

Opracowanie wysokosprawnego dwukierunkowego przekształtnika sieciowego przeznaczonego do pracy w mikroście prądu stałego

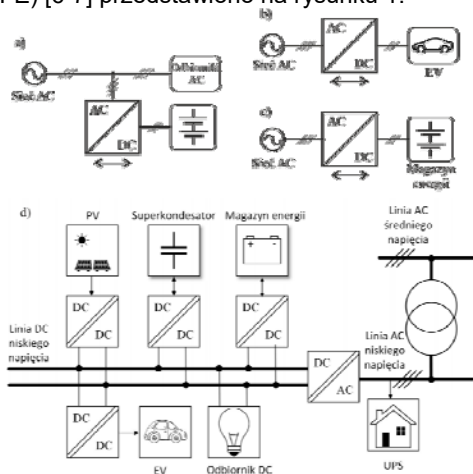
Streszczenie. Tematem artykułu jest projekt i badania prototypu dwupoziomowego trójfazowego przekształtnika sieciowego o mocy znamionowej 15 kW i napięciu w obwodzie DC na poziomie 760V. Za cel postawiono weryfikację algorytmu sterowania dwupoziomowego przekształtnika AC/DC w układzie eksperymentalnym. Algorytm umożliwia zastosowanie przekształtnika w mikroście prądu stałego. Zastosowany w układzie wydajny sterownik hybrydowy umożliwia zastosowanie zaawansowanego algorytmu sterowania. Badany przekształtnik oraz zastosowany algorytm sterowania pozwala na bezpośrednią regulację mocy czynnej i biernej w pracy dwukierunkowej. Odporność na odkształcenia napięcia sieci oraz zmiany jego częstotliwość uzyskana została przez moduł synchronizacji z siecią (DSOGI-PLL). W pracy zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych.

Abstract. The subject of the article is the design of a prototype of a two-level three-phase grid converter with a rated power of 15 kW and a DC voltage of 760V. The goal was to verify the control algorithm of the two-level AC/DC converter in the experimental system. The algorithm enables the use of the converter in a DC microgrid. The efficient hybrid controller used in the system enables the use of an advanced control algorithm. The tested converter and the control algorithm used allow for direct control of active and reactive power in bidirectional operation. Immunity to voltage distortion and changes in its frequency was obtained by the synchronization module with the network (DSOGI-PLL). The paper presents the results of simulation and experimental studies. (**Development of a high-efficiency bidirectional grid converter designed for a DC microgrid**).

Słowa kluczowe: trójfazowy przekształtnik sieciowy, węgiel krzemu, algorytm sterowania, badania symulacyjne, projektowanie.
Keywords: grid converter, active front end (AFE), ac/dc converter, SiC, design, thermal management, DPC.

Wprowadzenie

Idea mikroście prądu stałego zakłada przede wszystkim integrację źródeł, odbiorników i magazynów energii wokół wspólnej szyny DC [1-4]. Trudno sobie wyobrazić jednak działanie tego typu obiektów bez połączenia z istniejącym systemem elektroenergetycznym. Takie połączenie może być korzystne zarówno dla wydzielonej mikroście DC, zapewniając dodatkowe źródło energii, ale także możliwość oddania jej nadmiaru, oraz dla owego systemu AC (poprzez bilansowanie mocy, kompensację mocy biernej, stabilizację napięcia AC w przypadku zaników i zapadów). Zatem w celu zwiększenia funkcjonalności mikroście DC niezbędne jest wyposażenie jej w dwukierunkowy przekształtnik AC/DC [5], który będzie pełnił rolę sprzęgu obwodu DC z systemem elektroenergetycznym AC. To i inne zastosowania przekształtników AC/DC, które w literaturze anglojęzycznej często określane są jako układy Active Front End (AFE) [6-7] przedstawiono na rysunku 1.

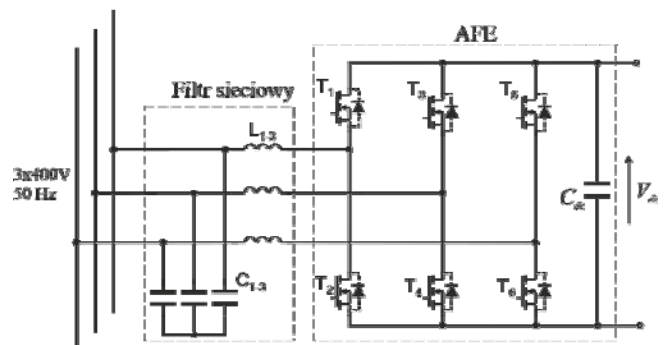


Rys. 1. Zastosowania przekształtnika AFE w sieciach AC i DC: (a) układy zasilania gwarantowanego (ang. UPS); (b) ładowarka samochodu elektrycznego; (c) stacyjny magazyn energii; (d) mikroście prądu stałego

Zastosowania z rys. 1, wymagają od przekształtników takich cech jak wysoka sprawność energetyczna i duża gęstość mocy. Główne zadania dla przekształtnika AFE w mikroście DC to [8-10]:

- Dwukierunkowa wymiana energii z systemem elektroenergetycznym;
- Odporność na odkształcenia napięcia i wahania częstotliwości w sieci (niezawodny układ synchronizacji);
- Możliwość bezpośredniej regulacji mocy czynnej i biernej w punkcie przyłączenia do sieci;
- Niezawodna synchronizacja;
- Praca równoległa z innymi modułami AFE;
- Niska zawartość wyższych harmonicznych prądu sieci.

Na rysunku 2 przedstawiono ogólny schemat elektryczny projektowanego przekształtnika AFE, zaznaczając elementy pasywne (filtr sieciowy oraz filtr DC), które mogą stanowić nawet 40% objętości układu.



Rys. 2. Ogólny schemat przekształtnika AFE

Pracując nad koncepcją mikroście prądu stałego w skali przemysłowej, niezbędne jest opracowanie prototypów przekształtników w skali laboratoryjnej, które umożliwią testowanie algorytmów sterowania oraz zarządzania energią w mikroście, bez zwiększonego ryzyka związanego z nieprzewidzianymi zdarzeniami, które mogą prowadzić do awarii i zniszczenia kosztownych układów. W projekcie badawczym SIMES, którego celem jest opracowanie takiej mikroście DC o mocy kilkuset kilowatów, opracowano

prototypy docelowych przekształtników o mniejszej mocy, zachowując pełną zgodność systemu sterowania i komunikacji, tak aby opracowane algorytmy były w pełni funkcjonalne w docelowym systemie dużej mocy.

Parametry projektowe

Uwzględniając powyższe wymagania i zastosowanie, sprecyzowane zostały parametry projektowe, które pozwolą sprawdzić wszystkie oczekiwane funkcjonalności tego układu w warunkach laboratoryjnych. Parametry projektowe opisywanego tu układu umieszczone zostały w Tabeli 1.

Tabela 1. Parametry projektowe

Parametr	Opis	Wartość
Napięcie AC / częstotliwość	u_{ac}	3x400 V/50 Hz
Napięcie DC	U_{dc}	740-780 V
Moc wyjściowa	P_o	15 kW
Częstotliwość łączeń	f_s	40 kHz
Sprawność	η	powyżej 98%

Istotnym wyzwaniem projektowym było opracowanie dokładnego modelu symulacyjnego, który pozwala na precyzyjne wyznaczenie strat mocy, ale także łatwe testowanie algorytmu sterowania.

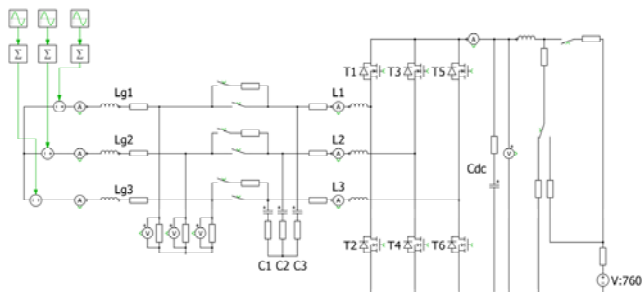
Badania symulacyjne

Symulacje zostały przeprowadzone w środowisku PLECS. Umożliwia ono precyzyjne modelowanie, pozwalające na weryfikację algorytmu sterowania przed badaniami eksperymentalnymi. Bazując na możliwościach implementacji kodu C w bibliotece DLL (ang. Dynamic-Link Library), możliwe jest bezpośrednie przeniesienie, wcześniej zweryfikowanego kodu do rzeczywistego sterownika mikroprocesorowego.

Implementacja algorytmu sterowania w opisany sposób ma liczne zalety względem użycia bloków przepływowych czy nawet wbudowanego bloku skryptowego C. Najważniejsze z nich to:

- Możliwość opracowania kodu sterowania w strukturze plików zbliżonej do tej stosowanej w procesorze sygnałowym;
- Łatwiejsze odwzorowanie opóźnień występujących w rzeczywistym układzie sterowania;
- Biblioteka DLL może być użyta w symulacji równoległej;
- Skrócenie procesu przygotowania symulacji;
- Możliwość debugowania kodu C.

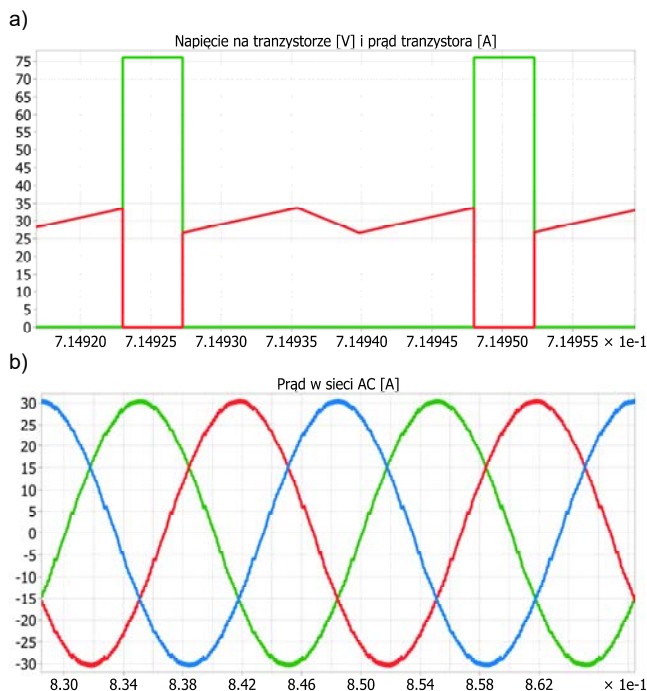
Początkowo przygotowany został wyidealizowany model symulacyjny. Celem wstępnej analizy było określenie warunków pracy tranzystorów oraz elementów pasywnych, w tym filtrów.



Rys. 3. Model symulacyjny AFE

Na jego podstawie został przygotowany również model stratny (rys. 3), uwzględniający parametry elementów półprzewodnikowych, magnetycznych jak i obwodu wstępnego ładowania pojemności w obwodach mocy AC i DC. Rysunek 4 przedstawia wyniki symulacyjne obrazujące

warunki pracy tranzystora oraz prądy przekształtnika po stronie AC w stanie ustalonym, dla mocy znamionowej.



Rys. 4. Przykładowe wyniki symulacyjne w pracy falownikowej: (a) chwilowy prąd tranzystora T1 (czerwony) i chwilowe napięcie na tranzystorze T1 (zielony x10V); (b) chwilowe prądy w obwodzie AC

Dobór elementów półprzewodnikowych i pasywnych

Na podstawie wyników badań symulacyjnych dobrane zostały elementy półprzewodnikowe i pasywne zamieszczone w Tabeli 2. Wybrane elementy pozwoliły na spełnienie postawionych założeń. Należy dodać że elementy magnetyczne zostały zaprojektowane i wykonane samodzielnie.

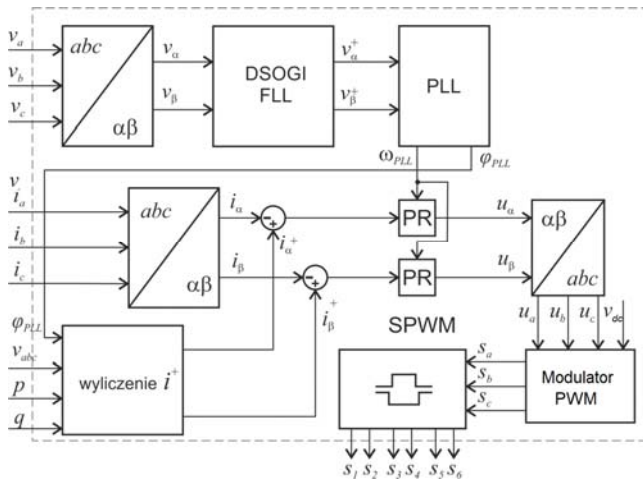
Tabela 2. Wybrane komponenty prototypu AFE

Parametr	Opis	Wartość
Kondensatory Cdc	MKP1848C65090JY5	100 uF, 900 V
Tranzystory T1-T6	G3R20MT12K	1.2 kV, 20 mΩ
Dławik AC L1, ESR	projekt własny	210 μH, 12 mΩ
Radiator	LA V 6 100 12	Rth = 0,2 K/W
Wentylator	612NHH-118 EBM-PAPST	55.5 m3/6800 rpm

Algorytm sterowania

W algorytmie użyto odpornego na zakłócenia modułu synchronizacji z siecią (DSOGI-PLL) [11-13]. Kąty przez niego wygenerowane pozwalają na swobodną regulację mocy czynnej i biernej. Osiągnięto to za pomocą zadawania wartości prądu w osiach d i q, które są następnie transformowane do ortogonalnego układu współrzędnych $\alpha\beta$. Dynamika regulacji mocy została dodatkowo ograniczona filtrem pierwszego rzędu o stałej czasowej 20 ms. W celu uzyskania odporności na zaburzenia napięcia sieci jak i na zaburzenia własne wynikłe z czasów martwych zastosowano regulatory prądu proporcjonalno-multirezonansowe. Kompensowane są nieparzyste harmoniczne do 21. Modulacja min-max [14] zmniejszyła tętnienia prądu wyjściowego i dała większy zapas indeksu modulacji.

Schemat blokowy algorytmu sterowania zamieszczono na rysunku 5 [15-16].

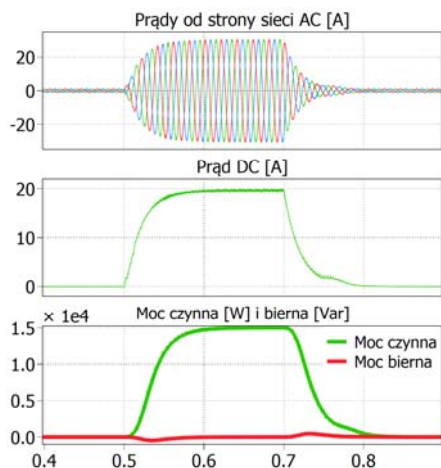


Rys.5. Schemat blokowy układu sterowania

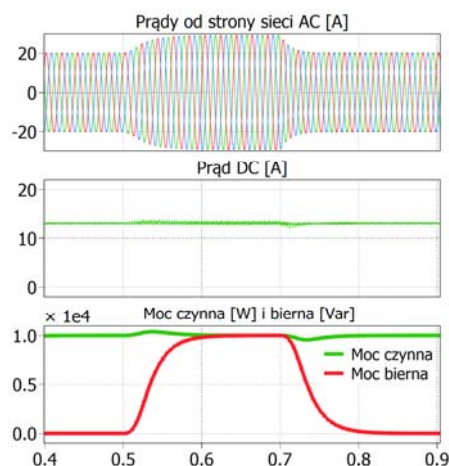
Symulacja stanów dynamicznych

W celu sprawdzenia przygotowanego algorytmu sterowania przekształtnikiem AFE pracującego z siecią AC został on zaimplementowany w modelu symulacyjnym. Uwzględnione zostały również parametry rzeczywistych elementów przedstawionych w tabeli 2. Na podstawie przeprowadzonych testów dobrane zostały nastawy regulatorów PR zapewniające odpowiednie warunki pracy w stanach dynamicznych.

a)



c)



Rys.6. Stany dynamiczne w badaniach symulacyjnych: (a) skokowa zmiana mocy czynnej przy zachowaniu jednostkowego współczynnika mocy; (b) skokowa zmiana kierunku przepływu energii przy zachowaniu jednostkowego współczynnika mocy; (c) skokowa zmiana mocy bierniej; (d) skokowa zmiana kierunku przesyłanej mocy bierniej

Rysunek 6 przedstawia wybrane wyniki badań symulacyjnych w opisanych warunkach:

(a) Skokowa zmiana obciążenia układu, odpowiadająca zmianie wartości mocy czynnej z 0 na 15 kW i z wartości 15 kW na 0, z zachowaniem jednostkowego współczynnika mocy (rys.6a);

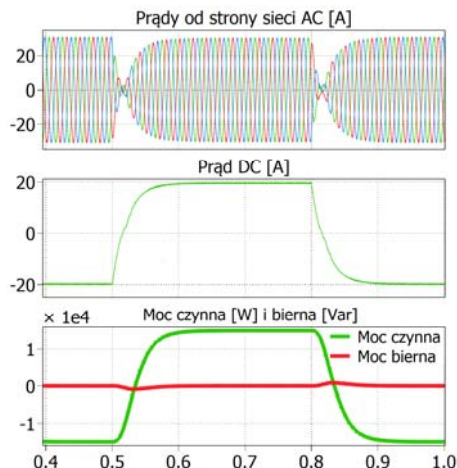
(b) Zmiana kierunku przepływu energii, przy zachowaniu jednostkowego współczynnika mocy ($P = |15 \text{ kW}|$) (rys. 6b);

(c) Skokowa zmiana mocy bierniej wprowadzanej do sieci z wartości 0 na 5 kVar i z 5 kVar na 0 A, zachowaniem stałej wartości mocy czynnej oddawanej do sieci $P = 10 \text{ kW}$ (rys.6c);

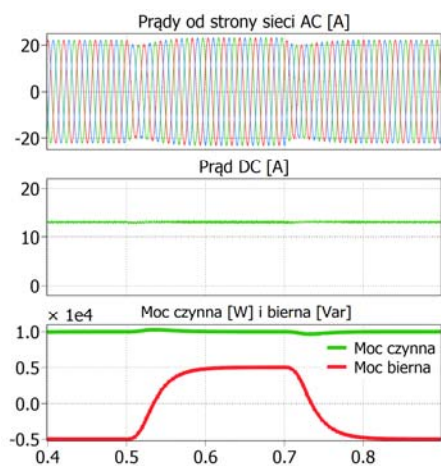
(d) Skokowa zmiana wartości mocy bierniej z 5 kVar na -5 kVar oraz z -5 kVar na 5 kVar, z zachowaniem stałej wartości mocy czynnej oddawanej do sieci $P = 10 \text{ kW}$ (zmiana mocy bierniej indukcyjnej na pojemnościową) (rys. 6d).

Zaprezentowane na poniższych rejestracjach wyniki badań symulacyjnych potwierdzają prawidłową pracę algorytmu sterowania w zakresie regulacji przesyłanej mocy czynnej i bierniej. Pętla sterowania zapewnia utrzymanie zadanej wartości mocy, a po dynamicznej zmianie wartości zadanej powraca do ustalonego punktu pracy. W stanach dynamicznych nie występują przeregulowania prądów AC i DC przekształtnika,

b)



d)



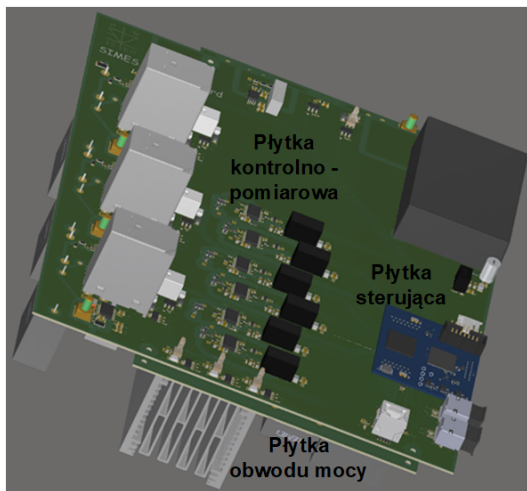
Budowa prototypu

Na podstawie wyników badań symulacyjnych z uwzględnieniem wybranych podzespołów, przystąpiono do projektowania konstrukcji przestrzennej przekształtnika, a następnie obwodów drukowanych oraz układu chłodzenia *Obwód drukowany*

Przekształtnik składa się z dwóch czterowarstwowych płytek drukowanych. Na umieszczonej na dole płycie mocy (rys. 7) znajdują się tranzystory mocy wykonane w technologii węgla krzemu [17] i kondensatory obwodów wejściowego i wyjściowego. Ponad nią znajduje się płytka kontrolna ze sterownikami bramkowymi, układami pomiarowymi, przetwornicami napięć pomocniczych oraz sterownikiem mikroprocesorowym.

Projektowany układ umożliwia pomiar napięć i prądów wszystkich faz, a także pomiar napięcia DC. W projekcie wykorzystany został sterownik bramkowy UCC21739-Q1 z zabezpieczeniem zwarciovym i nadprądowym.

a)



b)



Rys.7. Prototyp 15 kW AFE z system chłodzenia: (a) wizualizacja 3D; (b) model eksperymentalny

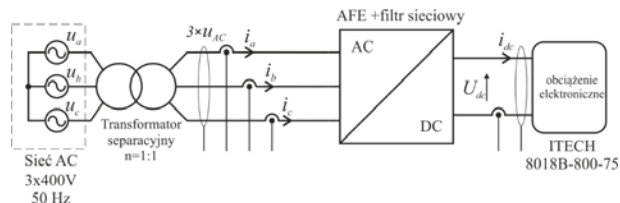
Sterownik

Algorytm sterowania przekształtnika AFE zaimplementowany został przy użyciu dwurdzeniowego procesora TMS320F28377D z rodziny C2000 o zdolności obliczeniowej 800 MIPS. Funkcję pomocniczą, odpowiedzialną m.in. za dekodowanie sygnałów pomiarowych pełni układ programowalny FPGA Lattice LFE5U-12F.

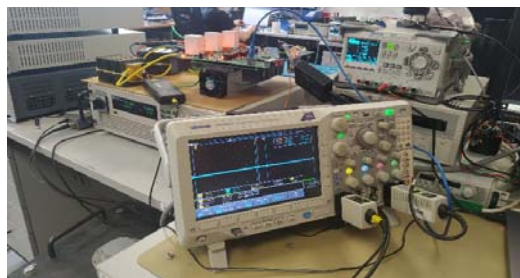
Wyniki badań eksperymentalnych

Zbudowany układ został przetestowany w warunkach laboratoryjnych. Przekształtnik został podłączony do sieci AC przez transformator separacyjny. Źródłem stabilnego napięcia DC był dwukierunkowy zasilacz prądu stałego ITECH 8018B-800-75 (rys. 8).

a)

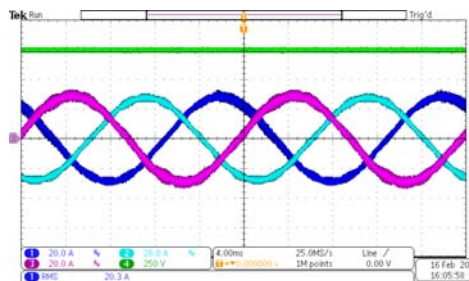


b)



Rys.8. Stanowisko laboratoryjne do badania układu AFE: (a) schemat; (b) zdjęcie stanowiska

Na rysunku 9 zamieszczono przebiegi prądów AC i napięcia DC przekształtnika w stanie ustalonym przy mocy znamionowej $P = 15 \text{ kW}$



Rys. 9 Przebiegi prądów AC i napięcia DC przekształtnika w stanie ustalonym przy mocy znamionowej $P = 15 \text{ kW}$

Na rysunku 10 zamierzono zdjęcie z kamery termowizyjnej w stanie termicznie ustalonym przy znamionowych wartościach napięć i mocy (tab. 1).

a)

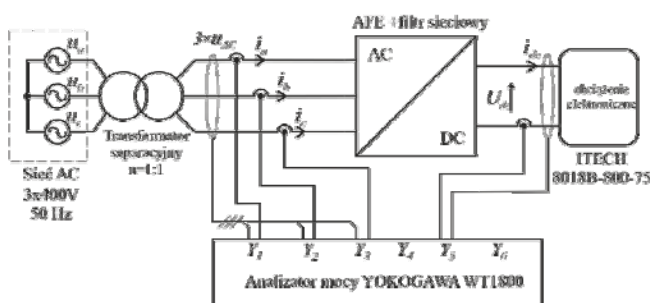


b)



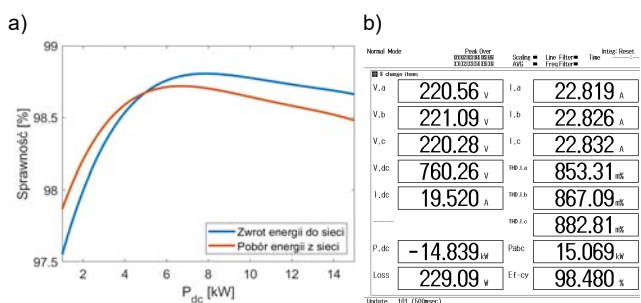
Rys.10. Analiza termiczna przekształtnika w stanie termicznym ustalonym przy pracy z mocą $P = 15 \text{ kW}$: (a) pomiar temperatury tranzystora w stanie termicznym ustalonym; (b) pomiar temperatury dławików filtra sieciowego oraz rezystorów bramkowych

Pomiar sprawności urządzenia przeprowadzony został przy użyciu analizatora mocy YOKOGAWA WT1800 podłączonego zgodnie ze schematem na rysunku 11.



Rys. 11. Schemat stanowiska pomiarowego badanego układu AFE

Sprawność przekształtnika pracującego z napięciem $U_{dc} = 760$ V, oraz jednostkowym współczynnikiem mocy przekracza 98% przy pracy z mocą $|P| > 2$ kW (rys. 12a) zbliżając się w optymalnych warunkach pracy do 99%.



Rys. 12. Wyniki pomiarów przy pomocy analizatora mocy YOKOGAWA WT1800: (a) charakterystyka sprawności w funkcji mocy; (b) zrzut ekranu z analizatora mocy

Współczynnik zawartości harmonicznych THD_i jest zależny od zadanej mocy w sposób przedstawiony w tabeli 4. W warunkach znamionowych ($P = |15$ kW]) osiąga wartość poniżej 0,9% (rys. 12b).

Tabela 4. Wyniki pomiarów THD prądu sieci

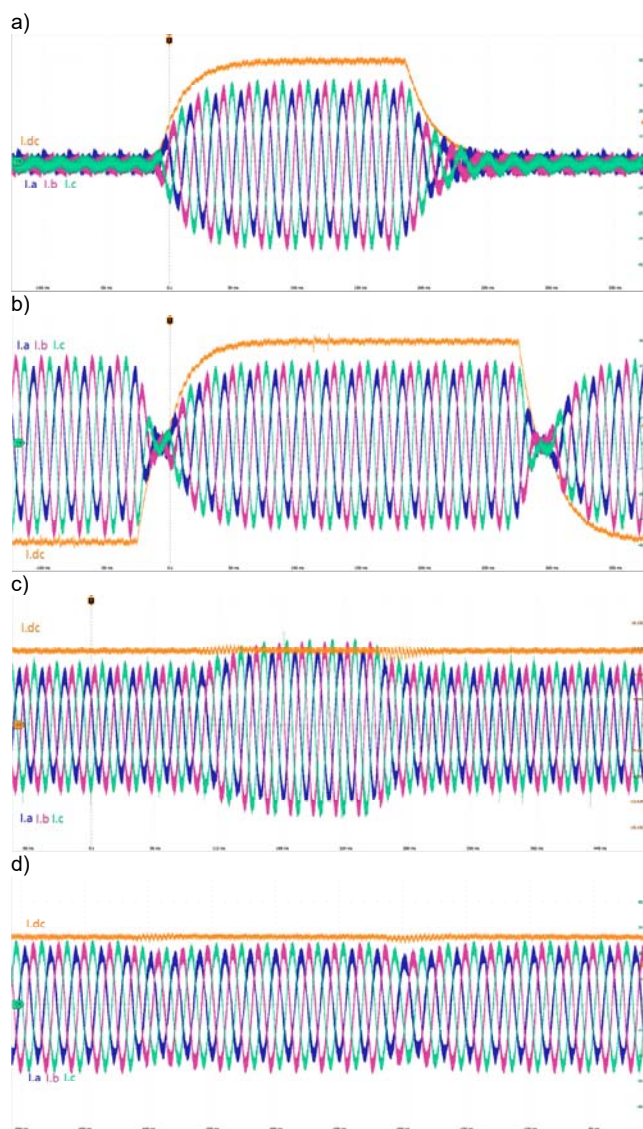
Lp	Moc czynna P [kW]	THD_i [%]
1	2	6
2	6	2,52
3	10	1,25
4	14	1
5	15	0,88

Test algorytmu sterowania

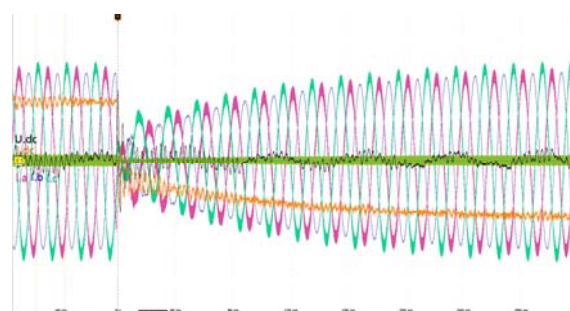
W badaniach eksperymentalnych (rys. 13) powtórzono testy opisane powyżej oraz zrealizowane w badaniach symulacyjnych (rys. 6). Otrzymane wyniki eksperymentalne są zbieżne z rezultatami symulacyjnymi i potwierdzają poprawność działania pętli regulacji.

Opisywany przekształtnik zaprojektowany został jako jedna ze składowych mikrosieci DC. Na rys. 14 zamieszczono oscylogram obrazujący stan dynamiczny polegający na skokowej zmianie obciążenia układu, odpowiadająca zmianie kierunku przepływu energii przy mocy znamionowej, z zachowaniem jednostkowego współczynnika mocy. Pomiar został zarejestrowany w układzie sprzężonych układów AC-DC i DC-DC [18] odpowiadający rys. 1d.

Przekształtnik DC-DC odpowiedzialny jest za stabilizację napięcia na głównej szynie DC. Przedstawiony stan dynamiczny następuje po zmianie kierunku przesyłania energii ($P = |15$ kW]).



Rys. 13. Stany dynamiczne w badaniach eksperymentalnych (a) skokowa zmiana mocy czynnej przy zachowaniu jednostkowego współczynnika mocy; (b) skokowa zmiana kierunku przepływu energii przy zachowaniu jednostkowego współczynnika mocy; (c) skokowa zmiana mocy biernej; (d) skokowa zmiana kierunku przesyłanej mocy biernej. I.a, I.b, I.c 10 A/div, I.dc 5 A/div.



Rys. 14 Skokowa zmiana kierunku przepływu energii przy zachowaniu jednostkowego współczynnika mocy. I.a, I.b, I.c 10 A/div, U.dc 10 V/div, I.dc 10 A/div, U.dc 250 V/div.

Podsumowanie

W ramach pracy przedstawiono założenia i wymagania dla przekształtnika energoelektronicznego będącego połączeniem mikrosieci prądu stałego z trójfazowym systemem elektroenergetycznym prądu przemiennego. Następnie zaprezentowano kolejne etapy procesu

projektowania, w którym posługiwano się specjalistycznym modelem symulacyjnym zrealizowanym w programie PLECS, który pozwala na bardzo dokładne odwzorowanie algorytmu sterowania jeszcze na etapie badań symulacyjnych. Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych prototypu o mocy 15 kW, którego budowa umożliwiła przetestowanie pełnej funkcjonalności układu w warunkach laboratoryjnych, zachowując 100% zgodność algorytmu sterowania oraz obwodów sterownika i pomiarowych, dzięki czemu realizacja docelowych modułów o większej mocy będzie wymagać jedynie zmiany obwodów silnopiędowych oraz tranzystorów. Przeprowadzone badania potwierdziły gotowość przekształtnika do pracy modułowej równoległe połączonych przekształtników DC/DC i AC/DC co stanowić będzie dalszy etap prac w realizowanym projekcie.

Szczególne podziękowanie kierowane są dla Pana inż. Karola Brzostka za pomoc w przygotowaniu modelu eksperymentalnego i stanowiska laboratoryjnego

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, dr inż. Piotr Grzejszczak, mgr inż. Kornel Wolski, mgr inż. Tomasz Święchowicz, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej ul. Koszykowa 75 00-662 Warszawa. E-mail: mikolaj.koszel@pw.edu.pl, piotr.grzejszczak@pw.edu.pl, kornel.wolski@pw.edu.pl, tomasz.swiechowicz.dokt@pw.edu.pl; inż. Bartosz Nowatkiewicz, Wibar Instalacje Sp. z o.o. Sp. j. ul. Bernardyńska 23/62 02-904 Warszawa, bartosz.nowatkiewicz@wibar.pl

LITERATURA

- [1] Dragičević T., Lu X., Vasquez J. C. i Guerrero J. M., DC Microgrids—Part I: A Review of Control Strategies and Stabilization Techniques, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, (2016) no. 7, 4876-4891, doi: 10.1109/TPEL.2015.2478859.
- [2] Ali S., Zheng Z., Aillerie M., Sawicki J.P., Péra M.C., i Hissel D., A review of DC Microgrid Energy Management Systems dedicated to residential applications, *Energies*, vol. 14, (2021) no. 14, p. 4308.
- [3] Salas-Puente R., Marzal S., González-Medina R., Figueres E., Garcera G., Experimental Study of a Centralized Control, Strategy of a DC Microgrid Working in Grid Connected Mode. *Energies*, vol. 10, (2017) 1627. <https://doi.org/10.3390/en10101627>
- [4] Silva C. M. M. R. S. et al., Integrated Control Strategy for Grid Connected Photovoltaic Array, Battery Storage and Supercapacitors, *2nd International Conference On Electrical Engineering (EECon)*, (2018), pp. 51-57, doi: 10.1109/EECon.2018.8541009.
- [5] Patel H. and Shah A., A novel control method for UPS battery charging using Active Front End (AFE) PWM rectifier, *2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, (2016), 1-3, doi: 10.1109/PEDES.2016.791423
- [6] Falkowski P. and Sikorski A., Comparative Analysis of Finite Control Set Model Predictive Control Methods for Grid-Connected AC-DC Converters with LCL Filter, *2018 IEEE 27th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, (2018), 193-200, doi: 10.1109/ISIE.2018.8433673.
- [7] R. Barlik, P. Grzejszczak, B. Leszczyński, and M. Szymczak, Experimental investigations on the grid-connected AC/DC converter based on three-phase SiC MOSFET module, *INTL Journal of electronics and telecommunications*, 2019, Vol. 65, No. 4, pp. 619-624, doi: 10.24425/ijet.2019.129821.
- [8] Rivera S., S. Kouro S., Vazquez S., Goetz S. M., Lizana R., and Romero-Cadaval E., Electric Vehicle Charging Infrastructure: From Grid to Battery, *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 15, (2021), no. 2, 37-51, doi: 10.1109/MIE.2020.3039039.
- [9] Rothmund, Guillod T., Bortis D., and Kolar J. W., 99.1% Efficient 10 kV SiC-Based Medium-Voltage ZVS Bidirectional Single-Phase PFC AC/DC Stage, *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 7, (2019) no. 2, 779-797, 2019, doi:10.1109/JESTPE.2018.2886140.
- [10] Jamil M., Hussain B., Abu-Sara M., Boltryk R. J. and Sharkh S. M., Microgrid power electronic converters: State of the art and future challenges, *2009 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, (2009), 1-5.
- [11] Teodorescu R., Liserre M., and P. Rodriguez P., Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems., *John Wiley & Sons, Ltd*, (2011), Chapter 8.5.
- [12] Blahnik V., Kosan T. and Talla J., Control of single-phase AC/DC converter based on SOGI-PLL voltage synchronization, *Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics - Mechatronika*, (2014), 652-655, doi: 10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018337.
- [13] Milczarek A., Malinowski M., Sterowanie trójfazowym przekształtnikiem DC/AC z algorytmem monitorowania sieci elektroenergetycznej, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2012), nr 12a, 18
- [14] Chung D.W., Kim J.S. and Sul S.K., Unified voltage modulation technique for real-time three-phase power conversion, in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, (1998), no. 2, 374-380, doi: 10.1109/28.663482.
- [15] Jasinski M., Wrona G., Piasecki S., Control of Grid Connected Converter (GCC) Under Grid Voltage Disturbances, *Advanced and Intelligent Control in Power Electronics and Drives, Springer Book Series: Studies in Computational Intelligence*, vol. 531 (2014), 91-142, doi:10.1007/978-3-319-03401-0_3
- [16] Kazmierkowski P., Jasinski M. and Wrona G., DSP-Based Control of Grid-Connected Power Converters Operating Under Grid Distortions, in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 7, (2011), no. 2, 204-211, doi: 10.1109/TII.2011.2134856
- [17] Li H., Ma Y., Ren R., and Wang F., SiC Impact On Grid Power Electronics Converters, *2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, (2020), 1-5, doi: 10.1109/PESGM41954.2020.9281404.
- [18] Piasecki S. Zaleski J. Jasinski M. Bachman, S. Turzyński M. Analysis of AC/DC/DC Converter Modules for Direct Current Fast-Charging Applications, *Energies*, 2021, no. 14, 6369. <https://doi.org/10.3390/en14196369>