

Regeneracyjny układ testowania stacji ładowania pojazdów elektrycznych

Streszczenie. W artykule przedstawiono układ do testowania stacji ładowania pojazdów elektrycznych prądem stałym. Dzięki zastosowaniu dwukierunkowych przekształtników AC/DC oraz zasobnika energii układ może pracować w trybie rewersyjnym pozwalając na testowanie stacji o mocy przewyższającej moc przyłączeniową w miejscu testowania, natomiast zastosowanie pojazdowego kontrolera ładowania odpowiada za standaryzowaną komunikację pomiędzy testerem a stacją ładowania, emulując tym samym wiarygodnie proces ładowania pojazdów elektrycznych.

Abstract. The article presents testing system for electric vehicles DC charging stations. By applying bidirectional AC/DC converters and energy storage, system can work in reversing mode permitting the charging station tests with power level higher than connection capacity in the test place, while the application of vehicle charging controller is responsible for standardized communication between testing system and EV charging station, emulating reliably charging process of electric vehicles. (**Regenerative testing system for electric vehicles charging station**).

Słowa kluczowe: stacja ładowania; testy obciążeniowe; regeneracja energii.

Keywords: charging station, loading tests, energy regeneration.

Wstęp

Dynamiczny rozwój elektromobilności wymaga rozwoju infrastruktury szybkiego ładowania [1], która będzie w stanie sprostać także rosnącym wymaganiom użytkowników pojazdów elektrycznych. Oznacza to nie tylko bezdyskusyjną potrzebę wzrostu liczby punktów ładowania DC, ale także konieczność skrócenia czasu potrzebnego do naładowania pojazdu.

Tendencja wzrostu pojemności baterii w pojazdach elektrycznych jak i postępujący rozwój w dziedzinie ogniw elektrochemicznych, wymaga coraz to większej mocy ładowania, co w konsekwencji przekłada się na moc znamionową stacji ładujących. Jeszcze kilka lat temu stacje o mocy 50 kW definiowały poziom szybkiego ładowania. Obecnie standardem stają się dyspensery o mocach rzędu od 100 kW do 150 kW, a poziom szybkiego i ultraszybkiego ładowania definiują stacje o mocy w zakresie od 150 kW do 350 kW [2] [3] wyposażone w złącza typu HPC (High Power Charging) chłodzone cieczą. Opisane zjawisko choć w znacznym stopniu sprzyja popularyzacji pojazdów z napędem elektrycznym, to rodzi nowe problemy przed którymi stają nie tylko operatorzy systemów dystrybucyjnych [4], którzy muszą modernizować swoje sieci aby sprostać nowym wyzwaniom w postaci dorywczych obciążeń dużej mocy, ale także producenci infrastruktury ładowania. Począwszy od etapów uruchamiania i testów fabrycznych, kończąc na badaniach oraz testach certyfikujących w tym badaniach dotyczących kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) [5] [6], stacje dużej mocy przechodzą szereg procedur wymagających ich długotrwałego obciążenia, często z mocą znamionową.

Obciążanie stacji ładowania testowym pojazdem elektrycznym nie daje satysfakcjonujących efektów, gdyż w procesie takim moc obciążenia nie może być intencjonalnie ustawiana i jest ściśle zależna od żądania wystosowanego przez pojazd oraz aktualnych możliwości przyłączeniowych stacji. Pojazd stanowiący obciążenie musi być do procesu ładowania testowego przygotowany, to znaczy, że musi wcześniej zużyć energię, co często jest praktykowane przez wykonywanie przejazdów bez konkretnego przeznaczenia. Ponadto czas testu jest ograniczony pojemnością baterii jak i jej stanem naładowania [7].

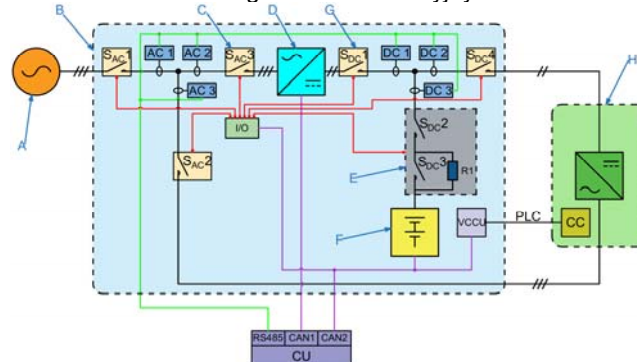
Inną metodą obciążeniową stosowaną w testach stacji ładowania jest obciążenie rezystancyjne, które posiada zasadniczą wadę w postaci generacji dużej ilości ciepła oraz konieczności manualnej regulacji prądu ładowania. Nastawy prądu można dokonać poprzez regulację napięcia

wyjściowego stacji lub przez skokową zmianę rezystancji. W procesie takim odtworzenie warunków ładowania zgodnych z wymaganiami normatywnymi jest mocno utrudnione, podobnie jak automatyzacja testów. W obu wspomnianych wyżej metodach obciążeniowych energia w procesie testowania stacji ładowania jest marnotrawiona [8].

W odpowiedzi na ten problem w artykule zaproponowano regeneracyjny układ testowania pozwalający na pełne obciążenie stacji ładowania ze znacznym ograniczeniem obciążenia po stronie sieci dystrybucyjnej (praca w trybie rewersyjnym) oraz pracy w trybie obciążenia baterijnego pozwalającego na późniejsze oddanie zmagazynowanej energii z powrotem do sieci dystrybucyjnej (tryb regeneracyjny). Dodatkowym atutem wykorzystania zasobnika energii w układzie jest możliwość wykorzystania baterii wtórnego użycia typu B2U (Battery Second Use). Baterie tego typu, które zostały wycofane z eksploatacji w pojazdach elektrycznych po wykonaniu odpowiedniej diagnostyki ich żywotności oraz ponownemu spakietowaniu mogą zostać ponownie wykorzystane co pozwala na przesunięcie czasu ich utylizacji co zarazem ma korzystny wpływ na środowisko.

Struktura proponowanego rozwiązania

Schemat ideowy układu zawierający obwody silnoprądowe prądu stałego oraz przemiennego wraz z elementami sterującymi pokazano na rysunku 1. Układ wyposażony jest w sterownik główny (Control Unit - CU), w którym znajduje się oprogramowanie sterujące całym urządzeniem i odpowiadające za wymianę informacji pomiędzy poszczególnymi elementami układu za pośrednictwem trzech magistral komunikacyjnych.

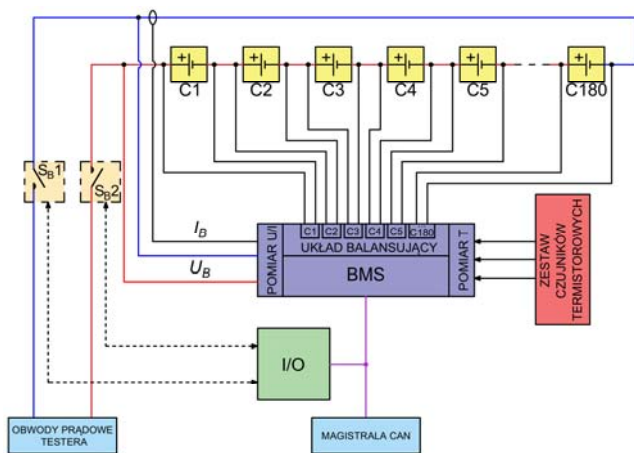


Rys.1. Schemat blokowy regeneracyjnego układu testowania stacji ładowania

A – źródło zasilania prądu przemiennego; B – obszar funkcjonalny testera; C – stycznik prądu przemiennego; D – zespół połączonych równolegle 16 dwukierunkowych modułów przekształtnikowych AC/DC; E – układ miękkiego startu baterii; F – zasobnik energii typu NMC (Nickel Manganese Cobalt) wraz z BMS (Battery Management System); G – stycznik prądu stałego, H – testowana stacja ładowania prądu stałego; VCCU (Vehicle Charge Control Unit) – kontroler ładowania pojazdu, CC (Charging Controller) – kontroler ładowarki; AC1, AC2, AC3 – mierniki parametrów prądu przemiennego; DC1, DC2, DC3 – mierniki parametrów prądu przemiennego; I/O (Input/Output) – moduły wejść/wyjść

Układ przedstawiony na rysunku 1 składa się z kilku podstawowych elementów:

- zasobnika energii z układem nadzoru (rys. 2) odpowiedzialnego za proces magazynowania energii w trybie obciążenia bateryjnego oraz stabilizację obwodu prądu stałego podczas testowania w trybie pracy rewersyjnej,
- 16 dwukierunkowych przekształtników AC/DC odpowiedzialnych za rewers energii do sieci dystrybucyjnej,
- kontrolera ładowania pojazdu wyposażonego w komunikację PLC (Power Line Communication) wykorzystującego HomePlug Green PHY™ odpowiedzialnego za prowadzenie standaryzowanej komunikacji [9][10] pomiędzy stacją ładowania a testerem oraz moderowanie standardowych procesów ładowania,
- sterownika centralnego w postaci komputera odpowiedzialnego za nadzór procesu testowania, wizualizację nastaw i pomiarów oraz komunikację z obsługą stanowiska.



Rys.2. Schemat blokowy zasobnika energii z układem nadzoru, gdzie SB1... SB2 – styczniki prądu stałego baterii; BMS – system zarządzania baterią; I/O – moduł wejść/wyjść, C1...C180 – poszczególne ogniwa zasobnika

W układzie testera zastosowano dwa standardy komunikacji wewnętrznej podłączone do sterownika głównego. Jednym z nich jest szybka komunikacja w standardzie CAN (Controller Area Network), urządzenie wyposażono w dwie takie magistrale. Na jednej magistrali CAN zainstalowano moduły wejść/wyjść (I/O), kontroler ładowania pojazdu (VCCU) oraz system nadzoru baterii (BMS), druga zaś magistrala odpowiada za wymianę danych pomiędzy modułami przekształtnikowymi AC/DC. Drugim standardem komunikacji zastosowanym w układzie testera jest standard RS-485 obsługujący protokół komunikacyjny Modbus. Za pośrednictwem tego standardu sterownik testera pozyskuje informacje ze wszystkich urządzeń pomiarowych znajdujących się na obwodach prądowych całego układu i dokonuje kontroli ustawionych limitów.

Tryby pracy układu

Układ ma możliwość pracy w trzech podstawowych trybach.

• Tryb obciążenia bateryjnego

Tryb ten pozwala na testowanie systemu ładowania obciążeniem bateryjnym, czyli docelowym rodzajem obciążenia dla stacji ładowania. Obciążenie ładowarki baterią charakteryzuje się obniżoną emisją zaburzeń przewodzonych ze strony testera co jest korzystne przy wykonywaniu badań związanych z kompatybilnością elektromagnetyczną. Nie jest jednak pozbawione wad i posiada kilka istotnych ograniczeń. Pierwszym ograniczeniem jest ograniczenie prądu ładowania ze strony baterii, w przypadku większości technologii bateryjnych osiągający wartość bliską 1C, czyli wartość prądu ładowania odpowiadającą wartości pojemności baterii. Przykładowo dla baterii o pojemności 94 Ah prąd ładowania o wartości 1C będzie wynosił 94 A. Dodatkowo ładowanie baterii prądem o wartości 1C pozwala naładować baterię do pełna w ciągu jednej godziny. Drugim ograniczeniem jest ograniczenie związane z maksymalną mocą przyłączeniową w miejscu testowania. Równanie (1) przedstawia ustalenie limitu maksymalnego prądu ładowania zależnego od maksymalnej mocy przyłączeniowej w miejscu testowania, aktualnego napięcia na baterii, które jest odczytywane na bieżąco z systemu zarządzania baterią (BMS) oraz zakładanego współczynnika sprawności ładowarki.

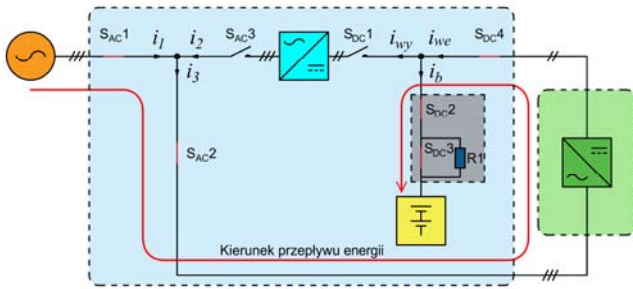
$$(1) \quad i_{\text{lad}} = \frac{P_{\text{max}}}{u_b \cdot \frac{\eta}{100}}$$

gdzie: P_{max} – maksymalna moc punktu przyłączeniowego (wartość w watach), i_{lad} – maksymalny prąd ładowania, którego wartość ograniczona jest maksymalną wartością prądu ładowania baterii (zależność (2)), u_b – aktualne napięcie baterii, η – zakładany współczynnik sprawności badanej ładowarki (wartość w procentach).

$$(2) \quad i_{\text{lad}} \leq i_{\text{bmax}}$$

W pierwszej fazie testu współczynnik sprawności η jest wyznaczany na podstawie potwierdzonego minimalnego współczynnika sprawności pojedynczego modułu przekształtnikowego stacji ładowania. Następnie cały układ w trakcie testowania obciążeniowego poddawany badaniu, w którym wykorzystywany jest pomocy analizator parametrów sieci, dzięki któremu określany jest rzeczywisty współczynnik sprawności całego urządzenia, pozwalając tym samym na ustalenie rzeczywistego limitu prądu ładowania.

Za pośrednictwem stycznikowego układu przełączającego w każdym węźle, obwody testera można konfigurować w taki sposób, że ładowarka zostaje zasilona od strony zasilania AC bez konieczności włączenia modułów przekształtnikowych (włączone styczniki S_{AC1} oraz S_{AC2}). Po stronie DC obwód silnoprądowy modułów jest także odseparowany w tym stanie pracy, dlatego ładowarka połączona jest bezpośrednio tylko z magazynem energii (włączone styczniki S_{DC4} , S_{DC2} oraz S_{DC3}). Ze względów bezpieczeństwa we wstępnej fazie ładowania układ złożony ze stycznika S_{DC3} oraz rezystora dużej mocy R1 włączany jest z opóźnieniem 5 sekund od wystawienia przez ładowarkę żądanego napięcia przez tester. Zastosowanie takiej procedury pozwala na zmniejszenie prądu wyrównawczego spowodowanego różnicą potencjałów między baterią, a ładowarką, dlatego układy tego typu określa się układami miękkiego startu systemu bateryjnego.

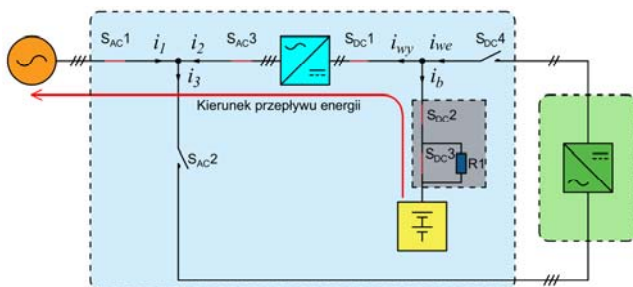


Rys.3. Stan łączników oraz przepływ energii w trybie baterijnym

W konfiguracji przedstawionej na rysunku 3 przewidziano możliwość pominięcia odczytywania wartości z niektórych elementów pomiarowych, co upraszcza aplikację od strony pozyskiwania informacji z układu. Spowodowane jest to rozpięciem prądów w obwodzie, ponieważ $i_1=i_3$ natomiast $i_{we}=i_b$, wtedy $i_2=0$ oraz $i_{wy}=0$, co po stronie AC umożliwia na odczytywanie wartości tylko z jednego licznika (AC1 lub AC3), a po stronie DC z jednego przetwornika pomiarowego (DC2 lub DC3). Istotnym ograniczeniem tego trybu pracy jest ograniczony czas testu zależny od początkowego stanu naładowania baterii, prądu ładowania (obciążenia stacji ładowania) oraz maksymalnej pojemności zasobnika. Czas testu jest optymalizowany poprzez każdorazowe uprzednie rozładowanie baterii (tryb regeneracyjny) przed wywołaniem trybu baterijnego.

• *Tryb regeneracyjny*

Jest to tryb wykorzystywany do rozładowania baterii i umożliwiający przygotowanie stanowiska testowego do pracy z odpowiednimi parametrami początkowymi np. ustalane jest początkowe napięcie obwodu DC. Wartość napięcia do jakiego zasobnik energii ma zostać rozładowany ustawiana jest z poziomu programu sterującego za każdym razem w bezpiecznym dla zasobnika zakresie (powyżej wartości minimalnej). Ważną zaletą tego trybu pracy jest możliwość zwrotu większości zgromadzonej w zasobniku energii z powrotem do sieci elektroenergetycznej. Część energii jest oczywiście tracona ze względu na ograniczoną wartość współczynnika sprawności modułów przekształtnikowych, co niestety przekłada się także na generowanie strat cieplnych w układzie i konieczność jego chłodzenia. Na rysunku 4 przedstawiono konfigurację układu stycznikowego w trybie regeneracyjnym oraz kierunek przepływu energii. W trakcie rozładowywania magazynu energii testowana ładowarka jest odseparowana od zasilania (wyłączone styczniki S_{DC4} oraz S_{AC2}) co zapobiega generacji dodatkowych strat energii.



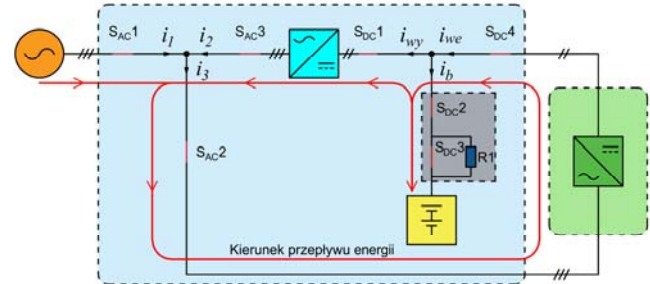
Rys.4. Stan łączników oraz przepływ energii w trybie regeneracyjnym

Limitowanie maksymalnego prądu rozładowywania odbywa się w taki sam sposób jak w przypadku trybu ładowania baterii (równanie (1)), zmienia się tylko układ

pomiarowy wykorzystany do kontroli nastaw. Rozpięcie prądów w układzie przedstawia się następująco: $i_1=i_2$ natomiast $i_b=i_{wy}$, wtedy $i_3=0$ oraz $i_{we}=0$, co po stronie AC stwarza potrzebę odczytywania wartości z jednego tylko licznika (AC1 lub AC2), a po stronie DC z jednego przetwornika pomiarowego (DC1 lub DC3).

• *Tryb rewersyjny*

Tryb rewersyjny wykorzystywany jest do testowania stacji ładowania pełną mocą (moc maksymalna układu wynosi 240 kW, a większość produkowanych ładowarek posiada moc maksymalną w zakresie od 50 kW do 150 kW). Na rysunku 5 pokazano stan łączników oraz kierunki przepływu energii w trybie rewersyjnym.



Rys.5. Stan łączników oraz przepływ energii w trybie rewersyjnym

W trybie tym rozpięcie prądów znacząco różni się od rozpięć przedstawionych w trybach baterijnym i regeneracyjnym. W obwodzie AC oraz w obwodzie DC wszystkie elementy stycznikowe w trakcie pracy układu są zamknięte. Rozpięcie prądów uzależnione jest od wysłanego do stacji ładowania żądania wartości prądu ładowania. Bateria w trybie tym pełni rolę buforową i stabilizuje pracę układu w stanach przejściowych związanych ze zmianą prądu obciążenia. Istotnym parametrem w bilansie prądów jest wartość prądu baterii co przedstawiono w równaniu (3).

$$(3) \quad i_{wy} = i_{we} - i_b,$$

gdzie: i_{wy} – prąd modułów przekształtnikowych, i_{we} – prąd wejściowy od strony DC (prąd ładowania), i_b – prąd baterii (w zakresie od 0 A do 10 A).

Ustawienie wartości tego prądu determinuje rozpięcie prądów zarówno w obwodzie DC jak i AC. W parametryzacji układu uwzględnia się także limity wartości poszczególnych prądów tak, aby zabezpieczyć układ przed przeciążeniem. Pierwszym limitem jaki jest brany pod uwagę, jest prąd wejściowy AC (i_1). W rzeczywistości w trybie rewersyjnym jest to wypadkowy prąd strat w układzie testowym i nie powinien być większy od maksymalnego prądu przyłącza zasilającego. Maksymalną wartość prądu wejściowego przedstawia równanie (4).

$$(4) \quad i_1 \leq i_{1max},$$

gdzie: i_1 – prąd wejściowy AC; i_{1max} – maksymalny prąd przyłącza zasilającego AC.

Drugim limitem jest maksymalna wartość prądu ładowania testowanych stacji ładowania (i_{we}). W omawianym testerze wartość ta jest stała i nie powinna być większa niż 400 A, w rzeczywistości osiągnięta wartość wynosi 373 A. Spowodowane jest to maksymalnymi możliwościami obciążeniowymi obwodu DC oraz maksymalnym możliwym prądem modułów przekształtnikowych AC/DC. Maksymalna wartość prądu ładowania jest także uzależniona od napięcia obwodu DC.

Uruchomienie procesu testowania w tym trybie pracy można podzielić na dwa etapy. W pierwszym etapie następuje inicjalizacja procesu ładowania w trybie obciążenia baterijnego, gdzie prąd ładowania zwiększany jest stopniowo do wartości 50 A. W tym momencie rozpoczyna się etap drugi, w którym włączane są moduły przekształtnikowe ze sterowaniem równoległym z równomiernym rozdzieleniem wartości prądu na wszystkie 16 modułów. Zastosowane uproszczenie pozwala na odpowiednie zbilansowanie rozptyłu prądów w momencie włączenia modułów. Jak już wspomniano zasobnik energii w tym układzie pełni rolę bufora stabilizującego napięcie w obwodzie DC oraz bilansuje rozptyły prądów jeśli stacja ładowania nie nadąża za żądaniem określonej wartości prądu ładowania wystosowanym przez tester. Po włączeniu i ustabilizowaniu się rozptyłu prądów następuje dalszy narost żądanej wartości prądu ładowania, natomiast na modułach ustawiana jest wartość prądu zgodnie z równaniem (3).

W opisanym wyżej sposobie sterowania maksymalny czas testu stacji ładowania jest uzależniony od wartości prądu baterii. Jeżeli prąd baterii będzie równy zero to w układzie realizować można obciążeniowe testy długoterminowe (na przykład 72 godzinne), natomiast jeśli prąd baterii będzie różny od zera, test będzie trwał aż do maksymalnego naładowania baterii. Pozwala to na testowanie stacji ładowania w różnych warunkach lub wykonywanie na przykład testów wydajności układu chłodzenia. Niestety przy pracy z zerowym prądem ładowania występuje problem związany z rozkalibrowaniem się układu BMS w zakresie wyliczania stanu naładowania (*SoC*) za pomocą metody pomiaru ładunku, co wymaga wprowadzania korekt. Rozkalibrowanie układu spowodowane jest sumowaniem się błęd pomiarowego pochodzącego z przetwornika prądowego zasobnika, gdzie przy zerowych wartościach prądu pomiar zostaje zakłócony przez szum przetwornika. Aby skalibrować BMS na nowo należy dokonać pełnego rozładowania baterii i późniejszego naładowania „do pełna” z prądem przekraczającym błąd pomiarowy.

Wyniki badań eksperymentalnych

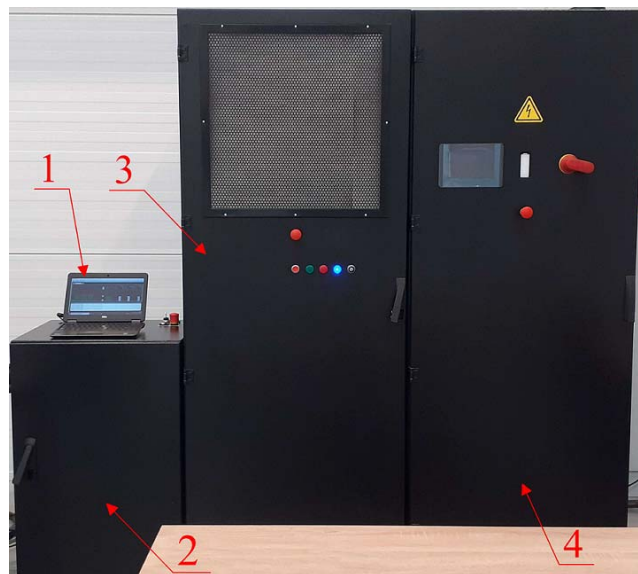
Proponowany układ testowy poddano badaniom eksperymentalnym. Widok stanowiska testowania stacji ładowania pokazano na rysunku 6. Rysunek 7 przedstawia podłączony obiekt w trakcie eksperymentu. Parametry urządzenia oraz magazynu energii przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry stanowiska eksperymentalnego

Parametry obwodów silnoprądowych	
Parametr	Wartość
Napięcie / częstotliwość zasilania	Trójfazowe (TN-S) 3x400 V/50 Hz
Maksymalny prąd zasilania	125 A
Maksymalny prąd obwodu AC	400 A
Maksymalny prądu obwodu DC	373 A
Zakres napięcia roboczego obwodu DC	645-735 V
Maksymalna moc obwodu DC	240 kW
Parametry magazynu energii	
Technologia ogniwi	NMC (LiNiMnCoO ₂)
Napięcie znamionowe	662 V
Maksymalny prąd ładowania	100 A
Maksymalny prąd rozładowania	230 A
Pojemność znamionowa	94 Ah
Pojemność energetyczna	62,3 kWh
Temperatura pracy	0-55 °C

Układ testowania stacji ładowania został zbudowany jako układ modułowy: moduł bateryjny (szafa bateryjna);

moduł przekształtnikowy AC/DC (szafa sterownicza) i moduł przyłączeniowy. Wnętrze zabudowanej szafy sterowniczej przedstawiono na rysunku 8.



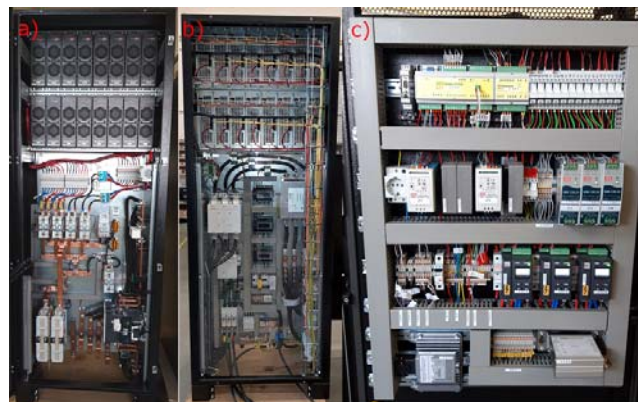
Rys.6. Stanowisko układu testowego

1 – Komputer; 2 – Szafa przyłączeniowa testowanych ładowarek; 3 – szafa sterownicza wraz z modułami przekształtnikowymi; 4 – Szafa z zasobnikiem energii NMC



Rys.7. Ładowarka w trakcie testów na układzie

1 – Badana ładowarka; 2 – Analizatory parametrów sieci; 3 – Wtyk w standardzie CCS2; 4 – Przewody zasilające stację ładowania

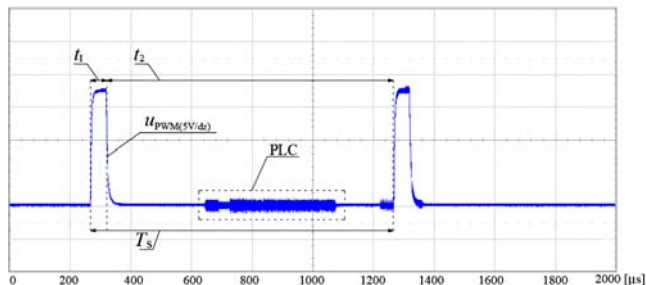


Rys.8. Wnętrze szafy sterowniczej

a) Część silnoprądowa DC; b) Część silnoprądowa DC; c) Część sterownicza układu

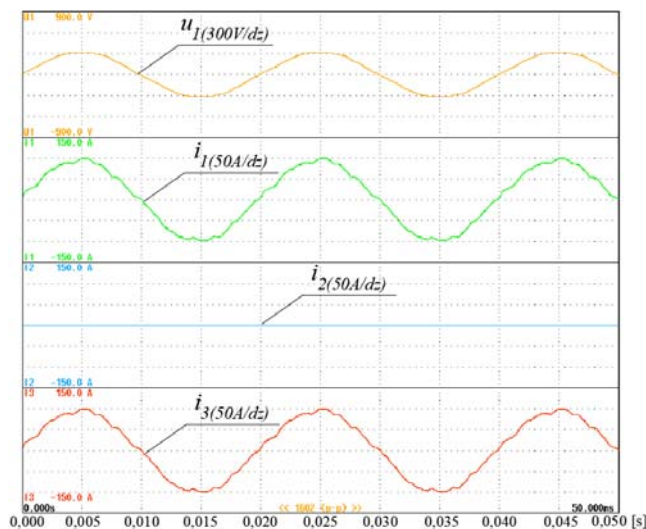
Badania eksperymentalne przeprowadzono dla każdego z trzech trybów pracy układu.

Pierwszy eksperyment obejmował obciążenie ładowarki w trybie bateryjnym. W pierwszej fazie po włożeniu wtyku ładowania do gniazda w standardzie CCS2 [11] następuje standaryzowana komunikacja [12] oparta o sygnał nośny PWM (Pulse Width Modulation) i modulowany sygnał w standardzie PLC. Przykładowy przebieg czasowy komunikacji pomiędzy stacją ładowania [13] a pojazdem pokazano na rysunku 9.



Rys.9. Sygnał nośny PWM z widocznym sygnałem PLC

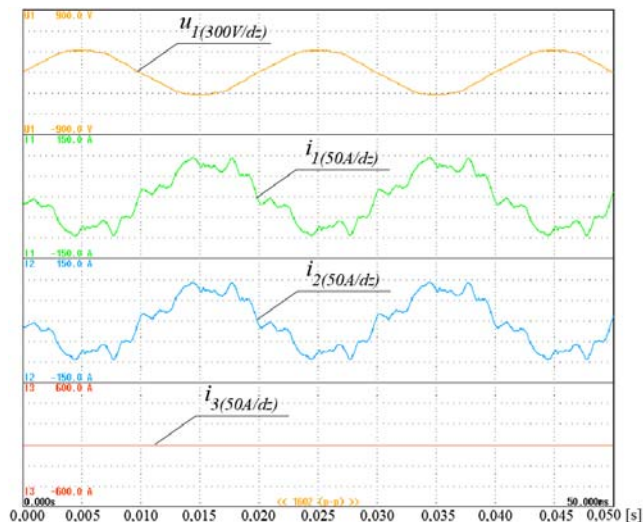
Na rysunku widoczny jest sygnał PWM o częstotliwości 1kHz i współczynniku wypełnienia $D=0,05$ a także obwódka sygnału zmodulowanego (PLC) z ramką komunikacyjną w standardzie HomePlug Green PHY™. W rozpatrywanym eksperymencie prąd ładowania miał wartość 59 A, a napięcie obwodu DC 670 V. Na rysunku 10 pokazano przebiegi prądów oraz napięcia (u_1) dla fazy pierwszej (pomiar napięcia względem przewodu neutralnego).



Rys.10. Przebiegi czasowe prądów oraz napięcia w trybie bateryjnym dla fazy pierwszej, u_1 – napięcie węzła; i_1 – prąd zasilania; i_2 – prąd modułów mocy; i_3 – prąd ładowarki

Jak można zauważyć amplitudy prądów i_1 oraz i_3 są równe, natomiast amplituda prądu i_2 wynosi zero. Spowodowane jest to odłączonym obwodem modułów przekształtnikowych, co oznacza, że prąd zasilania stacji ładowania w takim obwodzie równy jest prądowi zasilania całego układu.

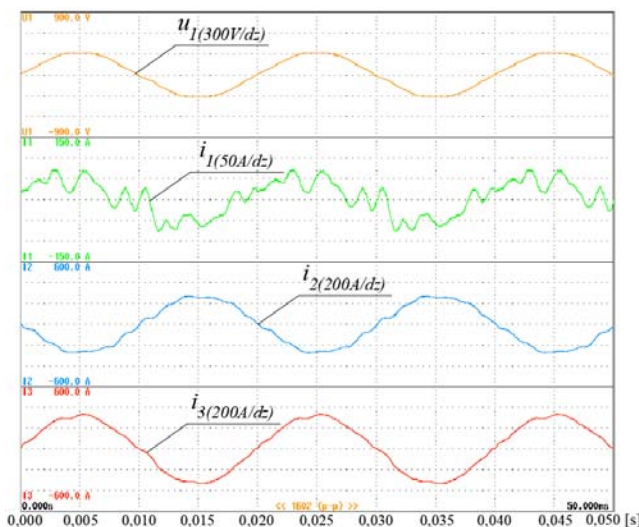
W drugiej fazie eksperymentu przeprowadzono rozładowanie zasobnika energii z prądem o wartości 70 A, napięcie obwodu DC w trakcie eksperymentu wynosiło 647 V. Przebiegi czasowe prądów oraz napięcia wejściowego dla fazy pierwszej pokazano na rysunku 11.



Rys.11. Przebiegi czasowe prądów oraz napięcia w trybie regeneracyjnym dla fazy pierwszej, u_1 – napięcie węzła, i_1 – prąd zasilania, i_2 – prąd modułów mocy, i_3 – prąd ładowarki

Jak można zauważyć na rysunku 11 prąd zasilania i prąd modułów przekształtnikowych są sobie równe, oba prądy są w przeciwfazie do napięcia fazowego, co świadczy o pracy urządzenia w trybie regeneracyjnym tj. rozładowania baterii. Oznacza to, że energia z magazynu jest zwracana do sieci elektroenergetycznej, zgodnie z kierunkiem przepływu energii z rysunku 4. Można także dostrzec, że wartość prądu ładowarki (i_3) wynosi zero, co jest następstwem odłączenia obwodu zasilającego ładowarkę od układu testera za pośrednictwem stycznika S_{AC2} . Widoczne na rysunku odkształcenie prądu spowodowane jest równoległym sterowaniem modułami przekształtnikowymi. Konsekwencją równomiernego wykorzystania przekształtników jest podzielenie ustawianej wartości prądu na wszystkie 16 modułów, a co za tym idzie niepełne wystrojenie układu korekcji współczynnika mocy (Power Factor Correction – PFC) w każdym z nich. Zastosowanie tego rodzaju sterowania pozwala na osiągnięcie dość dużej dynamiki układu, ze względu na występowanie małych opóźnień w układzie sterowania. Zmniejszenie opóźnień spowodowane równoczesnym sterowaniem wszystkimi 16 modułami na raz i są traktowane jak jedno urządzenie, ale osiągnięcie współczynnika mocy o wartości bliskiej 1 osiągane jest dopiero w momencie kiedy wszystkie moduły pracują z pełną mocą. Przeciwnieństwem zastosowanego rodzaju sterowania jest sterowanie sekwencyjne, gdzie każdy moduł jest sterowany osobno. Dodatkowo dla równomiernego czasu pracy przekształtników, za każdym razem włącza się inne moduły w układzie, zmniejszając tym samym efekt starzenia poszczególnych elementów układu.

W ostatnim etapie eksperymentu przeprowadzono badanie układu w trybie rewersyjnym, gdzie stacja ładowania o mocy nominalnej 150 kW została obciążona pełną dostępną mocą. Moc maksymalną badanego układu jaką udało osiągnąć się w tym trybie wyniosła 146 kW przy napięciu obwodu DC 664 V, co oznacza prąd ładowania na poziomie 220 A. Zgodnie z kierunkiem rozptyłu prądów z rysunku 5 prąd baterii (i_b) ustawiono na wartość 1 A. Aby osiągnąć taki rozptył prądów, prąd przekształtników (i_{wy}) został wystrojeny na 219 A. Oscylogramy rozptyłu prądów po stronie AC w trybie rewersyjnym z powyższymi parametrami pokazano na rysunku 12.



Rys.12. Przebiegi czasowe prądów oraz napięcia w trybie rewersyjnym dla fazy pierwszej, u_1 – napięcie węzła; i_1 – prąd zasilania; i_2 – prąd modułów mocy; i_3 – prąd ładowarki

Jak wynika z przebiegów czasowych przedstawionych na rysunku 12, w opisywanym przypadku występuje praca w trybie rewersyjnym, o czym świadczy stosunkowo niewielki prąd po stronie sieci (i_1) względem prądu pobieranego przez stację ładowania (i_3). Spowodowane jest to bilansowaniem z prądem (i_3) generowanym przez przekształtniki dwukierunkowe AC/DC. W procesie chwilowego bilansowania prądów w węźle AC uwidacznia się odkształcenie prądu od strony zasilania. Spowodowane jest ono odkształceniem napięcia zasilającego wpływającego na pracę układu PFC w modułach AC/DC testera jak i w modułach AC/DC stacji ładowania.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono opis regeneracyjnego układu testowania stacji ładowania pojazdów elektrycznych oraz wyniki badań eksperymentalnych w różnych jego trybach pracy. Wyniki eksperymentu potwierdzają założenia konstrukcyjne i funkcjonalne układu. Układ umożliwia przeprowadzanie testów stacji szybkiego ładowania z pełną mocą przy ograniczonej mocy przyłączeniowej. Pozwala także na redukcję zużycia energii na potrzeby takich testów. W trakcie badań stwierdzono kilka problemów związanych z odkształceniami prądu po stronie sieci zasilającej w trybie pracy rewersyjnej jak również problem związany regulacją prądu baterii przy małych jego wartościach. Pewnym ograniczeniem proponowanego układu jest także zakres napięcia przy jakim możliwe jest obecnie prowadzenie testów tj. od 580 V do 747 V (maksymalne wartości napięcia zasobnika energii).

W dalszych pracach autorzy skupią się głównie nad automatyzacją testów a także nad poprawą jakości sterowania układem testowym. Kontynuowane będą także prace nad układem z baterią rekonfigurowalną pozwalającą na testy stacji ładowania w dwóch zakresach napięciowych do 500 V i powyżej 500 V.

Podziękowania

W artykule wykorzystano wyniki badań uzyskane w ramach projektu „Opracowanie innowacyjnego rozwiązania technicznego – terminala ładowania autobusów elektrycznych zasilanego z sieci dystrybucyjnej i

wspomaganego stacjonarnym zasobnikiem energii zbudowanym w oparciu o akumulatory wtórnego użycia (B2U)” współfinansowane ze środków RPO Lubuskie RPLB.01.01.00-08-0033/16.

Autorzy: mgr inż. Łukasz Pilimon, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Automatyki, Elektroniki i Elektrotechniki, ul. Prof. Z. Szafrana 2, 65-516 Zielona Góra, E-mail: l.pilimon@stud.uz.zgora.pl; dr hab. inż. Marcin Jarnut, Biuro Rozwoju, Ekoenergetyka-Polska S.A., ul. Nowy Kisielin - Rozwojowa 7A, 66-002 Zielona Góra, E-mail: marcin.jarnut@ekoenergetyka.com.pl; mgr inż. Marcin Szott, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Automatyki, Elektroniki i Elektrotechniki, ul. Prof. Z. Szafrana 2, 65-516 Zielona Góra, E-mail: m.szott@iee.uz.zgora.pl.

LITERATURA

- [1] Flaszka J., Matuszczyk P. Elektromobilność w Polsce a systemy OZE, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 94 NR 1/2018, DOI: 10.15199/48.2018.01.09
- [2] Szafranski D., Kaznowski R., Gurdek M., Gumiela J. Problemy infrastrukturalne związane z przejściem od napędu spalinowego do elektrycznego w pojazdach samochodowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 97 NR 4/2021, DOI: 10.15199/48.2021.04.20
- [3] Bieliński K., Młodzikowski P. Wybrane wyniki badań przebiegu procesu ładowania akumulatorów pojazdów elektrycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 95 NR 10/2019, DOI: 10.15199/48.2019.10.10
- [4] Kłos M., Zagrajek K., Biczal P., Sosnowski Ł. Problemy przyłączenia do sieci dystrybucyjnej stacji ładowania autobusów elektrycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 95 NR 1/2019, DOI: 10.15199/48.2019.01.44
- [5] Mazurek P. A. Wybrane zagadnienia prawne i techniczne w zakresie emc stacji ładowania pojazdów elektrycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 97 NR 1/2021, DOI: 10.15199/48.2021.01.31
- [6] PN-EN 61851-21-1:2018-02. System przewodowego ładowania pojazdów elektrycznych -- Część 21-1: Wymagania EMC dotyczące przyłącza przewodowego zasilania prądem przemiennym/prądem stałym pokładowych ładowarek pojazdów elektrycznych
- [7] Wang L., Qin Z., Slangen T., Bauer P., Wijk T.V. Grid Impact of Electric Vehicle Fast Charging Stations: Trends, Standards, Issues and Mitigation Measures - An Overview, *IEEE Open Journal of Power Electronics (Volume: 2)*, ISSN: 2644-1314, pp. 56-74, DOI: 10.1109/OJPEL.2021.3054601
- [8] Serna-Montoya L.F., Cano-Quintero J.B., Muñoz-Galeano N., López-Lezama J.M. Programmable Electronic AC Loads: a Review on Hardware Topologies, *2019 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*, DOI: 10.1109/PEPQA.2019.8851542
- [9] PN-EN ISO 15118-3:2016-06. Interfejs komunikacyjny pomiędzy pojazdem a siecią -- Część 3: Wymiana dla warstwy fizycznej i warstwy łącza danych
- [10] PN-EN IEC 61851-1:2019-10. System przewodowego ładowania pojazdów elektrycznych, Część 1: Wymagania ogólne
- [11] PN-EN 61851-21:2002. System przewodowego ładowania (akumulatorów) pojazdów elektrycznych -- Część 21: Wymagania dotyczące połączeń zasilania a.c./d.c. w pojazdach elektrycznych
- [12] PN-EN 61851-24:2014-11/AC1:2015-10. System przewodowego ładowania pojazdów elektrycznych -- Część 24: Cyfrowe przesyłanie danych pomiędzy stacją prądu stałego ładowania elektrycznych pojazdów drogowych i pojazdem elektrycznym w celu kontroli ładowania prądem stałym
- [13] PN-EN 61851-23:2014-11/AC:2016-08. System przewodowego ładowania pojazdów elektrycznych -- Część 23: Stacja ładowania pojazdów elektrycznych prądu stałego