

# Algorytm sterowania zasobnikiem superkondensatorowym pojazdu trakcyjnego minimalizujący przesyłowe straty mocy uwzględniający stany pracy sieci trakcyjnej

**Streszczenie.** Współczesne napędy elektryczne stosowane w pojazdach elektrycznych i hybrydowych coraz częściej wykorzystują zasobniki superkondensatorowe jako magazyny energii o dużej gęstości mocy. Zasobniki te wykorzystywane są zarówno do rekuperacji energii, jak i do zmniejszania szczytowych wartości prądów w układach zasilania. W artykule przedstawiono metodę sterowania zasobnikiem energii trakcyjnego układu napędowego, której nadrzędnym celem jest minimalizacja strat mocy w układach przesyłowych oraz w superkondensatorach. Zaproponowany algorytm sterowania uwzględnia możliwość rekuperacji energii w sytuacji braku możliwości zwrotu energii do sieci trakcyjnej. W artykule zamieszczono przebiegi symulacyjne sterowania zasobnikiem energii z wykorzystaniem zaproponowanego algorytmu.

**Abstract.** Modern drives used in electric and hybrid vehicles are often using ultracapacitors as energy storage that have a high power density. These storages are used both for energy recuperation and to reduce peak values of currents in power system. In this paper a method of energy storage control for traction drive to minimize power losses in transmission system and ultracapacitors was presented. The proposed control algorithm allow also a proper energy recuperation in case when power grid can not receive energy. Simulation waveforms of energy storage control process was included in this paper. (**Control algorithm of traction vehicle ultracapacitor storage to minimize power losses in various power grid operation conditions**).

**Słowa kluczowe:** zasobnik superkondensatorowy, optymalizacja strat mocy, sieć trakcyjna, napęd trakcyjny.

**Keywords:** ultracapacitor storage, power loss optimization, traction grid, traction drive.

doi:10.12915/pe.2014.06.24

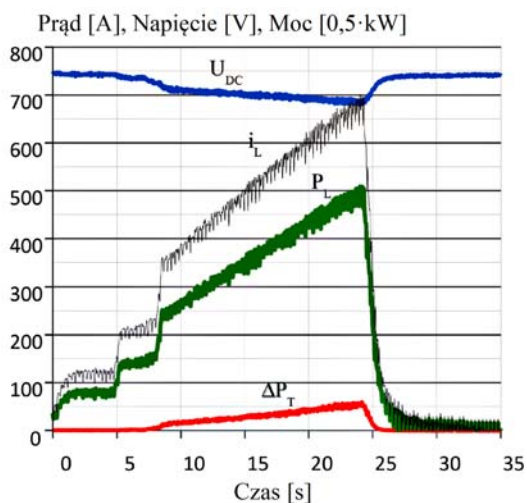
## Wstęp

Odzyskiwanie energii mechanicznej w trakcie hamowania pojazdu jest zagadnieniem powszechnie wykorzystywanym w napędach elektrycznych i hybrydowych. Wykorzystanie baterii superkondensatorów, jako pojazdowych zasobników energii, w sposób istotny zwiększa efektywność rekuperacji energii [1-3]. Podobne rozumowanie przeprowadza się często w przypadku pojazdów zasilanych z sieci trakcyjnej [4, 5]. Nie prowadzi ono jednak w tych przypadkach do takiej samej poprawy efektywności energetycznej. Znaczna część energii powstającej podczas hamowania nowoczesnego napędu zasilanego z sieci trakcyjnej jest przekazywana bezpośrednio do sieci i nie może być w całości traktowana jako straty [5]. Możliwości przyjmowania energii przez sieć nie są jednakowe w każdych warunkach. Zależą one między innymi od ilości pojazdów i ich chwilowego stanu pracy. W przypadku trolejbusów, które charakteryzują się wyższymi oporami ruchu sytuacje, w których prostownikowe podstacje i sąsiedniej pojeździe nie są w stanie odebrać energii od hamującego pojazdu zdarzają się rzadziej niż w przypadku tramwajów, metra czy kolei. Wysokie ceny zasobników w połączeniu z rozważaną dużą zdolnością do zwrotu energii przez pojazdy sprawiają, że ich stosowanie tylko w celu poprawy efektywności związanej z gromadzeniem energii powstałej podczas hamowania staje się nieopłacalne lub przynosi zysk dopiero po bardzo długim okresie użytkowania [7, 8]. Inną korzyścią wynikającą ze stosowania zasobnika jest ograniczenie szczytowych wartości prądu pobieranego lub oddawanego do sieci. Dzięki temu zwiększa się żywotność urządzeń trakcyjnych i zmniejsza amplitudy zaburzeń napięcia w zasilających podstacjach energetycznych. Zaletą obniżenia szczytowej wartości prądu pobieranego lub oddawanego do sieci jest również znaczne ograniczenie strat energii powstających w obwodach zasilania napędów [9-11]. Jeżeli w bilansie energetycznym uwzględni się możliwość ograniczenia tych strat, to poprzez odpowiednie sterowanie prądem zasobnika można uzyskać oszczędności pozwalające na skrócenie okresu zwrotu nakładów poniesionych na zasobnik.

## Rola strat przesyłowych w ogólnym bilansie energetycznym pojazdu trakcyjnego

Dostarczanie energii do pojazdów za pomocą sieci trakcyjnej jest zagadnieniem stosunkowo złożonym. Istnieje wiele czynników mających wpływ na jakość dostarczanej energii oraz możliwości jej swobodnego przepływu od podstacji do pojazdu i z pojazdu do podstacji. Istotną rolę w tym zagadnieniu pełni zdolność podstacji do odbierania energii powstającej podczas hamowania, obecność innych pojazdów na tym samym odcinku zasilania oraz rezystancja przewodów zasilających. Każdy z tych elementów ma znaczący wpływ na powstawanie strat i powinien być brany pod uwagę podczas analizy możliwości podniesienia sprawności energetycznej napędu [12]. Stosunkowo duże znaczenie dla ograniczenia poboru energii przez poruszające się pojazdy ma możliwość hamowania odzyskowego, w którą wyposażone są praktycznie wszystkie współczesne napędy. Z punktu widzenia bilansu energii dla pojedynczego pojazdu, najważniejszym czynnikiem ograniczającym jego sprawność staje się brak możliwości oddania energii do sieci, która często zasilana jest przez podstacje o charakterze prostownikowym – bez możliwości zwrotu energii do sieci energetycznej. Jednym ze znanych sposobów obniżenia tego typu strat jest zsynchronizowanie ruchu pojazdów w taki sposób, aby w czasie hamowania jednego, inny pobierał nadmiar energii z sieci. Takie rozwiązanie można spotkać w pociągach metra, w których możliwe jest zapewnienie dużej zgodności ruchu pojazdów z rozkładem jazdy [13]. Ograniczenie strat energii wynikających z przekazywania jej znacznych ilości w bardzo krótkich, na tle całej jazdy odcinków czasu, można uzyskać za pomocą odpowiedniego ukształtowania charakterystyki jazdy [14]. Innym często rozważanym sposobem ograniczenia tego typu strat jest zastosowanie stacjonarnych zasobników energii, montowanych na podstacjach zasilania lub lokalnych na pojazdach, które gromadzą nadmiar energii, chroniąc ją przed wytraceniem na rezystorach hamowania. Zgromadzona w ten sposób energia jest oddawana, gdy wystąpi zapotrzebowanie ze strony innych pojazdów [15].

Ważnym elementem związanym ze stratami energii są przewody trakcyjne [16]. Wartość powstających w nich strat zależy od rezystancji odcinka sieci trakcyjnej między źródłem energii i odbiornikiem oraz od wartości kwadratu pobieranego lub oddawanego przez napęd prądu. Na rysunku 1 przedstawiono wyniki pomiarów przeprowadzonych podczas typowego ruszania z przystanku tramwaju z pasażerami w mieście Grudziądz.



Rys.1. Przebiegi napięcia sieci w miejscu styku z pojazdem  $U_{DC}$ , prądu pobieranego przez pojazd  $i_L$ , mocy pobieranej przez pojazd  $P_L$  i mocy traconej na rezystancji przewodów trakcyjnych  $\Delta P_T$ .

Na wykresach zamieszczono przebiegi rzeczywistych wartości napięcia  $U_{DC}$ , prądu  $i_L$  w przewodzie zasilającym pojazd, mocy pobieranej przez układ napędowy  $P_L$  oraz strat mocy  $\Delta P_T$  związanych z przesyłem energii. Wartość szczytowa mocy traconej osiąga 30kW. Straty w analizowanym przypadku wynoszą około 8% całkowitej energii pobieranej przez pojazd. Jest to wielkość mająca istotny wpływ na całkowitą sprawność układu obejmującego podstację zasilającą, sieć trakcyjną i pojazd.

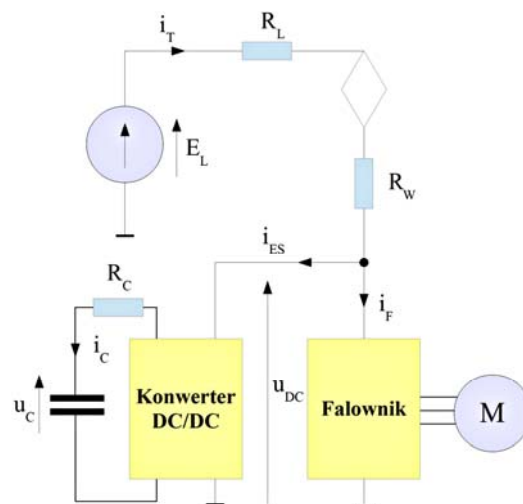
### Obniżanie strat energii w układach zasilania pojazdów trakcyjnych

Jednym ze sposobów ograniczenia strat związanych z przesyłaniem energii do pojazdu jest zapewnienie możliwie małej wartości rezystancji przewodów doprowadzających zasilanie od podstacji do pojazdu. Rezystancja sieci, wynika z jej struktury i zastosowanych do jej budowy elementów i materiałów. Na jej wartość mają wpływ przekroje przewodów i ich długości. Zwykle parametry te dobiera się na podstawie obciążenia danego odcinka spodziewanym ruchem pojazdów [17]. Uwzględnienie obecności na danym odcinku sieci większej liczby pojazdów, w tym pojazdów z możliwością hamowania odzyskowego, znacznie utrudnia analizę strat w sieci [17]. Z punktu widzenia pojazdu jako odbiornika (podczas rozpędzania) lub źródła energii (podczas hamowania) na wartość strat przesyłowych ma wpływ nie tylko sama rezystancja przewodów między podstacją a pojazdem, ale również obecność innych pojazdów, które w ramach tej samej podstacji mogą w danej chwili pobierać lub oddawać energię. W tej sytuacji wypadkowa wartość rezystancji łączącej źródło energii z odbiornikiem jest funkcją odległości poszczególnych pojazdów oraz ich aktualnego stanu (przyspieszanie/hamowanie) i jest trudna do określenia. Pozytywnym zjawiskiem jest to, że przekazywana między sąsiednimi pojazdami energia przesyłana jest krótszą drogą niż gdyby musiała być wymieniana z podstacją.

Ponieważ straty powstające w sieciach trakcyjnych zależą od kwadratu przepływającego prądu, możliwe jest ich zmniejszenie poprzez ograniczenie jego wartości szczytowych. Można to osiągnąć za pomocą narzucania określonego sposobu poruszania się pojazdu lub dzięki zastosowaniu stacjonarnych zasobników energii z superkondensatorami umieszczonych w miejscach odległych od podstacji. Jednym z rozważanych sposobów obniżenia strat związanych z przepływem prądu w przewodach zasilających pojazd jest zmniejszenie lub ograniczenie maksymalnych wartości prądów poprzez wykorzystanie zasobnika, który jest rozładowywany w czasie zwiększonego poboru prądu przez pojazd, a ładowany podczas hamowania odzyskowego.

### Zastosowanie zasobnika superkondensatorowego do zmniejszenia strat przesyłowych w sieci trakcyjnej

W celu przeprowadzenia analizy możliwości ograniczenia strat mocy związanych z jej przesyłaniem, przyjęto uproszczenie, polegające na zastąpieniu struktury sieci trakcyjnej, składającej się z podstacji zasilającej i wszystkich pojazdów pobierających lub oddających do niej energię, zastępczym źródłem napięciowym o sile elektromotorycznej  $E_L$  i rezystancji zastępczej  $R_S$ . Wartość tych parametrów jest zmienna w czasie i zależy od napięcia podstacji, odległości pojazdu od podstacji oraz od stanu wszystkich pojazdów znajdujących się na tym samym odcinku sieci. Dokładne określenie zastępczego napięcia i rezystancji, jakie w danej chwili widziane są od strony zacisków pojazdu, jest dość kłopotliwe, ponieważ obie wielkości zmieniają się w czasie w szerokim zakresie wartości. Dla potrzeb analizy przyjęto uproszczenie polegające na zastąpieniu układu zasobnika superkondensatorowego źródłem prądowym o regulowanej wartości. Zastosowanie powyższych założeń pozwala na przedstawienie układu zasilania pojazdu w postaci schematu zastępczego przedstawionego na rysunku 2.



Rys.2. Schemat zastępczy układu zasilania pojazdu trakcyjnego z zasobnikiem superkondensatorowym.

W przyjętym schemacie zastępczym napęd wraz z zasobnikiem reprezentuje układ dwóch regulowanych źródeł prądowych. Źródło prądowe  $i_F(t)$  przedstawia falownik napędzający silnik trakcyjny, a źródło  $i_{ES}(t)$  odpowiada zasobnikowi. Prąd pobierany z sieci trakcyjnej  $i_T(t) = i_F(t) + i_{ES}(t)$  jest wielkością odpowiadającą za powstawanie strat przesyłowych na rezystancji szeregowej  $R_S(t) = R_W(t) + R_L(t)$ , w skład której wchodzi zastępcza rezystancja sieci trakcyjnej  $R_L(t)$  i względnie stała rezystancja obwodów wejściowych pojazdu  $R_W(t)$ .

Zastosowanie dwukierunkowej przetwornicy DC/DC jako elementu łączącego obwód pośredniczący falownika napędu z baterią superkondensatorów umożliwia pracę układu napędowego we wszystkich kombinacjach różniących się kierunkiem przepływu energii w układzie sieć – napęd – zasobnik. Wymiana energii między baterią superkondensatorów, falownikiem i siecią trakcyjną nie jest zawsze jednakowo efektywna energetycznie. Sprawność układu przetwornicy DC/DC i baterii superkondensatorów zależy w dużym stopniu od kierunku przepływu energii oraz od stanu naładowania baterii [17]. Dla uproszczenia rozważań przyjęto, że za wszystkie straty wynikające z przepływu prądu przez przekształtnik i baterię reprezentowane są przez zastępczą rezystancję szeregową  $R_C$ . Pominięcie innych rodzajów strat pozwala na opisanie zależności między prądem zasobnika  $i_{ES}(t)$  i prądem baterii  $i_C(t)$  jako

$$(1) \quad i_C = \frac{u_{DC}(t)}{u_C(t)} \cdot i_{ES}(t)$$

gdzie:  $u_{DC}$  – napięcie na obwodzie pośredniczącym,  $u_C$  – napięcie na superkondensatorze.

Bilans energii w takim układzie można opisać równaniem

$$(2) \quad E_T(t) = E_F(t) + \Delta E_S(t) + E_{ES}(t) + \Delta E_{ES}(t)$$

gdzie:  $E_T$  – energia pobierana przez pojazd z sieci trakcyjnej,  $E_F$  – energia pobierana przez napęd falownikowy,  $\Delta E_S$  – straty energii na rezystancji szeregowej  $R_S$ ,  $E_{ES}$  – energia pobierana do superkondensatora,  $\Delta E_{ES}$  – straty energii w rezystancji zastępczej zasobnika.

Moc tracona w torze zasilania pojazdu o rezystancji  $R_S$  jest proporcjonalna do kwadratu wartości chwilowej prądu  $i_T$ . Moc tracona na rezystancji zastępczej kondensatora  $R_C$  jest proporcjonalna do kwadratu wartości chwilowej prądu baterii  $i_C$ , która jest funkcją prądu zasobnika  $i_{ES}$  oraz ilorazu napięć falownika i zasobnika.

Łączne straty energii w przedziale czasu  $\langle t_0, t_1 \rangle$  można opisać jako sumę całek z mocy traconych w rezystancjach sieci, obwodów zasilania i zasobnika:

$$(3) \quad \Delta E_{T(t_0, t_1)} = \int_{t_0}^{t_1} \left( R_S(\tau) \cdot i_T^2(\tau) + R_C(\tau) i_C^2(\tau) \right) d\tau$$

Zadanie optymalizacji strat energii za pomocą użycia zasobnika energii polega na wymuszeniu w zasobniku takiego przebiegu prądu  $i_{ES}(t)$ , który zapewni minimalizację wyrażenia (3) dla zadanego przebiegu prądu  $i_F(t)$

$$(4) \quad \min_{i_{ES}(t)_{t_0}^{t_1}} \left\{ \begin{array}{l} \int_{t_0}^{t_1} R_S(\tau) \cdot (i_F(\tau) + i_{ES}(\tau))^2 d\tau + \\ \int_{t_0}^{t_1} R_C(\tau) \cdot \left( \frac{u_{DC}(\tau)}{u_C(\tau)} i_{ES}(\tau) \right)^2 d\tau \end{array} \right\}$$

Wyrażenie (4) ma postać względnie skomplikowaną. Podstawowym warunkiem zastosowania algorytmu minimalizacji strat energii jest znajomość przewidywanego ruchu pojazdu wyrażona za pomocą trajektorii prądowej  $i_F(t)$  oraz jej zgodność z przejazdem rzeczywistym. Rozwiązanie zadania optymalizacyjnego wymaga również znajomości wielkości  $R_S(t)$  oraz zastępczego napięcia sieci trakcyjnej

$E_L(t)$  za cały odcinek czasu, dla którego ma zostać wyznaczone sterowanie. Brak dokładnej wiedzy o wartościach sygnałów wejściowych i niemożliwość określenia parametrów obwodu wejściowego sprawia, że tak postawione zadanie optymalizacyjne nie jest rozwiązywalne.

### Redukcja strat energii poprzez minimalizację strat mocy

W praktyce nie ma możliwości dokładnego określenia wyrażen występujących w równaniu (4), głównie ze względu na potrzebę znajomości przebiegów i parametrów jazdy przed rozpoczęciem ruchu. Można jedynie rozpatrywać pewne przybliżone rozwiązania, które zakładają znajomość średniej trajektorii ruchu lub ograniczać zmienność wybranych parametrów [18]. Taki sposób realizacji sterowania zasobnikiem znajduje zastosowanie szczególnie w sieciach zasilających kolei i metra. W obu tych przypadkach bardzo pomocnym elementem jest duża powtarzalność procesów jazdy. Praktycznie każdy przejazd składa się z pojedynczej, wyraźnej fazy rozruchu, fazy jazdy z małym lub zerowym momentem i ostatniej fazy hamowania. W takiej sytuacji łatwo wyznacza się optymalne warunki sterowania, pozwalające na poprawę sprawności. W przypadku tramwajów taka sytuacja występuje tylko wtedy, gdy pojazdy poruszają się na wydzielonych torowiskach z kontrolą ruchu poprzecznego. Zwykle jednak ruch tramwajów i trolejbusów podlega znacznym ograniczeniom wynikającym z lokalnych uwarunkowań drogowych wynikających z ruchu ulicznego, takich jak skrzyżowania lub korki w dużych miastach. Stany o największym znaczeniu dla algorytmu minimalizacji strat energii, czyli chwile o zwiększonym poborze lub oddawaniu energii występują często na skutek zdarzeń drogowych takich jak zatrzymanie i ruszanie na światłach ulicznych lub przy przejściach dla pieszych lub zatrzymaniu z powodu korków ulicznych. Tak silnie zaburzony ruch jest bardzo trudny do odzwierciedlenia nawet za pomocą średnich parametrów o charakterze statystycznym lub w postaci algorytmu predykcyjnego. Wyznaczenie przejazdu typowego dla tramwaju czy trolejbusu staje się niemożliwe, nawet w zakresie bardzo ograniczonego odcinka czasu. Jednocześnie w czasie jazdy znacznym zmianom ulegają wartości rezystancji i napięcia sieci widziane od strony pojazdu. Niemożliwe jest więc znalezienie optymalnego sterowania w postaci zadanego kształtu prądu zasobnika, który zapewni minimalizację strat energii za zadany z góry okres czasu. W takich warunkach, zamiast poszukiwania rozwiązania zadania optymalizacyjnego (4) za zadany z góry okres czasu, przy znajomości prądu, który będzie pobierany z sieci, można rozważyć zadanie minimalizacji chwilowych strat mocy, wyrażonych jako

$$(5) \quad \Delta P_T(t) = R_S(t) \cdot (i_F(t) + i_{ES}(t))^2 + R_C(t) \left( \frac{u_{DC}(t)}{u_C(t)} i_{ES}(t) \right)^2 = 2R_S(t) \cdot i_F(t) \cdot i_{ES}(t) + R_S(t) \cdot i_F^2(t) + \left( R_S(t) + R_C(t) \left( \frac{u_{DC}(t)}{u_C(t)} \right)^2 \right) i_{ES}^2(t)$$

Zadanie minimalizacji polega na znalezieniu takiej wartości chwilowej (nie przewidywanej trajektorii) prądu zasobnika  $i_{ES}(t)$ , która zapewni minimalizację wartości chwilowej mocy strat

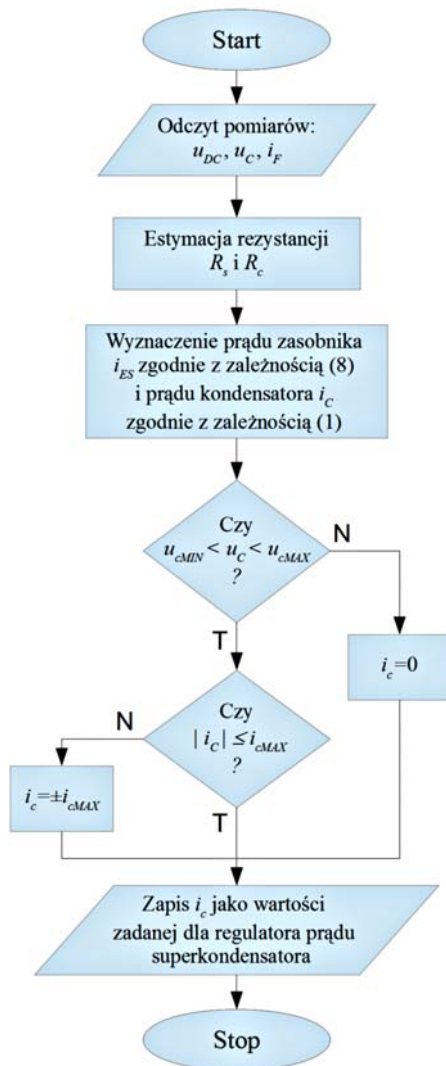
$$(6) \quad \min_{i_{ES}(t)} \{\Delta P_T(t)\}.$$

Znalezienie minimum funkcji poprzez wyznaczenie miejsca zerowego pochodnej cząstkowej

$$(7) \quad \frac{\partial \Delta P_T(t)}{\partial i_{ES}} = 0$$

prowadzi do wyrażenia na wartość prądu zasobnika w postaci

$$(8) \quad i_{ES}(t) = \frac{-1}{1 + \frac{R_C(t)}{R_S(t)} \cdot \frac{u_{DC}^2(t)}{u_C^2(t)}} \cdot i_F(t).$$



Rys.3. Algorytm sterowania superkondensatorem uwzględniający jego ograniczenia.

### Algorytm sterowania zasobnikiem pojazdowym minimalizujący straty przesyłowe

Minimalizacja straty mocy dostarczonej lub odbieranej z napędu sprowadza się w proponowanej metodzie do obliczenia wartości chwilowych prądu baterii superkondensatorowej  $i_c(t)$  zgodnie z zależnościami (8) i (1), a następnie wymuszenia tego prądu w obwodzie przekształtnika DC/DC z superkondensatorem (rys.2). Ze względu na ograniczenia charakteryzujące superkondensator, w algorytmie sterowania należy uwzględnić zarówno jego napięciowy zakres pracy, jak i jego dopuszczalną wartość prądu (rys.3).

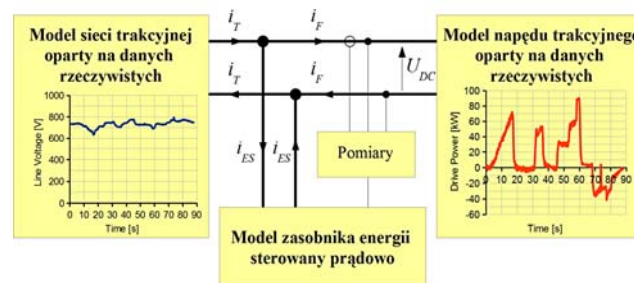
W sytuacji, gdy punkt pracy superkondensatora będzie znajdował się na ograniczeniu prądowym lub napięciowym, proponowane rozwiązanie będzie charakteryzowało się brakiem zdolności minimalizacji strat przesyłowych.

Zastosowanie powyższej metody w układzie sterowania zasobnikiem wymaga znajomości wartości chwilowych prądu falownika napędu  $i_F(t)$ , napięcia baterii  $u_C(t)$  i napięcia obwodu pośredniczącego  $u_{DC}(t)$ . Wszystkie te wielkości są dostępne jako sygnały pomiarowe. Największym problemem jest określenie chwilowej wartości rezystancji sieci trakcyjnej  $R_S(t)$ , która może ulegać zmianie w szerokim zakresie wartości.

### Badania symulacyjne minimalizacji strat mocy w układzie zasilania pojazdu trakcyjnego

W celu weryfikacji poprawności działania proponowanej metody minimalizacji strat energii w sieci trakcyjnej, poprzez użycie superkondensatorowego zasobnika pojazdowego zarejestrowano pomiary napięć i prądów w rzeczywistych tramwajach poruszających się w różnych warunkach jazdy w kilku polskich miastach. Uzyskane dane pomiarowe poddano analizie, która pozwoliła na wyznaczenie przebiegów napięcia zastępczego sieci zasilającej, rezystancji zastępczej sieci i prądu pobieranego przez napęd. Na podstawie tych danych wykonano badania symulacyjne (w programie PSIM POWERSYS) w oparciu o rzeczywiste dane wejściowe, w których porównano przebiegi otrzymane w pojeździe bez zasobnika z przebiegami, które wystąpiłyby w pojeździe z zasobnikiem.

Na rysunku 4 zamieszczono schemat blokowy modelu symulacyjnego układu napędowego z zasobnikiem superkondensatorowym, w oparciu o który zostały przeprowadzone badania algorytmu minimalizacji strat energii.



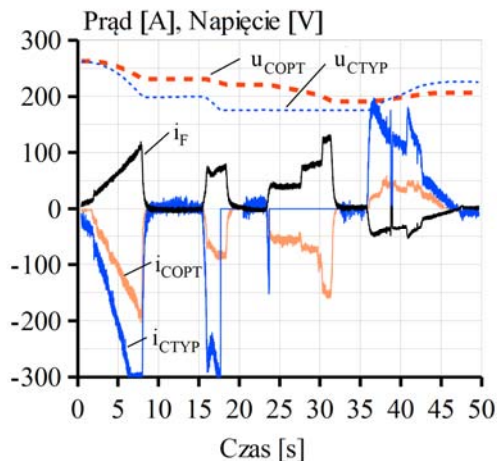
Rys.4. Schemat blokowy modelu symulacyjnego wykorzystanego do weryfikacji algorytmów sterowania zasobnikiem energii.

Na rysunkach 5 – 7 zostały przedstawione przebiegi procesu sterowania zasobnikiem energii dla dwóch różnych algorytmów. Jako typowy algorytm odniesienia, przyjęto metodę sterowania prądem zasobnika superkondensatorowego, w której zasobnik w trakcie rozruchu pokrywa całe zapotrzebowanie napędu na energię do chwili osiągnięcia założonej wartości minimalnej energii w zasobniku, a w trakcie hamowania pobiera całą energię oddawaną przez napęd do chwili zgromadzenia dopuszczalnej wartości maksymalnej energii. Tego typu sterowanie wykorzystywane jest w szczególności w układach zasilania, które nie umożliwiają zwrotu energii.

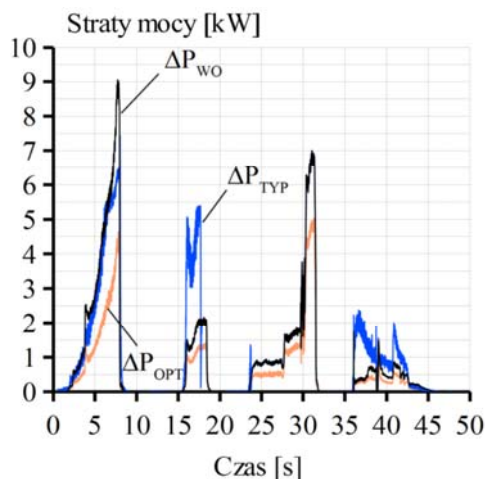
Zamieszczone przebiegi odzwierciedlają zmienność napięcia baterii kondensatorów, prądu baterii kondensatorów, straty mocy i straty energii, odpowiednio dla algorytmu sterowania proponowanego w artykule ( $u_{COPT}(t)$ ,  $i_{COPT}(t)$ ,  $\Delta P_{OPT}(t)$ ,  $\Delta E_{OPT}(t)$ ) oraz dla typowego algorytmu sterowania zasobnikiem ( $u_{CTYP}(t)$ ,  $i_{CTYP}(t)$ ,  $\Delta P_{CTYP}(t)$ ,  $\Delta E_{CTYP}(t)$ ). Dodatkowo zostały zamieszczone przebiegi straty

mocy i energii dla przypadku braku zasobnika energii ( $\Delta P_{wo}(t)$ ,  $\Delta E_{wo}(t)$ ).

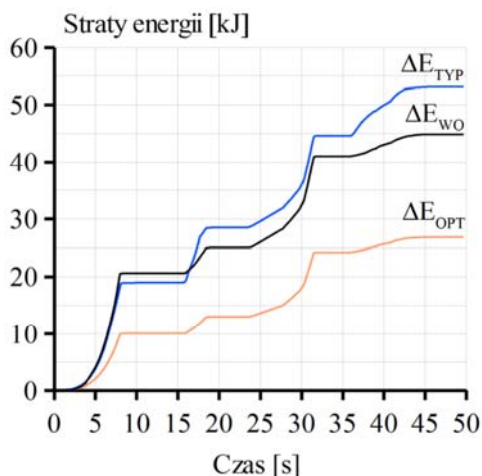
Do badań symulacyjnych przyjęto ograniczenia punktu pracy superkondensatora wynoszące odpowiednio:  $u_{cMIN}=150V$ ,  $u_{cMAX}=300V$ ,  $i_{cMAX}=300A$ . Początkowy punkt pracy superkondensatora do badań symulacyjnych został ustalony w taki sposób, aby możliwe było przedstawienie istoty sterowania danego zależnościami (8) i (1).



Rys.5. Przebiegi prądów i napięć uzyskane w procesie sterowania zasobnikiem superkondensatorowym napędu trakcyjnego.



Rys.6. Straty mocy w układzie zasilania napędu trakcyjnego dla różnych algorytmów sterowania zasobnikiem energii.



Rys.7. Straty energii w układzie zasilania napędu trakcyjnego dla różnych algorytmów sterowania zasobnikiem energii.

Dla przyjętych parametrów baterii superkondensatorów następuje transformacja prądu  $i_{ES}(t)$  do prądu  $i_C(t)$ , która skutkuje stratami na rezystancji szeregowej  $R_C(t)$  stanowiącymi istotny składnik w bilansie mocy. W analizowanym przypadku straty te spowodowały gorszą sprawność sterowania przepływem mocy w układzie zasilania napędu niż w sytuacji, gdyby zasobnika nie było.

Jednym z powodów montowania zasobników superkondensatorowych w układach zasilania pojazdów trakcyjnych jest ograniczona zdolność odbierania przez sieć energii uzyskanej podczas hamowania odzyskowego. Proponowany w artykule algorytm ograniczania przesyłowych strat mocy obejmuje swoim działaniem również tego typu stany. W przypadku ograniczonej zdolności odbierania energii przez sieć pojawia się nadmierny wzrost napięcia sieci, które poprzez dodatkowy algorytm można interpretować jako znaczny wzrost rezystancji sieci. Proponowany algorytm sterowania zasobnikiem energii sposób bezzwłoczny doprowadzi, w takiej sytuacji, do przejścia prądu hamującego falownika przez zasobnik.

### Podsumowanie

Zaproponowany w artykule algorytm sterowania zasobnikiem superkondensatorowym umożliwia zmniejszenie strat mocy w liniach przesyłowych sieci trakcyjnych z uwzględnieniem strat mocy w baterii kondensatorów. Pomimo, iż minimalizacja chwilowych strat mocy nie jest równoważna minimalizacji strat energii za zadany okres, to wykorzystanie proponowanego algorytmu może przyczynić się do istotnych oszczędności energii. W artykule wskazano, że sterowanie zasobnikiem superkondensatorowym algorytmem bazującym wyłącznie na odbieraniu i dostarczaniu pełnej mocy napędowi może prowadzić do większych strat energii niż w przypadku braku zasobnika.

Ważną zaletą proponowanego algorytmu jest objęcie swoim działaniem stanów braku zdolności odbierania przez sieć energii odzyskanej podczas hamowania. Taki mechanizm działania algorytmu sterowania sprawia, że układ realizując minimalizację strat przesyłowych jednocześnie zapewnia funkcjonalność układu ograniczającego straty na rezystorach hamowania.

### 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. Pazdro P., Efektywność odzysku energii hamowania elektrodynamicznego w komunikacji miejskiej, *Przegląd Elektrotechniczny* 10 (2004), 1016-1019.
- [9] Chlodnicki 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), n.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, Zanj 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), n.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), n.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

---

**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.