

Solarny Magazyn Energii – rozwiązanie oparte na komercyjnych krzemowych ogniwach słonecznych i superkondensatorach

Streszczenie. W ostatnich latach systemy magazynujące energię uzyskiwaną z odnawialnych źródeł energii budzą coraz większe zainteresowanie. Podstawowym rozwiązaniem jest układ, w którym jako magazyn energii wykorzystywany jest zespół akumulatorów. Rzadko w praktyce funkcjonuje układ hybrydowy, w którym zastosowano bufor w postaci superkondensatorów, którego podstawowym zadaniem jest przejęcie udaru prądowego. Przedstawione rozwiązanie jest nowatorskim podejściem zastosowania superkondensatorów, jako głównego magazynu energii. W artykule przedstawiono inżynierskie rozwiązanie systemu magazynowania energii elektrycznej w superkondensatorach ładowanych z krzemowych ogniw fotowoltaicznych.

Abstract. In recent years, storage systems for energy obtained from renewable energy sources have attracted more and more interest. The basic solution is a system in which a set of accumulators is used as energy storage. A hybrid system is rarely used in practice, in which a supercapacitor buffer is used, whose primary task is to take over the current surge. The presented solution is an innovative approach to the use of supercapacitors as the main energy storage. The article presents an engineering solution of an electric energy storage system in supercapacitors charged from silicon photovoltaic cells. (*Solar Energy Storage - solution based on commercial silicon solar cells and supercapacitors*)

Słowa kluczowe: ogniwo słoneczne, superkondensator, źródło prądowe, system magazynowania energii, fotowoltaika

Keywords: solar cell, supercapacitor, current source, energy storage system, photovoltaics

Wstęp

Magazynowanie energii elektrycznej jest jednym z najbardziej znanych sposobów wyrównywania bilansu popytu i podaży energii w danej chwili. Nie ma znaczenia jakim źródłem energii dysponujemy w danym momencie, odnawialnym (wiatraki, ogniwa słoneczne) czy nieodnawialnym np. spalinowym (zespoły prądotwórcze), możemy poprzez magazynowanie energii zagospodarować nadwyżkę, którą wykorzystujemy w momentach zwiększonego jej zużycia. Podstawowe parametry określające zakres stosowania danego magazynu energii to:

- sposób ładowania i rozładowania;
- głębokość rozładowania;
- czas przechowywania energii (samorozładowanie);
- gęstość energii
- gęstość mocy W/m^3 , (szybkość transferu energii).

Szeroko stosowane magazyny energii oparte o akumulatory (ogniwa elektrochemiczne) posiadają niewątpliwą zaletę, jaką jest długi czas przechowywania energii, ale proces ładowania, rozładowania i głębokość rozładowania muszą być kontrolowane gdyż przekroczenie wartości granicznych parametrów opisujących akumulator może doprowadzić do jego uszkodzenia lub w najlepszym wypadku skrócić czas jego użytkowania. Wad tych pozbawione są superkondensatory, w których jedynym krytycznym parametrem jest napięcie znamionowe pracy (ok. 3 V). Przekroczenie tego parametru prowadzi do zniszczenia superkondensatora w związku z wystąpieniem zjawiska elektrolizy elektrolitu.

W niniejszym artykule przedstawiono inżynierskie podejście do skonstruowania ładowarki solarnej opartej na komercyjnych podzespołach, jakimi są krzemowe ogniwa słoneczne i superkondensatory. Przedstawiono też badania gotowego urządzenia w warunkach laboratoryjnych. Wykreślono jego charakterystyki ładowania, rozładowania i doładowania, określono sprawność całego urządzenia. Wyniki przedstawione w artykule opublikowano w [1] i [2].

Podzespoły

Ponieważ nasze zadanie w ramach realizowanego projektu (TECHMATSTRATEG1/347431/14/NCBR/2018) obejmowało skonstruowanie magazynu energii o wymiarach nieprzekraczających 150 mm x 150 mm przeprowadzono rozeznanie rynku w celu określenia

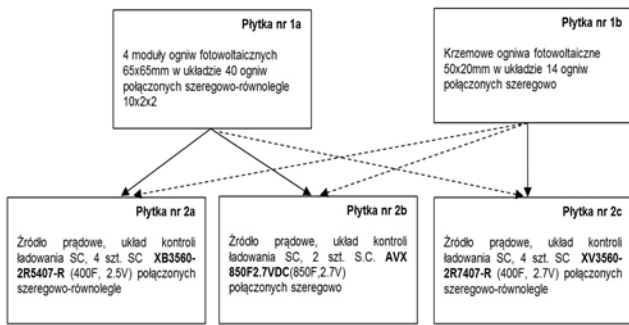
dostępności podstawowych elementów składowych magazynu energii, jakim są ogniwa fotowoltaiczne i superkondensatory, które mogłyby być zastosowane w ładowarce słonecznej. Krzemowe ogniwa słoneczne otrzymano ze sklepu Soltec (Warszawa, Polska), natomiast superkondensatory z firmy Eaton (Cleveland, USA). W modelu magazynu energii przebadano dwa rodzaje ogniw krzemowych i trzy rodzaje superkondensatorów, rys. 1. Wprowadzony podział na płytki PCB (płytką nr 1 - panel PV), (płytką nr 2 - elementy źródła prądowego, układu kontroli napięcia i superkondensatory) umożliwiły budowę modułową ładowarki [1]. W pierwszej fazie projektowania podział taki wymógł zmiany w schematach ideowych poszczególnych bloków, ale wprowadził możliwość dowolnej konfiguracji układu ładowania superkondensatora stałym prądem.

Projekt

Podczas założeń wstępnych, co do parametrów poszczególnych części składowych modelu na bazie parametrów wybranych podzespołów jak: ogniwo fotowoltaiczne, superkondensator, określono następujące parametry cechujące ładowarkę:

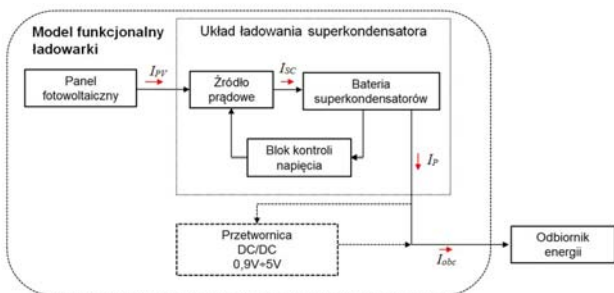
1. prąd ładowania superkondensatora warunkujący prąd wyjściowy z ogniwa fotowoltaicznego;
2. napięcie pracy superkondensatorów U_{SC} , które wynosi od 2,5 V do 2,8 V; (w przypadku 2 superkondensatorów połączonych szeregowo U_{SC} wynosi od 5,0 V do 5,6 V);
3. czas i prąd rozładowania superkondensatora poprzez obciążenie I_o , który warunkuje pojemność superkondensatora, a tym samym ma wpływ na czas i prąd ładowania superkondensatora;
4. pojemność superkondensatora (im większa tym czas ładowania superkondensatora dłuższy).

Wiadomo, że ilość superkondensatorów w układzie baterii liniowo wpływa na ilość energii w niej zmagazynowanej. Różnica jest tylko taka, że w połączeniu szeregowym zwiększeniu ulega napięcie pracy całego układu, a w połączeniu równoległym prąd. Ma to istotne znaczenie z punktu widzenia odbiornika, który charakteryzuje się określonym napięciem (U_{po}) i prądem pracy (I_{po}).



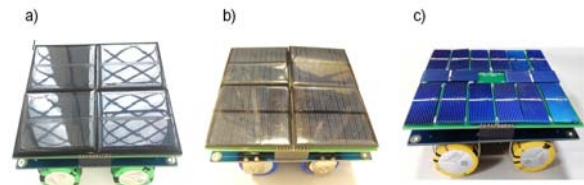
Rys. 1. Modułowa budowa ładowarki solarnej – możliwe konfiguracje

W naszych rozwiązaniach przebadano układy ogniwa fotowoltaicznego z baterią superkondensatorów połączonych szeregowo i szeregowo-równolegle. Najprostszym układem ładowania kondensatora jest układ źródła napięciowego podłączonego do kondensatora przez rezystor. W układzie takim w czasie ładowania kondensatora następuje zmiana potencjału na jego okładzinach. Zmiana ta ma charakter wykładniczy, co oznacza, że prąd ładowania jest największy w początkowej fazie ładowania i stopniowo maleje ze wzrostem napięcia na kondensatorze. W ładowarce solarnej zastosowano źródło prądowe, rys. 2, które ogranicza prąd ładowania superkondensatora do ustalonej wartości $I_{SC} = 100 \text{ mA}$, co powoduje, że superkondensator był ładowany stałym prądem, a napięcie na jego okładzinach wzrastało liniowo. Na rys. 2 w modelu funkcjonalnym ładowarki wyszczególniono ponadto blok kontroli napięcia, który zawiera dodatkowo układ równoważenia napięcia na superkondensatorach połączonych szeregowo [2]. Zapobiegał on przekroczeniu napięcia znamionowego pracy poszczególnych superkondensatorów. Układ ten w postaci dwójnika o silnie nieliniowej charakterystyce w momencie przekroczenia napięcia znamionowego superkondensatora zwiększa prąd płynący przez układ równoważenia napięcia do wartości ok. 500 razy większy niż prąd upływu superkondensatora. Jak przedstawiono na rys. 1 mamy 6 możliwych konfiguracji, w dwóch grupach. Podział na grupy odnosi się do układu panelu fotowoltaicznego, który wykonany był w dwóch wersjach (płytki nr 1) i układu superkondensatora wykonanego w trzech wersjach (płytki nr 2). Pierwszy panel PV zbudowany był w oparciu o 4 mikro panele fotowoltaiczne, z których każdy zawiera 10 x 2 ogniwa fotowoltaicznych połączonych w układzie szeregowo-równoległym. Mikro panele na płytce połączone były również szeregowo-równolegle w układzie 2 x 2. Drugi panel PV zawierał 14 ogniwa fotowoltaicznych połączonych szeregowo. Wykonania te różnią się napięciem obwodu otwartego V_{oc} i prądem zwarcia I_S .



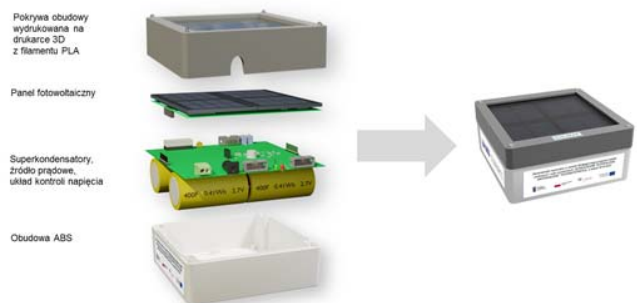
Rys. 2. Schemat blokowy modelu funkcjonalnego ładowarki solarnej

Płytki nr 2 zawiera źródło prądowe, układ kontroli napięcia i superkondensatory. Wykonana została w trzech wersjach, ponieważ dysponujemy trzema rodzajami superkondensatorów różniących się pojemnością i napięciem pracy. Wersja pierwsza zawiera 4 superkondensatory o pojemności $C_{SC} = 400 \text{ F}$ i napięciu pracy $U_{SC} = 2,5 \text{ V}$, przy energii zgromadzonej w superkondensatorach równej $E_{PSC} = 2,8 \text{ Wh}$. Wersja druga, która również zawiera 4 superkondensatory o pojemności $C_{SC} = 400 \text{ F}$, ale innym napięciu pracy $U_{SC} = 2,7 \text{ V}$ i przy energii zgromadzonej w superkondensatorach równej $E_{PSC} = 3,2 \text{ Wh}$. Obie powyższe wersje pracują w układzie szeregowo-równoległym, aby zachować pojemność 400 F przy napięciu pracy $U_{PSC} \Rightarrow 5 \text{ V}$. Ostatnia wersja zaprojektowana została w oparciu o superkondensatory o pojemności $C_{SC} = 850 \text{ F}$ i napięciu pracy $U_{SC} = 2,7 \text{ V}$. Pracują one w układzie szeregowym dając wypadkową pojemność $C_{PSC} = 425 \text{ F}$ i napięcie pracy $U_{PSC} = 5,4 \text{ V}$ przy energii zgromadzonej w superkondensatorach równej $E_{PSC} = 3,4 \text{ Wh}$. Zdecydowano się na takie układy połączeń superkondensatorów szeregowo-równolegle i szeregowo, aby zachować nominalną wartość pojemności całego pakietu $C_{PSC} \Rightarrow 400 \text{ F}$ przy jednoczesnym zwiększeniu jego napięcia pracy $U_{PSC} > 5 \text{ V}$.



Rys. 3. Widok wykonanych modeli ładowarki solarnej bez obudowy

Na rys. 3 przedstawiono widok wykonanych modeli ładowarki solarnej. Model z rys. 3a wykonano na bazie płytki 1a i płytki 2a, model z rys. 3b wykonano na bazie płytki 1a i płytki 2b natomiast ostatni model z rys. 3c wykonano w oparciu o płytki 1b i płytki 2c. W dalszej części zaprojektowano obudowę w całości wydrukowaną na drukarce 3D z materiału ABS. Po wydruku stwierdzono, że obudowa posiada wady, które je dyskwalifikują do zastosowania w modelu. Ponieważ koncepcja obudowy zakładała wykonanie jej z dwóch części, górnej zawierającej płytkę nr 1 z panelem fotowoltaicznym i dolną zawierającą płytkę nr 2 z superkondensatorami i elektroniką zdecydowano się na wydrukowanie górnej obudowy z ekologicznego materiału PLA a jako dolną obudowę wykorzystano dostępną w handlu obudowę z ABS o symbolu ZP15015060SJP-PC, rys. 4.



Rys.4. Widok modelu ładowarki solarnej

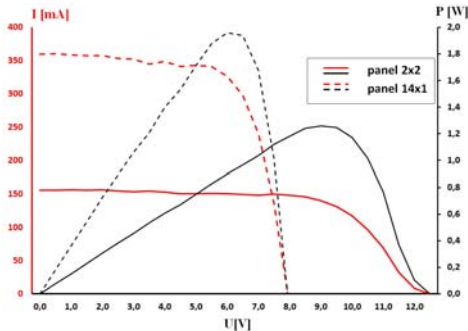
Badania

Badania układu ładowania superkondensatora podzielono na dwa etapy:

- pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych zmontowanego panelu PV – płytka nr 1;
- pomiary charakterystyk ładowania, rozładowania i doładowania superkondensatorów - płytka nr 2

Pomiar charakterystyk prądowo-napięciowych (UI) panelu PV wykonano na stanowisku pomiarowym, który składa się z symulatora promieniowania słonecznego SS150AAA sprzężonego z systemem do pomiaru charakterystyki UI, I-V Tracer SS I-V CT-02 zintegrowanym z miernikiem firmy Keithley Sourcemeter SM2401.

Badane panele pomierzono trzykrotnie, a następnie wyznaczono średnie wartości parametrów i wykreślono średnią charakterystykę UI. Wyniki otrzymane z pomiarów przedstawiono na rysunku rys. 5, a szczegółowe parametry poszczególnych paneli przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 5. Charakterystyki prądowo-napięciowe paneli fotowoltaicznych

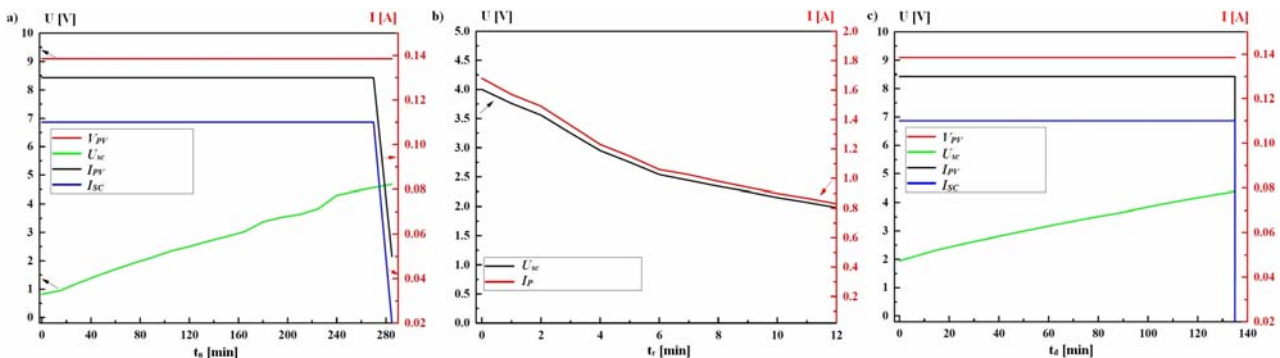
Tabela 1. Parametry paneli fotowoltaicznych

Parametr	Symbol	Płytki 1a	Płytki 1b
Prąd zwarciaowy	I_s	198mA	324mA
Napięcie obwodu otwartego	V_{oc}	12,7V	7,8V
Prąd maksymalny	I_{max}	176,8mA	277,5mA
Napięcie maksymalne	V_{max}	10,6V	9,5V
Moc maksymalna	P_{max}	1,7W	1,7W
Współczynnik wypełnienia	FF	0,7	0,7
sprawność	η	-	-
Rezystancja szeregowo ogniwa	R_{so}	10,6 Ω	3,1 Ω
Rezystancja bocznikująca (równoległa) ogniwa	R_{sho}	37,5 Ω	17,4 Ω

W następnym etapie naszej pracy, przetestowano trzy płytki nr 2 pod kątem ładowania do napięcia pracy U_{PSC} , rozładowania do napięcia minimalnego pracy U_{pmin} i doładowania superkondensatorów do napięcia pracy U_{PSC} . Wyniki testu przedstawiono w tabeli 2, a wybrane charakterystyki (model z rys. 3a) przedstawiono na rys. 6.

Tabela 2. Parametry elektryczne płytek nr 2

Parametr	Symbol	Płytki 2a	Płytki 2b	Płytki 2c
Napięcie znamionowe baterii superkondensatorów	U_{SC}	5,0V	5,4V	5,4V
Pojemność znamionowa baterii superkondensatorów	C_{SC}	400F	425F	400F
teoretyczną ilość energii zgmagazynowanej	E_{PSC}	1,39Wh	1,72Wh	1,56Wh
Czas pierwszego ładowania	t_n	255min	345min	270min
możliwa energia do odzyskania	E_d	0,23Wh	0,21Wh	0,57
Napięcie baterii superkondensatorów po podłączeniu obciążenia $R_{obc} = 2.4\Omega$ w czasie t_n	U_{obc}	4,65V	4,15V	5.3V
Czas rozładowania do napięcia $U_{SC}=2V$	t_r	720s	780s	900s
energia dostarczona do superkondensatorów podczas doładowania		0,3Wh	0,22Wh	0.61Wh
Czas doładowania	t_n	135 min	165 min	150 min
sprawność takiego układu podczas doładowywania superkondensatorów	η_d	0,76	0,93	0,92



Rys. 6. Charakterystyka ładowania (a), rozładowania (b), doładowania (c) superkondensatorów z panelu fotowoltaicznego

Podsumowanie

Wszystkie przebadane ogniwa słoneczne (PV) cechowały się parametrami, które umożliwiały budowę systemów magazynowania energii opartych na superkondensatorach. Przetestowane trzy modele cechowały się porównywalnymi właściwościami, co do ilości

magazynowanej energii jak i czasu ładowania, rozładowania oraz doładowania. Biorąc średnią teoretyczną ilość energii zgmagazynowanej w superkondensatorach rzędu $E_{PSC} = 1,5 Wh$ sprawność takiego układu podczas doładowania superkondensatorów wynosi $\eta_d = 0,9$ i jest to wielkość do zaakceptowania.

Autorzy: mgr inż. Ireneusz Plebankiewicz, Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, e-mail: plebankiewicz@witi.wroc.pl; mgr inż. Wojciech Przybył, Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, e-mail: przybyl@witi.wroc.pl

Główny autor – Ireneusz Plebankiewicz

LITERATURA

- [1] Plebankiewicz I., Bogdanowicz K.A., Iwan A. Photo-Rechargeable Electric Energy Storage Systems Based on Silicon Solar Cells and Supercapacitor-Engineering Concept, *Energies*, 13 (2020) 3867.

- [2] Plebankiewicz, I.; Bogdanowicz, K.A.; Iwan, A. Electronic System for Charger of Supercapacitors from Solar Cells. Polish Patent Application P.32868, 2020.

Podziękowania dla Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBR) za wsparcie finansowe projektu „Wydajne i lekkie układy zasilające złożone z ogniwa słonecznego i baterii litowo-jonowej oraz ogniwa słonecznego i superkondensatora przeznaczone do zastosowań specjalnych” otrzymane w ramach Strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Nowoczesne technologie materiałowe”. (Nr TECHMATSTRATEG1/347431/14/NCBR/2018).