografia. Po lewej stronie widoczny jest DAB, a po prawej trzy prototypy uAFE, z czego aktywnie używane są dwa. W dolnej części fotografii znajdują się filtry EMI, DC oraz AC.

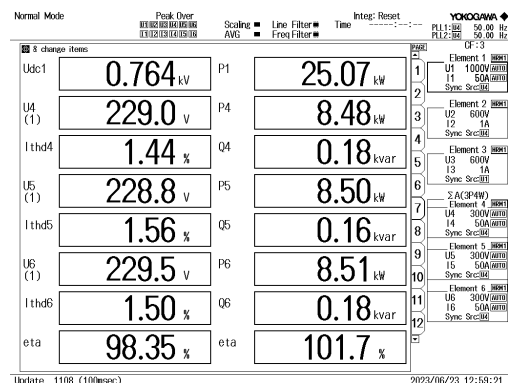


Rys. 6. Przykładowe przebiegi w konfiguracji nr 5: składowa AC napięcia na DC-linku po stronie wysokiego napięcia DAB (granatowy; 10 V/dz.), składowa AC napięcia na DC-linku uAFE (pomarańczowy; 10 V/dz.), prąd AC jednej fazy sieci (turkusowy; 10 A/dz.), prąd AC jednego z dławików fazowych uAFE (niebieski; 10 A/dz.), prąd CM na wejściu niskiego napięcia DAB (fioletowy; 5 A/dz.), prąd CM na wejściu AC uAFE (zielony; 10 A/dz.), prąd DC-linku uAFE (różowy, 5 A/dz.).

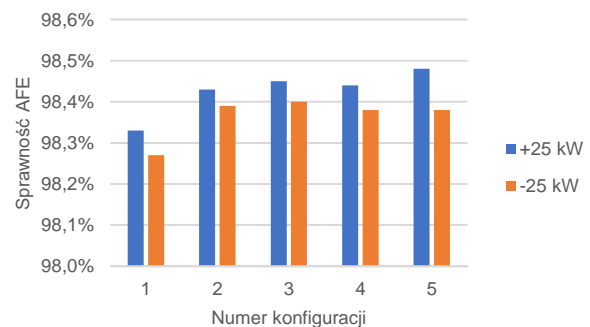
Różnica w sprawności między wynikiem dla konfiguracji nr 5 na Rys. 7 i Rys. 8 wynika z faktu, że zrzut ekranu zawiera chwilową wartość sprawności energetycznej, natomiast wyniki z wykresu kolumnowego uwzględniają uśrednienie przebiegów sprawności, zastosowane w celu usunięcia składowej niskoczęstotliwościowej wynikającej z prądów cyrkulujących.

Przeprowadzono również badania przy połączeniu pełnowymiarowego prototypu AFE (25 kW) w sprzęgu z przekształtnikiem DAB (Rys. 9).

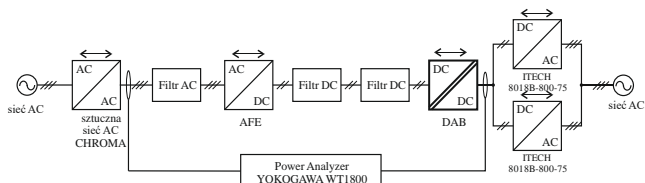
Eksperymenty zostały zrealizowane w celu weryfikacji pełnego zakresu mocowo-napięciowego badanego sprzęgu AC/DC/DC (Rys. 10).



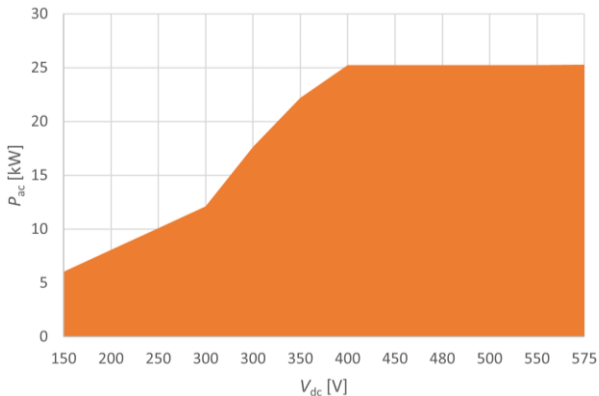
Rys. 7. Przykładowe pomiary 2 x uAFE analizatorem mocy w konfiguracji nr 5 połączenia 2 x uAFE + DAB.



Rys. 8. Pomiary sprawności 2 x uAFE analizatorem mocy w konfiguracjach nr 1–5 połączenia 2 x uAFE + DAB.



Rys. 9. Schemat blokowy stanowiska do badania sprzęgu AC/DC o szerokim zakresie regulacji napięcia DC.



Rys. 10. Osiągalny zakres operacyjny dwukierunkowego przekształtnika AFE + DAB z uwzględnieniem mocy po stronie AC i napięcia wejściowego po stronie DC.

Granice obszaru poprawnej pracy definiowane są przede wszystkim przez uwarunkowania termiczne a także magnetyczne. Przy niskich wartościach napięcia wejściowego uzyskanie mocy znamionowej wiązało się z znacznie zwiększonymi wartościami RMS i szczytowymi prądów. To prowadziłoby zarówno do zwiększenia strat przewodzenia, jak i do nasycania się komponentów magnetycznych, które były projektowane pod określone wartości prądów szczytowych.

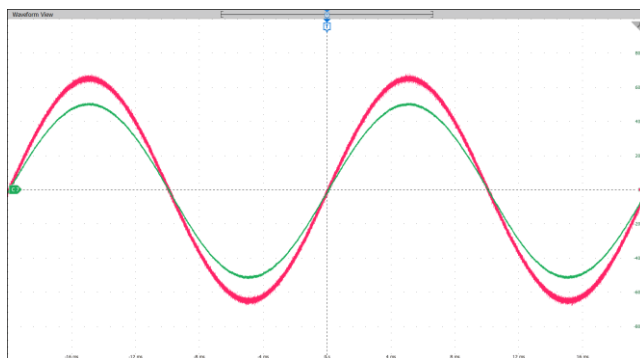
Podstawowe przebiegi niskoczęstotliwościowe zostały przedstawione na Rys. 11. W porównaniu z napięciem i prądem z Rys. 6 widać, że jakość przebiegów jest znacznie lepsza. Brak zakłóceń niskoczęstotliwościowych wynika z faktu, że zastosowano symulator sieci, który generował sinusoidalne napięcie. Z kolei brak zakłóceń wysokoczęstotliwościowych wynika z faktu, że w konfiguracji pojedynczego AFE nie występują prądy CM AC. Natomiast brak przesunięcia w fazie na Rys. 11 jest rezultatem tego, że sondy pomiarowe były umieszczone przed filtrem EMI AC, gdzie moc bierna była sprowadzona do zera.

Pomiary w skali czasowej okresu przełączania przekształtnika DAB zawarte są na Rys. 12. Można zaobserwować przesunięcie w czasie między napięciami strony pierwotnej i wtórnej transformatora, a także różnicę poziomów napięć. Przepięcia w trakcie przełączania zostały zminimalizowane dzięki zastosowaniu kondensatorów odsprężających na odpowiednich wyprowadzeniach modułów tranzystorowych. Zdecydowano się także na rezygnację z typowych transformatorów planarnych o wysokich wartościach pojemności pasożytniczych na rzecz autorskich transformatorów opartych na równoległe połączonych rdzeniach ferrytowych i uzwojeniach z licy [22]. Umożliwiło to osiągnięcie wysokich szybkości przełączania modułów tranzystorowych, a więc i zmniejszenie strat łączeniowych w modułach tranzystorowych.

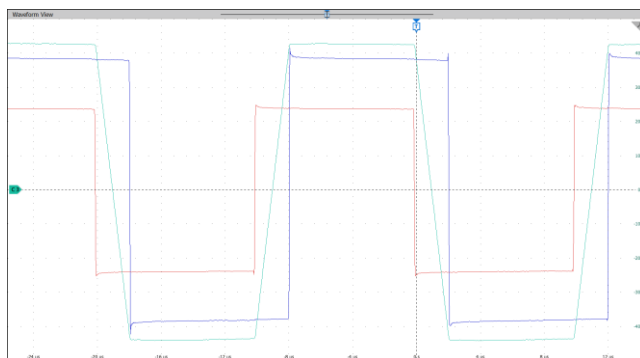
Przykładowy pomiar całego sprzęgu AC/DC/DC z analizatora mocy jest pokazany na Rys. 13. Potwierdza on zachowanie wysokiej sprawności przy szeregowym połączeniu dwóch przekształtników i sumarycznym dwustopniowym przetwarzaniu energii.

otrzymana sprawność spada wraz z wartością napięcia wejściowego (Rys. 14.), co potwierdza wcześniejsze

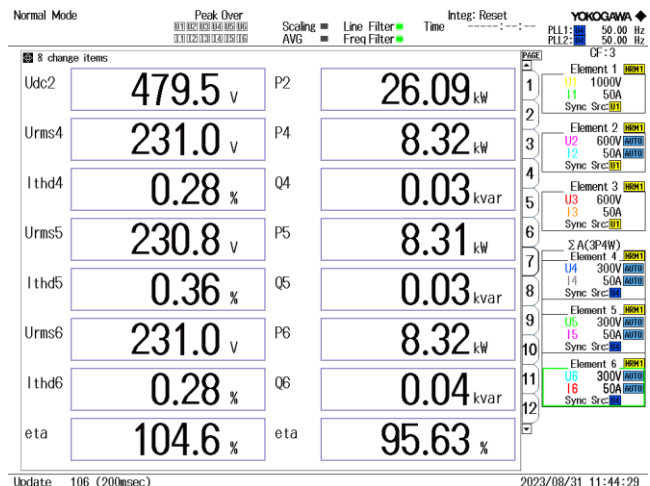
rozważania odnośnie zwiększonych wartości RMS prądów, zarówno w modułach tranzystorowych, jak i w komponentach magnetycznych.



Rys. 11. Przykładowe przebiegi napięcia (czerwony; 100 V/dz.) i prądu (zielony; 20 A/dz.) niskiej częstotliwości przy połączeniu AFE + DAB. Skala czasowa wynosi 4 ms/dz.



Rys. 12. Przykładowe przebiegi napięcia strony pierwotnej (czerwony; 200 V/dz.), wtórnej (niebieski; 200 V/dz.) i prądu (błękitny; 10 A/dz.) transformatora wysokiej częstotliwości przy połączeniu AFE + DAB. Skala czasowa wynosi 4 µs/dz.

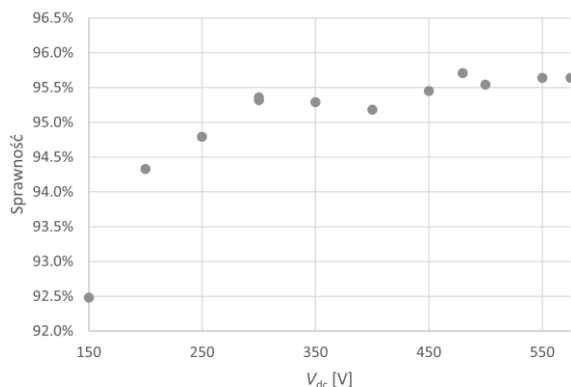


Rys. 13. Przykładowe pomiary analizatorem mocy układu AC/DC/DC przy połączeniu AFE + DAB.

Wnioski

W niniejszej pracy zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych dwukierunkowe izolowanego sprzęgu AC/DC o szerokim zakresie regulacji napięcia stałego, który może pracować w układzie modułowym (np. w pracy równoległej). Przedstawione wyniki badań dotyczą pracy układu w różnych warunkach i konfiguracjach oraz uwzględniają szereg czynników istotnych z punktu widzenia zastosowania w aplikacjach przemysłowych, w tym wpływ filtrów EMI na sprawność układu i jakość energii. Ważnym aspektem opracowanych przekształtników jest ich

przemysłowy charakter, który w odróżnieniu od modeli prototypowych zawiera wszystkie niezbędne układy pomocnicze (zabezpieczenia, zasilanie pomocnicze, system przyłączeniowy typu „hot swap”, oraz dedykowaną obudowę w rozmiarze RACK 4U).



Rys. 14. Sprawność energetyczna przekształtnika AFE+DAB w pełnym zakresie wartości napięcia wejściowego po stronie DC i maksymalnej mocy dla danego napięcia.

Projekt współfinansowany/finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu Ścieżka dla Mazowsza, nr wniosku MAZOWSZE/0111/19

Autorzy: mgr inż. Mikołaj Koszel, mgr inż. Kornel Wolski, dr inż. Piotr Grzejszczak, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej. E-mail: mikolaj.koszel@pw.edu.pl, kornel.wolski@pw.edu.pl, piotr.grzejszczak@pw.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Bartosik, M., Kamrat, W., Kaźmierkowski, M., Lewandowski, W., Pawlik, M., Peryt, T., Skoczowski, T., Strupczewski, A., & Szeląg, A. (2016). Magazynowanie energii elektrycznej i gospodarka wodorowa. *Przebieg Elektrotechniczny*, 332–340. <https://doi.org/10.15199/48.2016.12.78>
- [2] Robak S., Raczkowski R.: System magazynowania energii elektrycznej jako środek poprawy elastyczności systemu elektroenergetycznego z dużym udziałem generacji OZE, *Przebieg Elektrotechniczny*, 03/2021, pp 1-6, doi:10.15199/48.2021.03.01
- [3] Adnan M. The Future of Energy Storage: Advancements and Roadmaps for Lithium-Ion Batteries. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023; 24(8): 7457. <https://doi.org/10.3390/ijms24087457>
- [4] Sulaeman I., Chandra Mouli GR., Shekhar A., Bauer P., Comparison of AC and DC Nanogrid for Office Buildings with EV Charging, PV and Battery Storage, *Energies*, (2021), 14(18):5800. <https://doi.org/10.3390/en14185800>
- [5] Grzejszczak P., Koszel M., Barlik R. Nowatkiewicz B. SIMES – Smart Integrated Modular Energy System for DC microgrids with energy storages in Progress in Applied Electrical Engineering PAEE2023, Koscielisko, Poland, 2023.
- [6] K. H. Kumar and G. V. S. K. Rao, "A Review of Various DC-DC Converter Topologies for Photovoltaic Applications," 2021 6th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), Coimbatore, India, 2021, pp. 49-52, doi: 10.1109/ICCES51350.2021.9489070.
- [7] D. M. Bellur and M. K. Kazimierczuk, "DC-DC converters for electric vehicle applications," 2007 Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, Nashville, TN, USA, 2007, pp. 286-293, doi: 10.1109/EEIC.2007.4562633.
- [8] S. Chakraborty, H.-N. Vu, M. M. Hasan, D.-D. Tran, M. E. Baghdadi, and O. Hegazy, "DC-DC Converter Topologies for Electric Vehicles, Plug-in Hybrid Electric Vehicles and Fast Charging Stations: State of the Art and Future Trends," *Energies*, vol. 12, no. 8, p. 1569, Apr. 2019, doi: 10.3390/en12081569.
- [9] N. A. Al-Obaidi, R. A. Abbas and H. F. Khazaal, "A Review of Non-Isolated Bidirectional DC-DC Converters for Hybrid Energy Storage System," 2022 5th International Conference on Engineering Technology and its Applications (IICETA), Al-Najaf, Iraq, 2022, pp. 248-253, doi: 10.1109/IICETA54559.2022.9888704.
- [10] M. Koszel, P. Grzejszczak, B. Nowatkiewicz, K. Wolski, M. Szymczak and A. Czaplicki, "Design of dual active bridge for DC microgrid application," 2022 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE), Koscielisko, Poland, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/PAEE56795.2022.9966568.
- [11] F. Krismer and J. W. Kolar, "Efficiency-Optimized High-Current Dual Active Bridge Converter for Automotive Applications," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 7, pp. 2745-2760, July 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.211231
- [12] S. Ditzel, "Steady-state analysis of the bidirectional CLLC resonant converter in time domain," 2014 IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), Vancouver, BC, Canada, 2014, pp. 1-9, doi: 10.1109/INTLEC.2014.6972179.
- [13] Z. U. Zahid, Z. Dalala and J. -S. J. Lai, "Design and control of bidirectional resonant converter for Vehicle-to-Grid (V2G) applications," *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Dallas, TX, USA, 2014, pp. 1370-1376, doi: 10.1109/IECON.2014.7048680.
- [14] R. W. A. A. De Doncker, D. M. Divan and M. H. Kheraluwala, "A three-phase soft-switched high-power-density DC/DC converter for high-power applications," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 27, no. 1, pp. 63-73, Jan.-Feb. 1991, doi: 10.1109/28.67533.
- [15] Y. Cui, D. Wang and A. Emadi, "Three-phase dual active bridge converter design considerations," *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing, China, 2017, pp. 4696-4701, doi: 10.1109/IECON.2017.8216809.
- [16] J. Rodriguez, Jih-Sheng Lai and Fang Zheng Peng, "Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 4, pp. 724-738, Aug. 2002, doi: 10.1109/TIE.2002.801052.
- [17] Loncarski, J.; Monopoli, V.G.; Leuzzi, R.; Ristic, L.; Cupertino, F. Analytical and Simulation Fair Comparison of Three Level Si IGBT Based NPC Topologies and Two Level SiC MOSFET Based Topology for High Speed Drives. *Energies* 2019, 12, 4571. <https://doi.org/10.3390/en12234571>
- [18] M. Schweizer and J. W. Kolar, "Design and Implementation of a Highly Efficient Three-Level T-Type Converter for Low-Voltage Applications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 2, pp. 899-907, Feb. 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2203151.
- [19] Jing Huang and K. A. Corzine, "Extended operation of flying capacitor multilevel inverters," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 1, pp. 140-147, Jan. 2006.
- [20] Koszel, M., Grzejszczak, P., Nowatkiewicz, B., Wolski, K., Szymczak, M., & Czaplicki, A. (2022). Design of dual active bridge for DC microgrid application. W (Red.), 2022 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE) (s. 1–6). doi.org/10.1109/PAEE56795.2022.9966568
- [21] Koszel, M., Grzejszczak, P., Wolski, K., Świąchowicz, T., & Nowatkiewicz, B. (2023). Opracowanie wysokosprawnego dwukierunkowego przekształtnika sieciowego przeznaczonego do pracy w mikrosieci prądu stałego. *Przebieg Elektrotechniczny*, 1, 154–159. doi.org/10.15199/48.2023.07.28
- [22] P. Grzejszczak, K. Wolski, K. Brzostek and A. Sitnik, "Comparative study of two types of high-frequency transformers in a 20-kW Phase-Shifted Full Bridge converter application," 2022 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE), Koscielisko, Poland, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/PAEE56795.2022.9966578