

Damian GŁUCHY*
Leszek KASPRZYK*
Andrzej TOMCZEWSKI*

MODELOWANIE SUPERKONDENSATORÓW NA POTRZEBY WSPÓŁPRACY Z OZE

W pracy omówiono zagadnienie modelowania pracy superkondensatorów w kontekście ich wykorzystania jako zasobników energii w systemach współpracujących z OZE. Scharakteryzowano właściwości użytkowe superkondensatorów i porównano je z innymi technologiami magazynowania energii, stosowanymi w systemach energetyki odnawialnej. Przedstawiono modele obwodowe oraz omówiono ich cechy w zależności od obszaru zastosowań. Przedstawiono uwagi końcowe i wnioski na temat potrzeby modelowania superkondensatorów.

SŁOWA KLUCZOWE: magazyny energii, superkondensatory, modelowanie matematyczne, odnawialne źródła energii

1. WPROWADZENIE

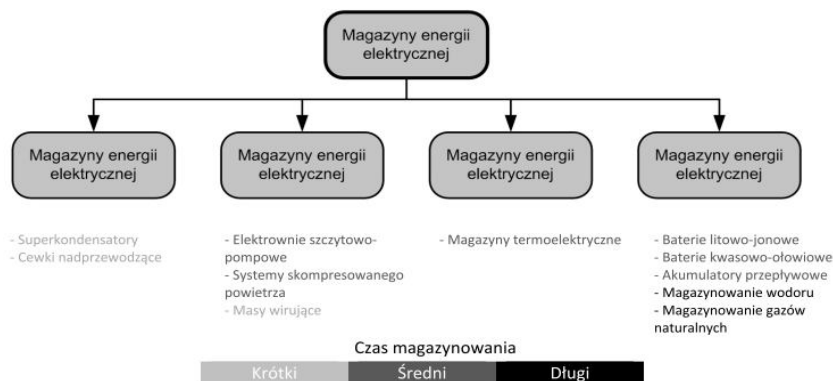
Wzrastające zapotrzebowanie na energię elektryczną istotnie wpływa na rozwój energetyki zawodowej w zakresie technologicznym, ekonomicznym i ekologicznym. Jednym z głównych kierunków rozwoju jest poszukiwanie nowych źródeł energii opartych o generację z wykorzystaniem źródeł ekologicznych. Doniesienia prasowe o katastrofalnej jakości powietrza w polskich miastach zmuszają krajowy przemysł energetyczny do modernizacji istniejących bloków generacyjnych zasilanych paliwami kopalnymi (np. węgiel kamienny, brunatny). Słabnie również zainteresowanie energetyką jądrową, co jest pokłosiem katastrofy w elektrowni Fukushima sprzed pięciu lat, której problem nadal pozostaje nierozwiązany. Dodatkowo coraz częściej krytykowane jest składowanie odpadów nuklearnych, które stanowią realne zagrożenie dla przyszłych pokoleń. W tej sytuacji atrakcyjnym rozwiązaniem staje się potencjał odnawialnych źródeł energii. Innym z mechanizmów ograniczania zużycia paliw kopalnych jest racjonalne zarządzanie generacją energii oraz stosowanie nowoczesnych odbiorników o wyższej sprawności.

* Politechnika Poznańska.

Racjonalne zarządzanie wyprodukowaną energią w systemach z dużym udziałem źródeł OZE w większości przypadków wymaga magazynowania energii. W zależności od obszaru zastosowania, przechowywanie energii spełnia różną rolę docelową. W przypadku OZE celem jest dopasowanie charakterystyki produkcji do aktualnego zapotrzebowania na energię, przy jednoczesnej poprawie jej parametrów. Innym zastosowaniem jest magazynowanie energii w pojazdach elektrycznych, które dodatkowo wyposażone są w systemy hamowania z odzyskiem, zwiększając tym samym całkowitą sprawność obiektu. Coraz częściej rozważa się również ich zastosowanie we współpracy z lampami LED w celu poprawy jakości energii poprzez zmniejszenie wpływu harmonicznych wyższych rzędów [16]. Mnogość obszarów zastosowania różnych magazynów sprawia, że w ostatnich latach zintensyfikowano działania związane z rozwojem i wykorzystaniem nowych technologii magazynowania energii.

2. METODY MAGAZYNOWANIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Ze względu na sposób akumulowania energii dostępne obecnie magazyny energii elektrycznej można podzielić na cztery główne kategorie: elektryczne, mechaniczne, cieplne oraz chemiczne. Wymieniony podział został przedstawiony na rysunku 1, z uwzględnieniem efektywnego czasu gromadzenia energii.



Rys. 1. Klasyfikacja magazynów energii ze względu na technologię i czas magazynowania [12]

Grupę magazynów energii mechanicznej można podzielić na zasobniki kinetyczne, elektrownie szczytowo-pompowe oraz magazyny pneumatyczne. W przypadku tych pierwszych energia elektryczna zamieniana jest na energię kinetyczną koła zamachowego. Wadą mas wirujących są ich duże straty jałowe, lecz dzięki możliwości szybkiego ładowania i szerokiego zakresu temperatur pracy znalazły one zastosowanie w systemach stabilizacji sieci, systemach stabilizacji generacji wiatrowej i trakcji elektrycznej.

Zasada działania elektrowni szczytowo-pompowych opiera się na pompowaniu wody ze zbiornika dolnego do górnego w okresie niskiego zapotrzebowania energetycznego, natomiast w celu generacji energii, proces ten jest odwracany. Duża stabilność pracy, zdolność do gromadzenia dużej ilości energii, wysoka wydajność i niski współczynnik samorozładowania spowodowały rozpowszechnienie tej technologii w energetyce zawodowej [9].

Magazyny pneumatyczne stanowią jedną z najstarszych form gromadzenia energii, a ich zasada działania opiera się na sprężaniu i rozprężaniu powietrza. Uwzględniając niską efektywność metody (na poziomie 40–70%), wynikającą z konieczności chłodzenia i ogrzewania układu, opłacalne są tylko duże systemy wykorzystujące naturalne zbiorniki w postaci jaskiń i kopalni [9].

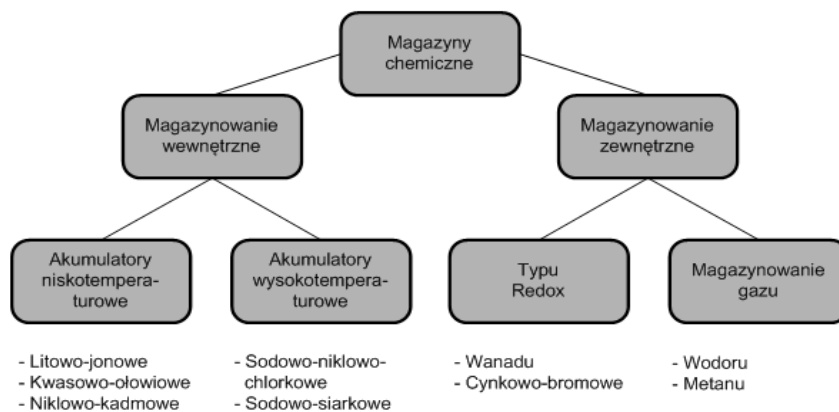
Istnieje szereg możliwości magazynowania energii w postaci ciepła, lecz do niedawna większość z nich nie umożliwiała generacji energii elektrycznej. Od początku XXI wieku liczba magazynów termalnych znacznie wzrosła, a przyczynił się do tego rozwój słonecznych elektrowni termalnych. Zasada działania magazynów termalnych polega na magazynowaniu ciepła poprzez podgrzanie soli w izolowanym zbiorniku. Tak zgromadzony czynnik wykorzystywany jest do podgrzania wody i wytworzenia pary wodnej, która zasila klasyczny generator energii elektrycznej [7].

Najbardziej rozpowszechnione pod względem liczby wyprodukowanych układów są magazyny elektrochemiczne, które można podzielić, ze względu na sposób magazynowania energii na wewnętrzne i zewnętrzne. Zasada ich działania związana jest z odwracalnymi reakcjami chemicznymi zachodzącymi między elektrodami a elektrolitem. W tej grupie zasobników wymienić można zróżnicowane pod wieloma względami rozwiązania [12], a ich ogólna klasyfikację przedstawiono na rysunku 2.

Do ostatniej grupy magazynów energii, czyli magazynów elektrycznych, należą cewki nadprzewodzące i superkondensatory. To z tymi elementami wiążą się największe nadzieje rozwojowe [12].

Cewki nadprzewodzące SMES (ang. superconducting magnetic energy storage) magazynują energię w polu magnetycznym. SMES składają się z cewki utrzymywanej w temperaturze poniżej wartości krytycznej (rzędu -200°C) dzięki czemu jej rezystancja jest zerowa. Realizowane w ostatnich latach projekty przemysłowe dotyczące zastosowań SMES są w fazie rozwojowej, szczególnie z uwagi na bardzo niskie temperatury pracy. Z tego samego powodu magazyny te są bardzo drogie, a większość implementacji wykorzystywana jest w zastosowaniach militarnych i naukowych [9].

Zdecydowanie bardziej zaawansowanymi technologicznie są superkondensatory, głównie z uwagi na intensywny rozwój nanotechnologii. Dzięki szczególnie korzystnym parametrom użytkowym, od kilku lat znajdują one zastosowanie w coraz większej liczbie układów przemysłowych.



Rys. 2. Klasyfikacja chemicznych magazynów energii [12]

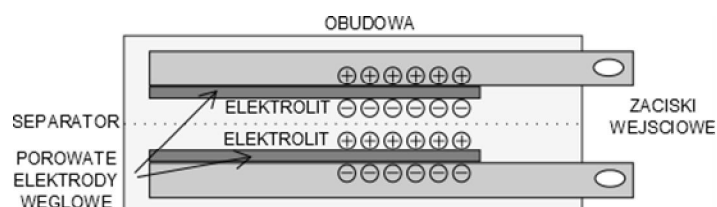
Jednym z obszarów, w którym odnotowuje się ich wyraźny wzrost popularności, są rozwiązania zasobników współpracujących z odnawialnymi źródłami energii. Wadą wymienionej grupy magazynów jest zależność ich podstawowych parametrów od wielu czynników, takich jak natężenie prądu, napięcie, temperatura itp. Z tego względu do analizy zachowania superkondensatorów w układach elektrycznych wymagane jest stosowanie zaawansowanych modeli matematycznych.

3. SUPERKONDENSATORY

3.1. Wprowadzenie

Superkondensatory, nazywane też kondensatorami dwuwarstwowymi lub ultrakondensatorami, są elementami elektronicznymi cechującymi się bardzo dużą pojemnością i gęstością mocy [5]. Składają się z trzech podstawowych elementów: elektrod, separatora i elektrolitu (rys. 3). Zasada działania superkondensatora wykorzystuje zjawisko opisane po raz pierwszy przez Helmholtz'a, czyli występowania tzw. warstwy podwójnej składającej się z warstwy elektronów na powierzchni elektrody oraz powłoki jonów w elektrolicie. Do rozpoczęcia procesu elektrolizy wymagane jest istnienie napięcia granicznego, poniżej którego zastosowany w superkondensatorze elektrolit zachowuje się jak izolator [8]. Tym samym podłączając do elektrod superkondensatora napięcie niższe od wartości granicznej, elektroliza nie następuje, co prowadzi do powstania bardzo cienkiej powłoki nieprzewodzącej na styku elektrolitu i elektrod. Jej mała grubość oraz zastosowanie metalowych okładzin powlekanych węglem aktywnym, pozwala uzyskać bardzo duże powierzchnie czynne kondensatora i małą odległość zgromadzonych ładunków, a tym samym bardzo duże pojemności. Jednocześnie

należy uwzględnić, że pojemność podwójnej warstwy elektrycznej nie jest stała i silnie zależy od przyłożonego napięcia i stężenia elektrolitu [4].



Rys. 3. Budowa superkondensatora

W odróżnieniu od tradycyjnych kondensatorów, w których energia magazynowana jest w spolaryzowanym dielektryku, w superkondensatorach wykorzystywana jest przewodność jonowa elektrolitu, co pociąga za sobą określone własności elektryczne. Tym samym superkondensatory charakteryzują się małą wartością rezystancji wewnętrznej, rzędu ułamków omów.

Budowa superkondensatorów powoduje, że posiadają one niskie napięcie pracy i przebicia. W praktyce pojedyncze elementy produkowane są na napięcie od 2 V do 2,8 V, natomiast w rozwiązaniach hybrydowych do 5 V. Tym samym dla zwiększenia obszaru aplikacji, superkondensatory łączy się szeregowo w tzw. moduły superkondensatorów. Wewnątrz modułu najczęściej znajdują się dodatkowe układy kontrolujące napięcie na pojedynczych superkondensatorach oraz temperaturę. Z uwagi na znaczące wartości tolerancji pojemności (rzędu $\pm 20\%$) [15], podczas łączenia szeregowego moduły wyposażone są również w dodatkowe zintegrowane układy wyrównywania napięcia (tzw. balansery). Najważniejsze parametry superkondensatorów zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyczne parametry superkondensatorów [12]

Parametr	Wartość
Efektywność (sumaryczna dla ładowania i rozładowania)	90 – 94%
Gęstość energii	2 – 10 Wh/l
Gęstość mocy	do 15 kW/l
Liczba cykli życia	do miliona cykli
Żywotność	15 lat
Głębokość rozładowania	75%
Samorozładowanie	do 25% w pierwszych 48 godzinach, potem niewielkie
Koszty instalowanej mocy	10 – 20 €/kW
Koszty instalowanej energii	10 000 do 20 000 €/kWh
Czas gotowości	< 10 ms

3.2. Zastosowanie

Ze względu na specyficzne właściwości (duża pojemność przy niewielkich gabarytach, mała rezystancja wewnętrzna, żywotność liczona w milionach cykli oraz wysokie prądy ładowania i rozładowania) superkondensatory znajdują coraz szersze zastosowanie w technice.

Jednym z szerzej rozwijanych zastosowań jest wykorzystanie superkondensatorów w samochodach hybrydowych. W takich rozwiązaniach podczas hamowania silnik elektryczny, pracujący jako prądnica, generuje w krótkim czasie prąd o dużej wartości. Większość akumulatorów nie jest przystosowanych do pracy z tak dużymi prądami, co powoduje zmniejszenie ich żywotności. Podobne procesy zachodzą podczas przyśpieszania, gdy zadaniem zasobnika energii jest dostarczenie, w krótkim czasie, dużej mocy. Rozbudowa instalacji magazynującej energię w samochodach hybrydowych o superkondensator umożliwia zwiększenie jej efektywności i trwałości [6].

Innym obszarem zastosowań superkondensatorów są układy falowników (energoelektronicznych przekształtników energii) z pośrednim obwodem prądu stałego. W tego typu instalacjach, superkondensator traktowany jest jako magazyn, z którego wyrównywane są niedobory energii przy zapadach napięcia zasilającego. Układy takie implementowane są w obiektach pracy podwyższonego ryzyka jak windy, a także w indywidualnych filtrach sieciowych minimalizujących negatywny wpływ odbiorników nieliniowych na sieć elektryczną [1].

Superkondensatory znalazły zastosowanie również w energetyce odnawialnej, jako elementy magazynów hybrydowych. Zarówno w przypadku stosowania turbin wiatrowych oraz instalacji fotowoltaicznych przewidywany poziom generacji możliwy jest jedynie w ujęciu uśrednionym. Wartości chwilowe mocy podlegają natomiast dużym zmianom w czasie. Stosowanie superkondensatorów pozwala na łagodzenie zmian prądów ładowania i rozładowania zasobników elektrochemicznych stanowiących zazwyczaj podstawowy element systemu magazynowania energii [13].

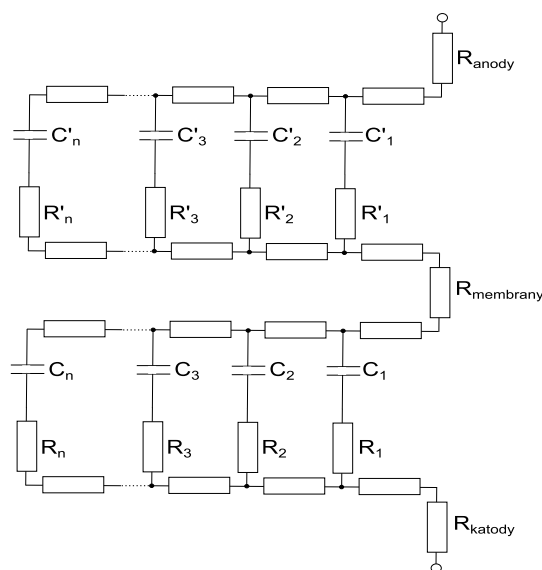
Złożoność procesów zachodzących w superkondensatorach oraz dynamika zmian obciążenia sprawia, że wymagana jest szczegółowa analiza ich pracy, która wymaga znajomości modelu matematycznego. Dla większości wymienionych przykładów pozwala to:

- projektować instalacje pozyskujące energię ze słońca lub wiatru współpracujące z bateriami akumulatorów i superkondensatorami,
- tworzyć układy sterowania służące np. do stabilizacji napięcia na superkondensatorze,
- projektować i formułować algorytmy sterowania dla rozbudowanych hybrydowych systemów magazynowania energii pod kątem wybranego kryterium: minimalizacji kosztów systemu, zwiększenia efektywności pracy układu czy podwyższenia żywotności instalacji HESS (*hybrid energy storage systems*).

3.3. Modelowanie

Analiza pracy superkondensatora, z uwagi na zachodzące w nim procesy chemiczne, jest znacznie bardziej skomplikowana niż tradycyjnych kondensatorów. Z tego powodu również model matematyczny superkondensatorów jest znacznie bardziej złożony. W literaturze najczęściej superkondensatory modeluje się przy użyciu obwodów elektrycznych zbudowanych z członów RC [5] lub z wykorzystaniem równań różniczkowych ułamkowego rzędu [11].

Schematy zastępcze, za pomocą których modeluje się superkondensatory, składają się zazwyczaj z rezystorów i kondensatorów, rzadziej cewek. Model teoretyczny tworzony jest na podstawie analizy budowy superkondensatora i zjawisk w nim zachodzących. Można przedstawiać go jako połączenie szeregowo rezystancji anody, membrany i katody z szeregami gałęzi RC. Elementy te reprezentują zjawiska zachodzące na elektrodach, z uwzględnieniem nieliniowości pojemności związanej z poszczególnymi częściami porowatej elektrody. Wartość rezystancji w tych szeregach uzależniona jest między innymi od rezystancji elektrod i elektrolitu, wielkości porów w elektrodach, dokładności połączenia pomiędzy elektrodą a okładziną i przepuszczalności membrany [5]. Ogólny schemat zastępczy superkondensatora został przedstawiony na rysunku 4.



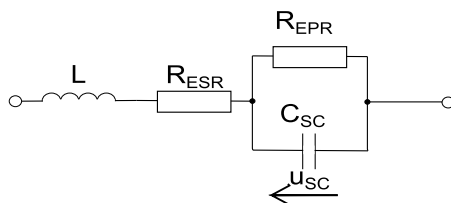
Rys. 4. Schemat zastępczy superkondensatora [5]

Model ten jest skomplikowany, dlatego poszukuje się modeli uproszczonych. Przykładem takim jest model pierwszego rzędu przedstawiony na rysunku 5. Składa się on z czterech elementów: rezystancji R_{ESR} odwzorowującej straty

energii podczas procesu ładowania i rozładowania, rezystancji R_{EPR} przedstawiającej straty energii podczas samorozładowania, indukcyjności L , która odnosi się do budowy zacisków wejściowych superkondensatora. Ma ona znaczenie jedynie w przypadku wysokiej częstotliwości zasilania (powyżej 10 kHz). Z tego powodu podczas analizy pracy układów elektrycznych z odnawialnymi źródłami energii może zostać pominięta. Pojemność C_{SC} reprezentuje całkowitą pojemność superkondensatora, której wartość ulega zmianie podczas ładowania i zależna jest od napięcia na zaciskach wejściowych [15]:

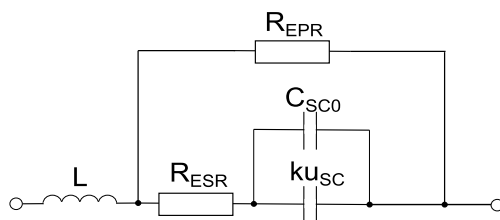
$$C_{SC}(u_{SC}) = C_{SC0} + ku_{SC} \quad (1)$$

gdzie: C_{SC0} – pojemność superkondensatora przy napięciu 0 V, k – współczynnik określający zależność pojemności superkondensatora od napięcia, u_{SC} – napięcie superkondensatora.



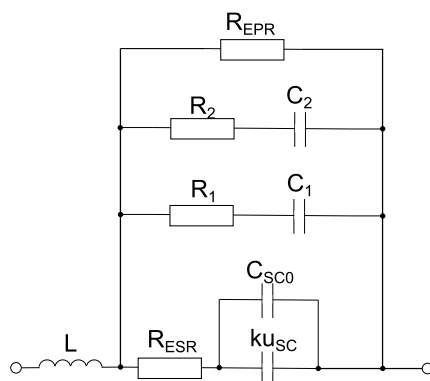
Rys. 5. Model pierwszego rzędu superkondensatora [2]

Uwzględniając zależność (1) oraz występującą w praktyce dużą różnicę wartości rezystancji ($R_{EPR} \gg R_{ESR}$) model superkondensatora można przedstawić w postaci schematu przedstawionego na rysunku 6. Jego struktura umożliwia poprawne odwzorowanie zachowania się superkondensatora jedynie w przypadku małej dynamiki zmian obciążenia oraz niskich częstotliwości.



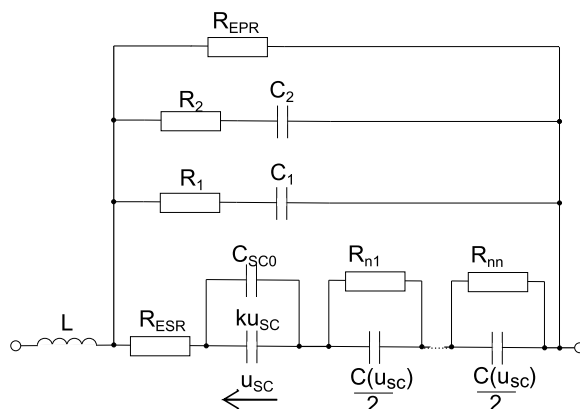
Rys. 6. Model o zmiennej pojemności [5]

Dalsze poprawa modelu dla niskich częstotliwości może być uzyskana przez dodanie do gałęzi podstawowej gałęzi równoległych RC. Im większa jest ich liczba tym model jest bardziej dokładny. W praktyce stosuje się najczęściej dwie gałęzie RC o różnych parametrach – pierwsza odpowiadająca za reakcje układu w okresie kilku minut, natomiast druga powyżej 10 minut. Model trójgałęziowy został przedstawiony na rysunku 7 [14].



Rys. 7. Model trójgałęziowy z dwiema równoległymi gałęziami RC [14]

Zachowanie superkondensatorów w stanach dynamicznych jest silnie uzależnione od zastosowanego elektrolitu oraz porowatości wykonania elektrod. Parametry te wpływają na ich pojemność, której wartość zmniejsza się ze wzrostem częstotliwości (osiągając zero przy częstotliwości rzędu kilku kHz). Powyższe zjawisko modeluje się poprzez rozszerzenie gałęzi podstawowej o dodatkowe n modułów RC, zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 8 [10].



Rys. 8. Model trójgałęziowy z dwiema równoległymi gałęziami RC [10]

4. WNIOSKI

Superkondensatory są jedną z najbardziej dynamicznie rozwijających się grup elektrycznych zasobników energii. Ich parametry funkcjonalne, a szczególnie bardzo duża gęstość mocy, predysponują je do wykorzystania w układach elektrycznych z dużymi wartościami prądów ładowania i rozładowania oraz

dużą dynamiką zmian obciążenia. Analiza zagadnień magazynowania energii wskazuje, że jednym z rozwojowych obszarów stosowania superkondensatorów jest energetyka odnawialna. Prowadzenie w tym obszarze badań symulacyjnych wymaga jednak wykorzystania odpowiedniego modelu obwodowego superkondensatora, który pozwala odwzorować pracę zasobnika w systemach zasilania.

Opisane w pracy modele superkondensatora pozwalają na szczegółową analizę ich zachowania w różnych układach pracy, zależnie od częstotliwości i dynamiki zmian obciążenia. Od złożoności modelu zależy liczba i dokładność odwzorowania zachodzących w superkondensatorze zjawisk, lecz jego rozbudowa powoduje jednocześnie wydłużenie się czasu analizy. Modelowanie jest szczególnie przydatne podczas prac projektowych związanych z optymalizacją struktury zasobnika energii, która pozwala uzyskać kompromis pomiędzy efektywnością i żywotnością układu, a także minimalizować koszty inwestycyjne i eksploatacyjne systemu.

Poszczególne gałęzie RC w modelu superkondensatora są elementami reprezentującymi najważniejsze procesy zachodzące podczas jego pracy, dlatego uwzględnienie tych elementów jest konieczne w każdym modelu, niezależnie od jego złożoności czy celu zastosowania. Wartości tych elementów oraz ich liczba w modelu odnosi się przede wszystkim do stałych czasowych i kształtu prądu podczas procesu rozładowania. Przy współpracy superkondensatorów z odnawialnymi źródłami energii, dla których częstotliwość przepływającego przez nie prądu jest niewielka, indukcyjność w modelu może zostać pominięta. W wielu przypadkach, w których czas pomiędzy kolejnymi cyklami pracy nie przekracza kilku godzin, również proces samorozładowania magazynu może zostać pominięty. Wówczas rezystancja odwzorowująca to zjawisko nie jest uwzględniana w modelu.

LITERATURA

- [1] Ashari M., Nayar C.V., Islam S., Steady-state performance of a grid interactive voltage source inverter. Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, 2001.
- [2] Cultura A. B., Salameh Z. M., Modeling, Evaluation and Simulation of a Supercapacitor Module for Energy Storage Application, International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications (CISIA), str. 876–882. 2015.
- [3] De Levie R., Electrochemical response of porous and rough electrodes. Advances in Electrochemistry and Electrochemical Engineering, vol. 6. New York: Wiley-Interscience, 1967.
- [4] Endo M., Takeda T., Kim Y.J., Koshiba K., Ishii K., High power electric double layer capacitors (edlc's) from operating principle to pore size control in advanced activated carbons. Carbon Science, 1(3&4), pp. 117–128, 2001.

- [5] Faranda R., Gallina M., Son D.T., A new simplified model of Double-Layer Capacitors. In Proceedings of International Conference on Clean Electrical Power, 2007. ICCEP '07., pp. 706–710, 2007.
- [6] Fice M., Setlak R., Modelowanie zasobników energii elektrycznej dla pojazdów elektrycznych i hybrydowych. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 90/2011.
- [7] Głuchy D., Czynniki warunkujące współpracę magazynów energii z OZE, Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering, vol. 87, str. 191–204, 2016.
- [8] Górecki P., 2700 Faradów, czyli Super(ultra)kondensatory. Elektronika dla Wszystkich, pp. 21–24, 2001.
- [9] Kasprzyk L., Pojazdy elektryczne a problematyka doboru magazynu energii elektrycznej w aspekcie ochrony środowiska, Europejski Wymiar Bezpieczeństwa Energetycznego a Ochrona Środowiska, Tom I, 2015, pp. 691–708.
- [10] Musolino V., Piegari L., New Full-Frequency-Range Supercapacitor Model With Easy Identification Procedure, IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp. 112–120, 2013.
- [11] Orzełowski M., Lewandowski M., Zastosowanie rachunku różniczkowego ułamkowego rzędu do modelowania dynamiki superkondensatorów. Przegląd Elektrotechniczny, str. 13–17. NR 8/2014.
- [12] Patrick T. Moseley P. T., Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing, International Lead Zinc Research Organization, North Carolina, USA, 2015.
- [13] Xiaolei Hu., Tseng K.J., Srinivasan M. Optimization of battery energy storage system with super-capacitor for renewable energy applications. Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), IEEE, 2011.
- [14] Zubieta L. and Bonert R., Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 36, no. 1, pp. 199–205, 2000.
- [15] Zygmantowski M., Grzesik B.: Moduł superkondensatorowy BMOD0350 jako element kondycjonera energii. Śląskie Wiadomości Elektryczne, Nr 6' 2009(87).
- [16] <http://www.kemet.com/Lists/TechnicalArticles/Attachments/122/2013-11%20LED%20Lighting%20and%20KEMET%20Supercapacitors.pdf> (10.02.2017).

SUPERCAPACITORS MODELING FOR THE COOPERATION WITH RES

The following paper discusses the problem of modeling the work of supercapacitors in the context of their use as energy storage systems cooperating with RES. Functional properties of supercapacitors were characterized and compared with other energy storage technologies, used in renewable energy systems. Furthermore, the equivalent electrical circuit model was presented and their characteristics were discussed; taking into account the area in which they were applied. Naturally, final suggestions and conclusions regarding the modeling of supercapacitors were also presented.

(Received: 24. 02. 2017, revised: 06. 03. 2017)