

Tadeusz Solarek

Ocena celowości stosowania w taborze trakcji tramwajowej kondensatorowych zasobników energii hamowania odzyskowego

Nowo budowany tabor tramwajowy oraz tabor modernizowany przystosowany jest do hamowania z odzyskiem energii. W ruchu tramwajowym potencjalne oszczędności płynące ze stosowania takiego hamowania są duże, co wynika z częstych zatrzymań na przystankach, skrzyżowaniach i z innych przyczyn, wynikających z zakłóceń generowanych przez pozostałych użytkowników ruchu w mieście.

W klasycznym układzie hamowania odzyskowego, w którym energia hamującego pojazdu oddawana jest bezpośrednio do innych pojazdów za pośrednictwem sieci trakcyjnej, rzeczywiste oszczędności są znacznie mniejsze, gdyż często się zdarza, że hamujący pojazd albo nie znajduje odbiorcy w swoim rejonie zasilania, albo z powodu zbyt dużych spadków napięć na drodze przesyłu tej energii, co skutkowało by przekroczeniem dopuszczalnej wartości napięcia na odbieraku hamującego pojazdu. Częściowo problem ten można rozwiązać stosując stacjonarne zasobniki energii w układzie zasilania (np. wirujące), jednak z wielu powodów korzystniejsze byłoby zainstalowanie zasobników na pojazdach. Wykorzystanie do celów magazynowania energii zasobników wirujących, z powodu wielu ich wad, takich między innymi, jak: znaczna masa, wymiary, efekt żyroskopowy, wydaje się być nierealne.

Coraz lepsze parametry techniczne superkondensatorów, takie jak wzrost żywotności oraz dopuszczalnego prądu ładowania, stwarzają przesłanki do wykorzystania ich w charakterze pojazdowych zasobników energii hamowania. Niestety, cena superkondensatorów jest nadal stosunkowo wysoka, ponadto do ceny zasobnika należy dodać jeszcze koszt czopera obniżająco-podwyższającego, niezbędnego do prawidłowej współpracy zasobnika z układem napędowym.

Dla oceny opłacalności stosowania zasobników niezbędna jest znajomość zysków energetycznych, jakie przyniesie ich wprowadzenie, w porównaniu do klasycznych układów hamowania z odzyskiem energii oraz określenie optymalnej pojemności zasobników. Aby określić spodziewane zyski w zużyciu energii, przeprowadzono badania symulacyjne dla dwóch rejonów zasilania w łódzkiej MPK, przy różnych pojemnościach zasobników, oraz dla taboru hamującego ze zwrotem energii bezpośrednio do sieci trakcyjnej.

Badania symulacyjne

Warianty symulacji i przyjęte założenia

Do symulacji wybrano dwa rejon zasilania – podstacji Piotrkowska 07 i Szczecińska 23, różniące się maksymalnie rozległością,

liczbą sekcji i natężeniem ruchu, gdyż te parametry mają decydujący wpływ na efekty energetyczne rekuperacji ze zwrotem energii bezpośrednio do sieci. Symulacje przeprowadzono dla szczytu i ruchu pozaszczytowego. Zużycie energii mierzono na szynach prądu zmiennego podstacji, czyli uwzględnia ono straty w samej podstacji i w sieci trakcyjnej. W wariantach symulacji z zasobnikami na pojazdach przyjęto, że po całkowitym naładowaniu zasobnika tramwaj przechodzi na hamowanie oporowe – nie oddaje energii do sieci. Założono, że ruch jest prowadzony, tak jak ma to miejsce obecnie, tramwajami składającymi się z dwóch wozów typu 805N. Przyjęto, że wszystkie tramwaje wyposażone są w silniki asynchroniczne i układ hamowania odzyskowego.

Parametry układu zasilania odpowiadają stanowi obecnemu. Przyjęto, na podstawie informacji z eksploatacji obecnie kursującego taboru hamującego odzyskowo, że graniczna wartość napięcia na odbierakach, po przekroczeniu której tramwaje przechodzą na hamowanie oporowe, wynosi 800 V. Uwzględniono pobór energii na potrzeby własne taboru (bez ogrzewania). Założono, że tramwaje hamują z opóźnieniem 1 m/s².

Symulacje przeprowadzone zostały dla aktualnego rozkładu jazdy, przy czym program generował losowe opóźnienia we wjazdach tramwajów w badany rejon według rozkładu prawdopodobieństwa odpowiadającego z grubsza zaobserwowanej nieregularności ruchu. Uwzględnienie występowania spóźnień jest szczególnie istotne przy stosowaniu rekuperacji bezpośrednio do sieci, gdzie jazda dokładnie według rozkładu jazdy może wyjątkowo sprzyjać, lub nie, znajdowaniu odbiorców przez hamujące pojazdy.

Maksymalne prędkości jazdy na poszczególnych sekcjach przyjęto na podstawie obserwacji obecnie prowadzonego ruchu.

Wszystkie skrzyżowania w symulowanych rejonach zasilania wyposażone są w sygnalizację świetlną. Przyjęte cykle świateł odpowiadają stanowi obecnemu.

W wyniku symulacji otrzymuje się, z przyjętym krokiem czasowym, chwilowe wartości mocy podstacji oraz wartości napięć na odbierakach wszystkich tramwajów. Określana jest ilość energii gromadzona w zasobnikach podczas kolejnych hamowań. Ponadto wyznaczany jest łączny czas przebywania wszystkich tramwajów w badanym rejonie za okres trwania symulacji.

Symulacje rejonu zasilania podstacji Piotrkowska

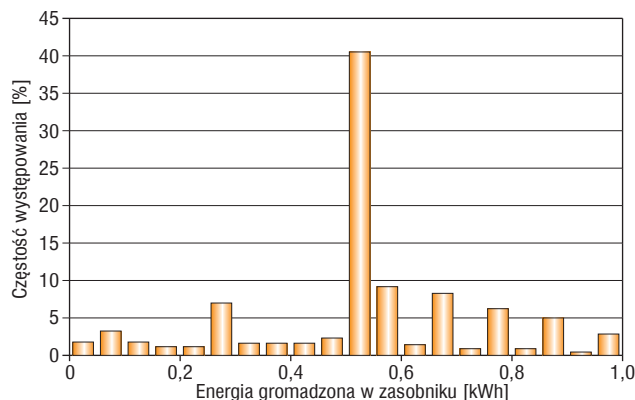
Podstacja ta zasilana jest linią SN 15 kV. Moc zwarciova wynosi 200 MVA. Z podstacji zasilanych jest jednostronnie 8 sekcji dwutorowych. Łączna długość wszystkich sekcji wynosi 2980 m. Przez rejon zasilania biegną trasy dziesięciu linii. W godzinach szczytu odstęp czasowy między tramwajami na wszystkich liniach

wynosi 600 s. Podstacja wyposażona jest w 4 zespoły prostownicowe z transformatorami TZE3-1202 (jeden rezerwowo).

W celu określenia maksymalnej energii gromadzonej w zasobnikach, pierwsze symulacje przeprowadzono przy założeniu, że pojemność zasobnika jest nieograniczona. Przy tym założeniu moc średnia podstacji wyniosła dla ruchu:

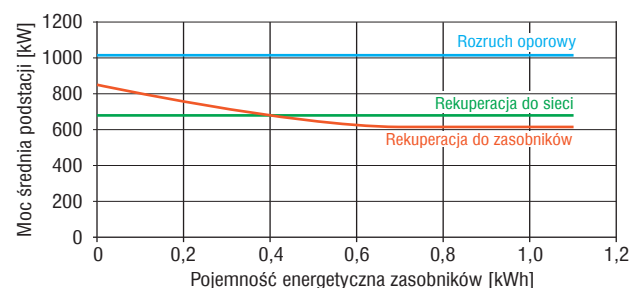
- szczytowego: $P_{sz} = 600,3$ kW;
- poza szczytem: $P_p = 380,6$ kW.

Maksymalna ilość energii zgromadzonej w zasobniku wyniosła 1,07 kWh. Histogram obrazujący częstość ładowania zasobników określoną ilością energii, dla ruchu szczytowego, zamieszczono na rysunku 1. Dla ruchu poza szczytem kształt histogramu jest bardzo podobny.



Rys. 1. Histogram ładowania się zasobników

W celu określenia wpływu pojemności energetycznej zasobników na efekty rekuperacji, przeprowadzono serię symulacji, zmieniając pojemność zasobników od 0 do 1,1 kWh. Ponadto przeprowadzono symulacje dla wariantu z rekuperacją bezpośrednio do sieci ($P = 681$ kW) i dla wariantu z użyciem taboru starego, z rozruchem oporowym (bez rekuperacji, $P = 1008$ kW). Wyniki w postaci graficznej przedstawiono na rysunku 2.

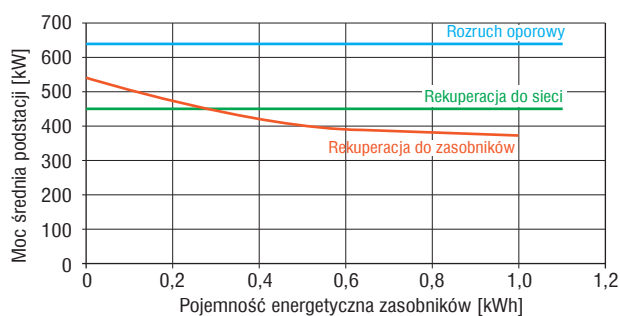


Rys. 2. Zależność mocy średniej podstacji od pojemności zasobników dla ruchu w szczycie

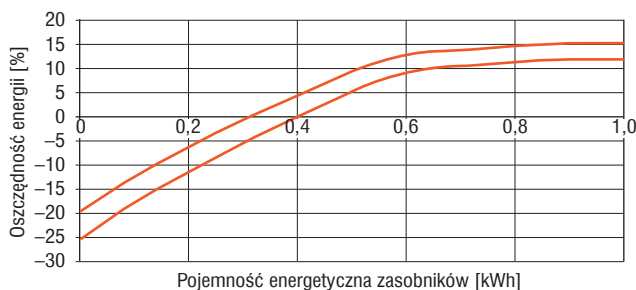
Analogiczne symulacje przeprowadzono dla ruchu pozaszczytowego. Moc średnia podstacji w wariantcie z rekuperacją bezpośrednio do sieci wyniosła $P = 449$ kW, a w wariantcie z rozruchem oporowym – $P = 639$ kW.

Wykres zamieszczony na rysunku 4 obrazuje procentowe zyski (lub straty) energii przy zastosowaniu zasobników, w stosunku do rekuperacji energii bezpośrednio do sieci, w funkcji pojemności zasobników.

Symulacje wykazały, jak można było zresztą przewidywać, że istnieje pewna graniczna wartość pojemności zasobników, powy-



Rys. 3. Zależność mocy średniej podstacji od pojemności zasobników dla ruchu poza szczytem



Rys. 4. Efekty stosowania zasobników w funkcji ich pojemności

żej której efektywność hamowania zasobnikowego jest większa od efektywności rekuperacji ze zwrotem energii bezpośrednio do sieci. Wartość ta wynosi dla ruchu w szczycie 0,4 kWh, a dla ruchu poza szczytem około 0,3 kWh. Różnica między nimi wynika z faktu, że efektywność rekuperacji bezpośrednio do sieci rośnie ze wzrostem natężenia ruchu, natomiast efektywność hamowania zasobnikowego jest od natężenia ruchu niezależna.

Symulacje rejonu zasilania podstacji Szczecińska

Podstacja Szczecińska jest jedną z najmniej obciążonych w tódkim MPK. Zasila jedynie dwie sekcje o łącznej długości 1565 m. W rejonie odbywa się ruch czterech linii tramwajowych.

Dla rejonu zasilania podstacji Szczecińska wykonano identyczne symulacje jak dla rejonu podstacji Piotrkowska.

Przy założeniu nieograniczonej pojemności zasobników moc średnia podstacji w szczycie wyniosła dla ruchu:

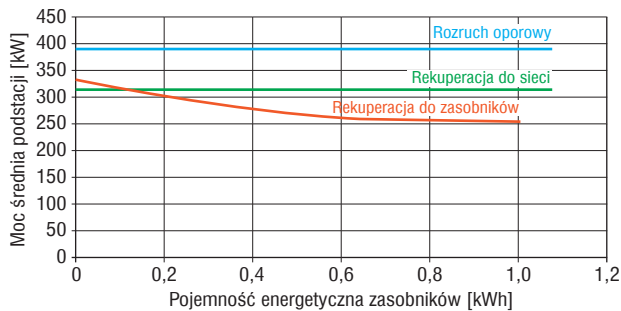
- szczytowego: $P_{sz} = 252,7$ kW;
- poza szczytem: $P_p = 159,1$ kW.

Maksymalna ilość energii zgromadzonej w zasobniku wyniosła 0,92 kWh zarówno w szczycie, jak i poza nim.

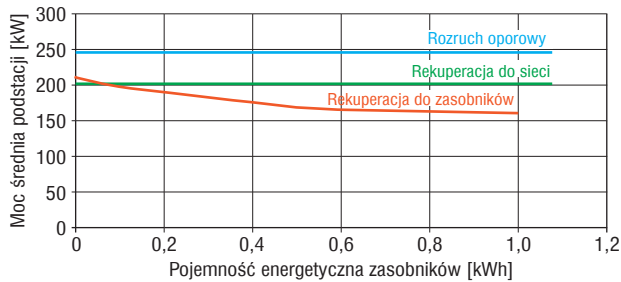
Wyniki symulacji dla ruchu szczytowego dały następujące wyniki: moc średnia podstacji dla taboru z rozruchem oporowym wyniosła 390,5 kW, a przy rekuperacji bezpośrednio do sieci – 313,1 kW.

Dla ruchu poza szczytem moc średnia podstacji dla taboru z rozruchem oporowym wyniosła 245,8 kW, a przy rekuperacji bezpośrednio do sieci – 200,0 kW. Zależność mocy średniej podstacji w funkcji pojemności zasobnika przedstawia wykres zamieszczony na rysunku 6.

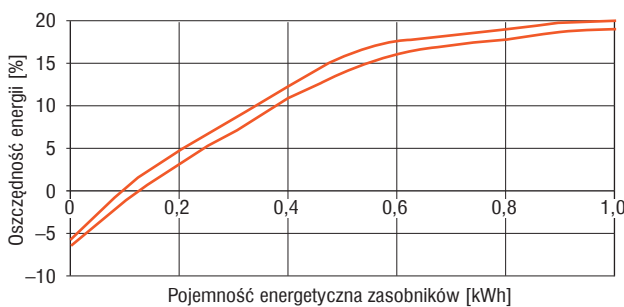
Na rysunku 7 zamieszczony jest wykres przedstawiający procentowe zyski energii przy zastosowaniu zasobników w porównaniu do wariantów z rekuperacją energii bezpośrednio do sieci.



Rys. 5. Zależność mocy średniej podstacji od pojemności zasobników dla ruchu w szczycie



Rys. 6. Zależność mocy średniej podstacji od pojemności zasobników dla ruchu poza szczytem



Rys. 7. Efekty stosowania zasobników w funkcji ich pojemności poza szczytem

Ocena opłacalności wprowadzenia hamowania odzyskowego z zasobnikami na tramwajach

Aby ocenić zyski energetyczne przypadające na jeden tramwaj, wyznaczono średnie moce tramwajów (mierzone na podstacji, czyli z uwzględnieniem strat w układzie zasilania) z zależności:

$$P_{s\text{tr}} = P_{s\text{podst.}} \frac{T}{\Sigma t}$$

gdzie:

T – czas trwania symulacji;

Σt – łączny czas przebywania wszystkich tramwajów w rejonie zasilania za okres symulacji.

Zestawione w tabeli 1 oszczędności wyznaczono przy następujących założeniach:

- pojemność energetyczna zasobników = 0,9 kWh;
- średni miesięczny czas jazdy tramwaju = 330 h;
- cena energii elektrycznej = 0,28 zł/kWh.

Tabela 1

Oszczędności dla jednego tramwaju

	Piotrkowska		Szczecińska		
	szczyt	po szczycie	szczyt	po szczycie	
Rekuperacja do sieci P_{sr} [kW]	77,20	81,10	111,10	115,00	
Rekuperacja zasobn. P_{sr} [kW]	68,30	68,80	96,20	95,60	
ΔP_{sr} [kW]	8,90	12,30	14,90	19,40	
Oszczędności roczne	[MWh]	35,24	48,60	59,00	76,80
	[zł]	9867,00	13 636,00	16 520,00	21 510,00

Spróbowano oszacować koszty instalacji na taborze układów hamowania z zasobnikami. Założono, że zasobnik będzie się ładował do napięcia maksymalnego 400 V, a rozładowywał do napięcia minimalnego 200 V, gdyż w celu wydłużenia jego żywotności napięcie przed rozpoczęciem hamowania nie powinno być mniejsze niż połowa napięcia maksymalnego. Przy tych założeniach, aby zasobnik mógł zgromadzić energię 0,9 kWh, musi mieć pojemność 54 F. Pojemność taką można uzyskać np. z kondensatorów firmy Maxwell 3000 F - 2,7 V. Przy przyjęciu, dla zwiększenia trwałości zasobnika, maksymalnej wartości napięcia równej 2,6 V, w jednej gałęzi powinno być 154 kondensatorów. Trzy takie gałęzie połączone równolegle mają pojemność 58,44 F.

Koszt jednego kondensatora MAXWELL 3000 F - 2,7 V wynosi 59 euro, co przy kursie 1 euro = 4,40 zł da koszt całego zasobnika około 120 tys. zł.

Koszt czopera podwyższająco-obniżającego to ok. 50 tys. zł. Istnieje jednak możliwość integracji przekształtnika z falownikiem (na etapie budowy falownika), co zmniejszy jego koszt do 30 tys. zł. Łączny koszt zainstalowania zasobnika wyniesie zatem 150 tys. zł.

Można liczyć, że żywotność kondensatora, przy rozładowywaniu go jedynie do połowy napięcia znamionowego wyniesie 106 cykli. Daje to okres eksploatacji zasobnika około 8,3 lat. W tym okresie, przyjmując średnie oszczędności płynące ze zmniejszenia rocznego zużycia energii w wysokości 15 tys. zł, zaoszczędzi się około 125 tys. zł, a więc mniej niż wynosi koszt zainstalowania zasobnika.

Podsumowanie

Przeprowadzone, na podstawie wyników symulacji, szacunkowe obliczenia ekonomicznej opłacalności zastąpienia układów hamowania ze zwrotem energii do sieci trakcyjnej układami z gromadzeniem energii hamowania w zasobnikach na pojazdach wykazały, że przy obecnych relacjach cen energii i cen superkondensatorów stosowanie zasobników jest nieuzasadnione.

Należy jednak zwrócić uwagę, że szacunki te wykonano przy założeniu pojemności zasobnika równej 0,9 kWh, pozwalającej prawie zawsze zgromadzić całkowitą energię hamowania. Podobne obliczenia wykonane dla zasobnika o pojemności zmniejszonej do 0,6 kWh, co skutkuje zmniejszeniem oszczędności energii o około 12%, lecz zmniejsza koszt zasobnika o jedną trzecią, wykazują, że rozwiązanie takie jest już na granicy opłacalności. Przypuszczać można, że w przyszłości, przy spadku cen superkondensatorów i poprawie ich parametrów, a z drugiej strony wzroście cen energii, stosowanie zasobników będzie ekonomicznie w pełni uzasadnione.