

Karol Fatyga
Politechnika Lubelska
Bartłomiej Mroczek
PGE Dystrybucja S.A.

CHARAKTERYSTYKI PRACY DWUKIERUNKOWEJ PRZETWORNICY DC/DC DO POJAZDÓW ELEKTRYCZNYCH I ARCHITEKTURA JEJ KOMUNIKACJI W SYSTEMIE OPERATORA SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ

CHARACTERISTICS OF BIDIRECTIONAL DC/DC CONVERTER FOR ELECTRIC VEHICLES AND ARCHITECTURE OF ITS COMMUNICATION IN THE POWER GRID

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę pracy przetwornicy DC/DC z transformatorem wysokiej częstotliwości dla wybranych strategii sterowania. Przetwornica taka stanowi część układu ładowania pojazdów elektrycznych. Konieczne jest ograniczenie strat mocy podczas ładowania pojazdów jak również ograniczenie negatywnego wpływu spodziewanej dużej liczby układów ładowania na sieć elektroenergetyczną. Celem wykonania szczegółowych badań zbudowano prototypową przetwornicę DC/DC z układem sterowania zdolnym do komunikacji z urządzeniami operatora sieci dystrybucyjnej OSD. Uzyskane wyniki pozwalają na ocenę zasadności stosowania wybranego rozwiązania na szeroką skalę.

Abstract: This paper presents analysis of DC/DC converter with high frequency transformer for selected control strategies. Such converter is part of an electric vehicle charger. Because of high power being transferred during charging process it is imperative to provide highest efficiency possible. It is also important to reduce negative impact of a large number of chargers on electrical grid. To test operation of the device a prototype DC/DC converter was built, along with controller capable of communication with grid operator. Results allow for evaluation of legitimacy of proposed solution being used on a large scale.

Słowa kluczowe: przetwornica DC/DC, transformator wysokiej częstotliwości, ładowanie pojazdów elektrycznych, operator sieci dystrybucyjnej, sterowanie fazowe, sterowanie częstotliwościowe

Keywords: DC/DC converter, high frequency transformer, electric vehicle charging, electrical grid operator, phase control, frequency control

1. Wstęp

Rynek pojazdów z napędem elektrycznym ciągle się rozwija. Wzrasta zainteresowanie alternatywą względem pojazdów spalinowych, ze względu na coraz większy zasięg, osiągi, lepszą stylistykę czy wreszcie – powoli wprowadzane inicjatywy rządowe. Również wśród producentów samochodów zaczyna pojawiać się trend wycofywania się z produkcji pojazdów z silnikiem wysokoprężnym czy też pojazdów spalinowych w ogóle. Kolejne państwa określają daty, po których nie będzie możliwa rejestracja samochodu z silnikiem spalinowym.

Ze względu na pojemności baterii oraz wymagany czas ładowania, określanymi w normie IEC61851, konieczne jest stosowanie układu zdolnego ładować baterie prądem osiągniętym 125 A, a nawet 250 A [2]. Stąd

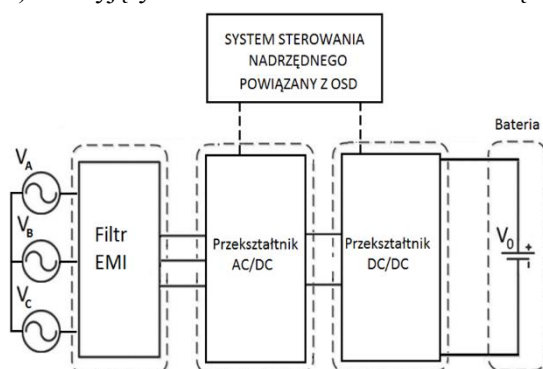
bardzo wielu producentów oferuje urządzenia do ładowania o mocy 22 kW czy 50 kW. Sprawność procesu ładowania jest parametrem ważnym dla operatora sieci dystrybucyjnej. Kolejnym problemem jest budowa odpowiedniej infrastruktury ładowania. Zapewnienie odpowiedniej liczby miejsc ładowania pojazdów elektrycznych wiąże się z przebudową znacznej części sieci przesyłowej. Jest ekonomicznie nieuzasadnionym doprowadzenie do każdego gospodarstwa domowego przyłącza o mocy 50 kW. Ważnym aspektem jest również bezpieczeństwo energetyczne – duża liczba pojazdów elektrycznych spowoduje drastyczne zwiększenie zużycia energii elektrycznej w krótkich okresach czasu co może doprowadzić też do destabilizacji systemu elektroenergetycznego [3][4]. Można jednak ten

problem wykorzystać do wspomagania sieci elektroenergetycznej. Dysponując dużą liczbą pojazdów elektrycznych dołączonych do sieci i możliwością sterowania procesem ładowania z poziomu systemu SCADA operatora sieci dystrybucyjnej (OSD), można dążyć do wyrównania krzywej obciążenia sieci poprzez centralne sterowanie ładowaniem i rozładowywaniem pojazdów [5][6]. W takim układzie akumulatory podłączonych do stacji ładowania elektrycznych pojazdów samochodowych mogłyby stanowić rozproszony zasobnik energii elektrycznej zarządzany przez operatora OSD.

Układy spełniające takie wymagania są obecnie konstruowane i badane w Politechnice Lubelskiej i w PGE Dystrybucja. W niniejszym artykule przedstawione są ważniejsze założenia konstrukcyjne oraz przykładowe metody sterowania. Przedstawione badania wykonane i analizowane były ze względu na wybór metody, która charakteryzować się będzie najwyższą sprawnością przetwarzania. Dodatkowym aspektem prezentowanym w artykule są zagadnienia współpracy stacji ładowania z operatorem OSD. Ich założenia prezentowane są w końcowej części opracowania.

2. Projektowany układ dwukierunkowej przetwornicy DC/DC

Ładowarki pojazdów elektrycznych składają się z przekształtnika AC/DC oraz przetwornicy DC/DC dopasowującej parametry napięcia i prądu do baterii w zależności od informacji pozyskanych od pojazdu elektrycznego (Rys 1.). Przyjęty do badań układ składa się z

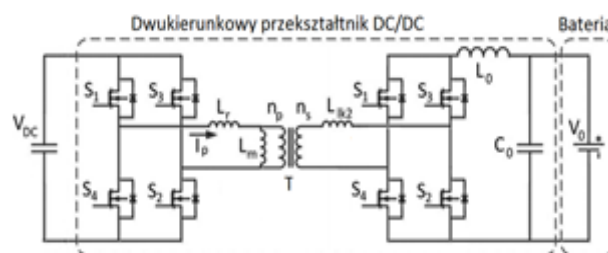


Rys. 1 Układ ładowania pojazdów elektrycznych z centralnym sterowaniem

bloków filtrów sieciowych, dwóch przekształtników energoelektrycznych oraz układu komunikacyjno-pomiarowego, który

zapewni realizację usługi ładowania/rozładowania przez OSD z uwzględnieniem aktualnych ograniczeń obciążenia linii i zgodnie z umową klienta.

Przetwornica DC/DC jest w takiej sytuacji regulatorem procesu ładowania oraz elementem izolującym pojazd elektryczny od sieci elektroenergetycznej. Izolacja galwaniczna pojazdu od sieci elektroenergetycznej jest wymogiem bezpieczeństwa w standardach ładowania. Aby zapewnić możliwość przesyłania energii w dwóch kierunkach należy zastosować odpowiednią topologię, której przykład przedstawiono na Rys. 2.



Rys. 2 Dwukierunkowy przekształtnik DC/DC

3. Wybór metody sterowania układu wysokiej częstotliwości

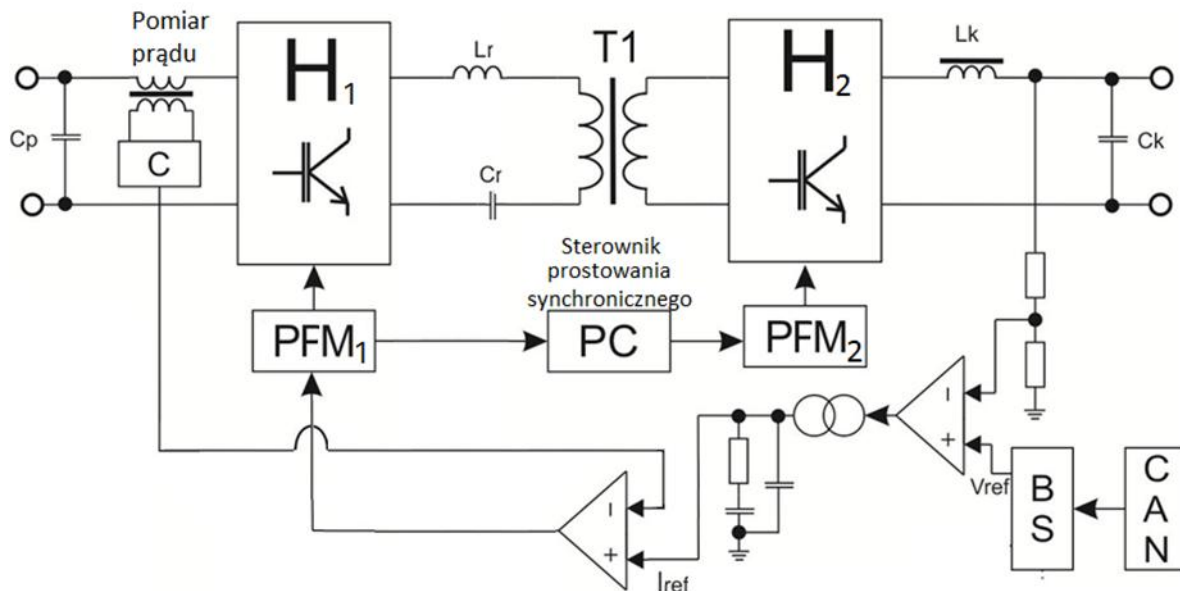
Do sterowania transformatorem wysokiej częstotliwości można wykorzystać jedną z kilku strategii sterowania: push-pull [7] pełnomostkowe sterowanie fazowe [8], czy sterowanie rezonansowe LLC [9]. Możliwe jest również zastosowanie sterowania wielopoziomowego [10]. Wśród wymienionych wiodącymi strategiami sterowania są sterowanie rezonansowe LLC oraz sterowanie pełnomostkowe fazowe PSFB. Niniejszy artykuł skupia się przede wszystkim na algorytmie sterowania fazowego, zaś wstępne badania oraz porównanie algorytmów rezonansowego LLC i fazowego PSFB są szerzej zaprezentowane w artykule [6].

3.1 Sterowanie rezonansowe LLC

Sterowanie rezonansowe LLC (rys.3) opiera się o zmianę częstotliwości sygnału sterującego transformatorem. Ciągi sygnałów sterujących tranzystorami w mostku (rys.2) ustawione są na stały współczynnik wypełnienia 50%. Sygnały sterujące przeciwległymi tranzystorami są zsynchronizowane ze sobą w fazie. Przez połowę okresu taktowania PWM napięcie na transformatorze dołączane jest do napięcia zasilania, przez kolejną do ujemnej wartości napięcia zasilania. Aby regulować wartość

prądu płynącego przez uzwojenie pierwotne transformatora do uzwojenia tego należy dołączyć elementy pasywne L i C, które wraz z indukcyjnością rozproszenia transformatora

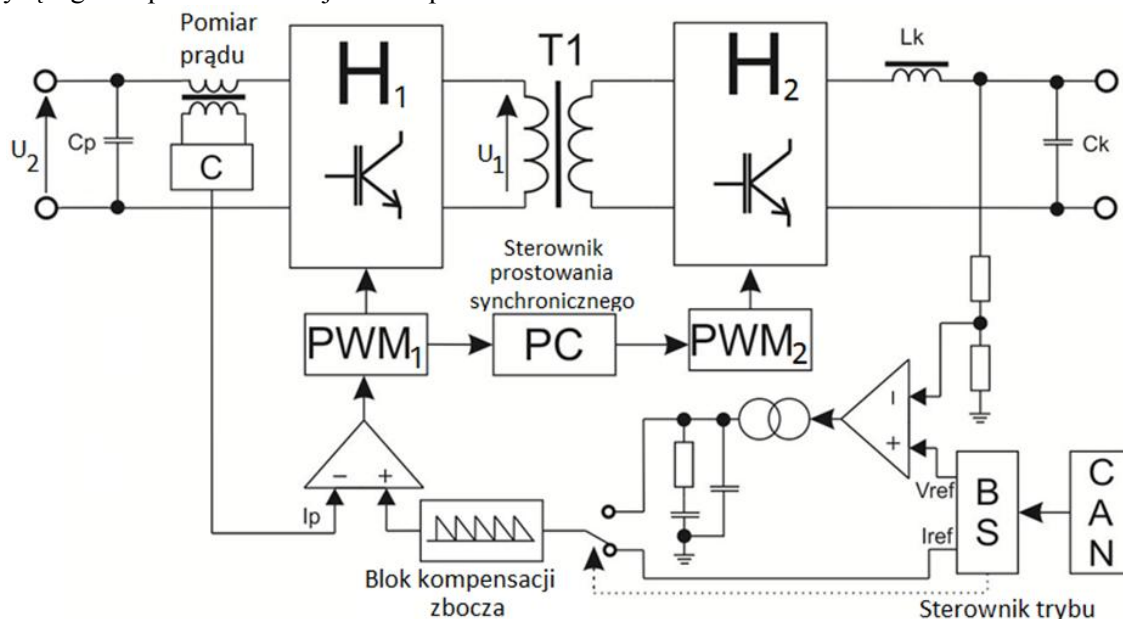
transformatora, który przy częstotliwości bliskiej do rezonansowej jest niemalże sinusoidalny. Kolejną zaletą jest łatwość implementacji miękkiego przełączania



Rys. 3 Układ sterowania rezonansowego: CAN - system komunikacji z OSD, BS - system logiczny, PFM - system sterowania częstotliwością sygnału PWM, PC - sterownik prostowania synchronicznego

utworzą obwód rezonansowy LLC. Zmiana częstotliwości powoduje zmianę impedancji takiego obwodu i tym samym zmianę prądu płynącego przez uzwojenie pierwotne (Rys. 3). Zaletą tego sterowania jest kształt prądu płynącego przez uzwojenie pierwotne

tranzystorów, co osiąga się poprzez pracę tylko w zakresie częstotliwości wyższych od częstotliwości rezonansowej, zachowując pojemnościowy charakter obwodu rezonansowego.



Rys. 4 Układ sterowania fazowego: CAN - system komunikacji z OSD, BS - system logiczny, PWM - kontroler sterowania fazą sygnału PWM, PC - sterownik prostowania synchronicznego

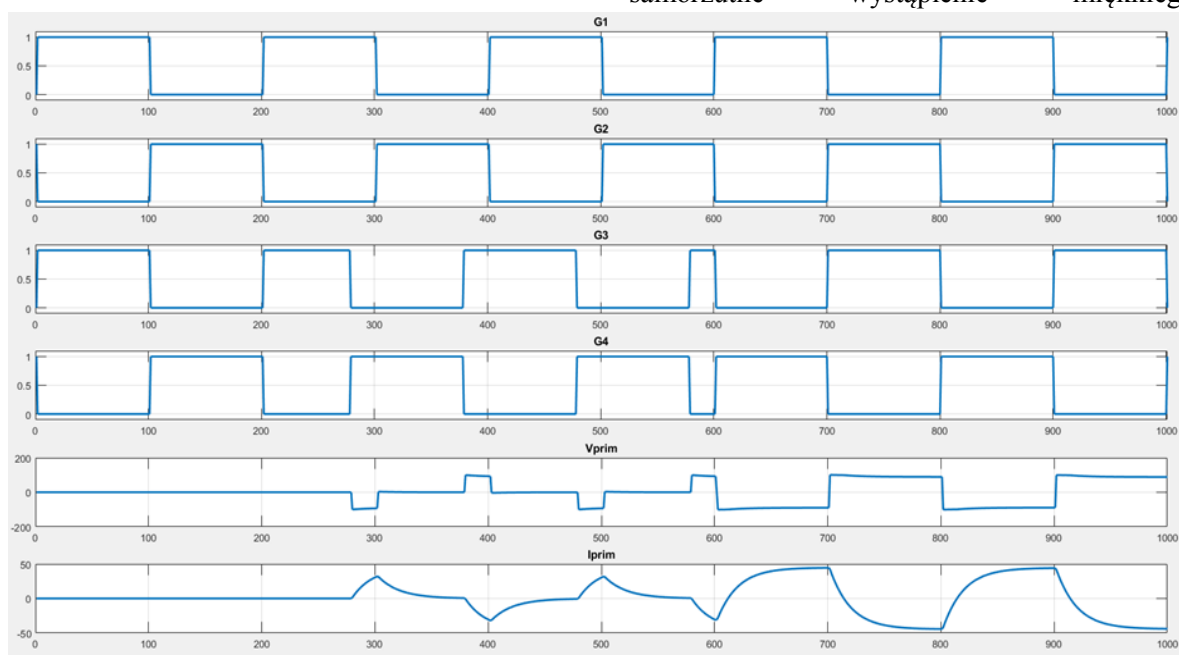
3.2 Sterowanie fazowe PSFB

W sterowaniu fazowym (rys.4) sygnały sterujące są sygnałami prostokątnymi o współczynniku wypełnienia 50%. Sygnały sterujące przeciwnymi tranzystorami są zsynchronizowane, ale przesunięte w fazie o 180° . W ten sposób w danej chwili załączane są (rys.2) dwa dolne, albo dwa górne tranzystory, dołączając oba końce uzwojenia pierwotnego transformatora U_1 albo do napięcia zasilania akumulatora U_2 , albo do punktu zerowego. Napięcie na wejściu transformatora w takiej sytuacji zawsze wynosi zero. Mostek taki jest podzielony na lewą i prawą gałąź. Sterując

energii, pozwalając na przepływ prądu przez transformator, aż do pełnego wysterowania tj. przesunięcia fazowego równego 0° (Rys 5.).

W początkowej fazie sygnały sterujące są rozsunięte, napięcie na uzwojeniu transformatora wynosi zero. Po skokowej zmianie przesunięcia fazowego do 150° pojawiło się przemienne napięcie, pozwalając na przepływ prądu. Następnie skokowo zmniejszono fazę między sygnałami do zera, maksymalnie otwierając okno transferowe i pozwalając na przepływ maksymalnego prądu.

W sterowaniu fazowym w odróżnieniu od sterowania rezonansowego, nie jest możliwe samorzutne wystąpienie miękkiego



Rys. 5 Przebiegi sygnałów sterujących (G1-G3), przebieg napięcia na uzwojeniu pierwotnym transformatora (V_{prim}), przebieg prądu w uzwojeniu pierwotnym transformatora (I_{prim}) przy sterowaniu PSFB

przesunięciem fazowym prawej gałęzi nakłada się na siebie sygnały sterujące lewej i prawej gałęzi mostka powodując, że na wejściu transformatora pojawia się napięcie prostokątne przemienne o amplitudzie równej napięciu na szynie DC zasilającej. Im większe przesunięcie fazowe w prawej gałęzi mostka H, tym dłuższy czas trwania napięcia na transformatorze aż do maksimum 50% okresu taktowania sygnału PWM. Przykładowy układ sterowania fazowego przedstawiony jest na rysunku 4. Przy przesunięciu fazowym równym 180° , uzwojenie pierwotne transformatora jest zwierane naprzemiennie do masy lub do napięcia zasilania. Zmniejszając to przesunięcie zwiększa się czas trwania okna transferu

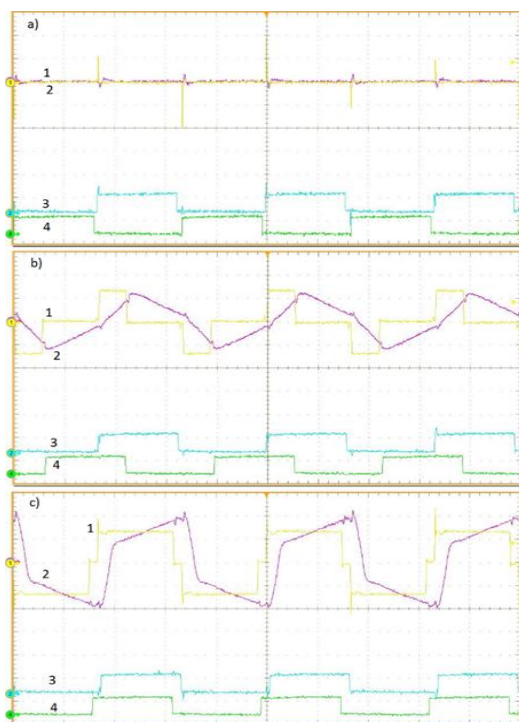
przełączania tranzystorów. Aby wprowadzić ten efekt należy wykorzystać pojemności pasożytnicze tranzystorów w połączeniu z indukcyjnością rozproszenia cewki i tak dopasować sterowanie opóźnieniem załączania kluczy, aby dokonywać przełączania przy zerowym napięciu.

4. Wyniki badań

Po przeprowadzeniu analizy własności układów przekształtnikowych DC/DC na podstawie uzyskanych wyników symulacji, do wykonania prototypu wybrano rozwiązanie, którego schemat ideowy przedstawiony jest na rysunku 4. Podczas budowy wykorzystano gotowe półmostki Mitsubishi CM200DX-24S. Parametry zastosowanego transformatora przedstawiono w tabeli 1.

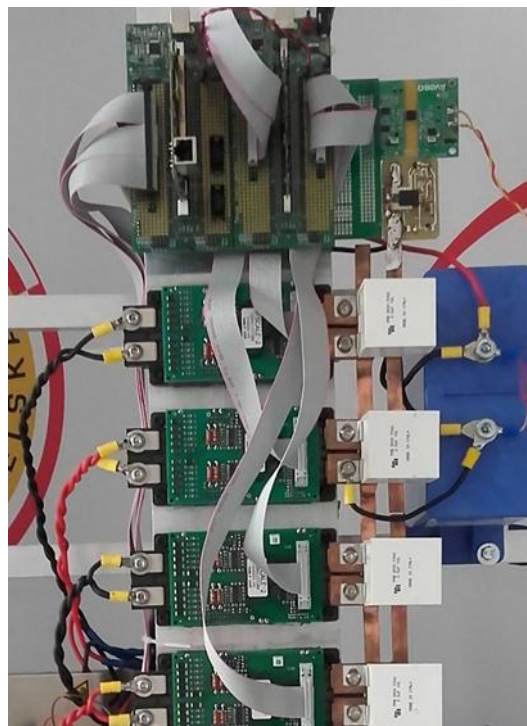
Tabela 1 Parametry transformatora przetwornicy DC/DC

Moc znamionowa P_n [kVA]	30
Napięcie pierwotne U_1 [V]	700
Napięcie wtórne U_2 [V]	6x100
Częstotliwość f [kHz]	25
Masa m [kg]	42



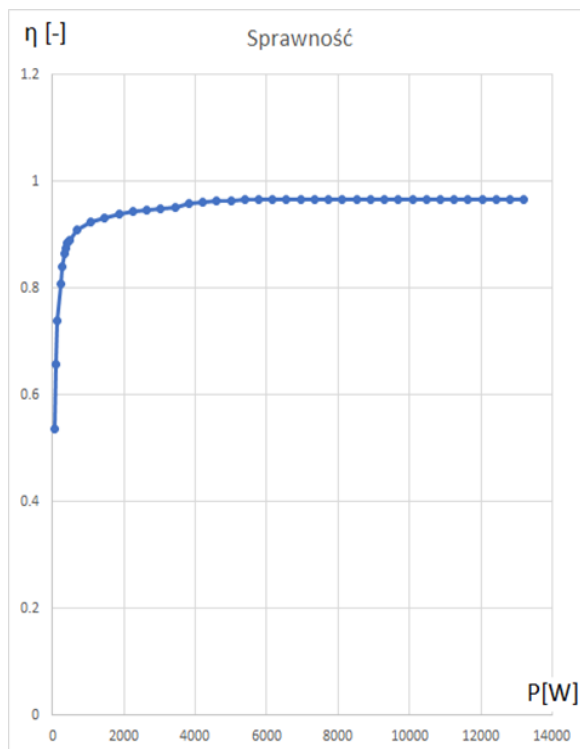
Rys. 7 Przebiegi: 1 - Napięcie na uzwojeniu pierwotnym transformatora, 2 - prąd w uzwojeniu pierwotnym transformatora, 3,4 - sygnały sterujące

Układ sterujący zbudowano na bazie procesora TMS320F28035 firmy Texas Instruments, posiadającego dedykowany układ generacji sygnałów PWM. Opracowane autorskie oprogramowanie pozwala na sterowanie układem w otwartej pętli, w zamkniętej pętli prądowej oraz w zamkniętej pętli napięciowej.



Rys. 6 Prototypowa przetwornica DC/DC zbudowana z półmostków Mitsubishi

Regulator napięcia ma charakterystykę nieliniową, umożliwiając szybkie ładowanie, które dostosowywane jest do poziomu napięć baterii, stąd w zakresie napięć bliskich znamionowemu napięciu baterii ma miejsce ograniczenie szybkości ładowania. Prototypowy układ, po dodaniu elementów pasywnych LC do uzwojeń transformatora oraz modyfikacji oprogramowania, można wykorzystać do testów sterowania częstotliwościowego LLC. Na rys. 7 zaprezentowano przebiegi prądów i napięć na uzwojeniu pierwotnym transformatora, oraz przebiegi sygnałów sterujących przy sterowaniu fazowym. Widoczne zmniejszenie przesunięcia fazowego między sygnałami sterującymi 3,4 powoduje pojawienie się napięcia na transformatorze. Im jest mniejsze przesunięcie, tym większy prąd płynie przez uzwojenie transformatora. Jest to zgodne z wcześniej prezentowanymi wynikami badań symulacyjnych (rys.5).



Rys. 8 Wykres sprawności układu w funkcji obciążenia

Sprawność układu zależy od stopnia jego obciążenia. W początkowej fazie stromo wzrasta i już przy 5 kW zaczyna się stabilizować. Maksymalna sprawność układu podczas ładowania wyniosła 95 % (Rys. 8).

5. Praca stacji ładowania w systemie sterowania i rozliczeń operatora sieci dystrybucyjnej

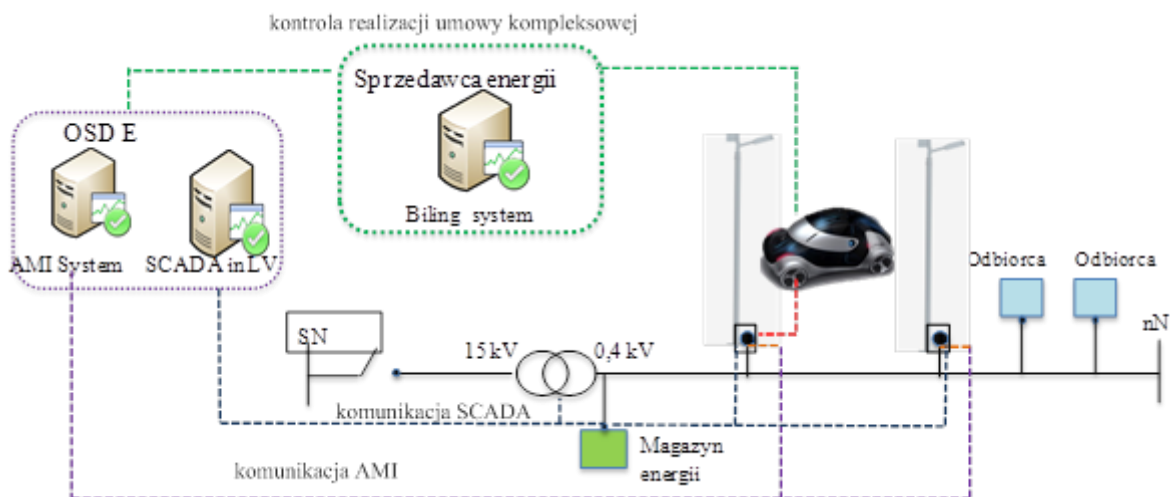
Projektowany układ usługi sprzedaży lub odkupu energii umożliwi włączenie stacji do systemu sterowania i akwizycji danych

operatora oraz systemu zdalnie realizowanych rozliczeń energii. Będzie on posiadać cechy użytkowe, istotne ze względu na wzmocnienie systemu energetycznego poprzez włączenie baterii akumulatorów do potencjalnego, rozproszonego zasobnika energii elektrycznej. Wykorzystanie standardów komunikacyjnych dostosowanych do istniejących na rynku operatorów sieci, umożliwi ich szeroką implementację. Przykładową architekturę systemu przedstawia rysunek 9.

System opomiarowany jest z wykorzystaniem inteligentnych systemów pomiarowych AMI. Komunikacja i rozliczenia z operatorem odbywa się za pomocą rozszerzonego systemu nadrzędnego sterowania i akwizycji danych SCADA. Użytkownik komunikuje się z systemem za pomocą specjalnego interfejsu użytkownika. System rozliczeń dostosowany jest do ogólnych wymagań i uwzględnia rodzaj usługi, umowy pomiędzy operatorem a użytkownikiem oraz tryb pracy.

6. Podsumowanie

Przetestowany algorytm sterowania fazowego pozwolił na osiągnięcie wysokiej sprawności przetwornicy DC/DC. W zakresie bardzo małych obciążeń (rzędu 0,5 kW) widać gwałtowny spadek sprawności. Może okazać się to problematyczne w końcowym etapie ładowania, gdzie wymagane jest powolne ładowanie małym prądem, ale ponieważ dzieje się tak przy bardzo niskim obciążeniu, nie powinno to wywoływać negatywnych skutków. Zarówno zaproponowana topologia, jak i metoda sterowania pozwalają na stosunkowo prostą zmianę kierunku pracy układu, ze



Rys. 9 Architektura systemu ładowania wraz z systemem rozliczeń

względu na jego pełną symetrię. Sterowanie również jest symetryczne: podczas gdy jeden mostek H zadaje napięcie na transformatorze, drugi jest wykorzystywany do pasywnego lub aktywnego prostowania. Zmiana kierunku przesyłania energii wymaga jedynie zamiany ról między mostkami H, bez konieczności zmiany algorytmu. Dzięki temu rozwiązaniu urządzenie może zostać wykorzystane przez operatora systemu dystrybucyjnego do optymalizacji procesu ładowania z poziomu systemu zarządzania SCADA, jak również do pełnego wykorzystania baterii jako zasobników energii do wspomagania sieci elektroenergetycznej.

7. Literatura

- [1] M. Piekarski, J. Drobnik, P. Rybiński "A load adaptive control approach for a zero-voltage-switching DC/DC converter used for electric vehicles", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 3, str. 92 -97, 2014.
- [2] M. Yilmaz and P. T. Krein, "Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 5, pp. 2151-2169, May 2013. DOI:10.1109/TPEL.2012.2212917
- [3] K. Clement-Nyns, E. Haesen and J. Driesen, "The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 371-380, Feb. 2010. DOI: 10.1109/TPWRS.2009.2036481
- [4] W. Jarzyna; D. Zielinski, "The impact of converter's synchronization during FRT voltage recovery in two-phase short circuits", 2015 *Selected Problems of Electrical Engineering and Electronics (WZEE)*, Kielce 2015, pages: 1 - 6, DOI: 10.1109/WZEE.2015.7394043
- [5] Jarod C. Kelly, Jason S. MacDonald, Gregory A. Keoleian, Time-dependent plug-in hybrid electric vehicle charging based on national driving patterns and demographics, *Applied Energy*, Volume 94, 2012, Pages 395-405, ISSN 0306-2619
- [6] K. Fatyga; D. Zieliński, "Comparison of main control strategies for DC/DC stage of bidirectional vehicle charger", *2017 International Symposium on Electrical Machines (SME)*, Naleczow Poland 2017, pages: 1 - 4, DOI:10.1109/ISEM.2017.7993585
- [7] F. J. Nome and I. Barbi, "A ZVS clamping mode-current-fed push-pull DC-DC converter," *Industrial Electronics, 1998. Proceedings. ISIE '98. IEEE International Symposium on*, Pretoria, 1998, pp. 617-621 vol.2. DOI: 10.1109/ISIE.1998.711684
- [8] S. Inoue and H. Akagi, "A Bidirectional DC-DC Converter for an Energy Storage System With Galvanic Isolation," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 6, pp. 2299-2306, Nov. 2007. DOI: 10.1109/TPEL.2007.909248
- [9] F. Musavi, M. Craciun, D. S. Gautam, W. Eberle and W. G. Dunford, "An LLC Resonant DC-DC Converter for Wide Output Voltage Range Battery Charging Applications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 12, pp. 5437-5445, Dec. 2013. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2241792
- [10] K. Jin and X. Ruan, "Hybrid Full-Bridge Three-Level LLC Resonant Converter: A Novel DC-DC Converter Suitable for Fuel-Cell Power System," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1492-1503, Oct. 2006. DOI: 10.1109/TIE.2006.882020