

Zygmunt Giziński, Marcin Żuławnik, Marcin Gąsiewski, Michał Zych

Hybrydowy układ zasilania trolejbusu

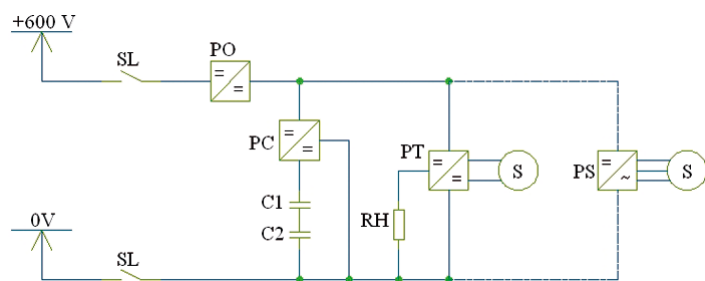
Prace nad zastosowaniem kondensatorowych zasobników energii w pojazdach trakcji elektrycznej Instytut Elektrotechniki prowadzi od ponad dwóch lat, a od 2006 r. w ramach specjalnego projektu badawczego COST/260/2006, zleconego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. W artykule przedstawiono wyniki badań prototypowego trolejbusu z takimi zasobnikami, eksploatowanego przez MPK Lublin.

Zastosowanie kondensatorowych zasobników energii w pojazdach trakcji elektrycznej, zwłaszcza w pojazdach komunikacji miejskiej, daje wymierne korzyści energetyczne i ruchowe:

- zmniejszenie średniej mocy pobieranej z sieci trakcyjnej o 20–40% oraz zmniejszenie zużycia energii o ok. 20–25%;
- znaczne skrócenie poboru mocy szczytowej z podstacji trakcyjnej, a więc zmniejszenie opłat za moc szczytową;
- akumulację energii hamowania trolejbusu 0,1–0,3 kWh dla rzeczywistych warunków ruchowych;



Fot. 1. Badany trolejbus hybrydowy na ulicach Lublina



Rys. 1. Schemat blokowy obwodu głównego trolejbusu z kondensatorowym zasobnikiem energii

SL - styczniki liniowe, PC - przekształtnik ładowania kondensatora, C1–C2 - dwa zespoły kondensatorów 390 V połączone szeregowo, PO - przekształtnik zwrotu energii do sieci trakcyjnej, PT - przekształtnik tranzystorowy do napędu silników prądu stałego, PS - falownik napędu AC, RH - opornica hamowania, S - silnik trakcyjny

- przejazd odcinka 200–400 m bez zasilania z sieci trakcyjnej, umożliwiający jazdę po zajezdni bez konieczności budowy sieci trakcyjnej, a także w ruchu miejskim objazd odcinków z uszkodzoną siecią.

W 2006 r. Instytut Elektrotechniki opracował i wykonał falownikowy układ napędowy dla trolejbusu o mocy 180 kW, zakupił w firmie Maxwell i zbadał kondensatorowy zasobnik energii 0,7 kWh/750 V oraz wykonał dodatkowe przekształtniki regulujące ładowanie i obciążenie zasobników. Dodatkowo, dla planowanej przez MPK Lublin trasy bez zasilania sieciowego, firma Hoppecke dostarczyła nowoczesną baterię akumulatorów o energii 7 kWh.

Dostarczone wyposażenie zamontowano w MPK Lublin w trolejbusie modelowym. Trolejbus z zasobnikowym układem zasilania został zbadany wspólnie przez MPK Lublin i Instytut Elektrotechniki w czerwcu i lipcu 2007 r. w normalnych warunkach ruchowych.

Układ elektryczny trolejbusu z kondensatorowym zasobnikiem energii

Kondensatorowy zasobnik energii może być stosowany zarówno do napędu z silnikami prądu stałego z przekształtnika PT, jak i silników asynchronicznych z falownikiem PS. Zasobnik kondensatorowy C1–C2 ładowany jest z sieci trakcyjnej przez przekształtnik tranzystora PC, kontrolujący prąd ładowania i napięcie kondensatorów.

W czasie rozruchu pojazdu prąd pobierany jest z kondensatorów aż do momentu obniżenia jego napięcia do wielkości napięcia sieci.

Przykładowy przejazd z zasobnikiem kondensatorowym przedstawiono na oscylogramie (rys. 2):

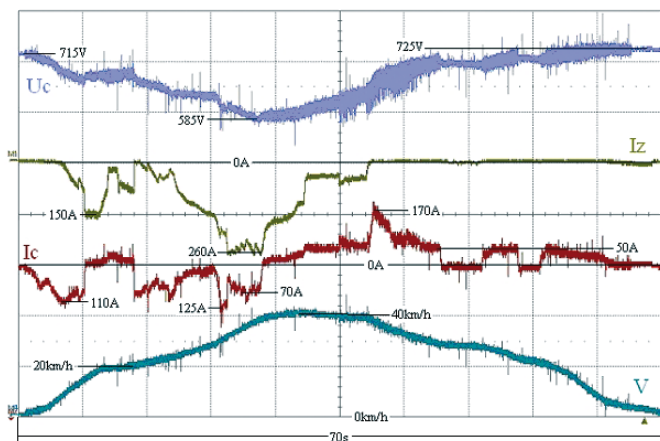
- średnia prędkość – ok. 23 km/h,
- energia pobrana z sieci – ok. 0,69 kWh,
- energia pobrana z kondensatora podczas rozruchu – ok. 0,25 kWh,
- energia zwrócona do kondensatora podczas hamowania – ok. 0,20 kWh,
- średnie zużycie energii – ok. 1,53 kWh/km.

Dla porównania na oscylogramie (rys. 3) przedstawiono analogicznie odcinek bez kondensatora zasobnika:

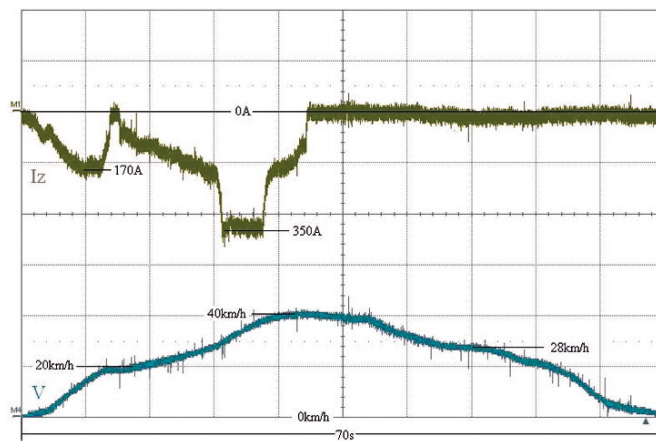
- energia pobrana z sieci – ok. 0,88 kWh,
- średnie zużycie energii – ok. 2,0 kWh/km.

W czasie hamowania energia akumulowana jest w kondensatorach do momentu osiągnięcia maksymalnych wielkości napięcia kondensatorów 750–800 V. Jeżeli prędkość pojazdu w momencie rozpoczęcia hamowania była większa niż 50 km/h, nadmiar energii odbierany jest przez sieć trakcyjną (przekształtnik PO) lub tracony w opornicach hamowania.

Wykonane badania jazdy bez sieci przy zasilaniu napędu z zasobnikiem kondensatorowym przy jeździe po zajezdni i na ulicy wykazały możliwość przejechania odcinka 400 m. Umożliwia to jazdę po zajezdni bez sieci trakcyjnej, a także objazd odcinka z uszkodzoną siecią.



Rys. 2. Przejazd trolejbusu na sieci trakcyjnej (ok. 450 m) z zasobnika kondensatorowego (trolejbus obciążony 8 Mg)
 Uc – napięcie zasobnika kondensatorowego, Ic – prąd zasobnika kondensatorowego, Iz – prąd sieci trakcyjnej, V – prędkość trolejbusu



Rys. 3. Przejazd trolejbusu na sieci trakcyjnej (ok. 450 m) bez zasobnika kondensatorowego (trolejbus obciążony 8 Mg)
 Iz – prąd sieci trakcyjnej, V – prędkość trolejbusu

Przejazd pokazano na oscylogramie (rys. 4):

- średnia prędkość – ok. 18 km/h,
- przejechany odcinek – ok. 400 m,
- wielkość napięcia na początku odcinka – ok. 700 V,
- wielkość napięcia na końcu odcinka – ok. 350 V,
- energia pobrana z kondensatora – ok. 0,5 kWh.

Trolejbus może więc być parkowany na terenie zajezdni bez sieci trakcyjnej.

Kondensator może być doładowany z pokładowej baterii akumulatorów 24 V.

Trolejbus z hybrydowym zasilaniem – baterie akumulatorów oraz kondensatorowy zasobnik energii

Na zamówienie MPK Lublin w Instytucie Elektrotechniki wykonano falownikowy układ napędowy trolejbusu 180 kW z kondensatorowym zasobnikiem energii oraz dodatkową baterią akumulatorów, umożliwiającą przejazd na trasie długości 1,2–2,0 km bez sieci trakcyjnej.

Podczas jazdy z zasilaniem z sieci trakcyjnej układ pracuje podobnie, jak poprzednio opisany.

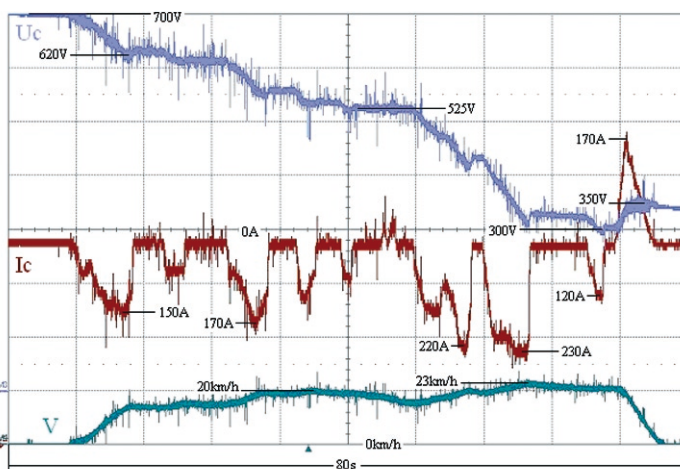
Podczas jazdy bez sieci trakcyjnej falownikowy układ napędowy pobiera energię z zasobnika kondensatorowego, jednocześnie kondensatory doładowywane są z baterii akumulatorów. Podczas przejazdu trolejbusem obciążonym 8 Mg odcinka 1600 m, z trzema zatrzymaniami na przystankach, napięcie kondensatora zmniejszyło się z 700 V do ok. 420 V, a rozładowanie baterii wyniosło 30%.

Maksymalnie przejechano trolejbusem w pełni obciążonym 4000 m, przy rozładowaniu baterii o ok. 50% pojemności znamionowej.

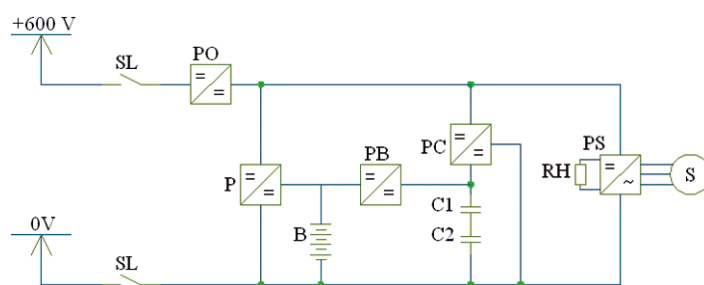
Przykładowe przebiegi przejazdu pokazano na oscylogramach (rys. 6 i 7).

Dla odcinka 350 m (oscylogram z rys. 6):

- początkowa wielkość napięcia zasobnika kondensatorowego wynosi ok. 670 V,
- najniższą wielkość napięcia zasobnika kondensatorowego 430 V uzyskano dla $V = 32$ km/h,
- podczas hamowania kondensator doładowany został do 640 V,

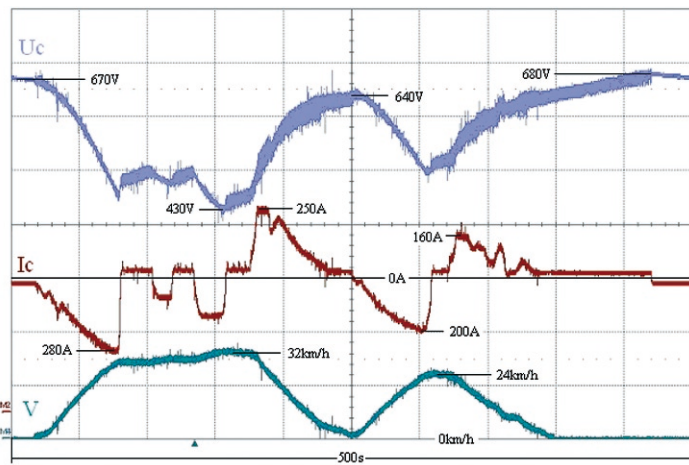


Rys. 4. Przejazd trolejbusu bez sieci trakcyjnej (ok. 400 m) przy zasilaniu z zasobnika kondensatorowego (trolejbus obciążony 8 Mg)
 Uc – napięcie zasobnika kondensatorowego, Ic – prąd zasobnika kondensatorowego, V – prędkość trolejbusu

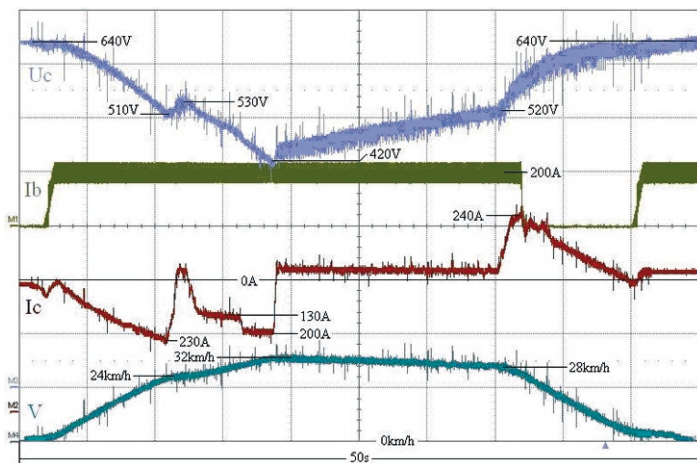


Rys. 5. Schemat blokowy obwodu głównego trolejbusu z hybrydowym zasilaniem
 SL – styczniki liniowe, PC – przekaźnik ładowania kondensatora, C1–C2 – kondensatory 780 V o energii 0,75 kWh, PO – przekaźnik zwrotu energii do sieci trakcyjnej, P – przekaźnik ładowania baterii akumulatorów, B – bateria akumulatorów o energii 7 kWh, PB – przekaźnik ładowania kondensatorów z baterii B, PS – falownik napędu AC, RH – opornica hamowania, S – silnik trakcyjny

- po doładowaniu z baterii akumulatorów na postoju (ok. 8 s) napięcie kondensatora wynosi ok. 680 V, czyli układ zasilania przygotowany jest do przejazdu kolejnego odcinka.



Rys. 6. Przejazd trolejbusu bez sieci trakcyjnej (ok. 350 m) z zasilaniem z zasobnika kondensatorowego i baterii akumulatorów (trolejbus obciążony 8 Mg)
 U_c – napięcie zasobnika kondensatorowego, I_c – prąd zasobnika kondensatorowego, V – prędkość trolejbusu



Rys. 7. Przejazd trolejbusu bez sieci trakcyjnej (ok. 350 m) z zasilaniem z zasobnika kondensatorowego i baterii akumulatorów (trolejbus obciążony 8 Mg)
 U_c – napięcie zasobnika kondensatorowego, I_c – prąd zasobnika kondensatorowego, I_b – prąd baterii akumulatorów, V – prędkość trolejbusu

Dla odcinka 350 m (oscylogram z rys. 7):

- początkowa wielkość napięcia zasobnika kondensatorowego wynosi ok. 640 V,
- najniższą wielkość napięcia zasobnika kondensatorowego 420 V uzyskano dla $V = 32$ km/h,
- podczas hamowania kondensator doładowany został do 640 V,
- na postoju akumulatory doładowują zasobnik kondensatorowy, przygotowując go do przejazdu kolejnego odcinka,
- na przejazd odcinka zużyto ok. 2,2 Ah z baterii akumulatorów.

Badania eksploatacyjne trolejbusu prototypowego wykazały, że dla projektowanego przez MPK Lublin odcinka 1200–2000 m bez sieci trakcyjnej, energia baterii akumulatorowych dobrana jest prawidłowo. Jej rozładowanie nie przekracza 20–30% pojemności znamionowej. Do doładowania baterii do pojemności znamionowej długość trasy powinna wynosić 10–12 km (1,5–2,0 km bez sieci + 8–10 km z zasilaniem z sieci trakcyjnej). Czas eksploatacji zastosowanej baterii, przy rocznym przebiegu 60 tys. km, wyniesie – według danych producenta – 2,5–3,5 lat.

Wnioski

1. Badania ruchowe i eksploatacyjne trolejbusu z zasobnikami energii potwierdziły w pełni korzyści hybrydowego zasilania trolejbusu.
2. Zasobnik kondensatorowy o energii 0,7 kWh umożliwia jazdę bez zasilania sieciowego zarówno na terenie zajezdni, jak i na trasie – np. przy uszkodzeniu sieci trakcyjnej, zjazd ze skrzyżowania przy braku zasilania. Energia kondensatora wystarcza na przejazd 200–400 m.
3. Zalety, potwierdzone badaniami eksploatacyjnymi trolejbusu z kondensatorowym zasobnikiem energii, są następujące:
 - obcięcie szczytu oraz skrócenie czasu poboru z sieci maksymalnego prądu podczas rozruchu;
 - akumulacja energii hamowania 0,1–0,3 kWh, czyli praktycznie całej energii przy hamowaniu z prędkości 40–50 km/h;
 - zmniejszenie średniej mocy pobieranej z podstacji trakcyjnej o ok. 20–30%.
4. Badania hybrydowego układu zasilania z dodatkową baterią akumulatorów 7 kWh trolejbusu obciążonego (8 Mg) na trasie planowanej oraz trasach zastępczych wykazały możliwość przejazdu 2000 m przy rozładowaniu baterii akumulatorów 20–30% pojemności znamionowej zapewniającej 2–3 lat trwałości baterii. Układ taki stwarza praktyczne możliwości wprowadzenia trójprądowej trakcji trolejbusowej w zabytkowe dzielnice miast bez zawieszania sieci trakcyjnej.

MPK Lublin planuje budowę trolejbusu prototypowego w nowym nadwoziu, z układem hybrydowego zasilania dla planowanej nowej trasy z odcinkiem bez sieci trakcyjnej. Prototyp ma być zbudowany na przełomie września i października 2007 r.

Autorzy
 prof. Zygmunt Giziński
 mgr inż. Marcin Żuławnik
 mgr inż. Marcin Gąsiewski
 mgr inż. Michał Zych
 Instytut Elektrotechniki