

## Modułowa, dwukierunkowa przetwornica DC-DC o napięciu wejściowym pojedynczego ogniwa Li-Ion do zastosowania w napędzie elektrycznym

**Streszczenie.** W artykule opisano budowę modułowej, dwukierunkowej przetwornicy DC-DC do zastosowań w napędzie pojazdów elektrycznych. Podwyższenie napięcia pojedynczego ogniwa Li-Ion niweluje problemy związane z balansowaniem napięć ogniw łączonych szeregowo. Przetwornica daje możliwość budowy układu dowolnie konfigurowalnego. Zespół zasilający napęd w pojeździe elektrycznym oparty o daną przetwornicę charakteryzuje się wysoką niezawodnością i łatwością eksploatacji. Zaproponowane rozwiązanie zapewnia zwiększenie ogólnej sprawności układu w porównaniu do klasycznego rozwiązania z pojedynczą przetwornicą.

**Abstract.** Bidirectional, modular DC-DC converter for use in electrical vehicle drive is described in this paper. Single Li-Ion cell voltage transforming eliminates problems with series connected cells balancing. Freely configurable power circuit possibility. High reliability and ease of application can be reached by using converters like this. Increase of overall efficiency in comparison to classic, based on single converter electrical drive. **Bidirectional, modular DC-DC converter for use in electrical vehicle drive**

**Słowa kluczowe:** modułowa przetwornica DC-DC, przetwornica dwukierunkowa, niskostratny napęd elektryczny, ogniwa Li-Ion

**Keywords:** modular DC-DC converter, bidirectional converter, low losses electric drive, Li-Ion cells

### Wstęp

Rosnące zapotrzebowanie na wydajne magazyny energii elektrycznej rodzi szereg problemów technicznych. Większość napędów elektrycznych przystosowana jest do napięć od kilkudziesięciu do kilkuset woltów. Wyższe napięcia zasilania stosuje się w celu zmniejszenia strat mocy powstających na skutek przepływu prądów o dużej wartości przez przewodniki wchodzące w skład połączeń elektrycznych. Z podstawowej zależności:

$$(1) \quad P_{loss} = RI^2$$

wynika, że w celu optymalizacji systemu zasilającego należy dążyć do zmniejszenia prądów, które generują straty na rezystancjach połączeń.

W przypadku ogniw akumulatorów, gdzie napięcie pracy jest stosunkowo niskie, standardowym rozwiązaniem jest wykonanie obwodu, w którym pojedyncze ogniwa są łączone szeregowo w celu zwiększenia napięcia roboczego. Zwiększanie przekroju połączeń miedzianych zwiększa ich całkowitą masę, co w wielu przypadkach nie jest zalecane (np. w pojazdach elektrycznych).

Zwiększanie napięcia daje możliwość uzyskania zadanej mocy z baterii ogniw, zachowując stosunkowo niski prąd płynący w obwodzie.

W przypadku zasilania napędów elektrycznych, konieczne jest zwykle uzupełnienie systemu o główny regulator napięcia, będący jednostkową przetwornicą dużej mocy realizujący często funkcję dwukierunkowej kontroli przepływu prądu. Alternatywnym rozwiązaniem jest łączenie równoległe ogniw, pozbawione wielu problemów łączenia szeregowego.

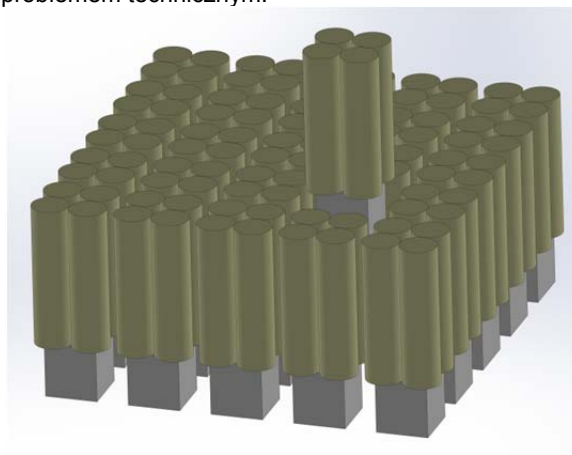
W tym przypadku, cały pakiet ogniw ma napięcie robocze pojedynczego ogniwa, co np. w przypadku ogniw Li-Ion wynosi około 4,2V. Tak niskie napięcie jest nieużyteczne w większości przypadków, a samo uzyskanie większych mocy wiązałoby się z koniecznością przesyłu prądu o bardzo dużej wartości i tym samym powstawaniu znacznych strat mocy, dużej masie i kosztach wykonania szyn zasilających. Koniecznym rozwiązaniem jest zatem podniesienie niskiego napięcia do zadanej wartości roboczej. Obecnie rozwijająca się technologia półprzewodników daje możliwości budowy przetwornic o

znacznej mocy i wysokiej sprawności pracujących z niskimi napięciami wejściowymi.

Koncepcja budowy systemu zasilania oparta o pakiet równoległe łączonych ogniw oraz współpracującej z nimi przetwornicy musi spełniać podstawowe założenia jakimi są: wysoka sprawność, wysoka niezawodność, kompatybilność z konwencjonalnymi systemami zasilania opartymi o łączenie szeregowo ogniw akumulatorów. Na rysunku 1 pokazano przykład pakietu 25 modułów ogniw połączonych równoległe z jedną przetwornicą.

W przypadku napędów elektrycznych, ważną cechą jest możliwość dwukierunkowego transferu energii pomiędzy akumulatorem a odbiornikiem, mogącym stać się w pewnych przypadkach źródłem energii, którą należy odebrać np. z wirującej masy na wale silnika elektrycznego w trybie hamowania odzyskowego. Warunek ten determinuje dwukwadrantowy charakter działania przetwornicy.

Budowa jednostkowej przetwornicy dużej mocy jest związana z wieloma problemami. Jeden z nich to zapewnienie bezawaryjnej pracy. Z uwagi na ilość elementów elektronicznych pracujących nieraz w trudnych warunkach środowiskowych, zapewnienie długotrwałej, bezawaryjnej pracy może okazać się sporym problemem technicznym.



Rys. 1. Model 3D przykładowego pakietu 25 modułów ogniw, każdy moduł oparty o 4 ogniwa 18650 połączone równoległe z jedną przetwornicą.

## Dywersyfikacja ryzyka

Jako alternatywę dla jednostkowej przetwornicy dużej mocy, autorzy zaproponowali rozwiązanie modułowe. W rozwiązaniu tym na całkowitą moc systemu przetwarzania energii składa się  $n$  przetwornic mniejszej mocy, których wyjścia łączone są równolegle.

Ilość modułowych przetwornic można określić przeprowadzając optymalizację projektu, przyjmując czynniki takie jak: całkowita sprawność, koszt, awaryjność.

Rozwiązanie to umożliwia też zmianę w wykonaniu baterii ogniw łączonych równolegle poprzez podzielenie ich na mniejsze grupy współpracujące z przydzielonymi do nich przetwornicami modułowymi. Wpływa to istotnie na niezawodność działania systemu zasilania, w którym, jeśli dojdzie do uszkodzenia którejkolwiek z przetwornic lub fragmentu baterii ogniw, wyłączony zostanie z użycia jedynie uszkodzony fragment, obniżając wydajność prądową systemu, jednak nie wykluczając go z użycia. Cecha ta jest szczególnie istotna w zasilaniu pojazdów elektrycznych, gdzie potencjalne uszkodzenie skutkowałoby zmniejszeniem zasięgu lub mocy pojazdu, nie uieruchamiając go jednak całkowicie.

Kolejną, bardzo istotną cechą, jest możliwość pełnej kontroli modułowych przetwornic przez nadrzędny system sterujący. Pełna kontrola dotyczy przede wszystkim regulacji prądów płynących w obu kierunkach, zarówno przy pracy klasycznej, jak i odzyskowej, a także napięcia wyjściowego całego systemu, które może być regulowane w szerokim zakresie.

Umożliwia to całkowitą eliminację głównego regulatora napięcia stosowanego w klasycznych rozwiązaniach z szeregowo łączonymi ogniwami.

## Problem balansowania napięć ogniw

Przypadki, w których napięcie na pojedynczych ogniwach może osiągnąć niebezpieczny poziom, można podzielić na dwa rodzaje w zależności od rodzaju pracy pakietu ogniw:

- wzrost napięcia przy ładowaniu pakietu,
- spadek napięcia na przy rozładowaniu pakietu.

W obu przypadkach przyczyną powstania nierównomierności napięć na ogniwach, jest rozrzut parametrów ogniw. Odstępstwa parametrów od danych fabrycznych mogą być wywołane procesem starzenia, który nasila się wraz ze wzrostem cykli ładowania i rozładowania akumulatorów i nie jest on do końca przewidywalny.

Dodatkowo aplikacje, w których pakiety ogniw są obciążane wysokim prądem ładowania i rozładowania, przyspieszają negatywne procesy starzenia.

Z powyższych faktów wynika, iż balansery biorą coraz większy udział w procesach kontrolowania napięć.

Budowa balanserów opiera się zwykle o elektroniczne układy, które redukują napięcie ogniw przejmując na siebie nadwyżkę energii emitując ją w postaci ciepła.

Są to zatem układy zaniżające sprawność pakietów, jednak niezbędne do ich prawidłowego działania i bezpiecznej eksploatacji. Pracą badawczą autorów jest opracowanie bezstratnych układów balansujących, w których nadwyżka energii jest transformowana do źródła ładującego pakiet.

## Przetwornice izolowane galwanicznie

W celu dopasowania i odpowiedniego zwiększenia napięcia zaproponowano koncepcję przetwornicy z użyciem niskostratnego transformatora impulsowego. W przetwornicach tego typu odpowiednie zwiększenie napięcia realizuje się za pomocą doboru odpowiedniej przekładni transformatora impulsowego. Dzięki zastosowaniu tej metody unika się problemów

występujących w nieizolowanych przetwornicach Buck-Boost, tzn. strona pierwotna przetwornicy może pracować z wartościami prądu i napięcia wyłącznie pierwotnego (analogicznie strona wtórna).

Mniej skomplikowany jest zatem dobór elementów aktywnych w tych rodzajach przetwornic, dzięki czemu mogą mieć znacznie lepsze parametry.

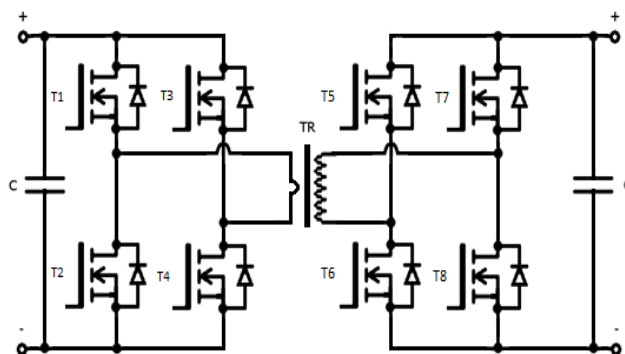
Po analizie pracy transformatora impulsowego, z uwagi na zjawiska występujące w trakcie przemagnesowywania rdzenia, rozpatrzono kilka rozwiązań topologicznych.

Pierwsza z nich, najmniej efektywna, bazuje na cyklicznym podawaniu napięcia do uzwojenia pierwotnego transformatora w dwóch cyklach. W pierwszym cyklu energia gromadzona jest w polu magnetycznym indukcyjności rozproszenia transformatora, natomiast w drugim cyklu, przekazywana do uzwojenia wtórnego. Metoda ta jest zbliżona do zasady działania przetwornic nieizolowanych Buck-Boost, w których gromadzenie energii odbywa się w polu magnetycznym indukcyjności dławika. Rozwiązanie to jest często wykorzystywane w przetwornicach małej mocy, jednak nie jest optymalne ze względu na niską sprawność transformatora z uwagi na wysoką indukcyjność rozproszenia.

Kolejna rodzina przetwornic transformatorowych, wykorzystuje topologie umożliwiające generowanie prądu przemiennego w uzwojeniu pierwotnym transformatora bez znacznego udziału indukcyjności rozproszenia. Rozwiązania te są najczęściej używane w przypadku przetwornic średniej i dużej mocy, jednak wiążą się zwykle z zastosowaniem większej ilości łączników w obwodzie części falownikowej przetwornicy.

Topologie umożliwiające wymuszenie dwukierunkowego prądu transformatora to przetwornice bazujące na co najmniej dwóch lub czterech łącznikach półprzewodnikowych.

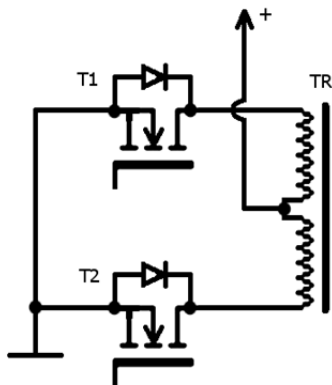
Topologia półmostkowa bazuje na wykorzystaniu dwóch tranzystorów mocy, jednak wymaga zastosowania dzielnika napięcia w celu wygenerowania sztucznego punktu zerowego. Najczęstszym rozwiązaniem jest zastosowanie dzielnika pojemnościowego, co stanowi poważny problem ze względu na występowanie znacznych strat w przypadku przewodzenia prądów dużej wartości i wysokich wartościach pochodnych tych prądów. Ponadto dochodzą problemy z efektem „flux walking”, czyli nierównomiernością strumienia magnesowania rdzenia (stanowiące w efekcie podmagnesowanie rdzenia transformatora prądem stałym). Nierównomierność wynika z niedoskonałości zera tworzonego przez dzielnik pojemnościowy (niedoskonałość parametrów charakterystycznych elementów wchodzących w skład dzielnika pojemnościowego, przede wszystkim rozrzut pojemności kondensatorów).



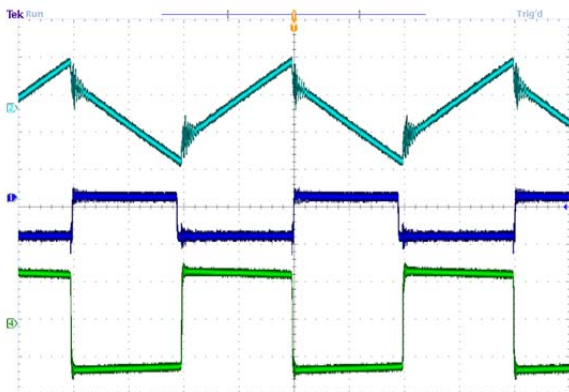
Rys. 2. Schemat dwukierunkowej, pełnomostkowej przetwornicy z transformatorem separującym.

Topologia pełnomostkowa [rys. 2] pozwala na wyeliminowanie dzielnika pojemnościowego z uwagi na międzygałęziowe podłączenie transformatora, jednak ma istotną wadę w postaci dodatkowych dwóch łączników tranzystorowych, które biorą udział w przepływie prądu pierwotnego, generując dodatkowe straty na rezystancjach przewodzenia  $R_{ds(on)}$ .

Kolejną topologią umożliwiającą optymalną pracę transformatora jest topologia przeciwsobnej przetwornicy dwutranzystorowej [rys. 3]. W rozwiązaniu tym, transformator posiada dwa uzwojenia pierwotne z punktem wspólnym podłączonym do dodatniej szyny zasilającej. Naprzemienne załączenie uzwojeń pierwotnych powoduje cykliczne zmiany kierunku strumienia magnetycznego w rdzeniu.



Rys. 3. Schemat topologii przeciwsobnej - transformator z odczepem



Rys. 4. Przebiegi prądu falownika (cyjan) i napięć pierwotnego (niebieski) oraz wtórnego (zielony)

Problemem w tym rozwiązaniu jest konieczność wykonania uzwojenia pierwotnego z odczepem. Przy dużych prądach i małych ilościach zwojów może to przysporzyć problemy z wykonaniem fizycznym, szczególnie związane z nierównomiernym przepływem prądów w obwodzie falownika, co może doprowadzić do problemów z podmagnesowaniem rdzenia transformatora prądem stałym i w efekcie nasycenia rdzenia.

Wszystkie obwody falownikowe wyżej wymienionych przetwornic izolowanych, muszą być wyposażone w prostowniki aktywne pełniące rolę falowników w drugim kwadrancie pracy. Przebiegi prądu falownika oraz napięć pierwotnego i wtórnego pokazano na rysunku 4.

### System sterowania

Z uwagi na konieczność uzyskania powtarzalności parametrów każdego z modułów przetwornic, bardzo ważną cechą jest powtarzalność parametrów każdej przetwornicy.

Klasyczne układy sterowania z magistralami analogowymi są skuteczne i zapewniają szybkie odpowiedzi układu, jednak w przypadku konieczności uzyskania informacji zwrotnych z komórek modułowej przetwornicy do centralnego układu sterującego, magistrale analogowe byłyby zbyt trudne w aplikacji i mogłyby powodować problemy związane z podatnością na zakłócenia elektryczne.

Rozwiązaniem optymalnym jest budowa szeregowej magistrali cyfrowej, która zapewni komunikację pomiędzy każdym modułem, a głównym sterownikiem. Moduły przetwornic wyposażone w indywidualny układ sterowania oraz indywidualny układ wejścia/wyjścia przesyłają informacje o podstawowych parametrach elektrycznych takich jak prąd wejściowy i wyjściowy oraz napięcie wyjściowe. Na podstawie tych informacji, algorytm zawarty w głównym sterowniku, optymalizuje pracę całej przetwornicy modułowej, odpowiednio zarządzając funkcjonowaniem każdej komórki.

Podstawową funkcją realizowaną przez sterowniki jest sterowanie komórkami przetwornicy w taki sposób, aby uzyskać równomierne obciążenie każdej z komórek. Jednak w przypadku, gdy zadane warunki pracy wymagają znacznego zmniejszenia mocy wyjściowej, istnieje możliwość wyłączenia pewnej ilości przetwornic w celu zoptymalizowania sprawności całego układu. W tym przypadku konieczne jest opracowanie algorytmu sterującego w taki sposób, aby „inteligentnie” zarządzał on udziałem pracy każdej z komórek przetwornicy modułowej.

Współczesna technologia mikroprocesorowa pozwala na łatwą implementację algorytmów umożliwiających sterowanie energoelektronicznym układem przetwornic. Układy regulatorów oraz sprzężeń zwrotnych, mogą być z łatwością implementowane jako funkcje programu mikrokontrolerów. Połączenie funkcji układu sterowania przetwornicą i interfejsu, stanowi optymalne zastosowanie w aplikacji przetwornic modułowych z uwagi na niskie koszty wynikające z redukcji ilości elementów elektronicznych, zwiększenie niezawodności poprzez redukcję liczby elementów składowych oraz redukcję do minimum ilości analogowych układów elektronicznych np. regulatorów PI wykonanych z użyciem wzmacniaczy operacyjnych i pasywnych elementów RC.

Eliminacja analogowych układów sterowania jest ważna szczególnie tam, gdzie konieczne jest zachowanie powtarzalności parametrów i zapewnienie niewrażliwości układów na procesy starzenia, czy też wpływy środowiska takie jak np. zmiany temperatury.

Układy przetwornic wyposażone w indywidualne sterowniki mikroprocesorowe umożliwiają ponadto, efektywną diagnostykę z użyciem tej samej magistrali poprzez którą, w trakcie pracy, komunikuje się nadrzędny kontroler sterujący.

Zaimplementowanie w każdym sterowniku pojedynczej przetwornicy modułowej, funkcji umożliwiającej wspólne, jednoczesne programowanie (tzw. *boot loader*) znacznie ułatwia proces związany z programowaniem i ewentualną zmianą oprogramowania mikrokontrolerów.

### Separacja galwaniczna

W modułach użyto transformatorów planarnych. Charakteryzują się one wysokim sprzężeniem magnetycznym pomiędzy uzwojeniami, co przyczynia się do zmniejszenia strat mocy. Uzwojenia, wykonane w technologii obwodów drukowanych, zapewniają dużą powtarzalność parametrów oraz prostotę wykonania. Kształt rdzenia transformatora planarnego przyczynia się do miniaturyzacji układu. Dzięki płaskiemu kształtowi rdzenia i uzwojeń możliwe jest efektywne chłodzenie całego

transformatora. Powyższe cechy umożliwiają zwiększenie gęstości mocy i zmniejszenie wymiarów.

Na rysunku 5 pokazano fotografię kompletnego modułu przetwornicy dwukierunkowej o mocy 300W.



Rys. 5. Fotografia kompletnego modułu przetwornicy dwukierunkowej o mocy 300W

#### Podsumowanie

System modułowych przetwornic przedstawiony w niniejszym artykule jest alternatywą dla obecnie używanych systemów zasilania opartych o szeregowe łączenie ogniw oraz używających centralnych regulatorów napięcia. Modułowość przedstawionego rozwiązania przyczyni się do zwiększenia bezawaryjności pojazdów elektrycznych oraz umożliwi łatwą skalowalność systemów zasilających w napędzie elektrycznym.

#### Autorzy:

mgr inż. Krzysztof Zygoń, student III stopnia, e-mail: [krzysztof.zygon@gmail.com](mailto:krzysztof.zygon@gmail.com)

mgr inż. Maciej Swadowski, student III stopnia, e-mail: [maciej940@gmail.com](mailto:maciej940@gmail.com)

dr inż. Andrzej Jąderko, e-mail: [aj@el.pcz.czest.pl](mailto:aj@el.pcz.czest.pl)  
Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa,

#### LITERATURA

- [1] Lee Y.-S., Cheng G.-T., Quasi-Resonant Zero-Current-Switching Bidirectional Converter for Battery Equalization Applications, (2002), *IEEE Transactions on Power Electronics* (Volume: 21, Issue: 5, Sept. 2006)
- [2] Bodur H., Bakan A.F., A new ZVT-PWM DC-DC converter, (2002), *IEEE Transactions on Power Electronics* (Volume: 17, Issue: 1, Jan 2002)
- [3] Wai Rong-Jong, Duan Rou-Yong., High-Efficiency Bidirectional Converter for Power Sources With Great Voltage Diversity, (2007), *IEEE Transactions on Power Electronics* (Volume: 22, Issue: 5, Sept. 2007)
- [4] Aigner H., Dierberger K., Grafham D., Improving the Full-bridge Phase-shift ZVT Converter for Failure-free Operation Under Extreme Conditions in Welding and Similar Applications, (1998), *Presented at IAS 98 St. Louis*
- [5] Jąderko A., Swadowski M., Zygoń K., Przekształtnik wysokiej częstotliwości z wykorzystaniem nowoczesnych tranzystorów GaN, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Studia i Materiały*, (2015), nr 35, 29-39
- [6] Jąderko A., Swadowski M., Zygoń K., Optymalizacja nowoczesnych zasilaczy impulsowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91(2015), nr 1, 152-155
- [7] Jąderko A., Swadowski M., Zygoń K., Niskonapięciowy prostownik synchroniczny z wykorzystaniem nowoczesnych tranzystorów GaN, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93(2017), nr 1, 205-208
- [8] Lei Wang, Hui Li., Maximum fuel economy-oriented power management design for a fuel cell vehicle using Battery and Ultracapacitor, (2010), *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol 46, No.3, 1011-1020
- [9] Lei Wang, E. G. Collins Jr., and Hui Li, Optimal design and real time control for energy management in plug-in hybrid electric vehicles, (2011), *IEEE Trans. of Vehicular Technology*
- [10] Zhan Wang, Hui Li, Three-phase bidirectional DC-DC converter with enhanced current sharing capability, (2010), *IEEE ECCE 2010*, 1116 – 1122
- [11] J.-S. Lai and D. J. Nelson, Energy management power converters in hybrid electric and fuel cell vehicles, (2007), *Proc. IEEE Ind. Electron., Taipei*, Taiwan, Volume 95, Issue 4, 766 – 777
- [12] G. Chen, D. Xu, and Y.-S. Lee, A family of soft-switching phaseshift bidirectional dc-dc converters: synthesis, analysis, and experiment, (2002), *Proc. the Power Conversion Conference*, Osaka, Japan, Volume 1, 122 – 127