

Petru Valentin Radu

Modelowanie zasobników energii do celów oceny efektywności energetycznej w transporcie zelektryfikowanym

JEL: L62, Q01. DOI: 10.24136/atest.2018.031.

Data zgłoszenia: 07.06.2018. Data akceptacji: 20.06.2018.

Celem artykułu jest przedstawienie modeli matematycznych zasobnika energii z superkondensatorem i akumulatorem. Do kontroli zasobnika energii zostało zaproponowane zastosowanie przekształtnika DC-DC podwyższająco-obniżającego typu buck/boost. W artykule podano przykładowe wyniki symulacji, wykonane w Matlab/Simulink, proponowanego modelu zasobnika energii.

Słowa kluczowe: model matematyczny, zasobnik energii, superkondensator, akumulator, sterowanie zasobnikiem.

Wstęp

Nowoczesne pojazdy elektryczne, takie jak pociągi, tramwaje, metro, trolejbusy, autobusy, mają zdolność (w wyniku hamowania) do transformacji energii mechanicznej na energię elektryczną oraz do zwrotu energii elektrycznej do zasobnika energii lub zasilającej sieci trakcyjnej. Ten proces jest nazywany „hamowaniem rekuperacyjnym” i jest skuteczny, jeżeli w czasie hamowania pojazdu na drugim torze znajduje się pojazd trakcyjny, który jest gotowy odebrać energię; jeżeli w czasie hamowania rekuperacyjnego pojazd trakcyjny nie będzie gotowy na odebranie energii, napięcie sieci trakcyjnej wrośnie i hamujący pojazd trakcyjny będzie zmuszony do zamiany energii elektrycznej na ciepło w rezystorach hamowania [36, 37]. Do magazynowania tej energii stosuje się zasobniki, których główną rolą jest ponowne wykorzystanie energii rekuperacyjnej. Zasobniki energii mogą być instalowane w pojeździe [2, 6, 12, 18, 23, 24, 31] lub stacjonarnie w podstacjach trakcyjnych [1, 5, 25, 29, 32].

Istnieje wiele zasobników energii elektrycznej, które są stosowane w trakcji elektrycznej kolejowej, takie jak akumulatory, koła zamachowe, superkondensatory oraz układy hybrydowe, które są kombinacją więcej niż jednego zasobnika. Zaletami zasobników – w zależności od stosowania w pojeździe lub stacjonarnie – są: redukcja zapotrzebowania mocy, zużycie energii, regulacja napięcia, kompensacja mocy i energii [19, 25].

Cechami zasobników energii są gęstość mocy, gęstość energii, czas ładowania i rozładowania, efekt pamięciowy.

Akumulatory mają dużą gęstość energii oraz małą gęstość mocy, co nie pozwala na szybkie ładowanie i rozładowanie. Z tego powodu akumulatory nie są w stanie zgromadzić całej energii wynikającej z hamowania pojazdu elektrycznego; ten proces trwa kilkadziesiąt sekund. Akumulatory mają tę zaletę, że mogą dostarczać przez dłuższy czas (kilka godzin) stałą moc.

Zaletą koła zamachowego oraz superkondensatorów jest wysoka gęstość mocy, pozwalająca na szybkie ładowanie i rozładowanie zasobnika. Wysoka gęstość mocy zasobnika pozwala na to, aby udostępnić wymaganą moc przy rozruchu pojazdu oraz rekuperować jak najwięcej energii hamowania. Wadą takich zasobników jest mała pojemność energetyczna, która ogranicza ich działanie w krótkim czasie.

Dobrym rozwiązaniem jest zastosowanie kombinacji 2 zasobników, takich jak superkondensatory i akumulatory, które zredukują zapotrzebowanie na moc szczytową systemu trakcyjnego oraz ustabilizują napięcie w sieci.

W artykule zostały zaprezentowane modele matematyczne zasobników energii z superkondensatorem i akumulatorem, wykorzystane do symulacji. Omówiono również takie zagadnienia, jak modelowanie przekształtników DC-DC oraz sposób sterowania zasobnika.

1. Modelowanie zasobników energii

W przeprowadzonych analizach dotyczących efektywności energetycznej zasobników stosowane są różne modele w zależności od rodzaju zasobnika.

1.1. Modelowanie akumulatorów

Najczęściej stosowanym modelem akumulatora jest model przedstawiony na rys. 1. Model zawiera idealne źródło napięciowe U_0 połączone szeregowo z rezystorem R , który jest ekwiwalentem rezystancji szeregowej wewnętrznej, określanej w katalogach producentów jako ESR (ang. *equivalent series resistance*) [7, 19, 25].

Napięcie na zaciskach akumulatora U_B może być wyrażone wzorem:

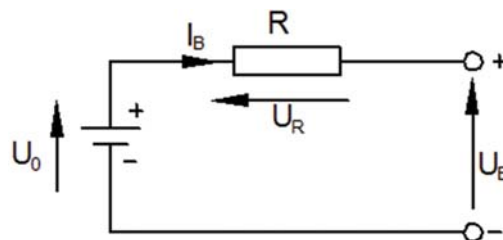
$$U_B = U_0 + I_B \cdot R \quad (1)$$

Akumulator jest ładowany lub rozładowywany w zależności od kierunku przepływu prądu I_B . Zgodnie z konwencją prąd I_B przyjmuje wartość ujemną w przypadku rozładowania akumulatora (rys. 1).

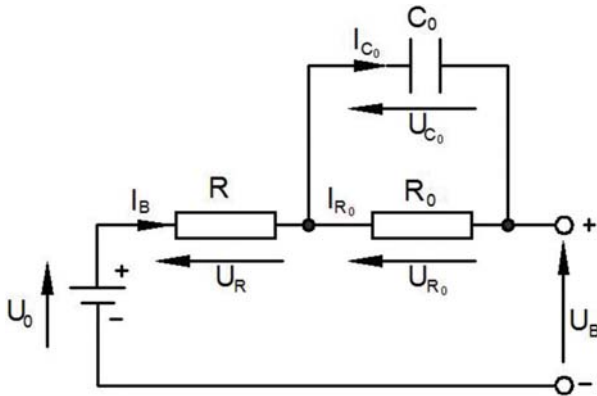
Powyżej przedstawiony model nie uwzględnia impedancji wewnętrznej akumulatora, zależnej od jego stanu naładowania SOC (ang. *state of charge*) [7, 30].

Taki model może być stosowany w symulacji, w przypadku gdy zakłada się, że energia uzyskiwana z akumulatora jest nieskończenie wielka lub w przypadku gdy stan naładowania nie jest istotny.

Ulepszony model akumulatora z rys. 1 został zaproponowany przez Jeana Paula Cuna [9]. Model uwzględnia stan naładowania akumulatora przez założenie, że ESR akumulatora nie jest stały, ale zależy od stanu naładowania. Podczas ładowania akumulatora wartość rezystancji R jest większa niż podczas rozładowania akumulatora kwasowo-olowiowego.



Rys. 1. Uproszczony model akumulatora



Rys. 2. Model akumulatora Thevenina

Rezystancja wewnętrzna akumulatora R może być wyrażona wzorem:

$$R = ESR = \frac{R_0}{S^k} \quad (2)$$

R_0 – początkowa rezystancja akumulatora, kiedy jest w pełni naładowany.

$$S = 1 - \frac{Ah}{C_{10}} \quad (3)$$

gdzie:

Ah – pojemność akumulatora [amperogodziny]

S – zmienia się od wartości 0, gdy akumulator jest całkowicie rozładowany, do wartości 1, gdy akumulator jest w pełni naładowany.

C_{10} – pojemność 10-godzinowa akumulatora zależna od temperatury referencyjnej. Wartości C_{10} i Ah zmieniają się wraz ze starzeniem akumulatora.

k – współczynnik zależny od szybkości rozładowania się akumulatora.

Często stosowanym modelem akumulatora jest model Thevenina [3, 6, 12, 16, 31], przedstawiony na rys. 2.

W skład modelu wchodzi rezystancja wewnętrzna R , pojemność C_0 i rezystor przepięciowy R_0 . Wartości elementów C_0 i R_0 wskazują stan naładowania SOC akumulatora, zakładając, że U_0 jest stały.

Autorzy [18, 33] zaproponowali model empiryczny akumulatora kwasowo-ołowiowego, który można zapisać zależnością:

$$U_B = U_0 - \left(R + \frac{K}{SOC} \right) \cdot I_B \quad (4)$$

U_B – napięcie na zaciskach akumulatora;

U_0 – napięcie jałowe akumulatora;

R – rezystancja na zaciskach akumulatora;

K – stała polaryzacja w Ω ;

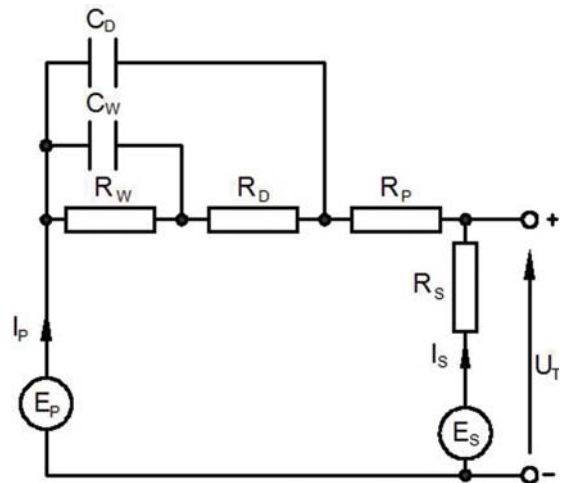
I_B – prąd rozładowania akumulatora w A;

SOC – stan naładowania.

Model uwzględnia charakterystykę nieliniową akumulatora dla napięcia jałowego oraz rezystancji wewnętrznej reprezentowaną przez komponent $\frac{K}{SOC}$.

Giglioli i Cerolo [15] zaproponowali model dynamiczny akumulatora (rys. 3). Model akumulatora składa się z 2 części:

- ♦ gałęzi, w której prąd I_p płynie przez rezystancję R_p (reakcja elektrolitu), R_D odpowiada stratom ohmowym i stratom na pojemności C_D , a R_W określa straty energii i straty własne na pojemności C_W ;
- ♦ prąd I_s płynie przez R_s (samorozładowanie).



Rys. 3. Model dynamiczny Giglioli i Cerolo

Wyżej przedstawiony model jest dokładny, ale zbyt skomplikowany do celów symulacyjnych dlatego, że zawiera dużo danych, których wartości muszą być wyznaczone empirycznie.

Po przeanalizowaniu literatury i opisanych wyżej różnych rozwiązań jako model akumulatorów do symulacji zaproponowano ten przedstawiony na rys. 1 – z założeniem, że rezystancja wewnętrzna szeregowo akumulatora jest zmienna w zależności od stanu naładowania akumulatora. Model ma zadowalającą dokładność do zastosowania w modelowaniu zasobników energii.

1.2. Modelowanie superkondensatorów

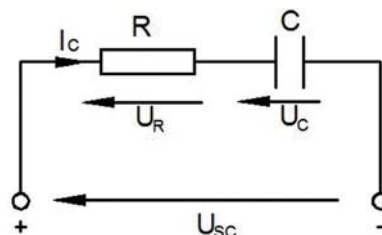
Superkondensatory mogą być modelowane najprościej jako zespoły kondensatorów podłączonych szeregowo z rezystorem [1, 8, 32]. Kiedy superkondensator ładuje się, napięcie na wyjściu u_{SC} jest proporcjonalne do wartości rezystancji R oraz prądu ładowania i_c . Rezystancja R odpowiada stratom w kondensatorze przy transferze energii.

Zastępczy model elektryczny superkondensatora z rys. 4 opisują zależności:

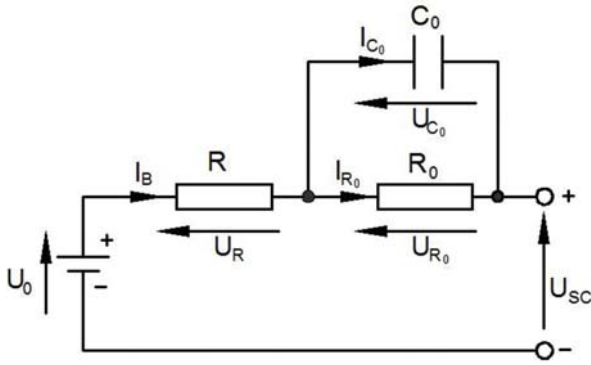
$$\begin{aligned} i_c &= C(u_{SC}) \cdot \frac{du_{SC}}{dt} \\ u_{SC} &= R \cdot i_c + u_{SC} \\ u_{SC}(0) &= u_{SC,max} \end{aligned} \quad (5)$$

Wadą modelu RC jest to, że nie uwzględnia on nieliniowych zmian napięcia superkondensatora, a główną zaletą tego modelu jest to, że jest mało skomplikowany.

Kolejny model uwzględniający efekt samorozładowania się superkondensatora przedstawiono na rys. 5 [32]. Kondensator C_0 jest podłączony równolegle z rezystorem R_p (rezystancja wyprowadzeń), który jest odpowiedzialny za samorozładowanie superkondensatora [31]. Pojemność C zależy od napięcia wyjściowego superkondensatora.



Rys. 4. Model superkondensatora z członem RC



Rys. 5. Model superkondensatora uwzględniający rezystancję wyprowadzeń

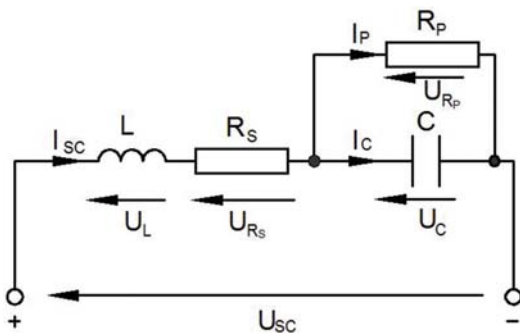
Kolejny model superkondensatora przedstawiono na rys. 6. W tym modelu uwzględnia się indukcyjność doprowadzeń [43]. Indukcyjność L uwidoczni się przy wysokich częstotliwościach [35]. Praktycznie największa indukcyjność superkondensatora odpowiada najniższym częstotliwościom.

Z prac [28, 35] wynika, że dla małych częstotliwości superkondensatory mają dynamikę bardzo zbliżoną do kondensatorów. Producenci superkondensatorów nie podają w danych katalogowych wartości indukcyjności doprowadzeń L z uwagi na jej znikomy wpływ w porównaniu z pojemnością C .

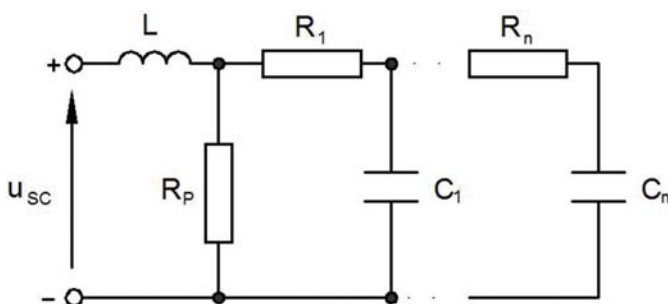
Autorzy prac [8, 28, 40] zaproponowali model transmisji liniowej superkondensatora, w którym oddzielnie przedstawiono dwie warstwy aktywne superkondensatora i rezystancję elektrolitu z uwzględnieniem nanorurek węglowych, z których zbudowane są elektrody. Model transmisji liniowej przedstawiono na rys. 7.

Pojemność zastępczą modelu z rys. 7 można przedstawić następująco:

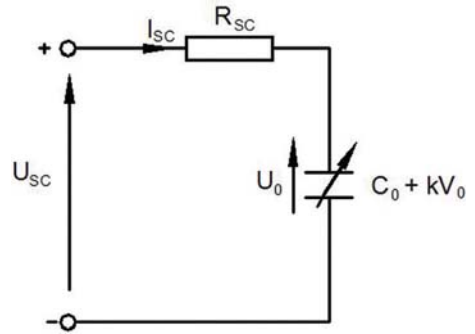
$$C_t = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}} \quad (6)$$



Rys. 6. Model superkondensatora uwzględniający indukcyjność wyprowadzeń



Rys. 7. Model transmisji liniowej superkondensatora



Rys. 8. Model superkondensatora

Rezystancja zastępcza jest równa:

$$R_{ESR} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (7)$$

Model zastępczy transmisji liniowej superkondensatora, który uwzględnia jego zmienną pojemność przedstawiono na rys. 8. Z uwagi na fakt, że rezystancja wyprowadzeń R_p jest dużo większa niż rezystancja szeregową wewnętrzną R i odgrywa znikomą rolę w szybkości ładowania i rozładowywania superkondensatora, rezystancję można pominąć. Indukcyjność L , która ma małą wartość, ma związek z konstrukcją superkondensatora [8].

W modelu przedstawionym na rys. 8 występuje stała pojemność składową C_0 oraz składową zmienną kV_0 , która jest zależna od napięcia ogniwa.

Gdy pojemność ogniwa jest równa $C_1 = C_2 = \dots = C_n$ i rezystancja szeregową wewnętrzną R jest taka sama $R_1 = R_2 = \dots = R_n$, wtedy pojemność zastępczą superkondensatora można przedstawić następująco [8]:

$$C = \frac{1}{n} C_n = \frac{1}{n} (C_0 + kV_0) \quad (8)$$

k – współczynnik zależny od charakterystyki napięciowej;
 n – liczba ogniw superkondensatora.

Po przeanalizowaniu literatury i opisanych wyżej różnych rozwiązań jako model superkondensatora do symulacji przyjęto model przedstawiony na rys. 8 – z uwagi na jego dokładność do zastosowania w modelowaniu zasobników energii.

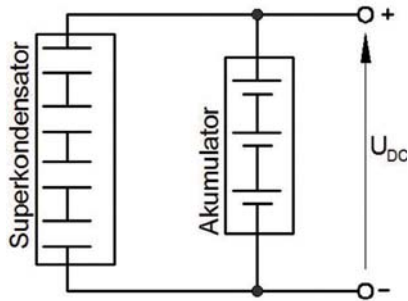
2. Modelowanie przekształtników DC-DC

Prostym rozwiązaniem zapewniającym integrację akumulatora i superkondensatora jest ich połączenie równolegle [14, 17, 26, 34]. Różne charakterystyki dynamiczne baterii i superkondensatorów zdecydują o sposobie dystrybucji mocy pomiędzy źródłami [34]:

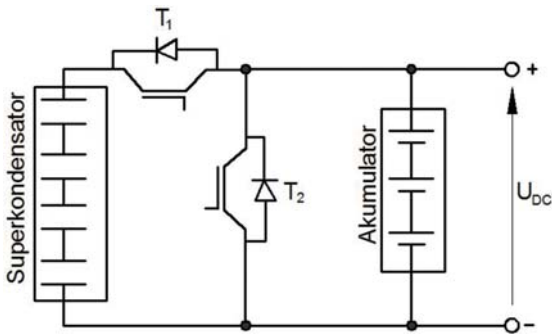
- ♦ dla niskiej częstotliwości pobieranego z zasobników prądu pojazd będzie zasilany z akumulatora;
- ♦ dla wysokiej częstotliwości prądu pojazd będzie zasilany z superkondensatora.

Połączenia równoległe akumulatora i superkondensatora pozwalają na redukcję pików prądu [22] w akumulatorze oraz poprawę żywotności i wydajności baterii, jak zostało to przedstawione na rys. 9 [38].

Zasobniki energii, takie jak superkondensatory, to urządzenia niskonapięciowe. Aby osiągnąć wysokie wartości napięcia wymagane w zastosowaniach trakcyjnych, wiele elementów musi być połączonych szeregowo [24]. Ponadto w przypadku bezpośredniego połączenia szeregowego ogniwa SC nie uzyskują napięcia ustalonego na wejściu zasobnika i nie ma możliwości zarządza-



Rys. 9. Zasobnik superkondensatorowy - akumulatorowy - połączony równolegle



Rys. 10. Zasobnik superkondensatorowy - akumulatorowy - z przekształtnikiem dwukierunkowym DC-DC

nia energią. Bezpośrednie połączenie szeregowe ogniw o różnych wartościach pojemności może doprowadzić do nierównowagi napięcia pomiędzy ogniwami ze względu na różne rezystancje ogniw. Nierównomierny rozkład napięcia może spowodować przepięcia i zniszczenie ogniw.

Aby zmniejszyć liczbę elementów szeregowych i poprawić możliwość zarządzania energią, stosuje się przekształtnik składający się z 2 zatorów sterowanych T_1 , T_2 , umieszczony pomiędzy superkondensatorem i akumulatorem [19].

Do łączenia obwodu pośredniczącego napięcia stałego sieci U_{DC} z zasobnikami energii stosuje się przekształtniki DC-DC podwyższająco-obniżające typu *buck/boost*, jak przedstawiono na rys. 10, w celu wykorzystania w pełni energii zasobnika superkondensatorowego [22]. Przy rozładowywaniu zasobnika jego napięcie maleje w zależności od stopnia naładowania. Rozładowanie i ładowanie zasobnika jest realizowane przy zmianie kierunku prądu oraz przy stałej biegunowości napięcia zasobnika [10].

W celu zapewnienia poprawnej pracy przekształtnika dwukierunkowego DC-DC musi być spełniony następujący warunek: napięcie zasobnika musi być niższe niż napięcie sieci trakcyjnej U_{DC} .

Zong w pracy [20] stwierdził, że energia superkondensatora jest w 25% dostępna przy połowie napięcia nominalnego superkondensatora a właściwie dobrany przekształtnik podwyższa napięcie zasobnika maksymalnie 3 razy - ograniczenie stanowi stabilność pracy systemu.

Dla częstotliwości przełączania przekształtnika powyżej 100 Hz wartość pojemności SC jest bliska zeru i zachowuje się on jak rezystor, generując tylko straty energii i zmniejsza żywotność zasobnika. Aby zmniejszyć harmoniczne prądu, filtr LC wejściowy (indukcyjność połączona szeregowo, kondensator równolegle) musi być dodany tak, jak to przedstawiono na rys. 11 [13]. Filtr L_f, C_f zmniejsza napięcie i tętnienie prądu w SC, ale zwiększa masę i wielkość zasobnika energii.

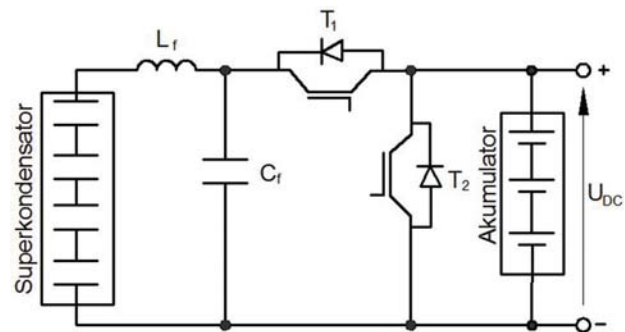
Taki model nie pozwala na wprowadzenie ograniczenia prądu płynącego przez zasobnik energii, co oznacza, że nie można ograniczać mocy maksymalnej zasobnika. Do ograniczenia prądu pobieranego z zasobnika można stosować rezystancję o określonej wartości, połączoną szeregowo - R_o (rys. 12).

W celu stabilizacji napięcia na wyjściu zasobnika stosuje się kondensator wygładzający C_{DC} [26].

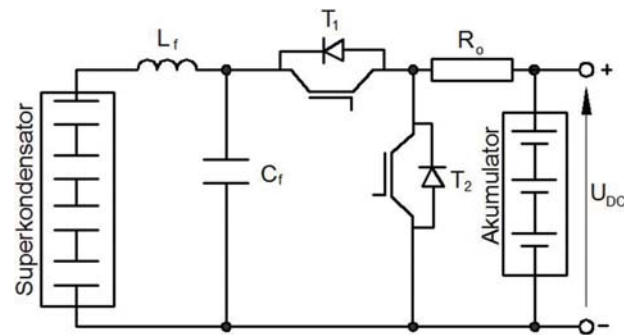
Model przedstawiony na rys. 13 nie umożliwia kontroli stanu naładowania i rozładowania akumulatora.

Do zarządzania energią w akumulatorze oraz do sterowania czasem pracy można stosować przekształtnik podwyższająco-obniżający typu *buck/boost*, jak to przedstawiono na rys. 14 [11].

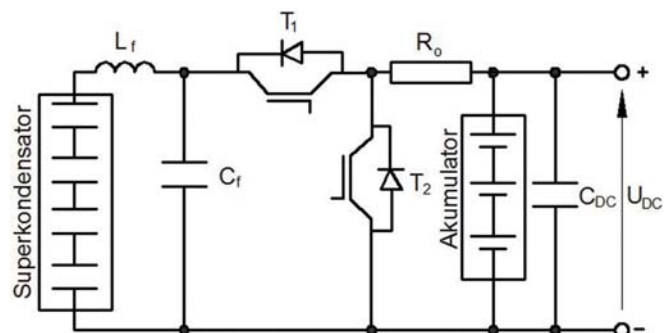
Energia nagromadzona w zasobniku jest zależna od charakterystyki SOC (stanu naładowania zasobnika) oraz od napięcia superkondensatora/akumulatora.



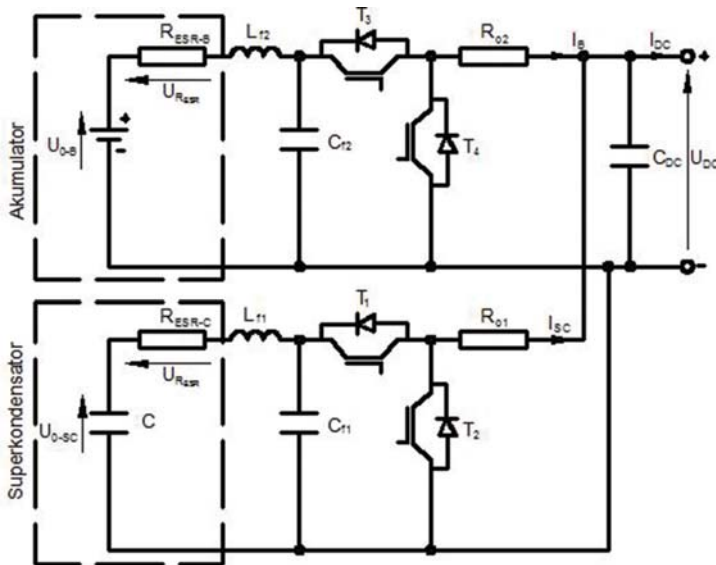
Rys. 11. Zasobnik superkondensatorowy - akumulatorowy - z przekształtnikiem dwukierunkowym DC-DC, połączony równolegle z filtrem LC



Rys. 12. Zasobnik superkondensatorowy - akumulatorowy - z przekształtnikiem dwukierunkowym DC-DC, połączony równolegle z filtrem LC, rezystancją ograniczającą prąd R_o



Rys. 13. Zasobnik superkondensatorowy - akumulatorowy - z przekształtnikiem dwukierunkowym DC-DC, połączony równolegle z filtrem LC, rezystancją ograniczającą prąd R_o oraz kondensatorem wygładzającym C_{DC}



Rys. 14. Zasobnik superkondensatorowy – akumulatorowy – z przekształtnikiem dwukierunkowym DC-DC, połączony równolegle z filtrem LC, rezystancją ograniczającą prąd R_0 oraz kondensatorem wygładzającym C_{DC}

Poniżej przedstawiono równania elektryczne energii zasobnika superkondensatorowego/akumulatorowego do rys. 14:

$$P_{DC} = U_{DC} \cdot I_{DC} \quad (9)$$

$$I_{DC} = I_B + I_{SC} \quad (10)$$

$$U_{DC} = U_B + U_{SC} \quad (11)$$

$$\int U_{SC} \cdot I_{SC} \cdot dt = E_{SC} \quad (12)$$

$$\int U_B \cdot I_B \cdot dt = E_B \quad (13)$$

$$\int U_{DC} \cdot I_{DC} \cdot dt = E_{DC} \quad (14)$$

Z równań (9–14) wynika, że energia wyjściowa zasobnika E_{DC} jest równa sumie energii zgromadzonej w baterii superkondensatorowej E_{SC} i energii zgromadzonej w baterii akumulatorowej E_B :

$$E_{DC} = E_{SC} + E_B \quad (15)$$

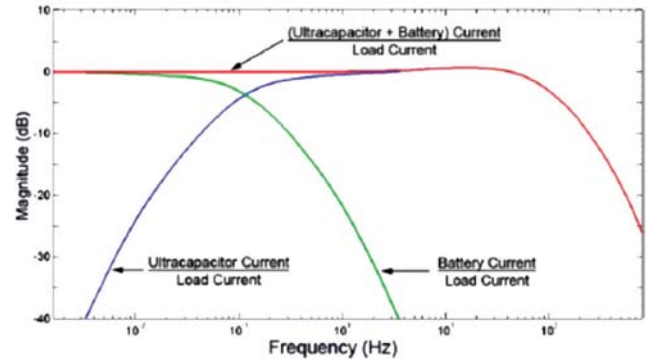
3. Sterowanie zasobnika superkondensatora/akumulatora

Sterowanie zasobnika może być wykonane w zależności od [39, 42]:

- ♦ stopnia naładowania zasobnika;
- ♦ ograniczenia prądów przepływających przez zasobnik;
- ♦ poziomu napięcia sieci, który określa stan obciążenia sieci (dotyczy pojazdów zasilanych z sieci trakcyjnej).

Garcia [26] proponuje następujący zakres częstotliwości działań przekształtników dwukierunkowych DC-DC z rys. 14:

- ♦ dla niskiej częstotliwości prądu akumulator będzie zasilał sieć trakcyjną;
- ♦ dla wysokiej częstotliwości prądu superkondensator będzie zasilał pojazd (sieć trakcyjną) zgodnie z rys. 15.



Rys. 15. Zakres częstotliwości działania przekształtników dwukierunkowych DC-DC dla akumulatora (linia zielona) oraz superkondensatora (linia niebieska) [26]

4. Przykład

Symulacje modeli zasobnika energii z akumulatorem i superkondensatorem zostały przeprowadzone w środowisku programowym MATLAB – Simulink.

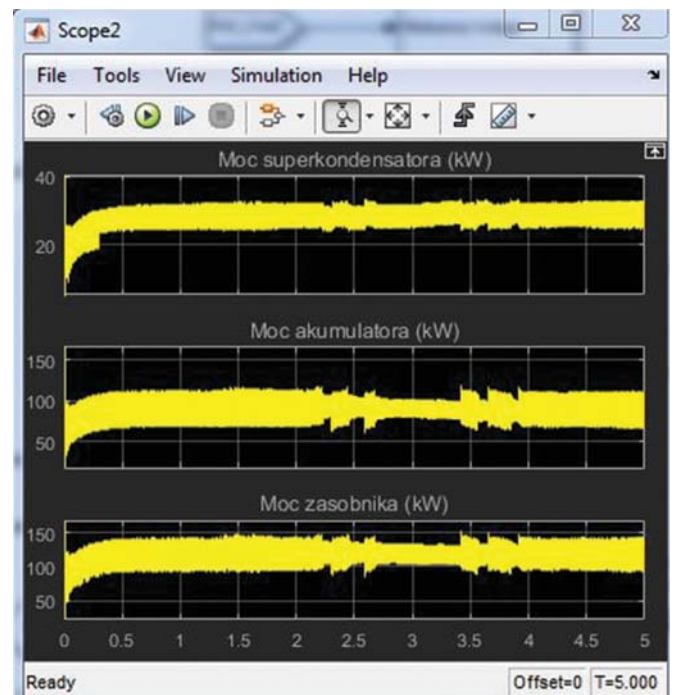
Do obliczeń symulacyjnych przyjęto następujące parametry:

- ♦ akumulator o napięciu 750 V i pojemności 6,5 Ah;
- ♦ superkondensator o napięciu 250 V i pojemności 600 F;
- ♦ obciążenie rezystancyjne o wartości 5 Ω ;

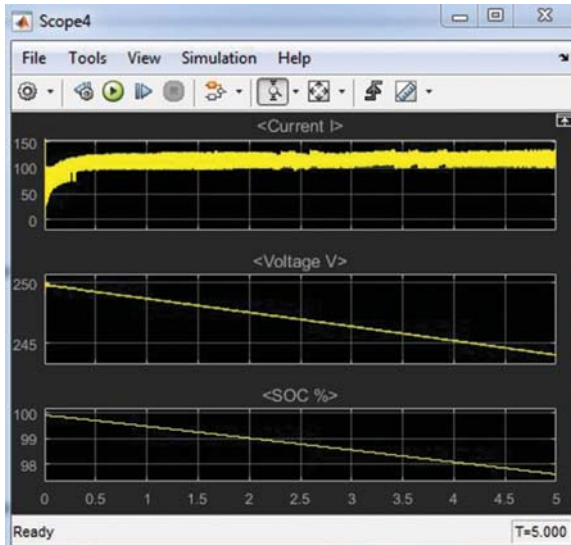
Do sterowania pracą zasobnika stosuje się 2 przekształtniki dwukierunkowe DC-DC: jeden dla akumulatora i drugi dla superkondensatora; napięcie wyjściowe zasobnika energii wynosi 750 V DC.

Na rys. 16 przedstawiono wyniki symulacji zasobnika energii z akumulatorem i superkondensatorem, połączonymi równolegle. Można tam zauważyć, że akumulator przekazuje 80% zapotrzebowanej mocy, a superkondensator pozostałe 20%.

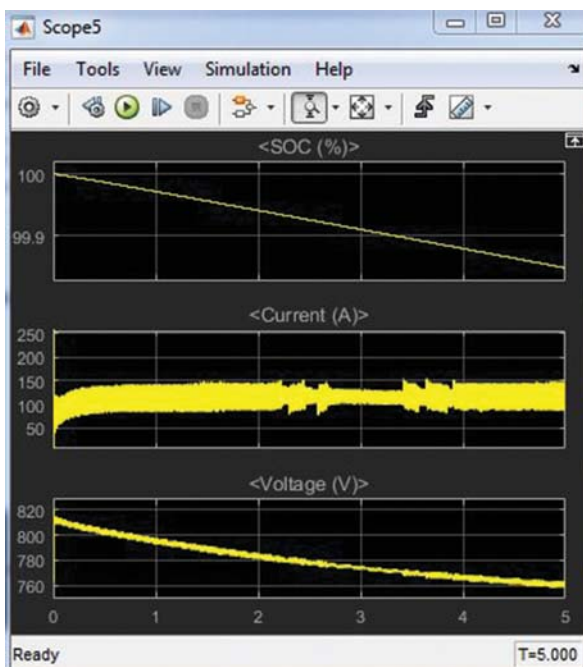
Na rys. 19 przedstawiono przebieg czasowy zmian napięcia wyjściowego zasobnika. Linia żółta oznaczono wartość napięcia sieci referencyjnego systemu trakcyjnego 750 V, a linią niebieską – napięcie wyjściowe zasobnika.



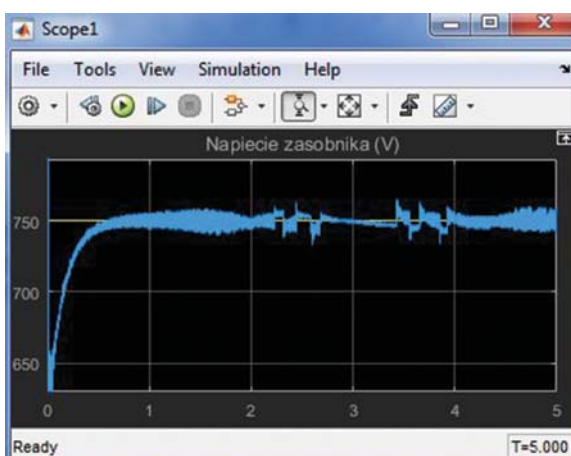
Rys. 16. Moc pobrana z zasobnika, akumulatora i superkondensatora



Rys. 17. Prąd, napięcie i stan naładowania superkondensatora



Rys. 18. Stan naładowania, prąd i napięcie akumulatora



Rys. 19. Napięcie wyjściowe zasobnika

Podsumowanie

Przy analizach symulacyjnych efektywności zastosowania zasobnika, w zależności od konstrukcji zasobnika i przekształtnika, miejsca i celu jego zainstalowania oraz algorytmu sterowania, stosowane są różne modele zasobników, opisujące w różnym stopniu szczegółowości właściwości zasobnika w trakcie jego ładowania i rozładowywania. W ostatnich latach pojawiły się nawet teoretyczne modele wykorzystujące rachunek różniczkowy ułamkowego rzędu do opisu superkondensatorów [41], co pozwala na uwzględnienie dynamiki procesów w nich występujących.

Do celów symulacji zasobników energii w zelektryfikowanym transporcie miejskim są wymagane modele proste, które nie wydłużają czasu symulacji oraz prowadzą do zadowalających wyników. Modele przedstawione w niniejszym artykule pozwalają na wybranie odpowiedniego modelu do analizy symulacyjnej zasobników energii.

Wyniki symulacji pokazują, że zastosowanie zasobnika z superkondensatorem i akumulatorem poprawia dynamikę zasobnika, dzieląc zapotrzebowanie na moc pomiędzy superkondensator i akumulator – w stosunku 20% dla superkondensatora i 80% dla akumulatora.

Bibliografia:

1. Al-Ramadhan M., Abido M. A., *Design and Simulation of Supercapacitor Energy Storage System*, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12), Santiago de Compostela 2012.
2. Ayad M. Y., Becherif M., Henni A., Wack M., Aboubou A., *Sliding mode control applied to fuel cell, supercapacitors and batteries for vehicle hybridization*, 2010 IEEE International Energy Conference, 2010.
3. Barsali S., Ceraolo M., *Dynamical models of lead-acid batteries: implementation issues*, „IEEE Trans. Energy Conversion” 2002, Vol. 17 (1).
4. Bentley P., Stone D. A., Schofield N., *The parallel combination of a VRLA cell and supercapacitor for use as a hybrid vehicle peak power buffer*, „Journal of Power Sources” 2005, Vol. 147.
5. Carpita M., De Vivo M., Gavin S., *Dynamic modeling of a bidirectional DC/DC interleaved converter working in discontinuous mode for stationary and traction supercapacitor applications*, IEEE International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2012.
6. Ceraolo M., *New dynamical models of lead-acid batteries*, „IEEE Trans. Power Systems” 2000, Vol. 15 (4).
7. Chen S. X., Tseng K. J., Choi S. S., *Modeling of Lithium-Ion Battery for Energy Storage System Simulation*, IEEE Power & Energy Society (PES) and Wuhan University, 2009.
8. 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 2015), 2015.
9. Cun J. P., Fiorina J. N., Fraise M., Mabboux H., *The Experience of a UPS Company in Advanced Battery Monitoring*, Telecommunications Energy Conference, INTELEC ,96, 18th International, 1996.
10. Dougal R. A., Liu S., White R. E., *Power and Life Extension of Battery – Ultracapacitor Hybrids*, „IEEE Trans. on Components and Packaging Technologies” 2002, Vol. 25.
11. Drabek P., Streit L., *The Energy Storage System for Light Traction based on the Supercapacitors*, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2012.

12. Gao L., Liu S., Dougal R. A., *Dynamic lithium-ion battery model for system simulation*, „IEEE Trans. Components and Packaging Technologies” 2002, vol. 25, No. 3.
13. Gao Z. Y., Fang J., Zhang Y., Jiang D. S. L., Yang X., *Control strategy research of wayside supercapacitor energy storage system for urban rail transit*, 2014 IEEE, 26th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2014.
14. Garcia F. S., Ferreira A. A., Pomilio J. A., *Control Strategy for Battery-Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System*, Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2009, Twenty-Fourth Annual IEEE, 2009.
15. Giglioli R., Cerolo P., *Charge and Discharge Fourth Order Dynamic Model of the Lead Battery*, 10th Int'l Electric Vehicle Symposium, Hong Kong 1990.
16. Glass M. C., *Battery electrochemical nonlinear/dynamic SPICE model*, Proc. Energy Conversion Engineering Conf., 1996, Vol. 1.
17. Guerrero M., Romero E., Barrero F., Milanés M., González E., *Overview of Medium Scale Energy Storage Systems, Compatibility and Power Electronics*, CPE'09, 2009.
18. Jayne M. G., Morgan C., *A New Mathematical Model of a Lead Acid Battery for Electric Vehicles*, Eighth Int'l Electric Vehicle Conference, Washington, D.C., 1986.
19. Jin-uk J., Hyeoun-Dong L., Chul-Soo K., Hang-Seok C., Bo-Hyung C., *A Development of an Energy Storage System for Hybrid Electric Vehicles Using Supercapacitor*, EVS19, 2002.
20. Kikuchi T., Aga H. T., Takagi R., *Fuzzy Feed-forward Charge/Discharge Control of Stationary Energy Storage Systems for DC Electric Railways*, 2014 IEEE, The 2014 International Power Electronics Conference, 2014.
21. Krawczyk G., *Zasobniki energii elektrycznej w transporcie szynowym*, „Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2013, nr 3.
22. Lukic S. M., Wirasingha S. G., Rodriguez F., Cao J., Emadi A., *Power Management of an Ultracapacitor/Battery Hybrid Energy Storage System in an HEV*, Vehicle Power and Propulsion Conference, 2006.
23. Maciołek I., Drażek Z., *Tram vehicle energy accumulator – on-board or in substation*, International Conference SPEEDAM 2004, Capri 2004.
24. Massot-Campos M., Montesinos-Miracle D., Bergas-Jané J., Rufer A., *Multilevel Modular DC/DC Converter for Regenerative Braking Using Supercapacitors*, „Journal of Energy and Power Engineering” 2012, Vol. 6.
25. Michalak J., Jelen M., Jarek G., *Skompensowany przekształtnik AC/DC symulujący prace baterii akumulatorów*, „Elektryka” 2014, z. 4 (232).
26. Miller M. J., *Energy storage technology markets and application's: ultracapacitors in combination with lithium-ion*, The 7th International Conference on Power Electronics, EXCO, Daegu 2007.
27. Orzyłowski M., Lewandowski M., *Zastosowanie rachunku różniczkowego ułamkowego rzędu do modelowania dynamiki superkondensatorów*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2014, nr 8.
28. Quintana J., Ramos A., Nuez I., *Identification of the fractional impedance of ultracapacitors*, In proceedings of the 2nd IFAC FDA'06, Porto 2006.
29. Radu P., Szeląg A., *A Cuk converter integrated with lead-acid battery and supercapacitor for stationary applications*, 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, 2017, Vol. 1.
30. Salameh Z. M., Casacca M. A., Lynch W. A., *A mathematical model for lead-acid batteries*, „IEEE Trans. Energy Conversion”, 1992, Vol. 7, No. 1.
31. Schweighofer B., Raab K. M., Brasseur G., *Modeling of high power automotive batteries by the use of an automated test system*, „IEEE Trans. Instrumentation and Measurement” 2003, Vol. 52, No. 4.
32. Shi L., Crow M., *Comparison of ultracapacitor electric circuit models*, 2008 IEE Power and Energy Society General Meeting. Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008.
33. Sims R. I., Carnes J. C., Dzieciuch M. A., Fenton J. E., *Computer Modeling of Automotive Lead Acid Batteries*, Ford Research Laboratories Technical Report SR-90- 154, 1990.
34. Solero L., Lidozzi A., Pomilio J. A., *Design of Multiple-Input Power Converter for Hybrid Vehicles*, „IEEE Trans. on Power Electronics” 2005, Vol. 20.
35. Spyker R., Nelms R., Merryman S. *Evaluation of Double Layer Capacitors for Power Electronics Applications*, IEE APEC, 1996, Vol. 2.
36. Szeląg A., *Zagadnienia analizy i projektowania system trakcji elektrycznej prądu stałego z zastosowaniem technik modelowania i symulacji*, „Elektryka” 2002, z. 123.
37. Szeląg A., *Zwiększanie efektywności energetycznej transportu szynowego*, „Technika Transportu Szynowego” 2008, nr 12.
38. Szumanowski A., Piorkowski P., Chang Y., *Batteries and Ultracapacitors Set in Hybrid Propulsion System*, Inter. Conf. on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2007.
39. Tsukahara K., Kondo K., *A Study on Methods to Design and Select Energy Storage Devices for Fuel Cell Hybrid Powered Railway Vehicles*, Industrial Electronics Society, IECON 2013 – 39th Annual Conference of the IEEE, 2013.
40. Westerlund S., Ekstam L., *Capacitor theory*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994.
41. Wieczorek M., Lewandowski M., *A mathematical representation of an energy management strategy for hybrid energy storage system in electric vehicle and real time optimization using a genetic algorithm*. Applied energy, 192, 2017.
42. Zhang Y., Wu L., Hu X., Liang H., *Model and Control of Supercapacitor-Based Energy Storage System for Metro Vehicles*, Proceedings of 11th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2008), Wuhan 2008.
43. Zygmanski M., *Analiza porównawcza właściwości wybranych wielopoziomowych przekształtników energoelektronicznych przeznaczonych do układów kondycjonowania energii elektrycznej*, Politechnika Śląska, Gliwice, 2009, praca doktorska: http://kener.elekt.polisl.pl/materialy/Marcin_Zygmanski_-_Doktorat.pdf (dostęp: 17.05.2018).
44. Zajkowski K., Zieliński P., *Wybrane współczesne metody akumulacji energii w urządzeniach mobilnych*, „Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2014, nr 6.

Modeling of the energy storage devices for the evaluation of the energy efficiency in the electric transport

The purpose of the article is to present mathematical models of energy storage devices with supercapacitors and accumulators. To control the energy storage device, it was proposed to use DC/DC buck/boost invertors and mathematical models are presented. The article gives example of simulation results of the proposed model of energy storage devices simulated in Matlab/Simulink.

Keywords: mathematical model, energy storage device, supercapacitor, battery, energy storage control.

Autor:
mgr inż. **Petru Valentin Radu** – Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny