



Janusz Biliński, Jacek Figat, Dariusz Milewski

Tramwaj z zasobnikiem akumulatorowym – koncepcja i testy

Tramwaj S70, San Diego

W artykule przedstawiono koncepcję i wyniki testów nowoczesnego zasobnika akumulatorowego. W obwodzie trakcyjnym zastosowano układ odzysku energii UOE-60S zaprojektowany do przekształcania napięcia tracji 600/750VDC na napięcie ładowania baterii podczas hamowania pojazdu oraz do konwersji napięcia baterii do poziomu zasilania tracji. Rozwiązanie to był testowany na linii tramwajowej w San Diego.

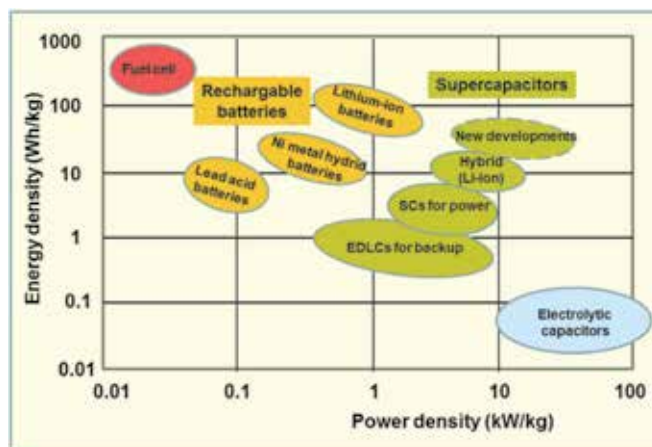
Jednym z głównych kierunków rozwoju tramwajów jest podniesienie sprawności energetycznej trakcyjnych układów poprzez zastosowanie na pojeździe zasobników energii. Zasobniki takie są wykorzystywane do magazynowania energii rekuperowanej podczas procesu hamowania, jak również stwarzają możliwości przejazdu tramwajów na odcinkach bez sieci trakcyjnej – na przykład przez zabytkowe rejony miast. W rozwiązaniach praktycznych stosowane są zasobniki wykorzystujące superkondensatory, nowoczesne baterie akumulatorów lub rozwiązania hybrydowe, które łączą obie te technologie. Zasobniki superkondensatorowe są już stosowane w Polsce w tramwajach (Tramino S100, Jazz), a akumulatorowe w trolejbusach (Trolino). Na wybór rozwiązań modernizacji mają wpływ dwa, wzajemnie wykluczające się, uwarunkowania: z jednej strony chęć uzyskania jak najlepszych parametrów technicznych przy wykorzystaniu najnowocześniejszych zespołów i podzespołów oraz technologii, z drugiej – ograniczony budżet na budowę tramwaju.

Projektując układy zasobników energii, dąży się do:

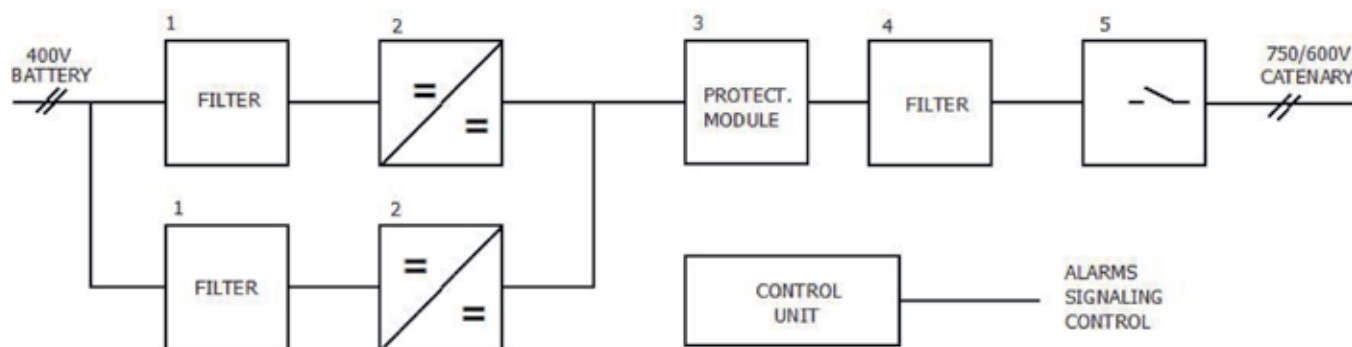
- ♦ uzyskania jak największej pojemności energetycznej,

- ♦ optymalizacji zużycia energii,
- ♦ optymalizacji masy i objętości urządzeń zasobnika,
- ♦ uzyskania wysokiej niezawodności napędu (silnika, falownika),
- ♦ znaczącego obniżenia kosztów eksploatacji.

W ostatnich latach widać bardzo szybki postęp technologiczny w budowie superkondensatorów i nowoczesnych baterii akumulatorów. Plany badawczo-rozwojowe baterii akumulatorów zakładają wprowadzenie nowych typów baterii, wykonanych w technologiach Li-poly, Li-ion, Li-S, Li-air, a także rozwiązań z anodą Si pokrytą MnO_3/Mn_2O_4 [1]. Oczekiwana gęstość mocy, jaką przedstawiono w planach prac badawczo-rozwojowych De-



Rys. 1. Wykres Ragone dla różnych źródeł energii (wg Elcap)



Rys. 2. Względny czas przekroczenia progu hamowania rezystorowego w obszarach zasilania przedmiotowych podstacji

partamentu Energii USA do 2020 roku dla akumulatorów, to 500 Wh/ogniwo. Impulsem do dalszego rozwoju zasobników energii jest rosnąca popularność samochodów z napędem elektrycznym. Na rysunku 1 przedstawiono wykres Ragone, obrazujący gęstość mocy w kW/kg dla różnych źródeł energii.

W ramach prac nad zastosowaniem nowoczesnych baterii akumulatorów w zasobnikach energii w firmie MEDCOM został opracowany układ odzysku energii, współpracujący z bateriami litowo-polimerowymi. Badania tramwaju S70 – wyposażonego w taki zasobnik – zostały przeprowadzone wspólnie przez firmy Siemens USA, MEDCOM i Corvus. Jazdy testowe przeprowadzono w San Diego.

Układ odzysku energii UOE-60S

Układ odzysku energii UOE-60S jest w pełni automatycznym urządzeniem, zaprojektowanym do przekształcania napięcia trakcji 600/750VDC na napięcie ładowania baterii podczas hamowania pojazdu oraz do konwersji napięcia baterii do poziomu zasilania trakcji. Układ może też być ładowany z trakcji podczas jazdy tramwaju. Bateria ładowana jest stałym prądem do chwili osiągnięcia stanu pełnego naładowania. Konwersja napięcia baterii do poziomu napięcia trakcji trwa do czasu rozładowania baterii (napięcie określone przez producenta baterii). W przypadku przeciążenia prąd jest ograniczany przez układ przekształtnika. Schemat blokowy układu przedstawiono na rysunku 2.

UOE-60S jest przystosowany do zamontowania na dachu pojazdu. Dostęp do jego elementów jest możliwy po zdjęciu górnej kłapy lub po odkręceniu bocznych osłon.

Widok układu UOE-60S przedstawiono na rysunku 3, sposób montażu przedstawiono na rysunku 4.

Zasada działania układu UOE-60S

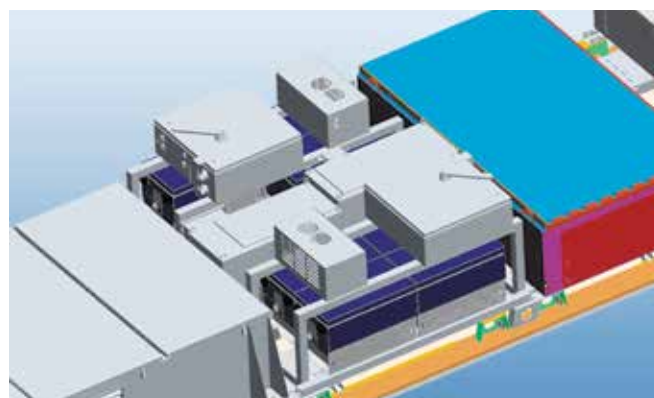
Obwód wejściowy jest wyposażony w system wstępnego ładowania, który ogranicza prąd rozruchowy – prąd ładowania kondensatorów wewnętrznych. Napięcie wejściowe przez filtr LC i moduł ochrony jest podawane do przekształtnika DC/DC, który wytwarza napięcie stałe, odpowiednie dla baterii. Prąd ładowania jest ograniczony do znamionowego prądu ładowania baterii (150A). Do chwili osiągnięcia pełnego naładowania bateria jest ładowana stałym prądem, a następnie na baterii utrzymywane jest stałe napięcie (tryb pracy CC/CV). Napięcie wyjściowe DC jest stabilizowane, co pozwala na normalną pracę w szerokim zakresie napięcia wejściowego (trakcji) – 420...925VDC. Blok sterowania mikroprocesorowego zapewnia prawidłowe działanie układu w szerokim zakresie napięcia zasilania sieci trakcyjnej. Blok ten również generuje sygnały alarmowe.

Sterowanie pracą układu jest realizowane przy wykorzystaniu systemu DSP. Układ UOE-60S charakteryzuje się niskim poziomem tętnień napięcia wyjściowego, zapewnia bardzo wysoką wydajność i wysoką zdolnością przeciążenia. Zastosowane kondensatory polipropylenowe zapewniają długą trwałość oraz odporność układu na zmiany napięcia w sieci trakcyjnej. System zapewnia bardzo niski poziom zakłóceń emitowanych do sieci trakcyjnej i obciążenia. Układ spełnia wymagania norm EN w zakresie bezpieczeństwa i kompatybilności elektromagnetycznej.

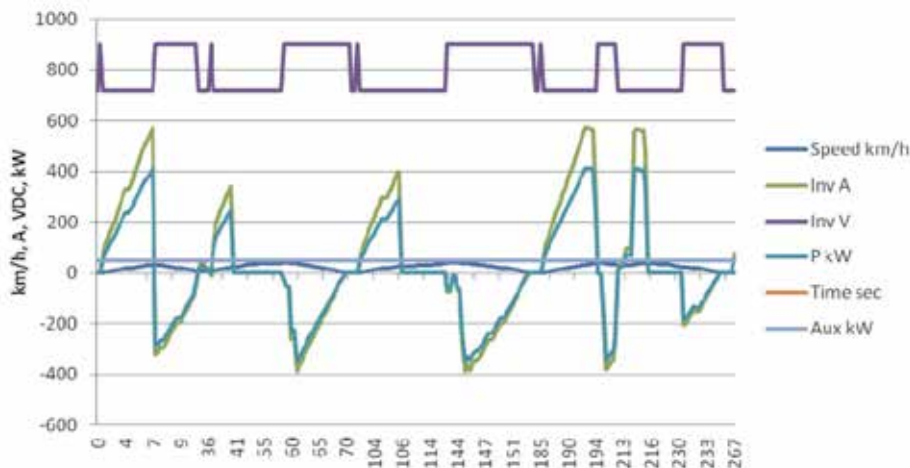
W czasie jazdy urządzenie pracuje w trybie rozładowania baterii i przekazywania energii do trakcji. Możliwe jest 20-sekundowe przeciążenie układu prądem baterii 400A, co w istotny sposób ułatwia i przyspiesza rozruch tramwaju. Stan taki utrzymuje się do czasu rozładowania baterii do poziomu 309VDC. W czasie hamowania następuje przekazywanie energii hamowania do baterii. Stan taki utrzymuje się do czasu pełnego naładowania baterii (384VDC). Brak napięcia trakcji (za wyjąt-



Rys. 3. Widok układu UOE-60S



Rys. 4. Sposób montażu układu UOE-60S



Rys 5. Profil obciążenia do założeń projektowych układu UOE-60S (wg Siemens USA)

kiem jazdy autonomicznej) lub wystąpienie stanów alarmowych (przeciążenie, przekroczenie temperatury dopuszczalnej, napięcie zasilania układu poza zakresem, przepięcie itp.) zatrzymuje pracę urządzenia.

Układ – w rozwiązaniu dla tramwaju S70 – współpracował z blokiem baterii firmy Corvus, zbudowanym na bazie ogniw litowo-polimerowych typu XALT (o pojemności 75 Ah) z firmy Dow Cocam. W tramwaju zastosowano dwa systemy UOE-60S z baterią Li-poly, połączone równolegle. Bloki baterii miały łączną znamionową pojemność 150Ah i łączną pojemność energetyczną równą 52 kWh. Masa układu UOE-60S wynosiła ok. 140 kg, a łączna masa zasobników akumulatorowych wynosiła ok. 520 kg.

Na zdjęciu 2 przedstawiono widok urządzeń (zasobnika i baterii) na tramwaju S70.

Jazdy testowe

Jazdy testowe zostały przeprowadzone na liniach tramwajowych w San Diego, początkowo na linii MTS Green Line, odcinek Morena / Linda Vista–Fashion Valley. Odcinek ten miał 2,5 km długości, była to trasa ze spadkami i wzniesieniami (od -1,65% do +3,4%). W czasie przejazdów sprawdzano zachowanie się układu w trybach pracy podczas jazdy z baterii (rozruch z maksymalnym przyspieszeniem do 40 km/h – jazda wybiegiem / jazda ze stałą prędkością – hamowanie odzyskowe z inten-



Układ UOE-60S (na górze) i bloki baterii na dachu tramwaju S70

sywnością 50%/100% – postój 20 s) w powtarzających się cyklach. Stan naładowania baterii był utrzymywany w zakresie powyżej 85% przed rozpoczęciem cykli, rozładowanie nie mogło być głębsze niż 30%.

Profil obciążenia tramwaju S70 do założeń projektowych przedstawiono na rysunku 5.

W czasie jazd były monitorowane i rejestrowane prądy, napięcia i temperatury układu UOE-60S i baterii akumulatorów, co pozwalało na dokonywanie zmian nastaw regulatorów prądu i napięcia w czasie rozładowania i ładowania bezpośrednio w czasie prób. Sprawdzone także możliwość jazdy na trasie przy zasilaniu wyłącznie z baterii.

Podczas jednej z prób sprawdzono zasięg jazdy tramwaju – tramwaj przejechał 24,5 km, co potwierdziło wysokie parametry techniczne układu.

Podsumowanie

Uzyskane wyniki potwierdziły duże możliwości układu z nowoczesnymi bateriami akumulatorów. Rozwój technologiczny zasobników energii umożliwi zmodernizowanie układów napędowych tramwajów, trolejbusów i autobusów elektrycznych, dając nowe możliwości w zakresie oszczędności energii i jazdy z zasilaniem autonomicznym. Szczególnie istotny postęp będzie obserwowany w odniesieniu do baterii akumulatorów. Wprowadzenie nowych rozwiązań zwiększy możliwości operacyjne pojazdów szynowych komunikacji miejskiej.

Artykuł został przygotowany na XVI Ogólnopolską Konferencję Naukową Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2014, zorganizowaną przez Politechnikę Krakowską w październiku 2014 r.

SEMTRAK 2014

Autorzy:

dr inż. **Janusz Biliński** – MEDCOM
mgr inż. **Jacek Figat** – MEDCOM
mgr inż. **Dariusz Milewski** – MEDCOM

Tramway with battery storage system – concept and tests

The paper presents concept and tests of modern battery storage system. In the traction circuit was used Energy Storage Battery Charger UOE-60S with Li-poly batteries. System is designed for converting traction power supply voltage 600/750VDC to the battery voltage for charging and back, to convert battery voltage to the traction voltage level. Energy is delivered during acceleration and stored during braking. Presented solution allows „catenary free” operation for tramway. This solution was tested on S70 tramway in San Diego, showing very good traction parameters and energy savings. In special test, the distance travelled without catenary and without intermediate battery charging was 24,5 km.