

KRAWCZYK Grzegorz, SZYCHTA Elżbieta

WPŁYW URZĄDZEŃ MAGAZYNUJĄCYCH ENERGIĘ ELEKTRYCZNĄ NA EFEKT STABILIZACJI NAPIĘCIA W SIECI TRAKCYJNEJ METRA

Streszczenie

W artykule przedstawiono wpływ urządzeń magazynujących energię elektryczną na efekt stabilizacji napięcia w sieci trakcyjnej metra. W tym celu wykonano badania symulacyjne podstacji trakcyjnej metra wyposażonej w układ akumulacji energii elektrycznej oraz samej podstacji bez zasobnika. W powyższych badaniach zastosowano zasobnik superkondensatorowy o pojemności energetycznej 10 kWh i napięciu 900 V.

WSTĘP

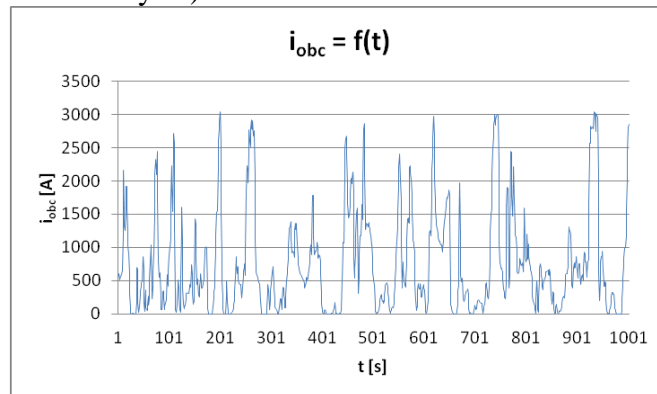
W ciągu ostatnich lat w transporcie szynowym można zaobserwować wzrost zainteresowania urządzeniami do magazynowania energii elektrycznej, zwanych zasobnikami (ESD – Energy Storage Devices)[1, 2, 3, 4, 5,6]. Jest to związane z wciąż rosnącymi cenami energii elektrycznej, które wymuszają podejmowanie działań mających na celu ograniczenie energochłonności w transporcie, m.in. poprzez zastosowanie najnowszych technologii. Najczęściej stosowanymi typami urządzeń magazynujących energię elektryczną są koła zamachowe (Flywheels), akumulatory elektrochemiczne (Electrochemical Energy Storage Devices) oraz superkondensatory (Supercapacitors). Wykorzystywane są zarówno instalacje mobilne tych urządzeń, tzn. zasobniki umieszczane są w pojeździe, jak i stacjonarne, gdzie zasobniki podłączone są do sieci trakcyjnej równolegle z podstacjami trakcyjnymi.

Ważnym aspektem wynikającym z zastosowania tych urządzeń jest stabilizacja napięcia w sieci trakcyjnej i ograniczanie wartości szczytowych poboru mocy z podstacji trakcyjnej. Im napięcie jest stabilniejsze, tym są lepsze warunki, zarówno do przyśpieszania pociągów jak i do zwrotu energii podczas hamowania rekuperacyjnego. W związku z tym faktem, istnieje możliwość rozładowywania zasobnika w momencie zwiększonego zapotrzebowania na moc oraz akumulowania przez to urządzeń nadwyżek mocy pojawiających się w sieci trakcyjnej.

1. BADANIA SYMULACYJNE PODSTACJI TRAKCYJNEJ WYPOSAŻONEJ W ZASOBNIK ENERGII ELEKTRYCZNEJ I BEZ ZASOBNIKA

Badania symulacyjne przeprowadzono przy wykorzystaniu pakietu SimPowerSystems/Simulink, który jest narzędziem do modelowania i symulacji obwodów elektrycznych i systemów elektroenergetycznych.

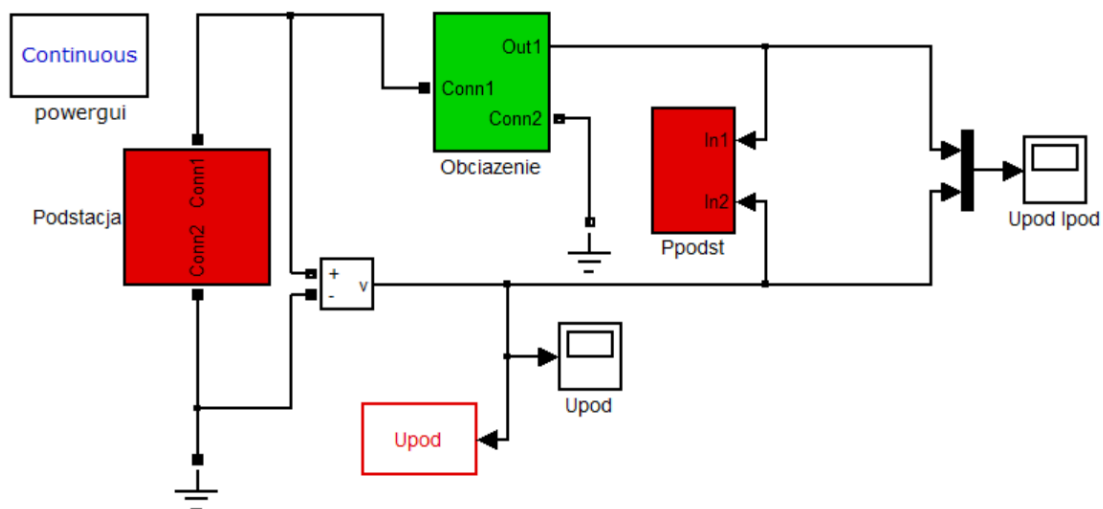
Danymi wejściowymi modelu podstacji są rzeczywiste wartości prądu obciążenia podstacji (po stronie prądu stałego) uzyskane w trakcie pomiarów na jednej z podstacji metra warszawskiego przy częstotliwości kursowania pociągów, co 3-4 minuty (w szczycie kursowania pociągów metra – rys.1).



Rys. 1. Przebieg wartości chwilowych prądu obciążenia podstacji A-18 (fragment - pierwszych 1000 wartości) poza szczytem kursowania pociągów metra dla przedziału czasowego 8.00.00 – 9.00.00

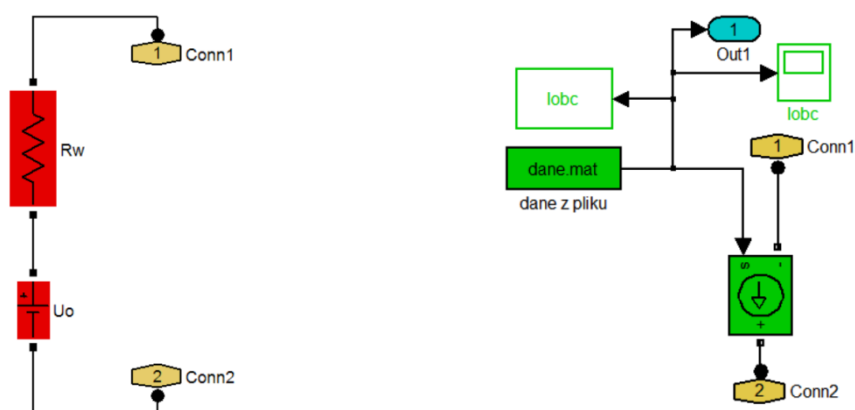
1.1. Model symulacyjny podstacji trakcyjnej metra bez zasobnika energii

Model symulacyjny podstacji trakcyjnej (rys. 2) składa się z podsystemu *Podstacja* połączonego szeregowo z blokiem *Obciążenia*.



Rys. 2. Model symulacyjny podstacji metra w pakiecie SimPowerSystems

Podsystem *Podstacja* (rys. 3a) zamodelowany został, jako szeregowe połączenie źródła napięciowego, odzwierciedlającego napięcie jałowe podstacji i rezystora o rezystancji odpowiadającej rezystancji wewnętrznej podstacji.



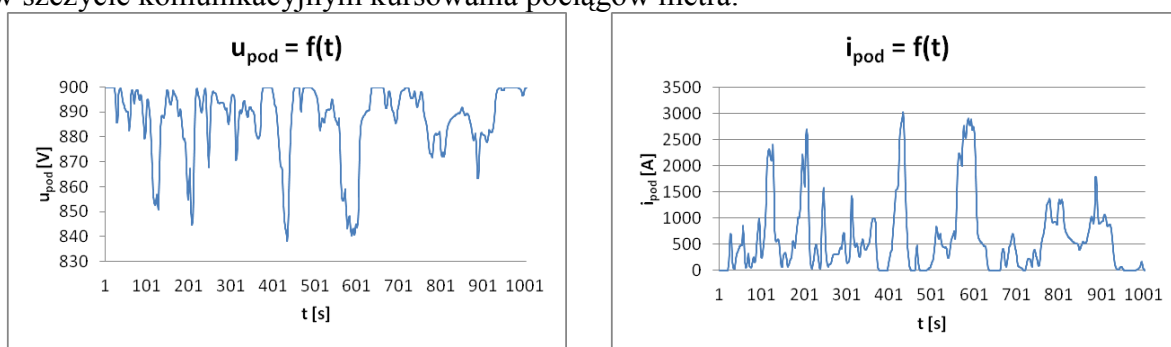
a) Podsystem „Podstacja”

b) Podsystem „Obciążenie”

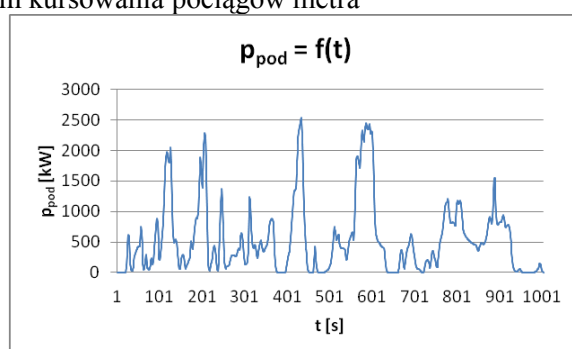
Rys. 3. Podsystemy „Podstacja” i „Obciążenie”

Natomiast obciążenie podstacji zamodelowano, jako odbiornik sterowany prądem obciążenia podstacji (rys. 1) uzyskany w oparciu o pomiary przeprowadzone na rzeczywistej podstacji trakcyjnej metra (podsystem „Obciążenie” rys. 3b).

Na rys. 5 i rys. 6 przedstawiono przebiegi uzyskane na podstawie badań symulacyjnych w szczycie komunikacyjnym kursowania pociągów metra.



Rys. 5. Fragment przebiegu wartości chwilowych napięcia i prądu podstacji w szczycie komunikacyjnym kursowania pociągów metra

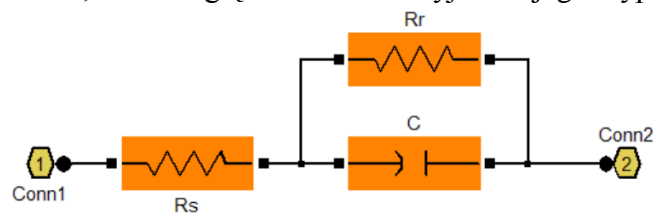


Rys. 6. Fragment przebiegu wartości chwilowych mocy podstacji w szczycie komunikacyjnym kursowania pociągów metra

1.2. Model symulacyjny podstacji trakcyjnej metra wyposażonej w zasobnik superkondensatorowy

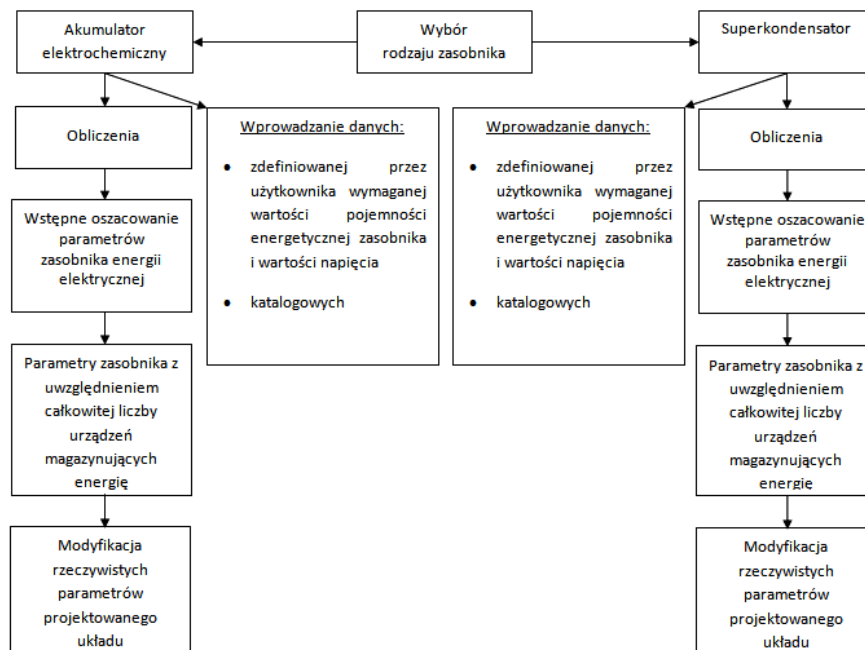
W zależności od podejścia badawczego kondensatory dwuwarstwowe są różnorodnie modelowane. Wynika to z faktu, że znajdują one zastosowanie w różnych dziedzinach i że każdy z modeli zapewnia różną dokładność opisywanych procesów zachodzących w tych

urządzeniach. Komputerowy model superkondensatora (rys. 7) powstał w oparciu o klasyczny model fizyczny kondensatora, bez uwzględnienia indukcyjności jego wyprowadzeń.



Rys. 7. Model symulacyjny zasobnika superkondensatorowego

W celu określenia odpowiedniej konfiguracji połączeń szeregowo – równoległych pojedynczych superkondensatorów i wyznaczenia parametrów zastępczych zasobnika, opracowano aplikację w środowisku Matlab (rys. 8).



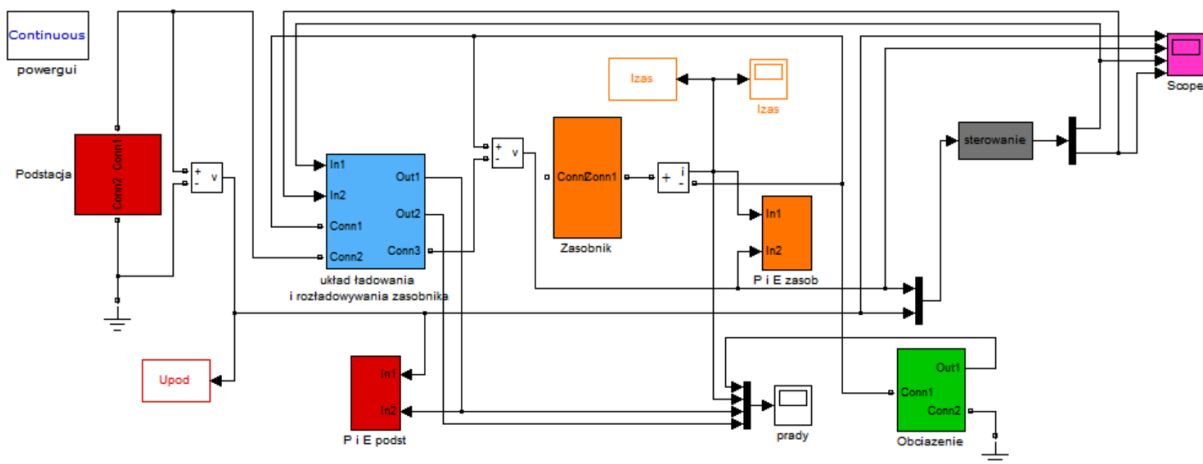
Rys. 8. Algorytm działania programu wyznaczającego parametry baterii zasobników

Jako dane wejściowe programu przyjęto: wymaganą przez użytkownika pojemność energetyczną zasobnika, który byłby w stanie obsłużyć 95 % wszystkich przypadków występujących w sieci trakcyjnej metra (wyznaczoną w pracy [1]) i wartość napięcia, na które ma zostać zwymiarowana bateria (wartość napięcia panującego w sieci trakcyjnej) oraz wybrane dane katalogowe pojedynczego superkondensatora o pojemności 3000 F i napięciu 2,8 V. Z danych katalogowych [7], w obliczeniach uwzględniono znamionową pojemność i napięcie pojedynczego urządzenia magazynującego oraz jego wymiary (długość, szerokość, wysokość), a także jego masę. Podczas obliczania parametrów baterii superkondensatorów dodatkowo, jako wielkości wejściowe wprowadzane są wartości: rezystancji wewnętrznej pojedynczego urządzenia R_s i rezystancji odpowiedzialnej za samorozładowywanie R_r . W tabeli nr 1 przedstawiono wybrane parametry zastępcze zasobnika uzyskane w wyniku działania powyższej aplikacji.

Tab.1. Wybrane parametry zastępcze zasobnika

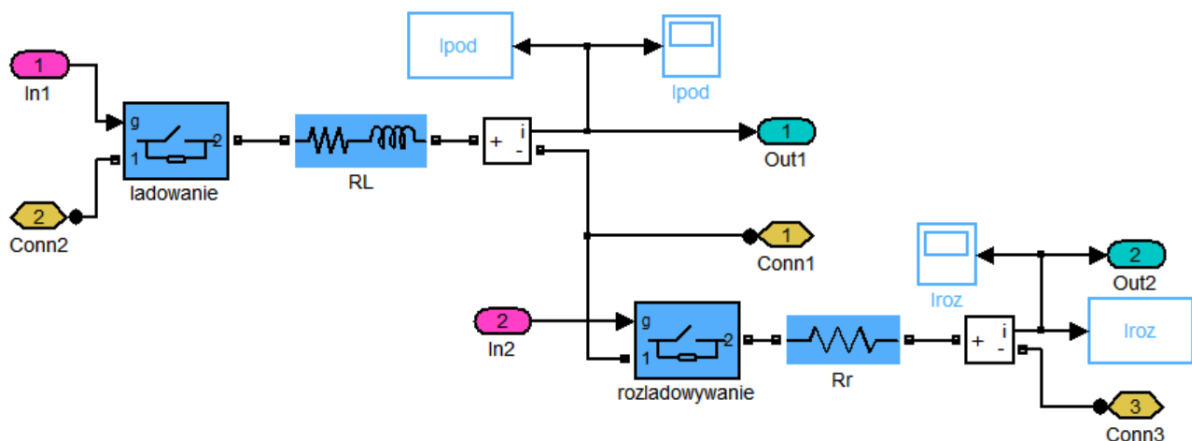
U = 900 V, E = 10 kWh LSUC-3000F/2,8V-P		
Pojemność wypadkowa zasobnika	F	93,17
Rezystancja Rs zasobnika	Ω	124,22
Rezystancja Rr zasobnika	Ω	6440
Liczba superkondensatorów połączonych szeregowo	szt.	322
Liczba gałęzi równoległych superkondensatorów	szt.	10
Liczba superkondensatorów wchodzących w skład zasobnika	szt.	3220
Masa zasobnika	kg	2028,6

Model symulacyjny podstacji metra wyposażonej w układ akumulacji energii (rys. 9) przebadano przy założeniu, że w chwili przed komutacją napięcie na zasobniku było równe 0 V (zasobnik nienaładowany).



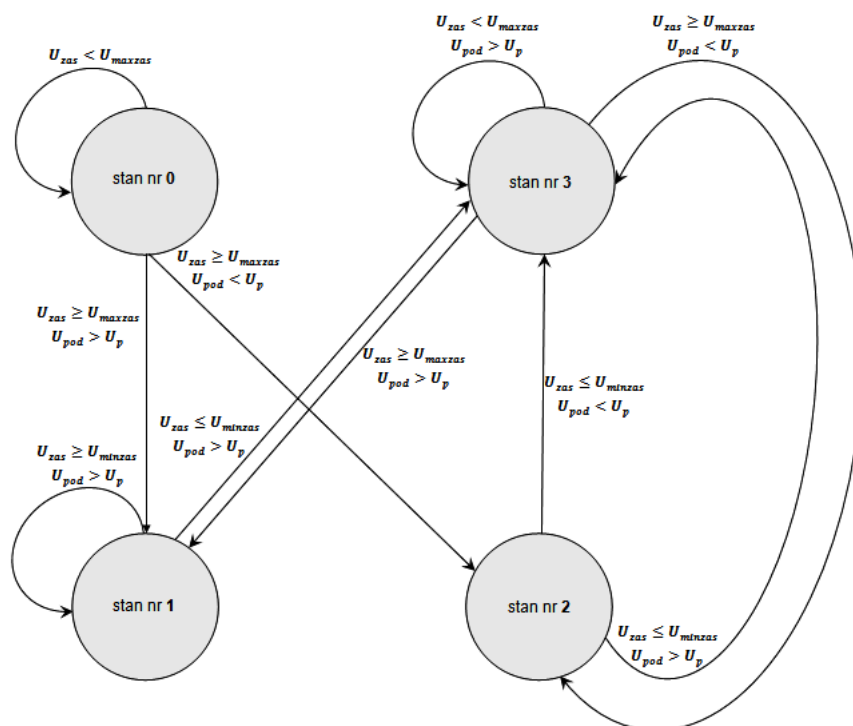
Rys. 9. Model symulacyjny podstacji metra z zasobnikiem energii elektrycznej

W modelu symulacyjnym podstacji z zasobnikiem energii elektrycznej zamodelowano „układ ładowania i rozładowywania zasobnika” (rys. 10), dzięki czemu zasobnik energii może pobierać z sieci trakcyjnej lub zwracać do niej do 75% energii, odpowiadającej jego znamionowej pojemności energetycznej, co odpowiada przedziałowi zmienności napięcia od 50 do 100 % wartości znamionowej.



Rys. 10. Podsystem podstacji z zasobnikiem - „Układ ładowania i rozładowywania zasobnika energii elektrycznej”

Sekwencje załączania i wyłączania wyłączników w układzie ładowania i rozładowywania zasobnika („ładowanie” i „rozładowywanie”) realizowane są zgodnie z algorytmem sterowania (rys. 11) umieszczonym w bloku S-funkcji o nazwie „Sterowanie”(rys. 9).



Rys. 11. Model symulacyjny układu sterowania podstacji z zasobnikiem energii elektrycznej

Oznaczenia użyte na rysunku 11:

u_{zas} – wartość chwilowa napięcia na zaciskach zasobnika energii elektrycznej;

U_{maxzas} – znamionowa wartość napięcia zasobnika energii elektrycznej;

U_{minzas} – minimalna wartość napięcia zasobnika energii elektrycznej;

$$U_{minzas} = \frac{U_{maxzas}}{2}$$

u_{pod} – wartość chwilowa napięcia na zaciskach podstacji;

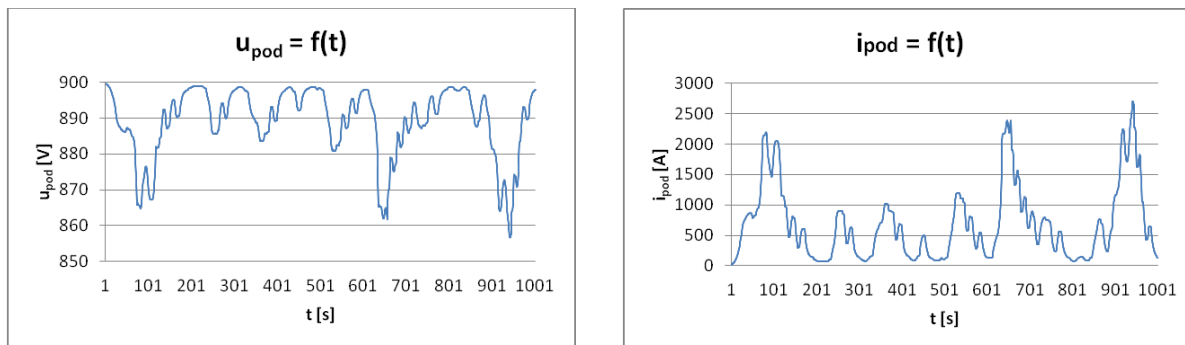
U_p – napięcie przełączania, czyli zdefiniowana przez użytkownika wartość średnia napięcia podstacji, powyżej której zasobnik jest ładowany, a poniżej tej wartości rozładowywany;

W momencie rozpoczęcia symulacji dokonywany jest pomiar wartości chwilowej napięcia na zaciskach zasobnika. Jeżeli jego wartość jest niższa od wartości napięcia znamionowego zasobnika $u_{zas} < U_{maxzas}$, to mamy do czynienia ze stanem nr 0, w którym to następuje proces ładowania zasobnika do wartości określonej, jako U_{maxzas} . W sytuacji, w której w stanie nr 0 napięcie chwilowe na zaciskach zasobnika jest równe wartości znamionowej napięcia zasobnika ($u_{zas} = U_{maxzas}$) nastąpi przejście do stanu nr 1 (stanu „bezczynności”), w którym zasobnik nie jest ładowany. W wyniku, czego następuje rozładowywanie zasobnika proporcjonalnie do wartości rzeczywistego obciążenia podstacji.

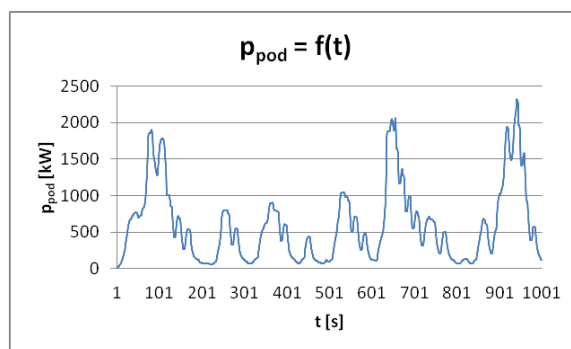
Jeżeli układ znajduje się w stanie nr 0 (ładowanie zasobnika) i spełnione są warunki: $u_{zas} \geq U_{maxzas}$ i $u_{pod} < U_p$, to następuje przejście do stanu nr 2 (rozładowywanie zasobnika). Natomiast, gdy $u_{zas} \geq U_{minzas}$ i $u_{pod} > U_p$ to układ przejdzie do stanu nr 1. Następnie, gdy $u_{zas} \leq U_{minzas}$ i $u_{pod} > U_p$ to wówczas układ przechodzi do stanu nr 3 i doładowuje zasobnik do wartości znamionowej napięcia, czyli

900 V. Jeżeli $u_{zas} \geq U_{maxzas}$ i $u_{pod} < U_p$ to układ przejdzie do stanu nr 2 i zacznie się stan rozładowywania zasobnika. Gdy zostanie spełniony warunek $u_{zas} \leq U_{minzas}$ i $u_{pod} > U_p$ układ przechodzi ponownie do stanu nr 3 i zaczyna się doładowywanie zasobnika. Następnie, kiedy $u_{zas} \geq U_{maxzas}$ i $u_{pod} > U_p$ to układ przejdzie do stanu nr 1.

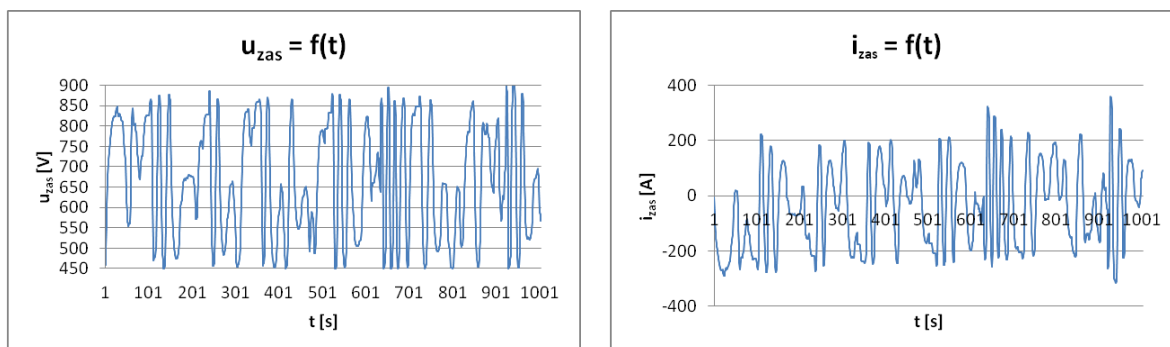
Na rys. 12-15 zamieszczono przebiegi uzyskane podczas badań symulacyjnych podstacji z zasobnikiem energii elektrycznej.



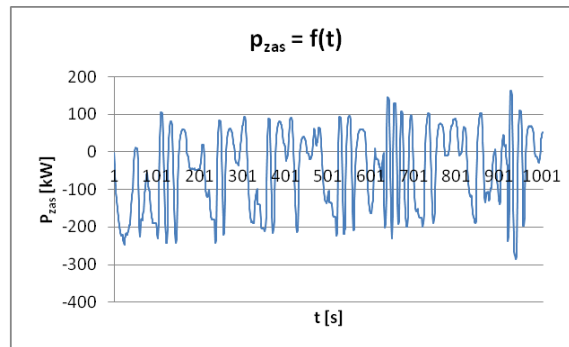
Rys. 12. Fragment przebiegu wartości chwilowych napięcia na zaciskach podstacji i prądu zasobnika w szczycie komunikacyjnym kursowania pociągów metra



Rys. 13. Fragment przebiegu wartości chwilowych mocy podstacji w szczycie komunikacyjnym kursowania pociągów metra



Rys. 14. Fragment przebiegu chwilowych wartości napięcia na zaciskach zasobnika i prądu zasobnika w szczycie komunikacyjnym kursowania pociągów metra



Rys. 15. Fragment przebiegu wartości chwilowych mocy zasobnika w szczycie komunikacyjnym kursowania pociągów metra

PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych obliczeń statystycznych wynika, że wartość średnia napięcia samej podstacji jest niższa w szczycie komunikacyjnym kursowania pociągów metra o 0,5 % w porównaniu z podstacją wyposażoną w urządzenie magazynujące energię elektryczną. Natomiast wartość odchylenia standardowego jest wyższa o 32,59 %. Porównując wartości mocy podstacji w układzie bez zasobnika i z zasobnikiem (o pojemności energetycznej 10 kWh) poza szczytem komunikacyjnym otrzymano zmniejszenie poboru mocy o 2,53 % w stosunku do wariantu podstacji niewyposażonej w układ akumulacji.

Na podstawie przebiegów wartości chwilowych: napięcia, prądu i mocy podstacji oraz obliczeń statystycznych uzyskanych w wyniku badań symulacyjnych można stwierdzić, że zastosowanie podstacji wyposażonej w zasobnik korzystnie wpływa na stabilizację napięcia jak i na ograniczenie poboru mocy z podstacji trakcyjnej. Zastosowanie zasobników poza wymienionymi powyżej efektami daje również zwiększenie bezpieczeństwa pasażerów w sytuacjach awaryjnych, w których zasobnik może stanowić dodatkowe źródło zasilania. Ponadto zmniejszenie zapotrzebowania na energię elektryczną powoduje mniejszą jej produkcję, co z kolei ma pośredni wpływ na ekologię (ograniczona emisja gazów cieplarnianych).

Efektywność wykorzystania zasobnika energii będzie bardziej widoczna w godzinach poza szczytem [8] niż w szczycie komunikacyjnym. Wynika to z faktu, że przy większej intensywności kursowania pociągów, następuje pomiędzy nimi częstsza wymiana energii i w związku, z czym obciążenie podstacji jest bardziej równomierne niż w godzinach poza szczytem.

BIBLIOGRAFIA

1. Krawczyk G.: *Ocena efektywności zastosowania zasobników w systemie zasilania linii metra*. Rozprawa doktorska. Politechnika Radomska 2012.
2. Barrero R., Tackoen X., Mierlo J.: *Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 2010.
3. Bartłomiejczyk M., Połom M.: *Możliwości ograniczenie zużycia energii w transporcie miejskim na przykładzie gdyńskiej komunikacji trolejbusowej*. Pojazdy Szynowe 3/2011.
4. Brenna M., Foiadelli F., Zaninelli D.: *Prospective for energy saving by means of ultracapacitors in electric systems for transportation*. EV-RE. Monaco, March 26-29 2009.
5. Szelağ A., Maciołek T., Drażek Z., Patoka M.: *Aspekty efektywności i energoszczędności w procesie modernizacji układów zasilania trakcji tramwajowej*. Pojazdy Szynowe 3/2011.

6. Szelaż A.: *Zwiększenie efektywności energetycznej transportu szynowego*. Technika Transportu Szynowego 2008/12.
7. Internet, <http://www.dacpol.eu/pl/dane-techniczne-superkondensatorow-175/product/superkondensatory-961>
8. E. Szychta, G. Krawczyk, J. Buday, J. Kuchta, J. Michalik: *Simulation studies of the underground DC traction substation with and without energy storage device*. Communications, Scientific letters of the University of Zilina, ISSN 1335-4205, Volume 3/2013.

THE IMPACT OF ELECTRICAL ENERGY STORAGE DEVICES TO THE EFFECT OF VOLTAGE STABILITY IN UNDERGROUND TRACTION NETWORK

Abstract

This paper presents the impact of electrical energy storage devices to the effect of voltage stability in underground traction network. For this purpose the underground DC traction substation simulation studies were performed for two versions: the substation equipped with the ESD (Energy Storage Device) and without the ESD. In these studies Supercapacitors Energy Storage System of energy capacity 10 kWh and voltage 900 V is used.

Autorzy:

dr inż. **Grzegorz Krawczyk** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki, Instytut Systemów Transportowych i Elektrotechniki, Zakład Elektrotechniki i Energetyki, g.krawczyk@uthrad.pl

dr hab. inż. Elżbieta Szychta, prof. nadzw. UTHRad, Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki, Instytut Systemów Transportowych i Elektrotechniki, Zakład Elektrotechniki i Energetyki, e.szychta@uthrad.pl