

Paweł Giziński

Kondensatorowy zasobnik energii do pojazdów trakcji elektrycznej

Pojazdy trakcji elektrycznej są znaczącym odbiorcą energii elektrycznej. Moc napędów zainstalowanych w lokomotywach osiąga 6 MW, pociągach metra 3 MW, tramwajach 600–800 kW. Współczesne tranzystorowe układy regulacyjne umożliwiają wykorzystanie pobieranej z podstacji energii ze stosunkowo wysoką sprawnością, wynoszącą 0,9. Układy te umożliwiają również częściowe odzyskanie energii kinetycznej rozpedzonego 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. Przy zasilaniu sieci prądem przemiennym stosowane są układy falownikowe przetwarzające pośrednie napięcie prądu stałego pojazdu na prąd przemienny. Układy takie, ze względu na wymaganą wysoką jakość prądu zwracanego do sieci, są skomplikowane i kosztowne.

Teoretycznie w trakcji miejskiej można odzyskać 20–40% energii pobranej na rozruch i jazdę, 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 tys. 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 dwiema metodami:

- 1) instalując na podstacjach trakcyjnych bezwładnikowe lub kondensatorowe zasobniki energii; takie rozwiązanie zastosowano próbnie w kilku miastach;
- 2) zabudowując na pojeździe zasobniki kondensatorowe o mniejszej mocy i pojemności wystarczającej do przejścia energii hamowania z prędkości odpowiadającej warunkom ruchowym.

Kondensatorowy zasobnik energii

Kondensatorowy zasobnik energii zabudowany na pojeździe trakcyjnym powinien przejmować całkowitą lub część energii EK zwracanej przez pojazd podczas hamowania.

Energia zmagazynowana w kondensatorze:

$$E = \frac{C \cdot U^2}{2}$$

Podczas hamowania maksymalna wartość prądu ładowania kondensatora równa jest sumie prądu hamowania dwóch grup silników. Superkondensatory charakteryzują się możliwością ładowania dużą wartością prądu, tym niemniej powinno się zastosować przekształtnik tranzystorowy zabezpieczający przed zwarciami.

Sprawność ładowania kondensatora ze stałą wartością prądu wynika ze strat w rezystancji szeregowo połączonych kondensatorów oraz strat w czoperze i określona jest na ok. 0,9.

Przyjmując sprawność ładowania zasobnika kondensatorowego $\eta_c = 0,9$ i maksymalne napięcie baterii kondensatorów $U_c = 750$ V, niezbędna pojemność zasobnika dla jednoczłonowego wagonu obciążonego o masie 28 Mg wynosi.

$$C = \frac{2 E_k \cdot \eta_c}{U_c} \approx 7 \text{ F}$$

Hamowanie tramwaju dla uzyskania wymaganego opóźnienia hamowania $1,4 \text{ m/s}^2$ dla wagonu pustego wymaga mocy hamowania ok. 240 kW. Moment hamujący silników w zakresie prędkości powyżej znamionowej, proporcjonalny do napięcia, maleje wraz z napięciem. Bateria kondensatorów przed rozpoczęciem nie może więc być rozładowana do zbyt niskiego napięcia.

Zakładając, że wartość napięcia baterii kondensatorów przed rozpoczęciem hamowania wynosi $U_{c0} = 500$ V, niezbędna pojemność wynosi:

$$C = \frac{2 E_k \cdot \eta_c}{U_c^2 - U_{c0}^2} = 12 \text{ F}$$

W tramwajach wielocłonowych przy hamowaniu intensywnym wózki toczne hamowane są mechanicznie za pomocą hamulców tarczowych. Liczba osi napędnych wynosi na ogół 4, a osi tocznych 2–4. Część energii ($1/3$) wytracana jest w hamulcach mechanicznych. W takich przypadkach, pomimo większej masy pojazdów wielocłonowych (ok. 40 Mg dla wagonu obciążonego), niezbędna pojemność baterii kondensatorów jest zbliżona do wartości dla tramwajów jednocłonowych i wynosiłaby ok. 12 F.

Uwzględniając jednocześnie, że część energii może być odebrana przez inne pojazdy znajdujące się na tym samym odcinku zasilania, optymalna pojemność baterii kondensatorów dla tramwaju 105N oraz członowego o masie własnej ok. 30 Mg powinno wynosić 9–10 F.

Baterie kondensatorów o pojemności ok. 9 F można np. zbudować z następujących oferowanych superkondensatorów:

- a) MAXWEL 2600 F – 2,5 V; przy połączeniu szeregowym 300 kondensatorów uzyskuje się $C = 8,7 \text{ F} - 750 \text{ V}$;
 b) kondensatory firmy .IVTAN 2 F, 400 V; przy połączeniu szeregowo dwóch takich kondensatorów w dziewięciu gałęziach równoległych łącznie 18 kondensatorów uzyskuje się $C = 9 \text{ F} - 800 \text{ V}$.

Baterie takie pozwalają na przejęcie połowy energii kinetycznej tramwaju lub 75% energii kinetycznej, z uwzględnieniem stosowania hamowania mechanicznego osi tocznych. Pozostała energia oddawana będzie do sieci trakcyjnej lub tracona w opornicach hamowania.

Początkowe wartości prędkości maksymalnej, przy których bateria kondensatorów o pojemności 9 F przejmie energię dla różnych sposobów hamowania, zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Początkowa prędkość hamowania tramwaju dla kondensatora 9 F

Masa wagonu [Mg]	Rodzaj hamowania	Początkowa prędkość hamowania [km/h]
40	Rekuperacyjne 100 %	35,0
28	Rekuperacyjne 100 %	50,0
40	Rekuperacyjne + mechaniczne 1/3	43,0
28	Rekuperacyjne + mechaniczne 1/3	50,4
40	Rekuperacja – 50 % bateria + 50 % sieć	48,0
28	Rekuperacja – 50 % bateria + 50 % sieć	57,0

Baterie kondensatorów o pojemności 9 F umożliwiają przy braku zasilania z sieci trakcyjnej przejazd z ograniczoną prędkością odcinka powyżej 250 m.

Schemat ideowy układu elektrycznego tramwaju napędzane go przez 4 silniki asynchroniczne zasilane z dwóch przekształtników pokazano na rysunku 1.

Poprzez stycznik liniowy LC oraz przekształtniki P1 i P2 hamowania odzyskowego zasilane są dwa układy napędowe. Przekształtniki PT1 i PT2, składające się z falowników i czoperów hamowania oporowego mają własny filtr wejściowy i opornik hamowania RH dla zapewnienia hamowania elektrodynamicznego w sytuacjach awaryjnych. Zasobnik energii składający się z przekształtnika P1 oraz baterii superkondensatorów dla pojazdu śred-

niej mocy może być wspólnym podzespółem lub dla dużych mocy każda grupa silników posiada własny zasobnik.

Układ może być wyposażony w dodatkowy podzespół P3 podwyższający napięcie, umożliwiającą pełne wykorzystanie energii zasobnika.

Przykładowy przejazd odcinka 400 m obciążonym tramwajem 105N pokazany jest na rysunku 2.

Początkowa wartość napięcia kondensatora 750 V spada podczas rozruchu do ok. 560 V, podczas wybiegu kondensator doładowuje się do wartości napięcia sieci ok. 600 V, następnie podczas hamowania doładowuje się do przyjętego napięcia granicznego 750 V.

Wartość szczytowa prądu pobranego z sieci trakcyjnej wynosi ok. 300 A przy prądzie silników 500 A.

Podczas rozruchu kondensator dostarcza energię 0,23 kWh przy całkowitym zapotrzebowaniu energii na cele trakcyjne ok. 1,2 kWh.

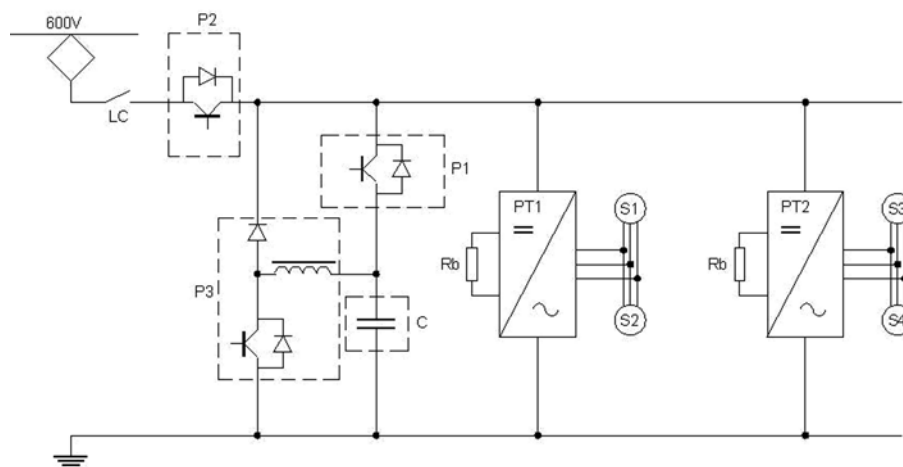
Podczas hamowania energia przyjęta przez zasobnik kondensatorowy wynosi ok. 0,27 kWh, energia zwracana do sieci trakcyjnej wynosi ok. 0,1 kWh.

Możliwe jest zablokowanie doładowywania z sieci kondensatorów podczas wybiegu, wówczas cała energia hamowania tramwaju przejęta będzie przez zasobnik kondensatorowy.

Wnioski

Zastosowanie w tramwajach kondensatorowych zasobników energii jest technicznie możliwe i daje następujące korzyści:

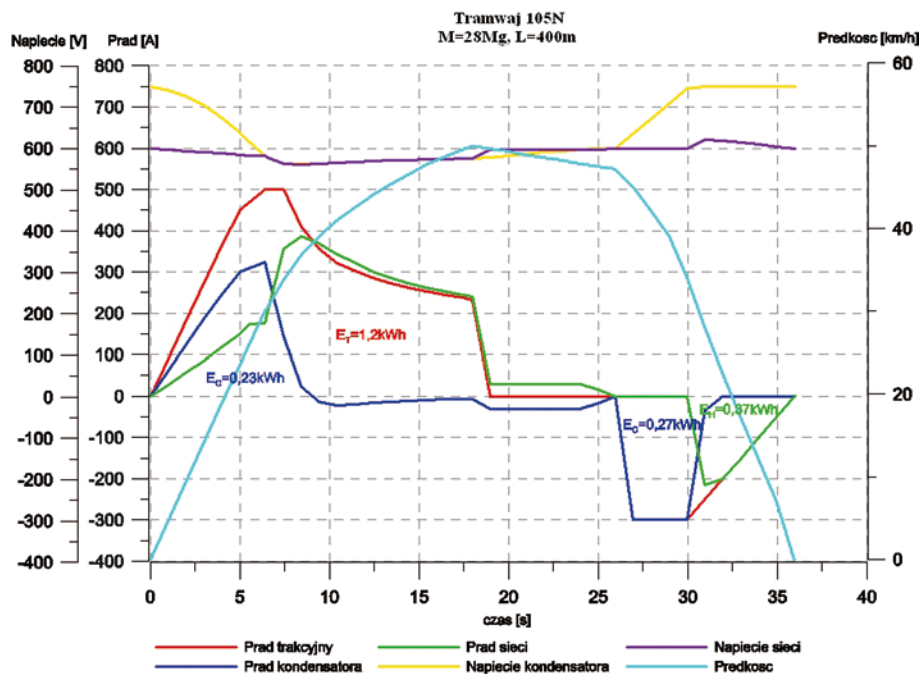
1. Przejęcie znacznej części energii hamowania tramwaju bowiem przy obecnym układzie zasilania sieci trakcyjnej praktycznie tylko połowa energii kinetycznej hamowania absorbowana jest przez inne pojazdy znajdujące się na danym odcinku zasilania.
2. Zakumulowana w kondensatorach energia zmniejsza obciążenie średnie i szczytowe podstacji trakcyjnych.
3. Kondensatorowy zasobnik energii zamontowany na pojeździe umożliwia w przypadkach awarii układu zasilania – zjazd ze skrzyżowania, przejechanie odcinka z np. zerwaną siecią trakcyjną (tramwaj, trolejbus) oraz dojazd do najbliższej stacji dla pojazdów metra.



Rys. 1. Schemat ideowy włączenia zasobnika C w układ tramwaju

LC - wyłącznik główny, PT1 – PT2 - falownik, P1 - przekształtnik ładowania baterii, PT2 - przekształtnik hamowania odzyskowego, P3 - przekształtnik podwyższający napięcie zasilania, C - zasobnik kondensatorowy, Rb - opornice hamowania

4. Pierwszy pojazd wyposażony przez Instytut Elektrotechniki w kondensatorowy zasobnik energii 8,7 F, 7500 poddany będzie badaniom ruchowym i eksploatacyjnym w I kwartale 2007 r.



Rys. 2. Przykładowy przejazd odcinka 400 m obciążonym tramwajem 105N

Autor
dr inż. Paweł Giziński
Instytut Elektrotechniki

➤ Dokończenie ze s. 80

Dla średniej wartości rozładowania baterii 16,5 Ah, uzyskanej z pomiarów testowych przeprowadzonych przez IEL dla pustego tramwaju, żywotność baterii będzie zbliżona.

Wnioski końcowe

Badania ruchowe potwierdziły słuszność przyjętych założeń w projekcie wstępnym dla układu napędowego tramwaju 116N zasilanego w systemie mieszanym: sieć trakcyjna – zasobnik akumulatorowy.

Dla tramwaju pustego o masie ~30 Mg zużycie energii przy jeździe baterijnej wynosi ok. 2 kWh/km, a rozładowanie baterii dla odcinka 6 km wynosi ok. 20 Ah, czyli 25% pojemności znamionowej baterii i są to wyniki zgodne z założeniami.

Dla tramwaju obciążonego pasażerami o masie ~10 Mg zużycie energii nie przekracza ok. 3 kWh/km, a rozładowanie baterii wynosi ok. 30%. Badania eksploatacyjne w normalnym ruchu z pasażerami potwierdzają te założenia.

Parametry ruchowe tramwaju przy jeździe baterijnej dla wagonu pustego, takie jak prędkość maksymalna 40–43 km/h, prędkość średnia 27–30 km/h, oraz prędkość komunikacyjna 23–25 km/h (wliczając 15 s postoju na przystankach) są wyższe od założonych. Dla wagonu obciążonego masą 10 Mg prędkość komunikacyjna zmniejszy się do 18–20 km/h i będzie jednak wyższa od obecnie stosowanej prędkości rozkładowej.

Parametry dynamiczne dla wagonu pustego, takie jak maksymalne przyspieszenie ruchu 0,7 m/s² do V = 30 km/h jest zgod-

ne z założeniami uwzględniającymi maksymalny, kilkusekundowy prąd baterii ok. 600 A. Dla wagonu obciążonego masą 10 Mg przyspieszenie zmaleje do ok. 0,53 m/s² do V = 30 km/h. Wartości opóźnień hamowania nie ulegną zmianie w stosunku do obecnie osiągniętych przez tramwaj 116N.

Akumulatorowy zasobnik energii podczas jazdy przy zasilaniu z sieci trakcyjnej poprawia dynamikę jazdy, zwłaszcza przy dużym natężeniu ruchu, a także zwiększa efektywność rekuperacji energii.

Badania ruchowe wykazały pełną sprawność zasilania tramwaju z zasobnika akumulatorowego.

Podczas badań eksploatacyjnych z pasażerami prowadzone są głównie badania pod kątem analizy bilansu energetycznego zastosowanego zasobnika energii i żywotności akumulatorów.

Badania eksploatacyjne tramwaju prowadzone również w okresie zimowym, przy obniżonym napięciu sieci trakcyjnej, wykazały potrzebę uzależnienia zwrotu energii do sieci trakcyjnej od stopnia naładowania baterii akumulatorów. Tramwaj z akumulatorowym zasobnikiem energii eksploatowany jest od grudnia 2005 r. i do chwili obecnej przejechał ok. 20 tys. km.

Autor
mgr inż. Marcin Gąsiewski
Instytut Elektrotechniki