

Modernizacja i budowa czystego taboru transportu publicznego na terenie miast i w obszarach metropolitalnych – tabor trolejbusowy

(Material do artykułu przedstawiono w formie prezentacji na Międzynarodowych Targach Poznańskich – Transporta 2009 – Transport Szynowy XXI wieku dla Polski)

1. Wstęp

Pojazdy trakcji elektrycznej są znaczącym odbiorcą energii elektrycznej.

Moc napędów zainstalowanych: w lokomotywach osiąga 6 MW, w pociągach metra 3 MW w tramwajach 600÷800 kW.

Współczesne tranzystorowe układy regulacyjne umożliwiają wykorzystanie pobieranej z podstacji energii ze stosunkowo wysoką sprawnością 0.9. Układy te umożliwiają również częściowe odzyskanie energii kinetycznej rozpędzonego pojazdu podczas hamowania. Dotyczy to zwłaszcza pojazdów zasilanych z sieci trakcyjnej prądu stałego (takich jak tramwaje, trolejbusy, metro) oraz pojazdy kolejowe w krajach z systemem zasilania 3000 V DC i 1500 V DC.

Teoretycznie w trakcji miejskiej można odzyskać 20÷40% pobranej na rozruch i jazdę energii zależnie od gęstości ruchu, prędkości komunikacyjnej oraz struktury układu zasilania sieci trakcyjnej. Można więc odzyskać ok. 40 MWh rocznie na jeden tramwaj, czyli dla miasta średniej wielkości eksploatującego 400 tramwajów, roczna oszczędność energii wynosi ok. 16 000 MWh. Dla trakcji kolejowej przy dużych odległościach zwracaną energię można oszacować na kilka procent. Stosowanie rekuperacyjnego hamowania jest więc uzasadnione tylko w ruchu podmiejskim i w terenach górzystych.

Aby rekuperacja była efektywna niezbędna jest możliwość odbioru zwracanej energii przez inne pojazdy znajdujące się w tym czasie na danym odcinku zasilania. Na przykład w Warszawie przy 20% tramwajów wyposażonych w układ umożliwiający hamowanie rekuperacyjne efektywny zwrot energii nie przekracza 25% energii pobranej na jazdę. Przy większym udziale taboru z rekuperacją możliwość jej odzysku będzie jeszcze niższa.

Zwiększenie efektywności odzysku energii hamowania pojazdów można osiągnąć poprzez zastosowanie zasobników energii:

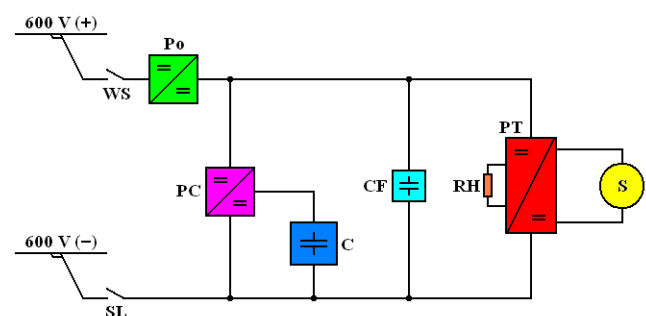
- zainstalowanych na podstacjach trakcyjnych, takie rozwiązanie zastosowano próbnie w kilku miastach,

- zabudowanych na pojeździe umożliwiających przejęcie jego energii hamowania z prędkości odpowiadającej warunkom ruchowym. Taki układ z kondensatorowym zasobnikiem energii został zaprojektowany, wykonany i przebadany w Instytucie Elektrotechniki oraz trolejbusach i zgłoszony do Urzędu Patentowego.

Niniejsze opracowanie zawiera podstawowe wyniki z tych badań.

2. Układ trolejbusu z kondensatorowym zasobnikiem energii

W ubiegłym, 2008 roku Zakład Trakcji Elektrycznej Instytutu Elektrotechniki zaprojektował i wykonał układ kondensatorowego zasobnika energii do trolejbusu eksploatowanego w Kownie na Litwie. System ten został dobudowany do istniejącego układu napędowego z silnikiem prądu stałego, napędzanego z przekształtnika tranzystorowego DC/DC i wyposażony w terminal, wyświetlający niezbędne prądy, napięcia i energię. Uproszczony schemat blokowy tego rozwiązania przedstawiony jest na rysunku poniżej.



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

Oznaczenia:

- WS - wyłącznik szybki nadmiarowy
- SL - stycznik liniowy
- PC - przekształtnik ładowania kondensatora
- C - moduł kondensatorowego zasobnika energii
- CF - kondensator filtru sieciowego

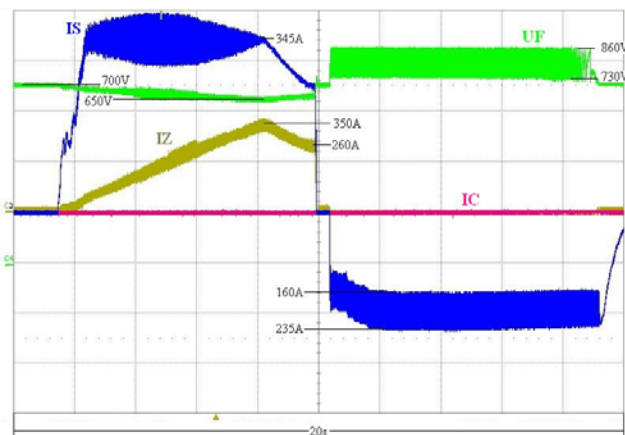
- PO - przekształtnik zwrotu energii do sieci trakcyjnej
- PT - przekształtnik tranzystorowy dla napędu silników prądu stałego
- RH - opornica hamowania
- S - silnik trakcyjny

Kondensatorowy zasobnik energii może być stosowany zarówno dla napędu z silnikami prądu stałego jak i dla silników asynchronicznych z falownikiem.

Zasobnik kondensatorowy C ładowany jest podczas hamowania pojazdu przez przekształtnik tranzystora PC kontrolujący prąd ładowania i napięcie kondensatorów. W czasie hamowania energia akumulowana jest w kondensatorach do momentu osiągnięcia maksymalnych wartości napięcia kondensatorów ok. 750V. Jeżeli prędkość pojazdu w momencie rozpoczęcia hamowania była większa niż 50 km/h, a co za tym idzie energia do odzyskania jest wyższa od możliwości zasobnika nadmiar energii odebrany może być przez sieć trakcyjną (przekształtnik PO), jeśli są ku temu możliwości lub tracony w opornicach hamowania. Testy przeprowadzone przy normalnej eksploatacji z pasażerami na różnych liniach wykazały, że praktycznie cała energia hamowania trolejbusu była magazynowana w kondensatorach.

W czasie rozruchu pojazdu prąd pobierany z sieci, wspomagany jest z kondensatorami aż do momentu obniżenia jego napięcia do wartości minimalnej. Poniższe oscylogramy przedstawiają odpowiednio prądy i napięcia dla przypadku bez zasobnika energii (Osc. 1) oraz z układem zasobnika energii przy jeździe na sieci (Osc.2 i 3).

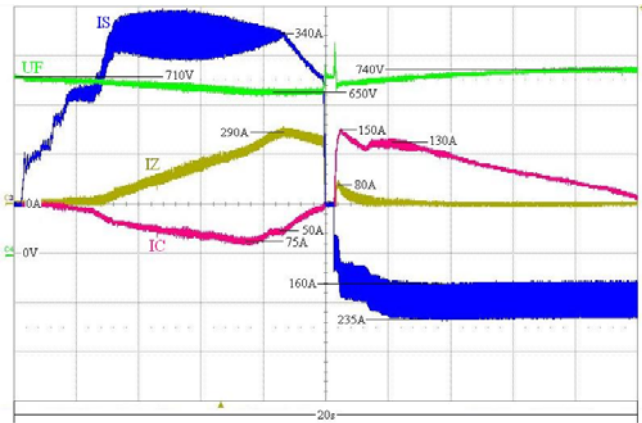
Jak widać w przypadku przejazdu na sieci bez zasobnika kondensatorowego, prąd sieci podczas rozruchu narasta liniowo do wartości ok. 350A, a następnie jest przejście na charakterystykę, podczas hamowania, cała energia tracona jest w opornikach hamowania.



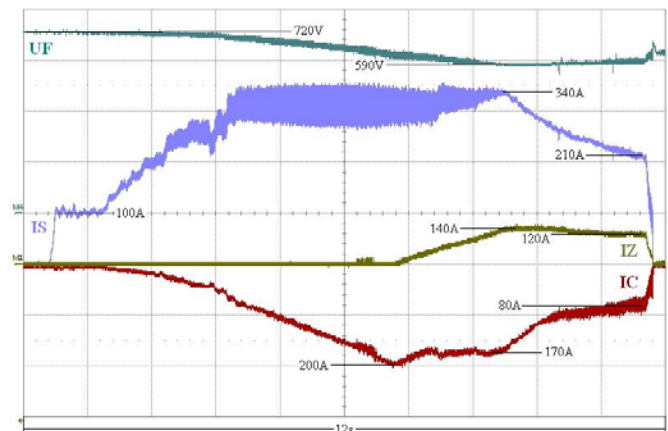
Osc. 1. Przejazd trolejbusu na sieci trakcyjnej bez zasobnika kondensatorowego

Legenda:

- IS – prąd silnika;
- IC – prąd zasobnika kondensatorowego;
- IZ – prąd sieci;
- UF – napięcie kondensatora filtru.



Osc. 2. Przejazd trolejbusu na sieci trakcyjnej wspomaganym zasobnikiem kondensatorowym (równe napięcia początkowe sieci i kondensatora)



Osc. 3. Przejazd trolejbusu na sieci trakcyjnej wspomaganym zasobnikiem kondensatorowym (napięcia początkowe kondensatora wyższe od napięcia sieci)

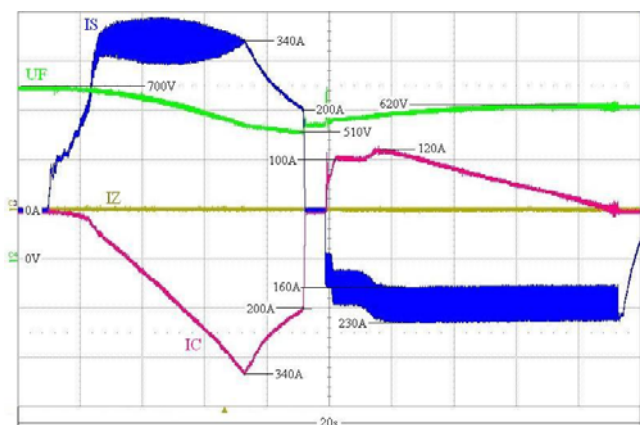
Legenda:

- IS – prąd silnika;
- IC – prąd zasobnika kondensatorowego;
- IZ – prąd sieci;
- UF – napięcie kondensatora filtru.

Oscylogram 2 przedstawia przejazd odcinka na sieci, wspomaganym kondensatorowym zasobnikiem energii. Jak widać przebieg prądu pobranego z sieci trakcyjnej podczas rozruchu jest bardziej łagodny, w porównaniu z pierwszym przypadkiem, a wartość maksymalna I_Z wynosi ok. 290A. Maksymalna wartość prądu pobranego z kondensatorów przy rozruchu w tym przypadku to ok. 75A. Dzięki zasobnikowi kondensatorowemu możemy więc zmniejszyć wartość maksymalną prądu pobieranego z podstacji trakcyjnej, a co za tym idzie mniej przeciążamy sieć i zmniejszamy zużycie energii.

Oscylogram 3 przedstawia sam rozruch, również w sytuacji zasilania hybrydowego (sieć + zasobnik). W tym przypadku jednak napięcie na zasobniku jest ok. 120V wyższe niż napięcie zasilania trakcyjnego. Maksymalny prąd pobrany z zasobnika to ok. 200A, natomiast z sieci to ok. 140A i pojawia się dopiero po ok. 6s od rozpoczęcia procesu rozruchu.

Zamontowanie zasobnika na pojeździe trakcyjnym umożliwi również przejazd bez przyłączenia do sieci trakcyjnej. Trolejbus, przy naładowanym zasobniku jest w stanie przejechać dystans kilkuset metrów przy zachowaniu parametrów jezdnych. Odległość uzależniona jest od warunków terenowych i stylu jazdy kierowcy. Poniższy oscylogram (Osc. 4) pokazuje prądy i napięcia podczas przejazdu odcinka bez sieci trakcyjnej.



Osc. 4. Przejazd trolejbusu bez sieci trakcyjnej zasilanego z zasobnika kondensatorowego

Legenda:

IS – prąd silnika;
IC – prąd zasobnika kondensatorowego;
IZ – prąd sieci;
UF – napięcie kondensatora filtra.

Kondensator podczas rozruchu prądem do 340A rozładowuje się od 700V do ok. 510V, a po hamowaniu osiąga wartość ok. 620V. Napięcie to pozwala na wykonanie ponownego cyklu rozruchu i hamowania, aż do osiągnięcia wartości ok. 400V. Prąd ładowania zasobnika podczas hamowania narasta do ok. 120A.

Wyniki badań uzyskane podczas normalnej eksploatacji trolejbusu z pasażerami potwierdziły, że oszczędność energii w przypadku zastosowania zasobnika kondensatorowego wzrasta do ok. 30 do 35%, w zależności od stylu jazdy (używanie hamulców mechanicznych, dynamiki jazdy), warunków terenowych (długie zjazdy powodują maksymalne naładowanie zasobnika), a także od używania zwrotnic prądowych, starego typu (prąd potrzebny do przestawienia zwrotnicy wymuszany jest z sieci trakcyjnej przez opornik hamowania). Wszystkie te czynniki mają bezpośredni wpływ na oszczędność energii w trolejbusie.

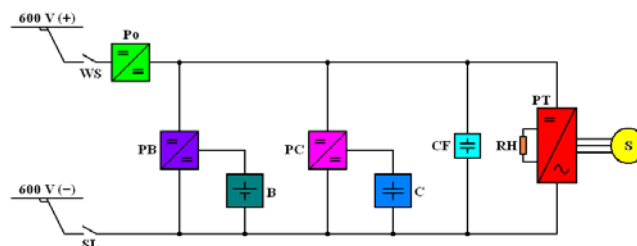
3. Układ trolejbusu z kondensatorowym i akumulatorowym zasobnikiem energii

W roku 2006 Instytut Elektrotechniki opracował i wykonał falownikowy układ napędowy dla trolejbusu o mocy 180 kW, wyposażony w kondensatorowy zasobnik energii 0,7 kWh / 750 V oraz baterię

akumulatorów o energii 7 kWh wraz z dodatkowymi przekształtnikami regulującymi ładowanie i obciążenie zasobników. Celem tego projektu było przejechanie odcinka bez zasilania z sieci trakcyjnej o długości ok. 1200m.

Dostarczone wyposażenie zostało zamontowane przez 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.

Obwód blokowy tego rozwiązania przedstawia poniższy rysunek (Rys. 2).

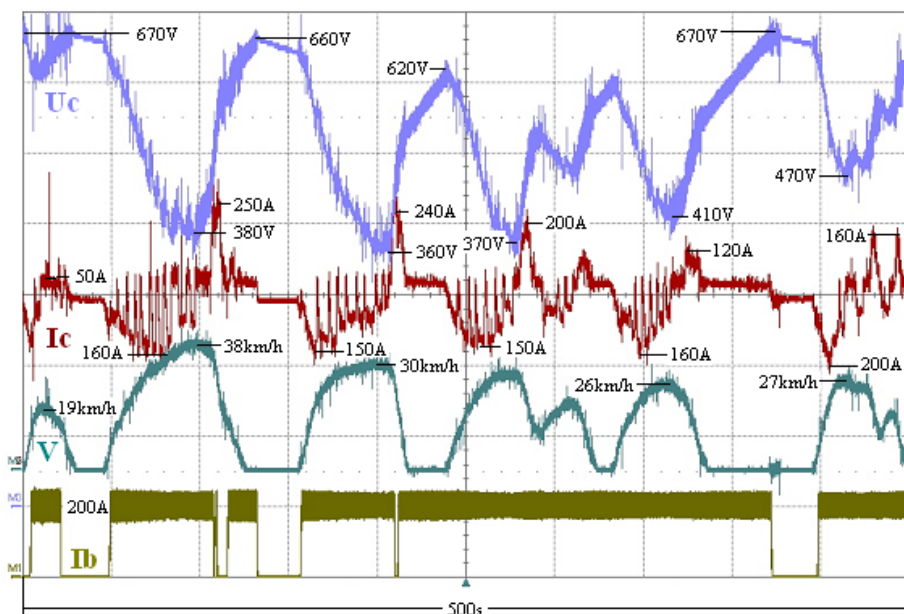


Rys. 2. Schemat blokowy obwodu głównego trolejbusu z kondensatorowym i akumulatorowym zasobnikiem energii.

Oznaczenia:

WS - włącznik szybki nadmiarowy
SL - stycznik liniowy
PC - przekształtnik ładowania zasobnika kondensatorowego
C - moduły kondensatorowe zasobnika energii
PB - przekształtnik ładowania baterii akumulatorów
B - bateria akumulatorów
CF - kondensator filtra sieciowego
PO - przekształtnik zwrotu energii do sieci trakcyjnej
PT - przekształtnik (falownik) tranzystorowy dla napędu silnika AC
RH - opornica hamowania
S - silnik trakcyjny

Oscylogram 5 przedstawia przejazd odcinka ok. 2000m bez sieci. Układ napędowy zasilany jest z dwóch zasobników: kondensatorowego, który pełni tu funkcję źródła mocy i pokrywa impulsy prądowe podczas rozruchu i pozwala przejąć i zmagazynować energię przy hamowaniu pojazdu oraz akumulatorowego, którego zadaniem jest dostarczanie na bieżąco energii potrzebnej na przejechanie żadanego odcinka. Osc. 5 przedstawia przebiegi prądów zasobników oraz napięcie kondensatora, a także prędkość pojazdu. Na tym odcinku znajdowały się cztery przystanki, a przejazd odbywał się w normalnym ruchu miejskim, średnia prędkość trolejbusu wynosiła ok 15km/h. Energia pobrana z baterii akumulatorów dla przejechania tej trasy wyniosła ok. 3,4kWh (~1,7 kWh / km), a energia obwodów pomocniczych, takich jak pompa wspomaganie kierownicy, sprężarka i alternator baterii pokładowej to ok. 1,0kWh. W tym przypadku rozładowanie baterii akumulatorów wyniosło ok. 47%, natomiast dla trasy żądanej 1200m 21%. Dla zachowania dłuższej



Osc. 5. Przejazd trolejbusu bez sieci trakcyjnej zasilanego z zasobnika kondensatorowego i baterii akumulatorów

Legenda:

- Uc – napięcie zasobnika kondensatorowego;*
- Ic – prąd zasobnika kondensatorowego;*
- Ib – prąd baterii akumulatorów;*
- V – prędkość trolejbusu.*

żywoćności baterii akumulatorów to rozładowanie nie powinno przekraczać 30%, tak więc na etapie projektowania powinna być znana długość odcinka bez sieci, jak również profil trasy.

Dla doładowania baterii do pojemności znamionowej długość trasy powinna wynosić $10 \div 12$ km ($1,5 \div 2,0$ km bez sieci + $8 \div 10$ km przy zasilaniu z sieci trakcyjnej). Czas eksploatacji zastosowanej baterii przy rocznym przebiegu 60000 km wyniesie wg danych producenta $2,5 \div 3,5$ lat.

4. Wnioski

- Badania ruchowe i eksploatacyjne trolejbusu z kondensatorowymi zasobnikami energii potwierdziły w pełni korzyści hybrydowego zasilania trolejbusu, odzysk energii wynosi ok. 30÷35%.
- Przejazd bez zasilania z sieci trakcyjnej, przy zastosowaniu samego zasobnika kondensatorowego, to ok. 400 m, przy zachowaniu normalnych parametrów ruchowych.
- Zastosowanie dodatkowej baterii akumulatorów umożliwi przejazd dłuższego odcinka, w zależności od pojemności i napięcia baterii. W naszym przypadku to ok. 1200÷2000 m.
- Przejęcie energii hamowania z $V = 50$ km/h ok. 0,35kWh.
- Obcięcie szczytu oraz skrócenie czasu poboru z sieci maksymalnego prądu podczas rozruchu.

- Zastosowany zasobnik kondensatorowy eliminuje problemy zatrzymania pojazdu pod izolatorem sekcyjnym, a także chwilowe przerwy w zasilaniu sieci.
- Żywotność zasobnika kondensatorowego wynosi $\sim 10^6$ cykli tj. ok. 15 lat eksploatacji.
- Żywotność zasobnika akumulatorowego przy rozładowaniu 25 % to ok. 14000 cykli tj. ok. 2 lata eksploatacji.
- Zastosowany przez Instytut Elektrotechniki układ hybrydowego zasilania pojazdu podlega prawnej ochronie zagwarantowanej przez Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej.



Trolejbus Jelcz M121 w Kownie



Trolejbus Jelcz PR110 w Lublinie