

Maksymalizacja sprawności zestawu przekształtników AC/DC i DC/DC poprzez zmiany napięcia obwodu pośredniczącego

Streszczenie. Praca omawia sposób sterowania zestawem przekształtników energoelektronicznych AC/DC i izolowanego DC/DC wchodzących w skład dwukierunkowego systemu ładowania pojazdów elektrycznych. Jego cechą jest sposób doboru napięcia obwodu pośredniczącego, który jest prowadzony, aby rezonansowy przekształtnik DC-DC pracował w najkorzystniejszym punkcie pracy. Artykuł jest ilustrowany wynikami badań laboratoryjnych modelu systemu ładowania o mocy 10 kW.

Abstract. The work discusses the control method for a system of AC/DC and DC/DC power converters that are part of a bidirectional EV charging system. Its feature is the method of selecting the voltage of the DC link, which is conducted in such a way that the resonant DC-DC converter works at the most favorable operating point. The article is illustrated with the results of laboratory tests of a 10 kW charging system model. (Maximizing the efficiency of the AC/DC and DC/DC converters by changing the DC-link voltage).

Słowa kluczowe: przekształtniki AC/DC, przekształtniki DC/DC, algorytmy sterowania, ładowarka.

Keywords: AC/DC power converters, DC/DC power converters, control algorithms, EV charger.

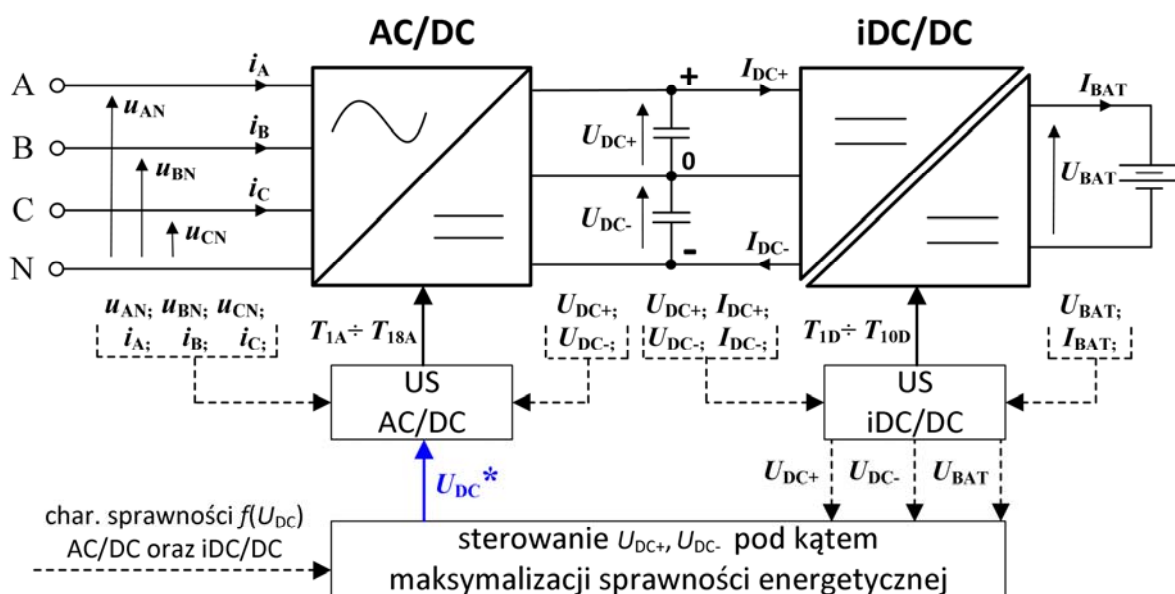
Wstęp

W systemach przekształtnikowych połączonych przez obwód pośredniczący pracuje się zwykle przy stałej wartości zadanej napięcia. Takie podejście zdecydowanie upraszcza proces projektowania samych układów przekształtnikowych, jak i ich systemów sterujących - przykładem mogą tu być układy napędowe z falownikami napięcia [1]. Podobnie jest w przypadku systemów ładowania, gdzie prostownik sieciowy (AC/DC) dostarcza stabilizowanego napięcia stałego dla izolowanych przekształtników prądu stałego (DC/DC) [2], [3]. Na tej podstawie odbywa się regulacja prądu lub napięcia baterii zgodnie z wybranym trybem ładowania lub rozładowania baterii. W literaturze można jednak spotkać układy, gdzie napięcie obwodu pośredniczącego jest cyklicznie zmienne, co pozwala ograniczyć częstotliwość przełączania w prostowniku sieciowym, a przez to zwiększyć jego sprawność energetyczną [4]. Niestety, podejście to jest dużo bardziej złożone, a wymagania wobec przekształtnika są bardziej wygórowane. Podobnie jest z układami o quasi-jednostopniowym przekształcaniu, gdzie prostowniki

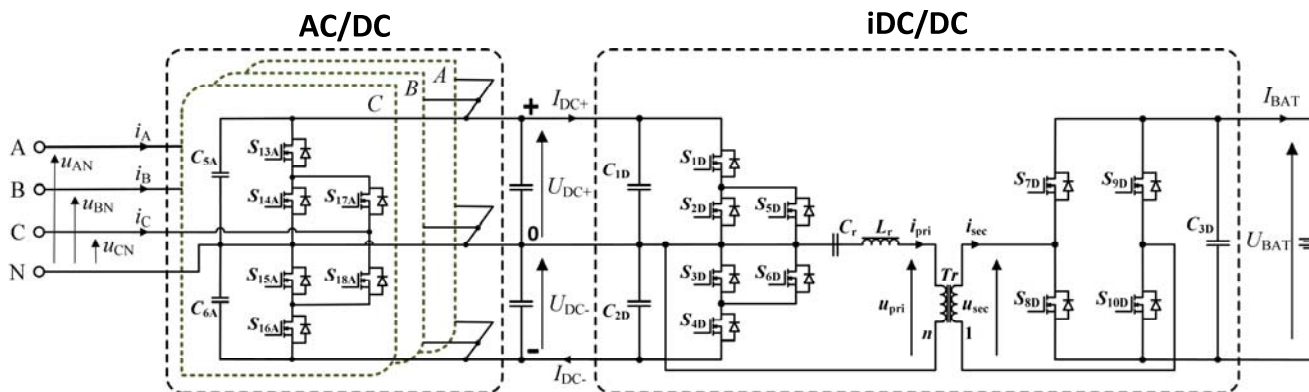
pracują z częstotliwością sieciową, ale napięcie obwodu pośredniczącego zmienia się w szerokim zakresie [5].

W poniższym artykule autorzy proponują poprawienie sprawności energetycznej systemu ładowania pojazdów elektrycznych poprzez dopasowywanie napięcia obwodu pośredniczącego do stanu naładowania baterii. System ten składa się z prostownika sieciowego (AC/DC) oraz rezonansowego, izolowanego przekształtnika prądu stałego (iDC/DC) - schemat blokowy pokazano na Rys. 1. Dzięki takiemu podejściu izolowany przekształtnik iDC/DC znajduje się w najkorzystniejszym punkcie pracy i może osiągać maksymalną sprawność nie tylko w wybranych punktach pracy, ale w trakcie całego cyklu ładowania lub rozładowania.

W części pierwszej artykułu scharakteryzowano system i proponowany algorytm sterowania aby w kolejnym rozdziale omówić układ laboratoryjny oraz cykl badań eksperymentalnych przeprowadzonych przy dwóch sposobach sterowania - klasycznym ze stałym napięciem obwodu pośredniczącego oraz proponowanym z dopasowywaniem tegoż napięcia do napięcia baterii.



Rys. 1 Zestaw przekształtników i proponowany układ sterujący.



Rys. 2 Schemat elektryczny zestawu przekształtników AC/DC (ANPC) oraz iDC/DC (SRDAB) do ładowania baterii pojazdów elektrycznych

System ładowania i jego sposób sterowania

Zestaw przekształtników, którego schemat elektryczny zaprezentowany jest na Rys. 2, stanowi część większego, skalowalnego, systemu ładowania baterii pojazdów elektrycznych opisanego szczegółowo w [6]. Układ wyposażony jest także w magazyn energii, który umożliwia zwiększenie mocy ładowania baterii pojazdów elektrycznych poprzez jednoczesne ładowanie baterii z dwóch źródeł. W celu zapewnienia bezpieczeństwa, pojazdy elektryczne ładowane są poprzez izolowane przekształtniki DC/DC (iDC/DC). Wszystkie przekształtniki w systemie połączone są poprzez trzypiętowy obwód napięcia pośredniczącego DC o nominalnej wartości 1,5 kV (+/- 750 V). Dzięki strukturze trójportowej i przyjętym topologiom przekształtników możliwe jest przekształcanie energii w zakresie średnich napięć przy wykorzystaniu dyskretnych, niskonapięciowych tranzystorów MOSFET z węgla krzemu (SiC). Jednocześnie praca przy wyższych napięciach w systemach o dużej mocy umożliwia obniżenie wartości przewodzonych prądów, a więc i strat przewodzenia, co pozwala na uzyskanie wyższych sprawności przekształcania energii. W dalszej części pracy zostanie przedstawiona analiza pracy przekształtników AC/DC oraz iDC/DC w trybie ładowania baterii pojazdu elektrycznego pod kątem maksymalizacji sprawności energetycznej wspomnianego zestawu przekształtników.

W przedstawionym stacjonarnym systemie ładowania baterii pojazdów elektrycznych [6] jako przekształtnik sieciowy (Rys. 2) zastosowano trójfazową topologię ANPC (ang. Active-Neutral-Point-Clamped), którego projekt, dobór parametrów i działanie szczegółowo opisano w [7]. Przekształtnik taki umożliwił dwukierunkowe przekazywanie energii oraz trzy poziomy napięcia po stronie wyjściowej. Moc znamionowa zbudowanego przekształtnika sieciowego wynosi 20 kW. W celu ładowania baterii pojazdów elektrycznych z wysoką sprawnością jako przekształtnik iDC/DC zastosowano układ podwójnego mostka aktywnego z szeregowym obwodem rezonansowym SRDAB (ang. Series-Resonant Dual-Active-Bridge), którego schemat przedstawiono na Rys. 2. Od strony obwodu pośredniczącego zastosowano gałąź ANPC, natomiast od strony baterii mostek H. Szczegółowy opis, dobór parametrów obwodu rezonansowego, metody sterowania i działanie zbudowanego układu SRDAB znajduje się w [8], [9]. Topologia ta również umożliwia pracę dwukierunkową, a dodatkowo izoluje baterie pojazdów elektrycznych od pozostałej części systemu ładowania, co zwiększa bezpieczeństwo użytkownika ładowarki. Moc znamionowa zbudowanego przekształtnika iDC/DC wynosi 10 kW.

Zestaw przekształtników ANPC oraz SRDAB wykorzystywany jest do ładowania baterii o napięciu znamionowym równym 700 V. Bateria taka składa się z 206

ogniw 10 Ah LiFePo4 [10], [11]. Wartość minimalna napięcia pojedynczego ogniwa opowiadająca pełnemu rozładowaniu wynosi 2,9 V. Natomiast naładowane ogniwo charakteryzuje się napięciem 3,4 V. Przekroczenie powyższych wartości może doprowadzić do uszkodzenia i degradacji baterii. Do podstawowych zalet baterii LiFePo4 należy zaliczyć nie palność, płaską charakterystykę napięciową w całym zakresie ładowania baterii, a także możliwość ładowania i rozładowania prądem przekraczającym trzykrotną wartość pojemności ogniwa. Podstawowe parametry pojedynczego ogniwa oraz przyjętej baterii o napięciu znamionowym 700 V przedstawiono w Tab. 1.

Tabela 1. Charakterystyka ogniwa i stosu o napięciu znamionowym 700 V.

Parametr	Wartość	Jednostka
Napięcie minimalne ogniwa $U_{CELLmin}$	2,9	V
Napięcie maksymalne ogniwa $U_{CELLmax}$	3,4	V
Liczba ogniw w baterii n	206	-
Pojemność baterii C	10	Ah
Napięcie znamionowe baterii U_{BATn}	700	V
Napięcie minimalne baterii U_{BATmin}	600	V
Maksymalny prąd ładowania baterii I_{BATmax}	10	A

W literaturze opisane zostały różne scenariusze ładowania baterii pojazdów elektrycznych [12], [13]. Najczęściej wyróżnić można trzy podstawowe tryby pracy: tryb ładowania ze stałym prądem CC (ang. constant current), przy stałym napięciu CV (ang. constant voltage) oraz ze stałą mocą CP (ang. constant power). Tryb CC najczęściej stosowany jest w początkowej fazie ładowania baterii, gdy jej napięcie (U_{BAT}) jest niższe od wartości nominalnej (U_{BATn}). Utrzymuje się wtedy stałą wartość prądu ładowania baterii (I_{BAT}), podczas gdy napięcie na baterii narasta. W związku z tym wraz ze wzrostem wartości U_{BAT} zwiększa się także moc ładowania baterii P_{BAT} .

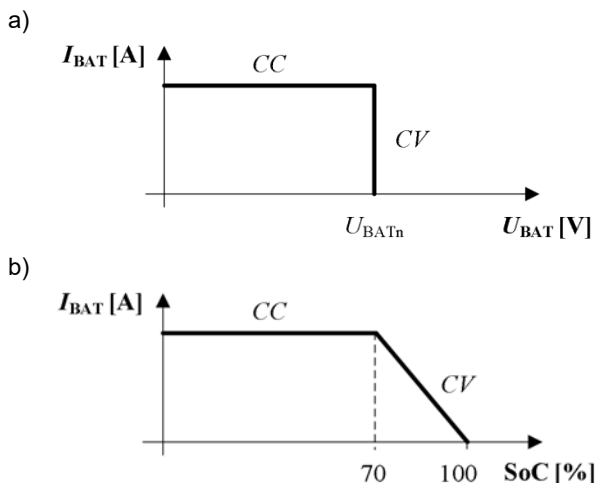
W chwili osiągnięcia przez baterię napięcia U_{BATn} jej poziom naładowania SoC (ang. State of Charge), w zależności od typu baterii, wynosi zazwyczaj od 60% do 80%. W takim stanie, pomimo osiągnięcia napięcia znamionowego U_{BATn} , napięcia na poszczególnych ogniwach baterii nie są jednakowe. Aby w pełni naładować baterię (SoC = 100%) i zbalansować napięcia na poszczególnych ogniwach stosowany jest tryb CV. W takiej sytuacji utrzymywane jest stałe napięcie baterii podczas gdy prąd ładowania I_{BAT} stopniowo maleje, co skutkuje zmniejszaniem mocy ładowania baterii.

W trybie CP prąd i napięcie ładowania baterii są zmieniane w ten sposób, aby utrzymać stałą moc ładowania. Tryb CP zazwyczaj wykorzystywany jest gdy prąd ładowania baterii, wynikający z maksymalnej mocy ładowarki, jest niższy, niż

dopuszczalny prąd ładowania danej baterii. Dzięki temu uzyskuje się najkrótszy możliwy czas ładowania baterii w danej aplikacji. Taki sposób ładowania może być stosowany zarówno gdy U_{BAT} jest mniejsze od U_{BATn} oraz w stanie gdy bateria osiągnie swoje napięcie znamionowe.

W dalszej części artykułu zostanie przyjęty profil ładowania baterii, w którym do czasu osiągnięcia przez baterię napięcia znamionowego U_{BATn} zastosowany jest tryb ładowania CC, natomiast po osiągnięciu przez napięcie baterii wartości równej U_{BATn} , bateria ładowana jest w trybie CV. W przyjętym profilu ładowania baterii litowo-żelazowo-fosforanowej osiągnięcie przez napięcie baterii wartości U_{BATn} jest tożsame z SoC równym 70%. Przyjęty profil ładowania baterii w funkcji napięcia baterii U_{BAT} , a także stanu naładowania baterii SoC przedstawiony jest na Rys. 3.

Czas ładowania baterii zależy od wartości prądu ładowania I_{BAT} , a w przypadku gdy prąd ten jest kontrolowany, napięcie, z którego ładowana jest bateria (U_{DC} – Rys. 1) nie ma wpływu na czas ładowania baterii. Jednakże, wartość napięcia U_{DC} ma istotny wpływ na warunki pracy oraz sprawność przekształtników sieciowego oraz izolowanego DC/DC. W podstawowym trybie sterowania zespołu przekształtników AC/DC oraz iDC/DC przedstawionym na Rys. 1, na podstawie pomiarów napięć i prądów fazowych (u_{AN} , u_{BN} , u_{CN} , i_A , i_B , i_C) oraz trypoziomowego napięcia obwodu pośredniczącego U_{DC} ($U_{DC} = U_{DC+} + U_{DC-}$), przekształtnik ANPC utrzymuje napięcie U_{DC} na nominalnym poziomie równym 1500 V przy zadanej mocy pobieranej z sieci,ysterowując odpowiednio tranzystory $T_{1A} \div T_{18A}$. Prąd I_{BAT} i moc P_{BAT} ładowania baterii kontrolowane są przez przekształtnik iDC/DC na podstawie pomiarów napięć i prądów po stronie obwodu napięcia pośredniczącego (U_{DC+} , U_{DC-} , I_{DC+} , I_{DC-}) oraz po stronie baterii (U_{BAT} , I_{BAT}). W konsekwencji uzyskiwane jest odpowiednie przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałami sterującymi tranzystorami po stronie nieizolowanej ($T_{1D} \div T_{6D}$) i izolowanej ($T_{7D} \div T_{10D}$) przekształtnika iDC/DC.



Rys. 3 Założony profil ładowania baterii w funkcji: napięcia baterii U_{BAT} a) oraz stanu naładowania baterii SoC b).

W celu optymalizacji warunków pracy i zwiększenia sprawności zestawu przekształtników AC/DC oraz iDC/DC możliwa jest także praca ze zmiennym w czasie napięciem obwodu pośredniczącego U_{DC} . W takim przypadku nadrzędny układ sterowania wybiera z dopuszczalnego zakresu wartość referencyjną napięcia obwodu pośredniczącego U_{DC} , dla której sprawność zestawu będzie najwyższa. Odbywa się to na podstawie pomiaru

napięcia baterii U_{BAT} , napięcia obwodu pośredniczącego U_{DC} oraz charakterystyk sprawności przekształtników AC/DC i iDC/DC w funkcji U_{DC} , co przedstawiono na schemacie na Rys. 1.

Charakterystyki sprawności energetycznej obu przekształtników w funkcji napięcia U_{DC} mogą być wyznaczone w sposób analityczny [14], [15]. Równania pozwalające wyznaczyć sprawność przekształtników AC/DC oraz iDC/DC są jednak skomplikowane i zależne od wielu parametrów. W związku z tym zdecydowano się skorzystać z uproszczonych zależności, a także bazować na wynikach eksperymentów. W przypadku przekształtnika sieciowego wyższe napięcie wyjściowe (U_{DC}) powiązane jest z pracą z niższym współczynnikiem modulacji M co powoduje nierównomierny rozkład strat na tranzystorach oraz wyższe straty łączeniowe [14]. W konsekwencji, przy pracy ze stałą wartością mocy, im wyższe napięcie wyjściowe w przekształtniku ANPC tym mniejsza sprawność przekształcania energii. Natomiast sprawność energetyczna układu SRDAB zależna jest w głównej mierze od wzmocnienia G obwodu rezonansowego oraz jego parametrów. Analiza charakterystyk tego układu przedstawionych w [15] pokazuje, że przy prawidłowym doborze wartości elementów obwodu rezonansowego najlepsze warunki pracy elementów uzyskuje się dla G zbliżonego do 1 co skutkuje najwyższą sprawnością przekształcania energii.

Celem zweryfikowania powyższej analizy i oceny wpływu wartości napięcia obwodu pośredniczącego U_{DC} na sprawność zaproponowanego zestawu przekształtników w dalszej części artykułu zostały przeprowadzone badania eksperymentalne przekształtników o mocy odpowiednio 20 kW (AC/DC) i 10 kW (iDC/DC). Wykonano pomiary sprawności energetycznej przekształtników AC/DC oraz iDC/DC w funkcji stanu naładowania baterii SoC dla profilu ładowania baterii przedstawionego na Rys. 3 przy różnych poziomach napięcia obwodu pośredniczącego U_{DC} – stałym wynoszącym 1500 V oraz zmiennym wynoszącym dwukrotność napięcia baterii U_{BAT} . Drugi z wymienionych profili ładowania baterii zapewniał utrzymanie wzmocnienia obwodu rezonansowego $G = 1$. Finalnie, wykreślono charakterystyki sprawności ładowania baterii przy wykorzystaniu zaproponowanego zestawu przekształtników dla różnych wartości napięć U_{DC} .

Model laboratoryjny o mocy 10 kW

Do przeprowadzenia badań eksperymentalnych sterowania napięciem obwodu pośredniczącego zestawu przekształtników AC/DC oraz iDC/DC w celu maksymalizacji jego sprawności energetycznej wykorzystano prototypowe modele laboratoryjne obu przekształtników zbudowane w ramach wcześniejszych prac w projekcie MoReSiC [6]. Każdy z przekształtników zbudowany jest z wykorzystaniem opracowanego submodułu, który stanowi podstawowy blok energoelektroniczny każdego przekształtnika w systemie [16]. Wszystkie submoduły w omawianym systemie ładowania baterii pojazdów elektrycznych zbudowane są w oparciu o tranzystory MOSFET z węglika krzemu SiC - NTH4L040N120SC1 [17].

Sieciowy przekształtnik AC/DC w topologii ANPC umożliwiła pobieranie energii z sieci trójfazowej oraz przesyłanie energii do sieci o maksymalnej mocy 20 kW. Izolowany przekształtnik SRDAB, również umożliwiła przesyłanie energii zarówno do baterii samochodów elektrycznych jak i jej pobieranie z tychże baterii jednak jego maksymalna moc wynosi 10 kW. Spowodowane jest to założeniem projektowym o równoległym połączeniu przekształtników iDC/DC od strony wejściowej co umożliwiła

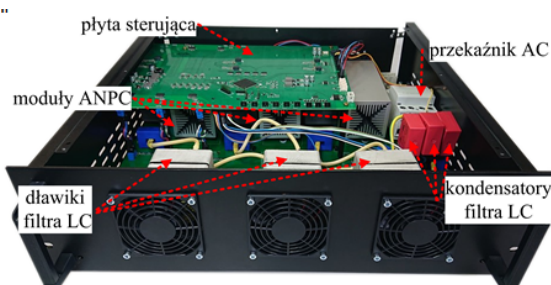
większe możliwości konfiguracji procesu ładowania baterii pojazdów elektrycznych. Możliwe jest równoczesne ładowanie kilku pojazdów z mniejszą mocą lub ładowanie mniejszej ilości pojazdów ale z większą mocą. Przeprowadzone badania dotyczyły pojedynczych przekształtników AC/DC oraz iDC/DC przez co maksymalna moc pracy takiego zestawu przekształtników wynosi 10 kW.

Tabela 2. Główne parametry przekształtnika ANPC

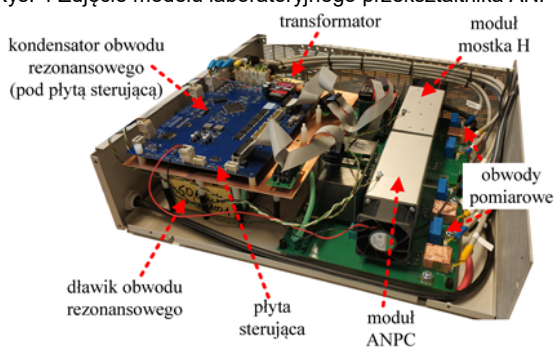
Parametr	Wartość	Jednostka
Moc znamionowa P	20	kW
Nominalne napięcia sieci U_{AN}, U_{BN}, U_{CN}	230	V
Częstotliwość napięcia sieci f_g	50	Hz
Nominalne napięcie U_{DC}	1500	V
Częstotliwość przełączeń f_s	62,5	kHz
Wartość indukcyjności dławików filtra sieciowego L_A, L_B, L_C	220	μ H
Wartość pojemności kondensatorów filtra sieciowego C_{AN}, C_{BN}, C_{CN}	4,7	μ F
Wartość pojemności kondensatorów obwodu pośredniczącego C_{DC}	6x60	μ F

Tabela 3. Główne parametry przekształtnika SRDAB

Parametr	Wartość	Jednostka
Moc znamionowa P	10	kW
Nominalne napięcie U_{DC}	1500	V
Nominalne napięcie baterii U_{BAT}	700	V
Zakres zmian napięcia U_{BAT}	600-700	V
Przekładnia transformatora n	1	-
Częstotliwość przełączeń f_s	65	kHz
Częstotliwość rezonansowa f_r	52,18	kHz
Wartość indukcyjności rezonansowej L_r	162,1	μ H
Wartość pojemności rezonansowej C_r	57,4	nF



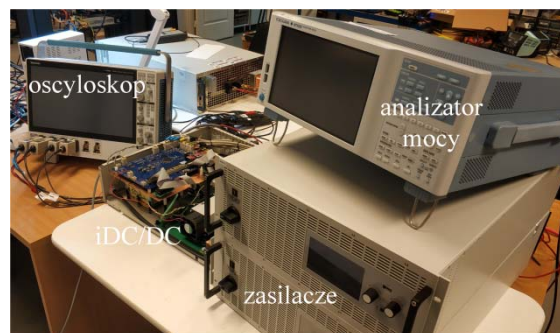
Rys. 4 Zdjęcie modelu laboratoryjnego przekształtnika ANPC.



Rys. 5 Zdjęcie modelu przekształtnika SRDAB o mocy 10kW.

Główne parametry zarówno przekształtnika ANPC, jak i SRDAB zamieszczono odpowiednio w Tab. 2 i 3. Natomiast na Rys. 4 przedstawiono fotografię prototypowego modelu laboratoryjnego przekształtnika ANPC, a na Rys. 5 przekształtnika SRDAB. Szczegółowy opis projektu, budowy i parametrów, a także charakterystyki oraz przebiegi oscyloskopowe uzyskane podczas badań przekształtnika ANPC zamieszczone są w [7], natomiast przekształtnika SRDAB w [8]. Do emulacji różnych profili ładowania baterii wykorzystano dwukierunkowe zasilacze EA-PSBE firmy Elektro-Automatik, natomiast do pomiaru sprawności energetycznej przekształtników zastosowano

precyzyjny analizator mocy WT5000 firmy Yokogawa. Stanowisko laboratoryjne do pomiarów sprawności przekształtników widoczne jest na Rys. 6.

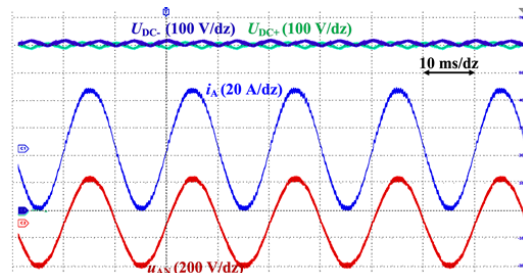


Rys. 6 Zdjęcie stanowiska laboratoryjnego.

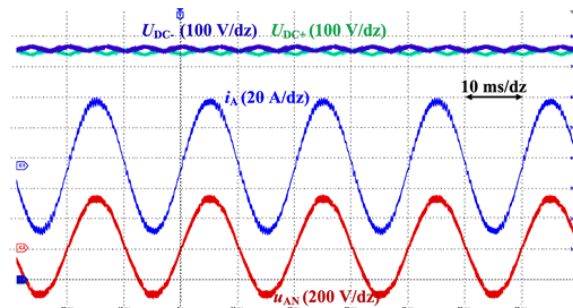
Badania laboratoryjne

W pierwszej kolejności przebadano poprawne działanie przekształtnika ANPC w trybie prostownikowym przy mocy znamionowej i napięciu U_{DC} równym 1200 V co odpowiada pracy z najniższym możliwym napięciem obwodu pośredniczącego przy założonych profilach ładowania i parametrach baterii. Następnie, dla tej samej mocy zweryfikowano działanie układu przy napięciu obwodu pośredniczącego na poziomie 1500 V. Wyniki oscyloskopowe z przeprowadzonych badań przedstawiono na Rys. 7. W obu przypadkach przekształtnik sieciowy działa poprawnie – prąd i napięcie sieci są ze sobą w fazie dzięki poprawnemu działaniu układu sterującego. Co więcej oba przebiegi odznaczają się niską wartością współczynnika THD na poziomie poniżej 2% co jest równoważne z wysoką jakością przebiegów sieciowych. W obu przypadkach uzyskiwana jest także zadana wartość napięcia U_{DC} o tętnieniach nie przekraczających 2,8%. Co więcej, napięcia na obydwu kondensatorach obwodu pośredniczącego są sobie równe w przyjętym zakresie $0,5 \cdot U_{DC} \pm 20$ V.

a)



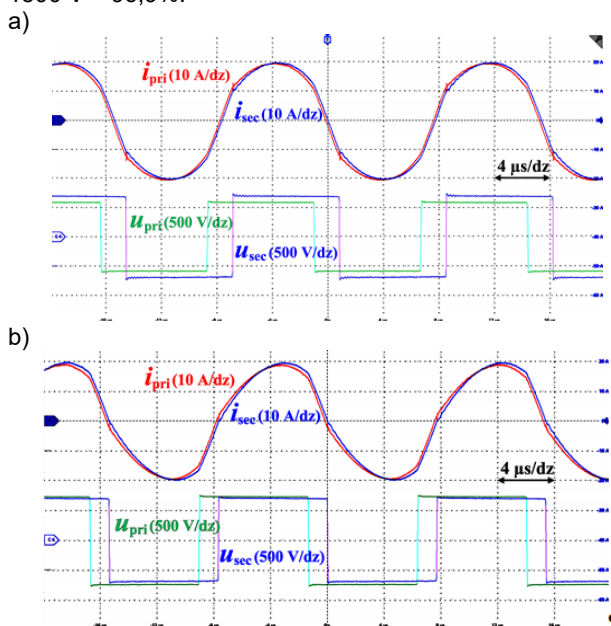
b)



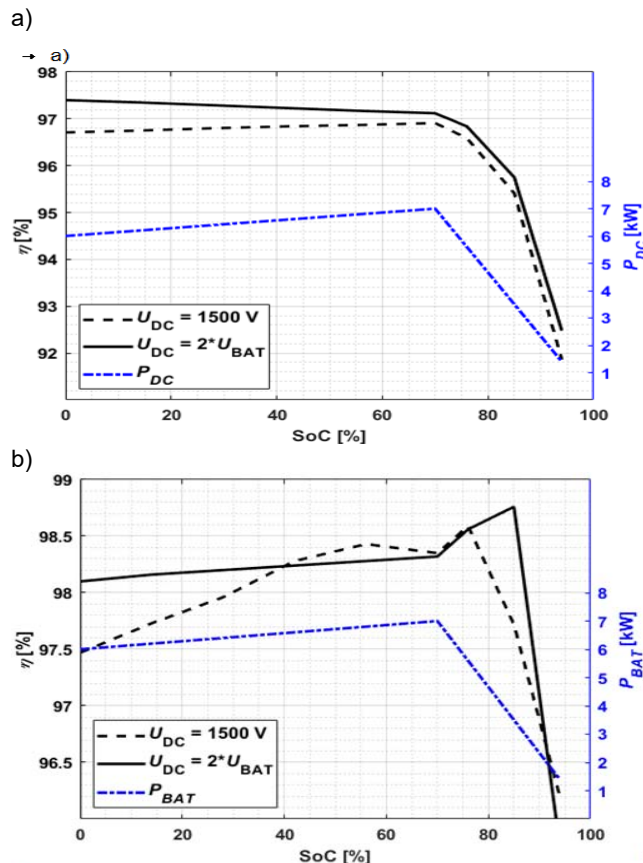
Rys. 7 Charakterystyczne przebiegi w przekształtniku ANPC w trybie prostownikowym przy pracy z mocą 20 kW, napięciu znamionowym sieci 3x400 V oraz napięciu obwodu pośredniczącego U_{DC} równym: 1200 V a) oraz 1500 V b); i_A, u_{AN} – prąd i napięcie fazy A sieci, U_{DC+}, U_{DC-} – napięcia obwodu pośredniczącego.

Następnie przebadano działanie układu SRDAB przy mocy 10 kW, napięciu baterii U_{BAT} równym 700 V oraz napięciach obwodu pośredniczącego U_{DC} na poziomie 1200 V oraz 1500 V. Wyniki tych testów przedstawiono na Rys. 8. Dla obu wartości napięcia U_{DC} przez uzwojenie pierwotne i wtórne transformatora płyną prądy sinusoidalne co korzystnie wpływa na warunki pracy elementów obwodu rezonansowego oraz samego transformatora. Napięcia po stronie pierwotnej i wtórnej mają kształt prostokątny i są przesunięte względem siebie o kąt zapewniający odpowiednią moc na wyjściu układu.

Po potwierdzeniu poprawnej pracy obu przekształtników przy różnych poziomach napięć obwodu pośredniczącego zmierzono sprawności energetyczne przekształtnika AC/DC oraz iDC/DC w funkcji stanu naładowania baterii SoC. Charakterystyki sprawności energetycznej obrazujące wyniki powyższych testów wykreślone są na Rys. 9. Zgodnie z przewidywaniami przekształtnik sieciowy uzyskuje wyższą sprawność dla niższego napięcia U_{DC} w całym zakresie ładowania baterii dla przebadanych mocy dostarczanych do obwodu pośredniczącego P_{DC} (Rys. 9a). Do osiągnięcia napięcia znamionowego baterii U_{BATn} moc dostarczana do obwodu pośredniczącego zmienia się nieznacznie – od 6 do 7 kW. Dla profilu ładowania $U_{DC} = 1500$ V przekształtnik ANPC pracuje ze stałym wzmocnieniem dlatego też w tym zakresie jego sprawność jest niemal stała. W przypadku profilu $U_{DC} = 2 \cdot U_{BAT}$ widać spadek sprawności dla pracy w trybie CC jednak wynosi on poniżej 0,3 punktu procentowego. W chwili uzyskania przez baterię wartości napięcia U_{BATn} moc dostarczana do obwodu pośredniczącego maleje co jest związane ze spadkiem sprawności przekształtnika sieciowego dla wszystkich przebadanych profili ładowania. W początkowej fazie ładowania baterii przy profilu ze zmiennym napięciem U_{DC} zmierzono sprawność wyższą do 0,7 punktu procentowego w porównaniu z profilem o stałej wartości napięcia U_{DC} , przy czym wraz z większym stanem naładowania baterii różnica pomiędzy oboma profilami malała. Maksymalna sprawność ładowania baterii dla profilu $U_{DC} = 2 \cdot U_{BAT}$ wyniosła 97,4% natomiast dla profilu $U_{DC} = 1500$ V – 96,9%.



Rys. 8 Charakterystyczne przebiegi w przekształtniku rezonansowym w trybie ładowania baterii przy pracy z mocą 10 kW, napięciu znamionowym baterii $U_{BAT} = 700$ V i napięciu obwodu pośredniczącego U_{DC} równym: 1200 V a) oraz 1500 V b); i_{pri} , u_{pri} – prąd i napięcie strony niez izolowanej transformatora, i_{sec} , u_{sec} – prąd i napięcie strony izolowanej transformatora.



Rys. 9 Sprawność energetyczna prostownika sieciowego ANPC w funkcji mocy przekazywanej do obwodu pośredniczącego P_{DC} a) sprawność izolowanego przekształtnika DC/DC SRDAB oraz moc ładowania baterii P_{BAT} w funkcji stanu naładowania baterii SoC b) dla różnych wartości napięcia obwodu pośredniczącego U_{DC} .

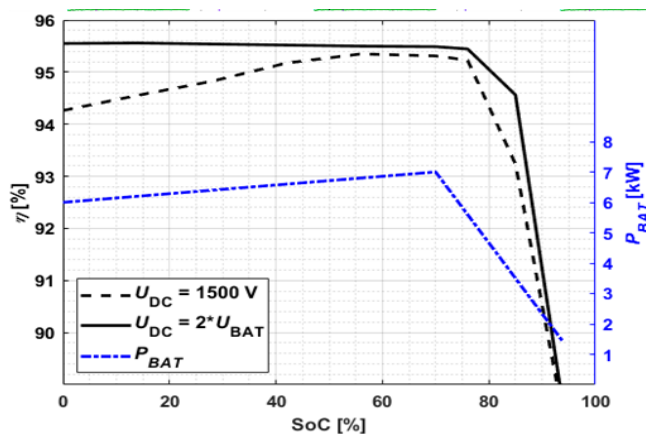
Ze względu na zastosowaną topologię układu SRDAB (gałąź ANPC po stronie napięcia obwodu pośredniczącego oraz mostek H po stronie baterii – Rys. 2) przy wzmocnieniu obwodu rezonansowego $G = 1$ cały przekształtnik odznacza się wzmocnieniem napięciowym równym 0,5. Wobec tego dla napięcia $U_{DC} = 2 \cdot U_{BAT}$ obwód rezonansowy charakteryzuje się wzmocnieniem $G = 1$ w całym zakresie ładowania, natomiast gdy $U_{DC} = 1500$ V wzmocnienie G obwodu rezonansowego zmienia się od wartości 0,8 do 0,933. Na Rys. 9b można zaobserwować, że dla SoC wynoszącego od 0% do 40% wyższa sprawność ładowania baterii została uzyskana przy zmieniającym się napięciu U_{DC} . W tym przedziale ładowania baterii maksymalna różnica pomiędzy oboma profilami wynosi ok. 0,6 punktu procentowego. Po osiągnięciu 40% stanu naładowania baterii do uzyskania U_{BATn} wyższa sprawność ładowania baterii uzyskiwana jest dla napięcia $U_{DC} = 1500$ V (różnica wynosi do 0,15 punktu procentowego). W trybie CV przy pracy z niższymi prądami ładowania I_{BAT} ponownie wyższa sprawność uzyskiwana jest dla profilu ładowania baterii ze zmiennym napięciem U_{DC} . Maksymalna różnica pomiędzy oboma profilami w tym zakresie ładowania wynosi ponad 1 punkt procentowy. Jedynie dla najniższych prądów ładowania (P_{BAT} poniżej 1,4 kW co odpowiada ponad 94% stanu naładowania baterii SoC) wyższe napięcie U_{DC} umożliwiła uzyskanie wyższej sprawności ładowania. Widoczny na Rys. 9b przyrost sprawności energetycznej dla obu profili ładowania po osiągnięciu U_{BATn} przez napięcie baterii związany jest ze zmniejszającą się mocą ładowania baterii P_{BAT} . Maksymalne sprawności ładowania baterii dla przekształtnika iDC/DC przy założonych profilach ładowania

wyniosły blisko 98,8% oraz 98,6% dla napięcia obwodu pośredniczącego odpowiednio $U_{DC} = 2 \cdot U_{BAT}$ oraz $U_{DC} = 1500 \text{ V}$. Charakterystyki przedstawione na Rys. 9b pokazują, że profil ładowania baterii przy $U_{DC} = 2 \cdot U_{BAT}$ nie pozwala uzyskać najwyższej możliwej sprawności energetycznej w całym zakresie ładowania baterii. W związku z tym, kolejnym etapem prac nad przedstawionym sposobem sterowania wartością napięcia obwodu pośredniczącego będzie rozszerzenie go o równania analityczne pozwalające oszacować najkorzystniejszą wartość napięcia U_{DC} w dowolnym punkcie pracy dla wybranego obwodu rezonansowego.

Na podstawie charakterystyk przedstawionych na Rys. 9 wykreślono sprawność energetyczną zestawu przekształtników ANPC oraz SRDAB dla dwóch profili ładowania baterii zaprezentowaną na Rys. 10. Pełne rozładowanie baterii przyjęto dla U_{BAT} równego 600 V. Co więcej, w trybie CC założono ładowanie baterii prądem I_{BAT} równym 10 A, natomiast po osiągnięciu przez baterię napięcia U_{BATn} wynoszącego 700 V zmniejszono prąd ładowania przy zachowaniu stałego napięcia wyjściowego. Jako napięcie obwodu pośredniczącego U_{DC} przyjęto niższe wartości:

- 1) $U_{DC} = 1500 \text{ V}$
- 2) $U_{DC} = 2 \cdot U_{BAT}$

Zgodnie z przeprowadzoną analizą proponowany sposób sterowania dostosowujący wartość napięcia obwodu pośredniczącego w zależności od punktu pracy zespołu przekształtników pozwala na maksymalizację sprawności energetycznej ładowania baterii. W zależności od stanu naładowania baterii SoC, przedstawiona metoda regulacji napięcia U_{DC} umożliwia zwiększenie sprawności przekształcania energii elektrycznej do ok. 1,3 punktu procentowego. Dodatkowo, przy zmieniającym się napięciu U_{DC} zestaw przekształtników AC/DC oraz iDC/DC uzyskuje sprawność ładowania baterii na poziomie powyżej 95% od stanu pełnego rozładowania baterii do 80% naładowania baterii. Przy stałym napięciu U_{DC} równym 1500 V jedynie dla zakresu SoC od ok. 35% do 77% uzyskano sprawność ładowania baterii wyższą od 95%. Maksymalne obliczone sprawności zestawu przekształtników ANPC oraz SRDAB wyniosły 95,6% dla zmiennego napięcia U_{DC} oraz 95,4% dla stałego napięcia obwodu pośredniczącego. W całym zakresie ładowania baterii wyższa sprawność energetyczna zespołu przekształtników uzyskiwana jest dla profilu 2). Wobec tego w dalszym etapie badań zostaną przeprowadzone testy na połączonych ze sobą przekształtnikach AC/DC oraz iDC/DC w celu pełnej weryfikacji przedstawionej metody.



Rys. 10 Charakterystyka sprawności energetycznej zespołu przekształtników AC/DC oraz iDC/DC dla ładowania baterii różnymi napięciami obwodu pośredniczącego U_{DC} w funkcji stanu naładowania baterii SoC.

Wnioski

W niniejszej pracy zaproponowano metodę sterowania napięciem obwodu pośredniczącego U_{DC} zespołu przekształtników celem maksymalizacji jego sprawności energetycznej. Przekształtniki te – prostownik sieciowy (AC/DC) oraz izolowany przekształtnik DC/DC (iDC/DC) – stanowią część większego systemu ładowania baterii pojazdów elektrycznych. W podstawowej wersji algorytmu sterownia oboma przekształtnikami wartość napięcia obwodu pośredniczącego U_{DC} utrzymywana jest na stałym poziomie równym 1500 V. Takie rozwiązanie nie zapewnia jednak najwyższej sprawności ładowania baterii wykorzystując wspomniany zestaw przekształtników. W przedstawionej, rozszerzonej pod kątem maksymalizacji sprawności energetycznej, wersji algorytmu sterowania, na podstawie pomiarów napięć i prądów w systemie, układ sterowania wymusza taką wartość napięcia obwodu pośredniczącego, aby uzyskać najwyższą możliwą sprawność przekształcania energii. Dzięki temu w całym zakresie ładowania baterii możliwe jest zwiększenie sprawności energetycznej zespołu przekształtników podczas ładowania baterii, a maksymalny zarejestrowany przyrost sprawności wyniósł do 1,3 punktu procentowego. W kolejnym etapie badań planowane jest rozszerzenie zaproponowanego sposobu sterowania napięciem U_{DC} o analityczne zależności umożliwiające obliczenie optymalnego napięcia obwodu pośredniczącego w dowolnym punkcie pracy oraz weryfikacja zaproponowanego sposobu sterowania dla połączonych przekształtników AC/DC oraz iDC/DC.

Badania, które doprowadziły do tych wyników, otrzymały dofinansowanie z funduszy EOG/Norweskich 2014–2021.

Autorzy: dr inż. Rafał Miśkiewicz, mgr inż. Przemysław Trochimiuk, dr hab. inż. Jacek Rąbkowski Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: rafal.miskiewicz@pw.edu.pl, przemyslaw.trochimiuk@pw.edu.pl, jacek.rabkowski@pw.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Abu-Rub H., Malinowski M., Al-Haddad K., High-Power Drive Systems for Industrial Applications: Practical Examples, *Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications*, pp. 695–726, 2014, doi: 10.1002/9781118755525.ch22.
- [2] Rivera S., et al., Charging Infrastructure and Grid Integration for Electromobility, *Proc. IEEE*, vol. 111, no. 4, pp. 371–396, 2023, doi: 10.1109/JPROC.2022.3216362.
- [3] Safayatullah M., Elrais M. T., Ghosh S., Rezaei R., Batarseh I., A Comprehensive Review of Power Converter Topologies and Control Methods for Electric Vehicle Fast Charging Applications, *IEEE Access*, vol. 10, pp. 40753–40793, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3166935.
- [4] Anderson J. A., Haider M., Bortis D., Kolar J. W., Kasper M., Deboy G., New Synergetic Control of a 20kW Isolated VIENNA Rectifier Front-End EV Battery Charger, *2019 20th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, pp. 1–8, 2019, doi: 10.1109/COMPEL.2019.8769657.
- [5] Blinov A., Zinchenko D., Rąbkowski J., Wrona G., Vinnikov D., Quasi Single-Stage Three-Phase Filterless Converter for EV Charging Applications, *IEEE Open J. Power Electron.*, vol. 3, pp. 51–60, 2022, doi: 10.1109/OJPEL.2021.3134460.
- [6] Rąbkowski J., et al., Advanced charging system with bipolar DC-link and energy storage, *2022 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE)*, pp. 1–6, 2022, doi: 10.1109/PAEE56795.2022.9966572.
- [7] Harasimczuk M., Kalinowski K., Miśkiewicz R., Kopacz R., Lasek B., Rąbkowski J., Three-Level ANPC Converter as an Input Stage of an EV Charging System with Bipolar DC Link, *PCIM Europe 2022; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and*

- Energy Management*, pp. 1–6, 2022, doi: 10.30420/565822256.
- [8] Trochimiuk P., Miskiewicz R., Rąbkowski J., Naresh Kumar K., Petitsis D., Medium Voltage Series Resonant Dual-Active-Bridge DC-DC Converter for EV Charging System with Bipolar DC-linkPrzemysław, *PCIM Europe 2023; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, pp. 1–9, 2023, doi: 10.30420/566091235.
- [9] Trochimiuk P., Miśkiewicz R., Rąbkowski J., Naresh Kumar K., Petitsis D., Experimental evaluation of SiC-based medium voltage Series Resonant Dual-Active-Bridge three-level DC/DC converters for EV charging, *2023 IEEE 17th International Conference on Compatibility, Power Electronics, and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, pp. 1–6, Jun. 2023.
- [10] Ma Q., Liu R., Tang C., Wang T., Sun J., LiFePO₄ Battery Characteristic Analysis and Capacity Loss Prediction for Constant Current Cycling, *2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pp. 1–5. 2019, doi: 10.1109/VPPC46532.2019.8952209.
- [11] Wang J., Sun Z., Wei X., Performance and characteristic research in LiFePO₄ battery for electric vehicle applications, *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1657–1661, 2009, doi: 10.1109/VPPC.2009.5289664.
- [12] Abdullah Al-Karakchi A. A., Putrus G., Das R., Smart EV charging profiles to extend battery life, *2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, pp. 1–4, 2017, doi: 10.1109/UPEC.2017.8231961.
- [13] Chung H.-C., Charge and discharge profiles of repurposed LiFePO₄ batteries based on the UL 1974 standard, *Sci. Data*, vol. 8, no. 1, p. 165, 2021.
- [14] Liu H., Jiang J., Luo W., A comparative analysis of the three-level NPC and ANPC converter loss distribution, *J. Electr. Syst.*, vol. 11, no. 3, pp. 271–280, 2015.
- [15] Li X., Bhat A. K. S., Analysis and Design of High-Frequency Isolated Dual-Bridge Series Resonant DC/DC Converter, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 4, pp. 850–862, 2010, doi: 10.1109/TPEL.2009.2034662.
- [16] Kopacz R., Harasimczuk M., Lasek B., Miśkiewicz R., Rąbkowski J., All-SiC ANPC Submodule for an Advanced 1.5 kV EV Charging System under Various Modulation Methods, *Energies*, vol. 14, no. 17, p. 5580, Sep. 2021, doi: 10.3390/en14175580.
- [17] Onsemi, “NTH4L040N120SC1 datasheet,” 2022. <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/nth4l040n120sc1-d.pdf>