

doi:10.15199/48.2018.03.15

Analiza metod sterowania zasobnikiem superkondensatorowym pojazdu trakcyjnego w wybranych stanach pracy sieci trakcyjnej

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę porównawczą wybranych metod sterowania zasobnikiem superkondensatorowym pojazdu trakcyjnego. Metody te porównano ze względu na stan pracy zasobnika oraz ze względu na efektywność energetyczną przesyłania energii w układzie sieć trakcyjna – zasobnik energii – falownik napędowy. W artykule zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych uwzględniających typowe stany pracy zespołu pojazdów trakcyjnych na wyizolowanym odcinku sekcji zasilającej.

Abstract. The paper presents a comparative analysis of selected methods of controlling supercapacitor storage of traction vehicle. Chosen control methods were compared due to the condition of the energy storage operation point and to the energy efficiency of the power flow in the traction grid. The article presents the results of the simulations that are taking into account the typical operating conditions of the traction vehicles on an isolated section of the power grid. (The analysis of traction vehicle ultracapacitor control methods in chosen states of traction power grid).

Słowa kluczowe: sterowanie zasobnikiem superkondensatorowym, straty energii w sieci trakcyjnej, napęd trakcyjny.

Keywords: supercapacitor storage control, energy losses in traction power grid, traction drive.

Wstęp

Stosowanie zasobników energii w systemach zasilania pojazdów trakcyjnych pozwala na podniesienie efektywności energetycznej pojazdów (rozumianej jako zmniejszenie strat mocy na rezystancjach sieci i pojazdu) oraz umożliwia zmniejszenie maksymalnych wartości prądów występujących w sieci. Najczęściej jako magazyn energii wykorzystywane są baterie superkondensatorów. W bateryjnych pojazdach elektrycznych i hybrydowych zasobniki istotnie zwiększają efektywność energetyczną, szczególnie podczas rekuperacji energii podczas hamowania [1-3]. W pojazdach trakcyjnych zasobniki pozwalają również na obniżenie strat [4], pomimo iż w wielu sytuacjach istnieje możliwość zwrotu energii bezpośrednio do sieci trakcyjnej [5]. Istotne korzyści, wynikające ze stosowania lokalnych zasobników energii bezpośrednio na pojazdach, związane są z redukcją start energii dzięki ograniczeniu konieczności jej przesyłania na dalekich odcinkach [7, 8]. Ograniczenie szczytowych wartości prądów trakcyjnych wpływa nie tylko na ograniczenie strat przesyłowych w sieci trakcyjnej i obwodach wejściowych napędów trakcyjnych [9-11], ale również na przedłużenie żywotności urządzeń oraz zmniejsza podatność urządzeń w podstacjach na zakłócenia wynikające z tych prądów. Częstym, dodatkowym atutem pojazdów wyposażonych w zasobnik energii jest również ich zdolność do krótkotrwałej jazdy w sytuacjach braku napięcia w sieci trakcyjnej, która pozwala na przykład na opuszczenie skrzyżowania lub dojechanie do najbliższego przystanku. Określone korzyści z zastosowania zasobnika osiągalne są poprzez właściwy dobór metod sterowania zasobnikiem. Metody te mogą optymalizować chwilowe wartości prądu zasobnika lub ograniczać szczytowe wartości prądu pobieranego i oddawanego do sieci ale mogą również dbać o ewentualną gotowość pojazdu do jazdy bez zasilania zewnętrznego.

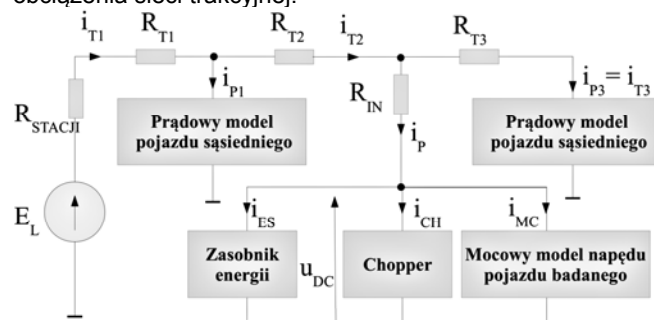
W artykule przedstawiono wpływ wybranych metod sterowania zasobnikiem superkondensatorowym na straty energii związane z jej przesyłaniem w sieci trakcyjnej oraz na stany pracy baterii superkondensatorowej. Uwzględniono przy tym różne stany pracy sieci trakcyjnej, opisane w dalszej części artykułu.

Model sieci trakcyjnej z zespołem pojazdów trakcyjnych

Stworzenie rzetelnego modelu systemu zasilania wraz ze znajdującymi się w jego obrębie pojazdami jest możliwe do wykonania jedynie dla ściśle określonej topologii sieci

i pod warunkiem znajomości stanu pracy każdego z pojazdów w danej chwili czasowej. Takie podejście niestety pozwalałoby jedynie na subiektywną ocenę efektywności użytych metod sterowania zasobnikami dla danej konkretnej sytuacji ruchowej lub dla pewnego zestawu danych testowych. W niniejszym opracowaniu, do badań metod sterowania zasobnikiem energii pojazdu trakcyjnego, został przyjęty uproszczony, ogólny model sieci trakcyjnej, w którym uwzględniono zaledwie trzy pojazdy na jednym odcinku (rys.1). Jeden z pojazdów jest pojazdem badanym a dwa pozostałe, nazwane sąsiednimi, wykonują w określonych odstępach czasowych pełne cykle pracy: rozpędzanie-jazda wybiegiem-hamowanie.

W przyjętym modelu sieć trakcyjna opisywana jest przez napięcie podstacji E_L , prądy płynące w poszczególnych odcinkach sieci trakcyjnej i_{T1} , i_{T2} , i_{T3} i rezystancje szeregowe odpowiedzialne za straty na tych odcinkach: R_{STACJA} , R_{T1} , R_{T2} i R_{T3} . Pojazd z zasobnikiem energii, którego metody sterowania zostały poddane analizie w artykule, realizuje poprzez prąd i_{MC} , typowy cykl pracy napędu trakcyjnego złożonego z czterech odcinków: stanu zatrzymania, przyspieszania, jazdy wybiegiem oraz hamowania. Pozostałe dwa pojazdy pełnią funkcję zaburzenia obciążenia sieci trakcyjnej.



Rys.1. Schemat modelu sieci trakcyjnej z zespołem pojazdów trakcyjnych

Tak przyjęty model sieci trakcyjnej daje możliwość analizy metod sterowania prądem zasobnika energii i_{ES} w sposób odpowiadający warunkom zbliżonym do rzeczywistych. Dodatkowo uwzględniono sytuacje, dla których sieć trakcyjna ma możliwość odbierania energii od pojazdów oraz zdolność taka nie występuje. W sytuacji braku możliwości odbioru energii, zostaje ona wytracona w układzie chopper-a, przez który płynie prąd i_{CH} .

Metody sterowania zasobnikiem superkondensatorowym

W literaturze znanych jest wiele różnych metod sterowania zasobnikiem energii pojazdu trakcyjnego. Za podejście klasyczne można przyjąć metodę polegającą na używaniu zasobnika energii do eliminacji strat powstających na rezystorach hamowania, w sytuacji braku odbioru przez inne pojazdy [5]. Innym podejściem jest uwzględnienie w metodzie sterowania zasobnikiem aktualnej prędkości obrotowej [20] lub realizacja bardziej złożonych zadań optymalizacyjnych takich jak uzależnienie stanu naładowania baterii od zadań stawianych pojazdowi (jazda miejska – pozamiejska) [23] czy zapewnienie napędowi optymalnych warunków napięciowych podczas pracy w stanie odwzbudzenia [21]. Ze względu na dużą różnorodność proponowanych rozwiązań autorzy artykułu proponują klasyfikację metod na następujące cztery podstawowe grupy charakteryzujące się różnymi właściwościami:

A. Metoda sterowania pokrywająca pełne zapotrzebowanie napędu na moc

Typowa metoda sterowania zasobnikiem energii sprowadza się do pełnego pokrycia zapotrzebowania napędu na moc chwilową, mocą dostępną w zasobniku. W takiej sytuacji prawo sterowania prądem zasobnika przyjmuje postać

$$(1) \quad i_{ES} = -i_{MC}$$

Zależność (1) (podobnie jak pozostałe prawa sterowania opisane w artykule) obowiązuje w zakresie dopuszczalnego napięcia na superkondensatorze u_c , które mieści się w przedziale (u_{cMIN}, u_{cMAX}) .

B. Metod sterowania ograniczająca maksymalny prąd trakcji

Metoda ta, umożliwiła przejście prądu trakcji przez zasobnik energii, ale tylko w części, która wykracza powyżej założonej wartości maksymalnej i_{PMAX} . [18]. Prawo sterowania prądem zasobnika przyjmuje postać:

$$(2) \quad i_{ES} = \begin{cases} \text{sign}(i_{MC}) \Delta i_{TC} & \text{dla } \Delta i_{TC} > 0 \\ 0 & \text{dla } \Delta i_{TC} \leq 0 \end{cases}$$

gdzie: sign jest operacją znaku podanego argumentu oraz

$$(3) \quad \Delta i_{TC} = |i_{MC}| - i_{PMAX}$$

C. Metoda sterowania minimalizująca przesyłowe straty mocy dla pojazdu wyizolowanego

Możliwe jest wyznaczenie takiego prądu zasobnika, aby znając rezystancję szeregową superkondensatora R_C , rezystancję szeregową sieci trakcyjnej na odcinku od źródła zasilania do falownika R_S , oraz napięcie pośredniczące napędu u_{DC} i napięcie na superkondensatorze u_c , minimalizował on chwilowe straty mocy na wymienionych rezystancjach [19]. Prawo sterowania umożliwiające powyższą optymalizację, dla pojazdu wyizolowanego na odcinku sekcji trakcyjnej, zostało sformułowane w postaci:

$$(4) \quad i_{ES} = \frac{-1}{1 + \frac{R_C}{R_S} \cdot \frac{u_{DC}^2}{u_c^2}} \cdot i_{MC}$$

D. Metoda sterowania uzależniająca stan energetyczny zasobnika od prędkości pojazdu trakcyjnego

Jednym z wymagań stawianych napędem z zasobnikami energii jest to, aby w stanie zatrzymania miały one zgromadzoną jej maksymalną wartość. Przy takim wymogu, metody sterowania zasobnikami uzależniają napięcie superkondensatora od prędkości chwilowej pojazdu v . Zależność opisującą powyższą metodę sterowania można wyrazić w postaci:

$$(5) \quad u_c = u_{cMAX} - \frac{v}{v_{MAX}} \cdot (u_{cMAX} - u_{cMIN})$$

Prawo sterowania (5) daje możliwość sparametryzowania procesu kontroli zasobnika poprzez określenie prędkości maksymalnej v_{MAX} , dla której zasobnik odda całą dopuszczalną wartość zgromadzonej energii.

Tabela 1. Zestawienie porównanych metod sterowania z ich oznaczeniem

Metoda	Oznaczenie
Pokrycie zapotrzebowania napędu na moc chwilową	ESCIMC
Ograniczenie maksymalnego prądu trakcji	ESCIMAX
Minimalizacja przesyłowych strat mocy dla pojazdu wyizolowanego	ESCOPT
Uzależnienie stanu energetycznego zasobnika od prędkości pojazdu trakcyjnego	ESCVMAX

W tabeli 1 zebrano wszystkie porównywane w artykule metody sterowania z ich oznaczeniami wykorzystywanymi w dalszej części artykułu. Wymienione metody sterowania zostały przebadane w kilku wybranych wariantach, ze zmiennymi wartościami ich charakterystycznych parametrów. Parametry podlegające zmianą zostały zestawione w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie wartości parametrów przyjętych do analizy dla badanych metod sterowania

Metoda	Parametr	Wartości parametrów
ESCIMC	-	-
ESCIMAX	i_{PMAX}	$i_{PMAX1}=100A, i_{PMAX2}=200A, i_{PMAX3}=250A$
ESCOPT	R_s	$R_{s1}=0.04\Omega, R_{s2}=0.08\Omega, R_{s3}=0.12\Omega$
ESCVMAX	v_{MAX}	$v_{MAX1}=20 \text{ km/h}, v_{MAX2}=50 \text{ km/h}, v_{MAX3}=80 \text{ km/h}$

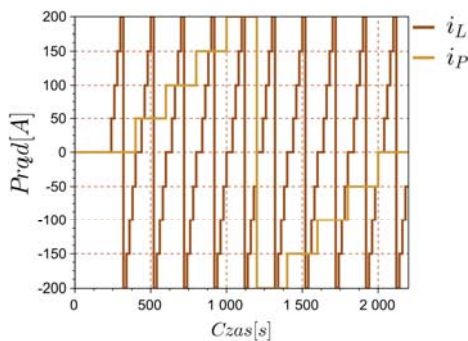
Wyniki badań

Model sieci trakcyjnej z okolicznymi pojazdami (rys.1) został zaimplementowany w środowisku obliczeniowo-symulacyjnym Scilab. Badania zostały przeprowadzone w kilku wariantach tak, aby otrzymane wyniki umożliwiły porównanie metod sterowania zasobnikiem energii w zależności od jego pojemności oraz z uwzględnieniem różnych stanów pracy sieci trakcyjnej. Stany te uwzględniały zdolność podstacji zasilającej odcinek sieci trakcyjnej do obioru energii oraz położenie pojazdów na odcinku linii zasilającej. Przyjęte zostały dwa statyczne położenia pojazdów w punktach proporcjonalnych do dwóch zestawów rezystancji odcinków linii zasilającej $R_{T11}, R_{T21}, R_{T31}$, oraz $R_{T12}, R_{T22}, R_{T32}$ (tab.3).

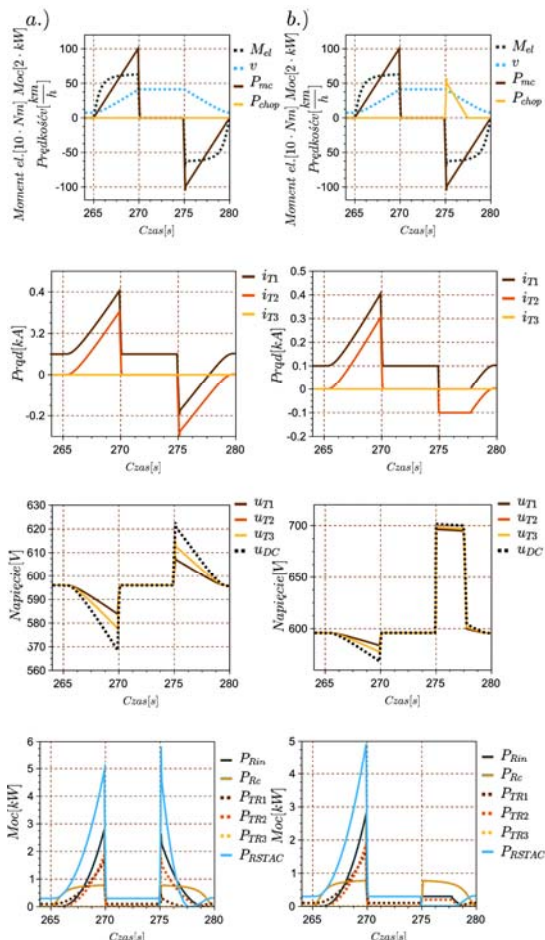
Wykorzystane matematyczne modele pojazdów sąsiednich realizują zadanie obciążenia sieci trakcyjnej pełnym zakresem prądowym napędów. Uzyskano w ten sposób wszystkie możliwe stany pracy sieci trakcyjnej, związane z tymi pojazdami (rys.2).

Tabela 3. Parametry modelu sieci trakcyjnej z zespołem pojazdów trakcyjnych przyjęte do przeprowadzenia badań

Parametr	Wartości parametrów
R_{STAC}	30 mΩ
R_{T1}	$R_{T11}=10$ mΩ, $R_{T12}=30$ mΩ
R_{T2}	$R_{T21}=20$ mΩ, $R_{T22}=20$ mΩ
R_{T3}	$R_{T31}=30$ mΩ, $R_{T32}=10$ mΩ
R_{IN}	30 mΩ
R_C	50 mΩ
$E_L, U_{CHOPPER}$	600 V, 700 V
U_{CMAX}, U_{CMIN}	375 V, 187.5 V
C_{SUPCAP}	$C_{SUPCAP1}=4$ F, $C_{SUPCAP2}=10$ F
J_{NAP}	10 kg·m ²

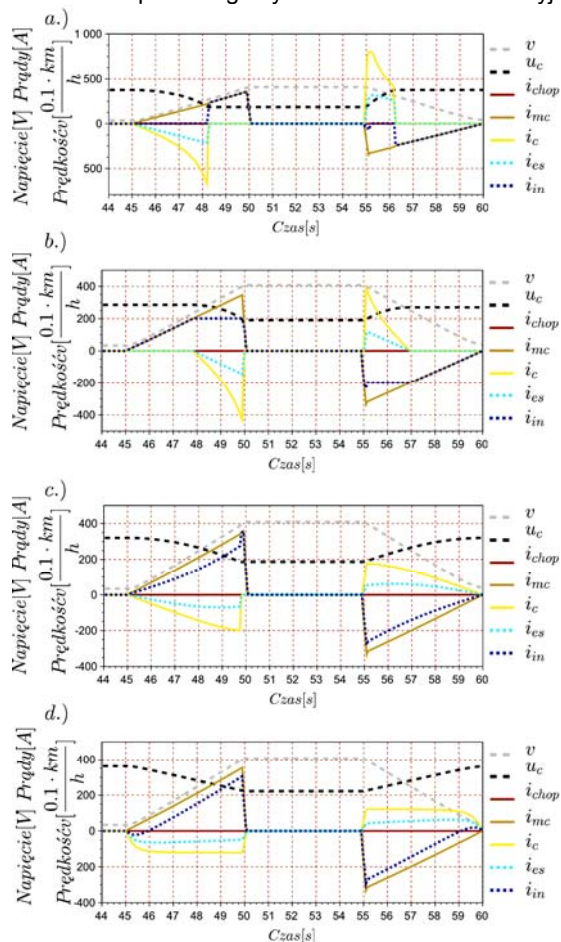


Rys.2. Przebiegi obciążenia sieci trakcyjnej prądem $i_{p1}=i_L$ przez pojazd znajdujący się bliżej stacji oraz prądem $i_{p3}=i_L$ znajdującym się na końcu odcinka sieci zasilającej



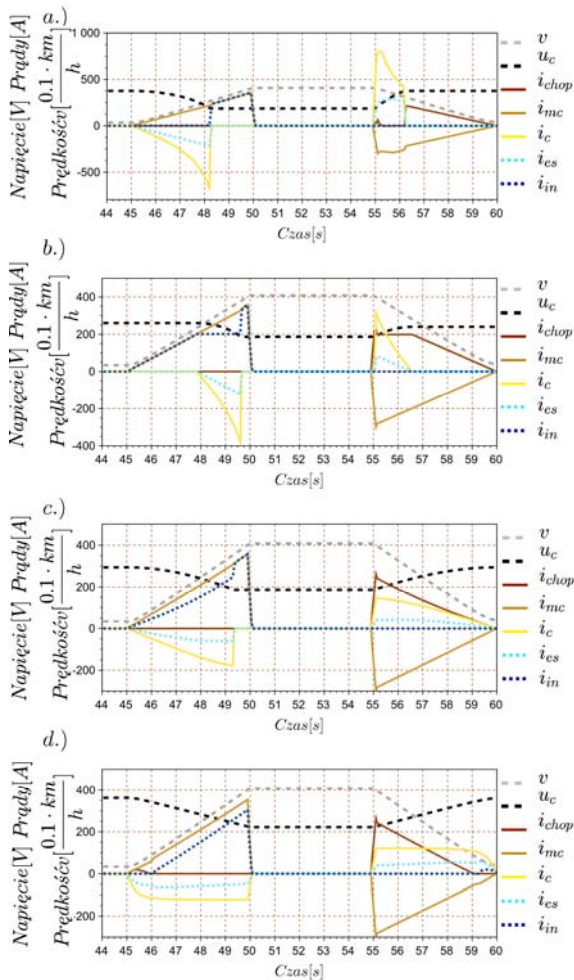
Rys.3. Wybrane przebiegi przejściowe w linii trakcyjnej dla a.) zwrotu energii do podstacji, b.) braku zdolności odbioru energii

Pojedynczy eksperyment symulacyjny został zaplanowany na czas 2200 sekund, w trakcie których pojazd z zasobnikiem realizuje 220 cykli pracy napędu ze sterowanym zasobnikiem energii. Na każde 10 cykli pracy napędu z zasobnikiem przypada jeden cykl symulowanego obciążenia przez pojazd znajdujący się w wcześniejszym odcinku linii, podczas gdy na 10 cykli jego pracy przypada jeden cykl pracy pojazdu znajdującego się na końcu linii zasilającej. Daje to możliwość przeanalizowania wszelkich możliwych przypadków związanych z pobieraniem i oddawaniem energii przez pojazdy. Na rys. 3-5 przedstawiono przykładowe przebiegi przejściowe dotyczące stanu napędu, stanu sieci trakcyjnej, strat energii (rys.3) oraz stanu zasobnika energii (rys.4-5) dla jednego cyklu pracy pojazdu trakcyjnego z zasobnikiem energii. Na rys.3 przedstawione wielkości oznaczają odpowiednio: M_{el} – moment elektromagnetyczny napędu z zasobnikiem, P_{mc} – moc chwilowa napędu z zasobnikiem, P_{chop} – moc tracona w układzie chopper-a, P_{Rin} – moc tracona na obwodach wejściowych napędu, P_{Re} – moc tracona na rezystancji szeregowej superkondensatora, P_{TR1} , P_{TR2} , P_{TR3} , P_{RSTAC} – moc tracona na poszczególnych odcinkach sieci trakcyjnej.



Rys.4. Przebiegi przejściowe dla przypadku zwrotu energii do podstacji z wykorzystaniem metod sterowania a.) ESCIMC, b.) ESCIMAX, c.) ESCOPT, d.) ESCVMAX

W wariancie, w którym sieć ma możliwość odbierania energii od pojazdów (rys.3a, rys.4) oraz w wariancie, gdy odbieranie energii nie jest możliwe i jeśli inne pojazdy jej nie odbiorą, to musi ona zostać wytracona w układach choppera-a (rys.3b, rys.5).

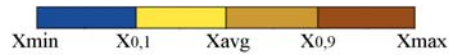


Rys.5. Przebiegi przejściowe dla przypadku braku możliwości zwrotu energii do podstacji z wykorzystaniem metod sterowania a.) ESCIMC, b.) ESCIMAX, c.) ESCOPT, d.) ESCVMAX

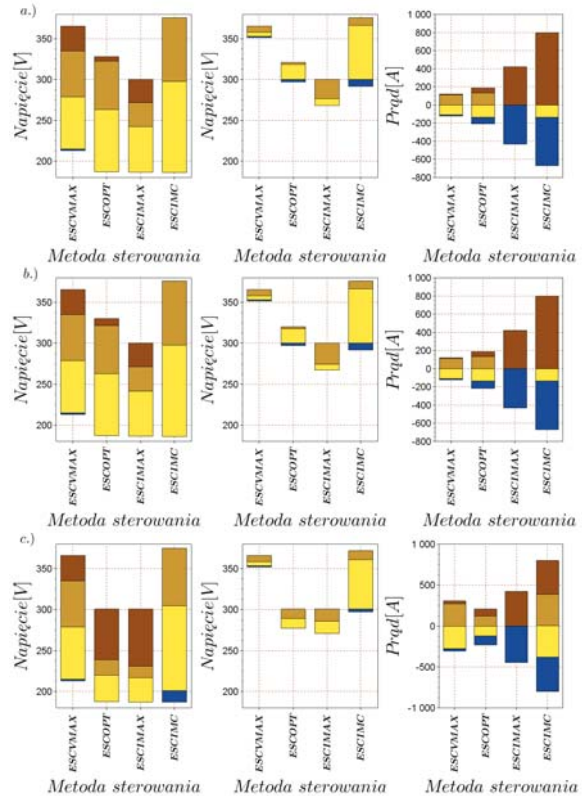
Rysunki 4-5 przedstawiają przykładowe przebiegi przejściowe pracy zasobnika energii, sterowanego każdą z opisywanych w artykule metod. Przebieg prądu superkondensatora jest ściśle zależny od zastosowanej metody sterowania. Dla metody **ESCIMC** prąd zasobnika i_{ES} odwzorowuje ujemną wartość prądu falownika i_{mc} , co wynika bezpośrednio z (1), ale tylko w początkowej fazie cyklu przyspieszania i hamowania, podczas gdy metoda **ESCIMAX** odwzorowuje prądem i_{ES} kształt prądu falownika w końcowej fazie cyklu przyspieszania i hamowania. W metodzie **ESCOPT** przebieg prądu superkondensatora i_c narasta w sposób zbliżony do prądu falownika, podczas gdy **ESCVMAX** charakteryzuje się prądem superkondensatora zbliżonym do przebiegu stałwartościowego (przy założeniu liniowo zmiennego prądu falownika). Oddawanie energii przez napęd i brak możliwości odebrania jej przez podstację skutkuje koniecznością załączenia chopper-a, wytracającego oddawaną energię. Charakter pracy chopper-a jest zależny od metody sterowania zasobnika energii. Metoda **ESCIMC** w czasie odbierania energii przez zasobnik praktycznie całkowicie dezaktywuje moduł chopper-a. W metodzie **ESCIMAX**, wartość prądu przepływającego przez chopper jest stała w czasie, gdy zasobnik odbiera część energii od napędu. Dla metody **ESCVMAX** przebieg prądu w układzie chopper-a jest prostoliniowy, przy czym charakterystyczne jest to, że chopper przestaje pracować zanim napęd wyhamuje.

Ilościowa analiza porównawcza metod sterowania zasobnikiem energii

Ze względu na rozległy zakres badań do ilościowej analizy wyników związanych ze stanem pracy superkondensatora posłużono się podstawowymi statystykami charakteryzującymi przebiegi prądu i napięcia superkondensatora. Na rysunku 6 przedstawiono legendę statystyk, wykorzystanych do opracowania wyników umieszczonych na rysunkach 7-8. Posłużono się statystykami w postaci: wartości minimalnej, dziesiątego centyla, wartości średniej, dziewięćdziesiątego centyla oraz wartości maksymalnej.

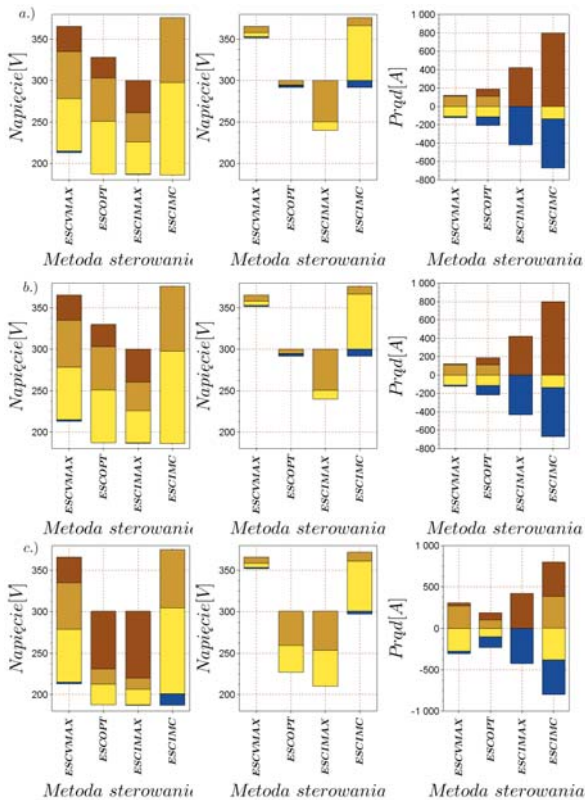


Rys.6. Podstawowe statystyki wykorzystane do opisu rozkładów prawdopodobieństwa przebiegów, naniesione na skalę barwną.



Rys.7. Statystyki wartości prądów i napięć na superkondensatorze w układzie z możliwością zwrotu energii do podstacji dla zestawu parametrów modelu a.) $C_{SUPCAP1}$, R_{T11} , R_{T21} , R_{T21} b.) $C_{SUPCAP1}$, R_{T12} , R_{T22} R_{T22} , c.) $C_{SUPCAP2}$, R_{T11} , R_{T21} , R_{T21} . Lewa i prawa kolumna - pełny zakres czasu trwania badania, środkowa kolumna - wybrane chwile czasowe, dla których prędkość pojazdu była mniejsza od 5km/h

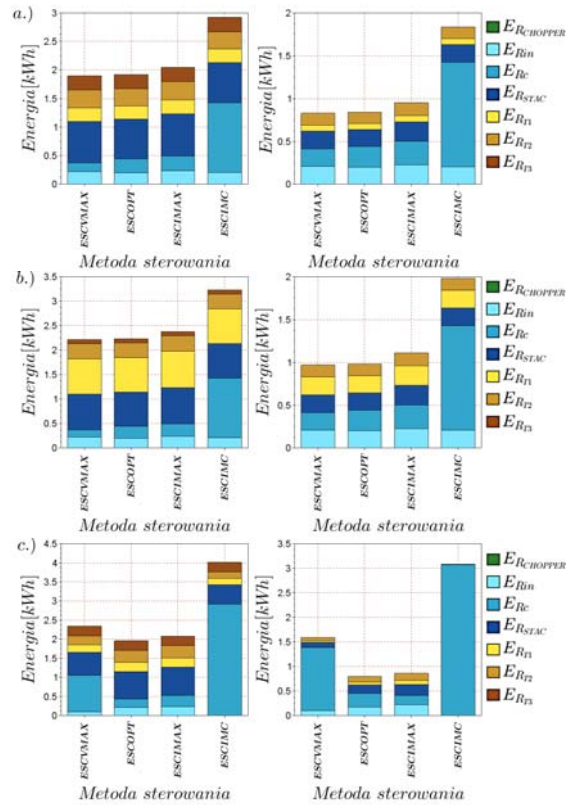
Metoda **ESCVMAX** umożliwia zgromadzenie maksymalnej ilości energii dla pojazdu zatrzymanego. Metoda sterowania **ESCIMC** zawsze wykorzystuje pełen zakres pracy punktu napięciowego superkondensatora, co wynika bezpośrednio z zależności (1). Metody **ESCIMAX** oraz **ESCOPT**, wraz ze wzrostem wartości pojemności superkondensatora, przestają wykorzystywać jego możliwości do gromadzenia energii. O ile w metodzie **ESCIMAX** uzysk ten można zwiększyć obniżając wartość graniczną prądu $i_{P_{MAX}}$ (w ujęciu granicznym, dla $i_{P_{MAX}}=0$ obie metody **ESCIMC** i **ESCIMAX** są sobie równoważne), o tyle w metodzie **ESCOPT** rozdział prądów uwarunkowany jest rzeczywistymi warunkami związanymi z pracą sieci trakcyjnej.



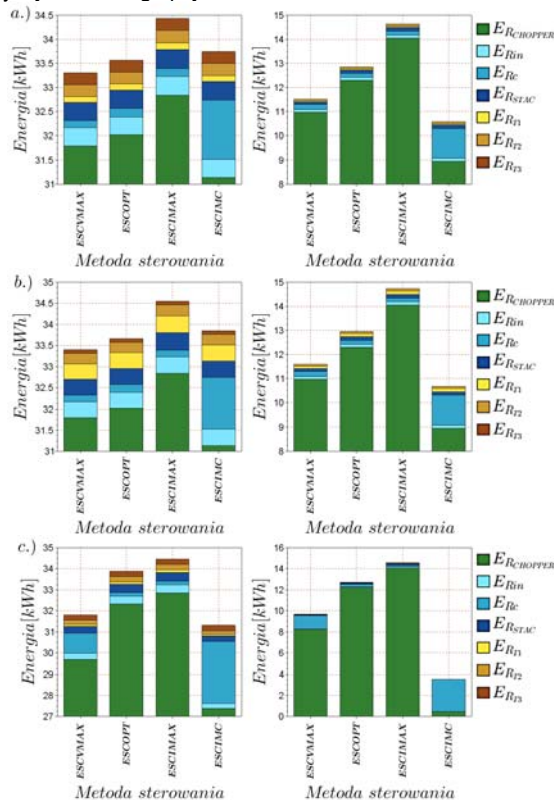
Rys.8. Statystyki wartości prądów i napięć na superkondensatorze w układzie z brakiem możliwości zwrotu energii do podstacji podstacji dla zestawu parametrów modelu a.) $C_{SUPCAP1}$, R_{T11} , R_{T21} , R_{T12} , R_{T22} b.) $C_{SUPCAP1}$, R_{T12} , R_{T22} R_{T22} , c.) $C_{SUPCAP2}$, R_{T11} , R_{T21} , R_{T21} . Lewa i prawa kolumna - pełny zakres czasu trwania badania, środkowa kolumna - wybrane chwile czasowe, dla których prędkość pojazdu była mniejsza od 5km/h

Efektywność energetyczna metod sterowania zasobnikiem energii

Zebrane wyniki badań posłużyły do oceny metod sterowania ze względu na straty przesyłania energii w układzie sieć trakcyjna - napęd – zasobnik energii. Na rysunkach 9-10 przedstawiono całkowite straty występujące w sieci trakcyjnej w trakcie trwania jednego eksperymentu o łącznym czasie 2200 sekund w zależności od przyjętej metody sterowania zasobnika energii, z rozbiem na udział strat w poszczególnych podukładach. Przedstawione na rysunkach wielkości oznaczają odpowiednio: $E_{Rchopper}$ – straty energii w układzie chopper-a, E_{Rin} , E_{Rc} – straty energii w obwodach wejściowych napędu i superkondensatorze, E_{RSTAC} , E_{RT1} , E_{RT2} , E_{RT3} – straty energii na poszczególnych rezystancjach sieci trakcyjnej. W przypadku możliwości zwrotu energii do sieci, najgorsze wyniki daje metoda **ESCIMC**. Ciągła wymiana energii pomiędzy zasobnikiem, w którym płyną duże wartości prądów a napędem, skutkuje dużymi stratami w zasobniku energii (rys.9). Pozostałe metody wykazują zależność efektywności energetycznej od wartości parametrów przyjętych w procesie sterowania. Dla pojazdu wyizolowanego (tj. bez innych pojazdów na odcinku linii sekcji trakcyjnej) najlepsze wyniki efektywności energetycznej wykazuje metoda **ESCOPT**, której podstawy analityczne dotyczą sytuacji z pojazdem wyizolowanym. W układzie z pojazdami okolicznymi metoda ta daje również bardzo dobre wyniki. Pomimo bardzo prostego prawa sterowania, metoda **ESCIMAX** umożliwia nie tylko redukcję wartości szczytowych prądów trakcyjnych ale również zwiększenie efektywności energetycznej.



Rys.9. Straty energii w układzie z możliwością zwrotu energii do podstacji dla zestawu parametrów modelu a.) $C_{SUPCAP1}$, R_{T11} , R_{T21} , R_{T12} , R_{T22} b.) $C_{SUPCAP1}$, R_{T12} , R_{T22} R_{T22} , c.) $C_{SUPCAP2}$, R_{T11} , R_{T21} , R_{T21} . Lewa kolumna – cykl pracy z pojazdami okolicznymi, prawa kolumna cykl pracy wyizolowanego pojazdu



Rys.10. Straty energii w czasie 2200 sekund w symulowanym układzie z brakiem możliwości zwrotu energii do podstacji dla zestawu parametrów modelu a.) $C_{SUPCAP1}$, R_{T11} , R_{T21} , R_{T21} , b.) $C_{SUPCAP1}$, R_{T12} , R_{T22} R_{T22} , c.) $C_{SUPCAP2}$, R_{T11} , R_{T21} . Lewa kolumna – cykl pracy z pojazdami okolicznymi, prawa kolumna cykl pracy wyizolowanego pojazdu

W sytuacji, gdyby sąsiednie pojazdy, zdolne do odbierania energii, nie występowały, a pojemność zasobnika była dostatecznie duża, aby zmagazynować całą energię oddawaną przez pojazd, to wówczas metoda **ESCIMC** byłaby najlepsza. Pojemności zasobników nie są jednak dostatecznie duże i w układzie z innymi pojazdami odbierającymi energię przy małych wartościach pojemności zasobników metody **ESCIMAX** i **ESCOPT** charakteryzują się wyższą efektywnością energetyczną (lewa kolumna rys. 10a i 10b). Im większa pojemność zasobnika tym korzyści wynikające z najprostszej metody **ESCIMC** wyraźnie rosną (rys. 10c, 10d). W przypadku braku możliwości zwrotu energii do podstacji zastosowanie zasobnika w każdym przypadku jest warte rozważenia. Uzyskane wyniki potwierdzają, że w takiej sytuacji oraz przy małej wartości pojemności zasobnika najprostsza metoda sterowania **ESCIMC** daje gorsze rezultaty energetycznej sprawności od metod **ESCOPT** oraz **ESCIMAX**, z prawidłowo dobranymi parametrami.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono porównanie czterech metod sterowania zasobnikiem energii w pojazdach trakcyjnych. Metody porównano ze względu na stany energetyczne osiągnięte przez zasobnik superkondensatorowy oraz efektywność energetyczną możliwą do uzyskania w układzie przesyłanie energii w sieci trakcyjnej.

W artykule wykazano, że w zależności od pojemności zasobnika oraz stanu w jakim pracuje sieć trakcyjna należy indywidualnie dobierać metodę sterowania oraz jej parametry w taki sposób, aby korzyści płynące ze stosowania metody sterowania zasobnikiem odzwierciedlały zapotrzebowanie przewoźnika, dla którego niejednokrotnie o wiele ważniejsza od aspektu ekologiczno-ekonomicznego jest zdolność pojazdu do choćby krótkotrwałego ruchu przy braku napięcia w sieci trakcyjnej (opuszczenie skrzyżowania).

Autorzy: dr inż. Andrzej Radecki, Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: andrzej.radecki@p.lodz.pl; dr inż. Piotr Chudzik, Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: piotr.chudzik@p.lodz.pl.

LITERATURA

- [1] Eshani M., Gao Y., Gay S. E., Emadi A., Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles, CRC Press, New York, 2005
- [2] Lukic S.M., Cao J., Bansal R.C., Rodriguez F., Emadi A., Energy Storage Systems for Automotive Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55 (2008), nr 6, 2258-2267
- [3] Vazquez S., Lukic S.M., Galvan E., Franquelo L.G., Carrasco J.M., Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57 (2010), nr 12, 3881-3895
- [4] Pawłowski M., Pojazdowe zasobniki energii dla trakcji kolejowej, *Pojazdy Szynowe*, 4 (2009), 25-29.
- [5] Grbović P.J., Delarue P., Le Moigne P., Bartholomeus P., The Ultracapacitor-Based Controlled Electric Drives With Braking and Ride-Through Capability: Overview and Analysis, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58 (2011), nr 3, 925-936
- [6] Jisheng Hu, Yukun Zhao, Xiaojing Liu, The design of regeneration braking system in light rail vehicle using energy-storage Ultra-capacitor, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, (2008), 1-5
- [7] 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), 1496-1500
- [8] Czucha J., Karwowski K., Mizan M. Puzdro P., Efektywność odzysku energii hamowania elektrodynamicznego w

- komunikacji miejskiej, *Przegląd Elektrotechniczny* 10 (2004), 1016-1019.
- [9] Chłodnicki Z., Koczara W., Supercapacitor storage application for reduction drive negative impact on supply grid, in *Proc. Compat. Power Electron.*, (2005), 78-84
- [10] Grbovic P. J., Delarue P., Le Moigne P., Bartholomeus P., The Ultracapacitor-Based Regenerative Controlled Electric Drives With Power-Smoothing Capability, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59 (2012), nr 12, 4511-4522
- [11] Giziński Z., Gąsiewski M., Giziński P., Żuławnik M., Zasobnikowe układy zasilania w pojazdach trakcyjnych, *Pojazdy Szynowe*, 3 (2011), 125-133
- [12] Barrero R., Tackoen X., Van Mierlo J., Analysis and configuration of supercapacitor based energy storage system on-board light rail vehicles, *Power Electronics and Motion Control Conference*, (2008), 1512-1517
- [13] Nasri A., Moghadam M.F., Mokhtari H., Timetable optimization for maximum usage of regenerative energy of braking in electrical railway systems, *International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion*, (2010), 1218-1221
- [14] Wan Qingzhu, Chen Jianye, Huang ZhenHua, ZANJI Wang, Real-Time Tracking of Substation's Feeder Current Based on Traction Calculation, 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, (2007), 777-782.
- [15] Rufer A., Hotellier D., Barrade P., A supercapacitor-based energy storage substation for voltage compensation in weak transportation networks, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19 (2004), nr 2, 629-636
- [16] Allegre A.L. Bouscayrol A., Trigui R., Influence of control strategies on battery/supercapacitor hybrid Energy Storage Systems for traction applications, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, (2009), 213-220
- [17] Grbovic P. J., Delarue P., Le Moigne P., Bartholomeus P., Regenerative controlled electric drive with extended ride-through capability using an ultra-capacitor as energy storage device, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 58 (2011), nr 3, 925-936
- [18] Radecki A., Chudzik P., Optymalizacja strat energii w torze zasilania napędu trakcyjnego z zasobnikiem superkondensatorowym, *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne*, 94 (2012), 43-48
- [19] Radecki A., Chudzik P., Algorytm sterowania zasobnikiem superkondensatorowym pojazdu trakcyjnego minimalizujący przesyłowe straty mocy uwzględniający stany pracy sieci trakcyjnej, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN: 0033-2097, 6 (2014), 127-132, 2014
- [20] D. Iannuzzi and P. Tricoli, "Speed-based state-of-charge tracking control for metro trains with onboard supercapacitors," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 4, pp. 2129-2140, Apr. 2012
- [21] Wang W. et al., A Novel Energy Management Strategy of Onboard Supercapacitor for Subway Applications With Permanent-Magnet Traction System, in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 6, pp. 2578-2588, July 2014
- [22] Bartłomiejczyk, M. Ograniczanie energochłonności zelektryfikowanego transportu miejskiego: przegląd metod i doświadczenia eksploatacyjne. *Pojazdy Szynowe*, (2016), 28-43.
- [23] Grigans L., Latkovskis L., "Study of control strategies for energy storage system on board of urban electric vehicles, Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010, Ohrid, 2010, pp. T9-34-T9-38.
- [24] Borowik L., Cywiński A., Modernization of a Trolleybus Line System in Tychy as an Example of Eco-Efficient Initiative Towards a Sustainable Transport System. *Journal of Cleaner Production*, Vol.117 (2016), 188-198.
- [25] Barrero R., Tackoen X., Van Mierlo J., Analysis and Configuration of Supercapacitor Based Energy Storage System On-Board Light Rail Vehicles, *EPE-PEMC2008, Poznan, Poland*, pp. 1535-1540, September 2008.
- [26] Destraz B., Barrade P., Rufer A., Klohr M., Study and Simulation of the Energy Balance of an Urban Transportation Network, *EPE2007, Aalborg, Denmark*, pp. 1-10, 2007.