

Straty mocy w zasobniku energii dla linii tramwajowej

Streszczenie. Oszczędność energii w trakcji tramwajowej można uzyskać stosując zasobnik energii, umieszczony na końcu linii tramwajowej. W artykule przedstawiony jest opis budowy zasobnika energii, złożonego z baterii superkondensatorów oraz przekształtnika DC/DC, umożliwiającego przepływ energii podczas ładowania i rozładowywania baterii. Omówione są podstawowe źródła strat mocy w tym zasobniku. Przedmiotem analizy jest dobór parametrów zasobnika, prowadzący do zmniejszania strat energii podczas jej przepływu między baterią z linią. Autorzy prezentują efektywne kryterium doboru parametrów modułów superkondensatorów, używanych do budowy baterii stacjonarnego zasobnika energii.

Abstract. Saving of energy in tram traction can be achieved by use the energy storage system placed at the end of the tram line. In the paper is presented the description of the energy storage system based on battery of supercapacitors and DC/DC converter enabling energy flow during loading and unloading of the battery. The basic sources of power losses in the energy storage system are discussed. The storage system parameters choice leading to minimizing the power losses during energy flow between battery and line are analyzed. **The effective criterion of choice of supercapacitor modules used in stationary energy storage system construction.**

Słowa kluczowe: zasobnik energii, trakcja tramwajowa, superkondensator, przekształtnik DC/DC.

Keywords: energy storage, tram traction, supercapacitor, DC/DD converter.

Wstęp

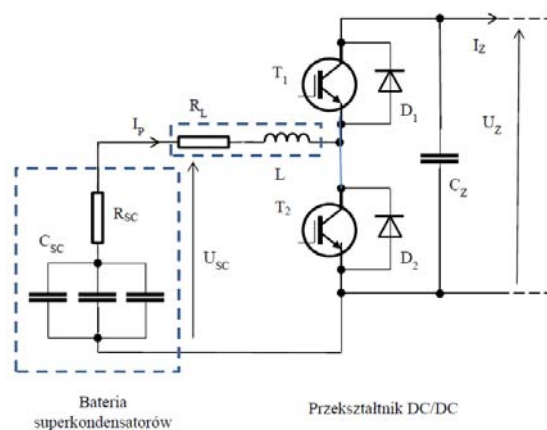
Oszczędność zużycia energii w zelektryfikowanym transporcie trakcyjnym [1] dotyczy między innymi wykorzystania energii oddawanej podczas hamowania pojazdów. Wykorzystanie tej energii powszechnie jest obecnie możliwe jedynie przy zapotrzebowaniu na energię innego pojazdu, znajdującego się aktualnie na tym samym odcinku sieci zasilającej. Nieobecność pojazdów z zapotrzebowaniem na energię powoduje przekazanie energii tej do rezystora hamowania i jej ostateczną stratę. Pełne wykorzystanie energii hamowania w dowolnym czasie wymaga zastosowania zasobników energii, pobierających energię hamowania i dostarczających ją w okresach zapotrzebowania. Zasobniki takie mogą być zamontowane w pojazdach lub w układach zasilania linii trakcyjnych.

W artykule jest omawiany zasobnik energii, usytuowany na końcu linii tramwajowej [2]. Zasobnik energii tego rodzaju może bazować na superkondensatorach (SC), gdyż ich obecne zaawansowanie technologiczne umożliwia efektywne magazynowanie energii i przekazywanie mocy o wartościach, wystarczających do zasilenia tramwaju. Artykuł przedstawia opis zasobnika energii, złożonego z baterii SC oraz przekształtnika DC/DC, umożliwiającego dwukierunkowy przepływ energii podczas ładowania i rozładowywania baterii. Omówione są podstawowe źródła strat mocy w tym zasobniku. Przedmiotem analizy jest dobór parametrów zasobnika, prowadzący do zmniejszania strat energii podczas jej przepływu między baterią z linią. Autorzy prezentują efektywne kryterium doboru parametrów modułów SC, używanych do budowy baterii stacjonarnego zasobnika energii.

Budowa zasobnika

Uproszczony schemat zasobnika energii dla linii tramwajowej, zawierającego baterię superkondensatorów oraz dwukierunkowy niez izolowany przekształtnik DC/DC jest przedstawiony na rysunku 1. Bateria SC charakteryzuje się pojemnością C_{SC} i zastępczą rezystancją szeregową R_{SC} . W skład przekształtnika wchodzi dławik o indukcyjności L i rezystancji uzwojeń R_L oraz układ przełączników prądu dużej mocy, złożonych z tranzystorów bipolarnych z izolowaną bramką IGBT, oznaczonych T_1 i T_2 oraz diod D_1 i D_2 . Tętnienia napięcia U_z od strony linii tramwajowej wygląda jak kondensator C_z . Na schemacie prąd dławika w kierunku linii jest oznaczony I_p , zaś prąd wpływający do linii

jest oznaczony I_z . Sterowanie układem przełączającym jest na rysunku 1 pominięte.



Rys. 1. Uproszczony schemat zasobnika energii dla linii tramwajowej, zawierającego baterię superkondensatorów oraz dwukierunkowy przekształtnik DC/DC

W prezentowanej analizie strat mocy w zasobniku energii przyjęto zastosowanie handlowo dostępnych modułów SC oraz elementów przełączających. Dławik, występujący w przekształtniku, zaprojektowano pod kątem spełnienia założeń, postawionych dla analizowanego układu [2].

Do grupy modułów SC dużej mocy należy na przykład moduł 125 V Heavy Transportation firmy Maxwell [3], którego zastosowanie w układzie zasobnika energii do zasilania linii tramwajowej omawiano w [2]. Moduł ten charakteryzuje się pojemnością 63 F, zastępczą szeregową rezystancją wewnętrzną 18 mΩ, wytrzymałością napięciową 136 V oraz ma możliwość zmagazynowania 140 Wh energii. Z analizy, przedstawionej w pracy [2] wynika, że dla zasilania linii o założonych tam parametrach należy w zasobniku zastosować baterię, zawierającą 20 tego rodzaju modułów, w których można zmagazynować energię 10 MJ, czyli ok. 2,8 kWh. Bateria ta powinna dostarczać w sposób efektywny moc dochodzącą do 600 kW.

Wspomniane moduły SC mogą być łączone równolegle i szeregowo. W efekcie można uzyskać baterie o różnych wartościach maksymalnego napięcia pracy. Skutkuje to różnymi wartościami prądów przekształtnika DC/DC,

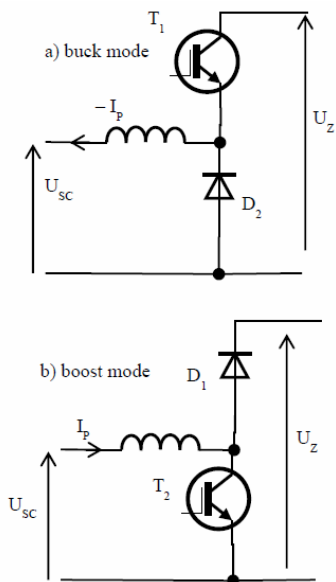
związanymi z przekazywaniem tej samej mocy pomiędzy zasobnikiem a linią.

Źródłem strat mocy w baterii SC jest ich szeregową zastępczą rezystancją wewnętrzną R_{SC} . Straty występują zarówno w fazie doładowywania jak i rozładowywania baterii. Ponadto rezystancja wewnętrzna ogranicza wartość mocy dostarczanej do odbiornika. Obecnie SC mają możliwość magazynowania energii rzędu kilku Wh/kg ich masy oraz przekazywania efektywnej mocy rzędu kilku kW/kg masy.

Dwukierunkowy nieizolowany przekształtnik DC/DC, przedstawiony w postaci uproszczonego schematu [4] na rysunku 1, w zależności od kierunku przekazywania energii pracuje w dwóch reżymach pracy:

- buck, w którym napięcie wyjściowe U_{SC} jest mniejsze niż wejściowe U_Z , czyli odpowiada to ładowaniu zasobnika,
- boost, w którym napięcie wyjściowe U_Z jest większe niż wejściowe U_{SC} , czyli odpowiada to oddawaniu energii przez zasobnik.

W zależności od kierunku przekazywania energii układ przekształtnika z rysunku 1 można przedstawić w postaci uproszczonych schematów, prezentowanych na rysunku 2.



Rys. 2. Schematy zastępcze konfiguracji przekształtnika dla a) Buck mode (ładowania zasobnika), b) Boost mode (dostarczanie energii dla linii)

Przyjmijmy pracę przetwornika w trybie prądu ciągłego dla pełnego obciążenia. Częstotliwość modulacji wynosi f_{sw} , a więc jej okres wynosi $t_{sw}=1/f_{sw}$. W okresie modulacji odpowiedni tranzystor (rys. 2) przewodzi prąd naprzemiennie z diodą, bocznikującą drugi z tranzystorów. W opisie przekształtników DC/DC jest stosowany współczynnik D , który jest stosunkiem czasu przewodzenia tranzystora do długości okresu t_{sw} . Dla przypadku idealnego [4] zależność między napięciami w reżymie buck wynosi

$$(1) \quad U_{SC} = D U_Z$$

zaś w reżymie boost wynosi

$$(2) \quad U_{SC} = (1 - D) U_Z$$

Podczas pracy przekształtnika z prądem ciągłym, przy stałym współczynniku D , prąd płynie przez dławik L w zależności od reżymu pracy w jednym lub drugim kierunku. Przy pominięciu spadków napięcia na elementach przełączających można stwierdzić, że na końcach dławika

panuje naprzemiennie różnica napięć $\Delta U = U_{SC} - U_Z$ lub $\Delta U = U_{SC}$. W związku z tym, przy zaniedbaniu wpływu R_L , można amplitudę tętnień prądu dławika określić jako [4].

$$(3) \quad \Delta I_L = \frac{\left(1 - \frac{U_{SC}}{U_Z}\right)}{2L f_{sw}} U_{SC}$$

Przy tętnieniach prądu dławika ΔI_L , niewielkich w stosunku do wartości średniej I_P tego prądu, przybliżone straty mocy można określić na podstawie wartości średniej prądu. Prąd ten jest jednocześnie prądem wpływającym lub wyływającym z baterii SC (rys. 1).

Podstawowe czynniki strat mocy

Moc strat zasobnika P_S jest sumą strat w baterii P_{SC} oraz w przekształtniku P_P . Ogólnie można wyróżnić następujące główne składowe tych strat mocy:

- straty P_{SC} na rezystancji szeregowej R_{SC} ,
- straty P_{LR} na rezystancji uzwojeń dławika P_L oraz w jego rdzeniu P_R ,
- straty w tranzystorach P_{CT} i diodach P_D w stanie przewodzenia,
- straty P_{SW} w tranzystorach i diodach podczas przełączeń między stanem przewodzenia i odcięcia, traktowane łącznie.

Ze względu na to, że napięcie linii U_Z różni się od napięcia baterii U_{SC} , różnią się także wartości średnie prądów I_Z oraz I_P . Dla maksymalnej mocy P_{max} , przekazywalnej między linią a zasobnikiem, średni prąd dławika I_{Pmax} wynosi

$$(4) \quad I_{Pmax} = \frac{P_{max}}{U_{SC}}$$

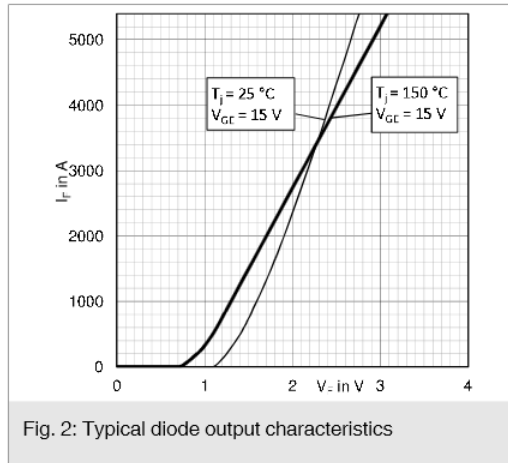
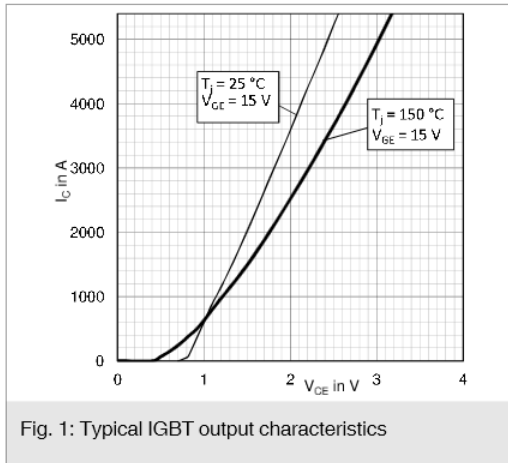
Straty P_{SC} związane z rezystancjami R_{SC} baterii oraz straty P_L dławika w rezystancji R_L są związane z prądem dławika I_P i wynoszą

$$(5) \quad P_{SC} = R_{SC} I_P^2$$

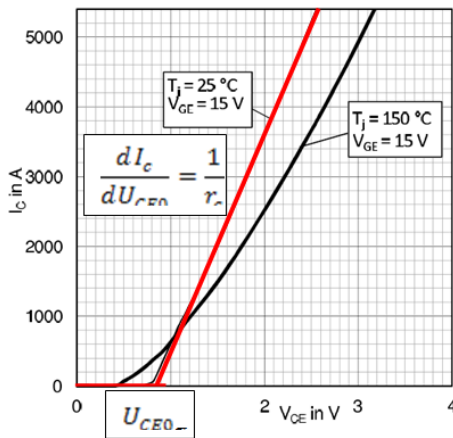
$$(6) \quad P_L = R_L I_P^2$$

Opisy strat w rdzeniu dławika oraz przełączania prądów w tranzystorach i diodach są z reguły prezentowane przez wytwórców w formie umożliwiającej ich wykorzystanie w analizie ogólnych strat mocy. Ze względu na duże wartości prądu, występujące w zasobniku, należy wykorzystać odpowiednie moduły przełączające. Z dostępnych handlowo modułów tego rodzaju rozważono zastosowanie modułów SKiiP firmy Semikron [5, 6] oraz modułów IGBT firmy Infineon [7, 8]. Moduły te zawierają tranzystory bipolarne z izolowaną branką IGBT, połączone z diodami, przewodzącymi w kierunku odwrotnym. Elementy te pracują naprzemiennie w reżymie pracy buck i boost (rys. 2). Przykładowe charakterystyki prądowo-napięciowe tych elementów w stanie przewodzenia są przedstawiona na rysunku 3.

W stanie przewodzenia tranzystora napięcie na nim można aproksymować za pomocą dwuodcinkowej linii łamanej, czego przykład jest zaprezentowany na rysunku 4. W opisie wykorzystane są pojęcia napięcia nasycenia U_{CE0} oraz rezystancji dynamicznej r_c . Tego rodzaju odcinkowa aproksymacja jest przyjęta w artykule także dla innych wykorzystywanych w artykule charakterystyk.



Rys. 3. Charakterystyki prądowo-napięciowe elementów przełączających SKiiP 3614 [6]



Rys. 4. Aproksymacja charakterystyki $I_c=f(U_{CE0})$ tranzystora IGBT dwuodcinkową linią łamaną (kolor czerwony)

Równanie odcinkowej aproksymacji napięcia U_{CE} tranzystora przełączającego prąd $i_c(t)$ w zakresie przewodzenia ma postać

$$(7) \quad u_{CE}(i_c) = u_{CE0} + r_C i_c$$

Analogicznie napięcie $U_D(t)$ na diodzie wynosi

$$(8) \quad u_D(i_D) = u_{D0} + r_D i_D$$

gdzie u_{D0} jest napięciem nasycenia, a r_D – rezystancją dynamiczną diody. Dla powyższej aproksymacji straty mocy na przewodzącym tranzystorze wynoszą

$$(9) \quad P_{CT}(t) = u_{CE}(t) i_C = u_{CE0}(t) i_C + r_C i_C^2(t)$$

zaś na diodzie

$$(10) \quad P_D(t) = u_{D0}(t) i_D + r_D i_D^2(t)$$

Straty energii przełączania prądu E_{sw} podczas pojedynczego cyklu włączania tranzystora i wyłączania diody oraz procesu przeciwnego ilustruje wykres na rysunku 5.

Ze względu na cykliczne przełączanie prądów podczas modulacji, średnie straty mocy z tego powodu można określić jako iloczyn energii E_{sw} i częstotliwości przełączania f_{sw} .

$$(11) \quad P_{SW} = E_{SW} f_{SW}$$

Biorąc pod uwagę wykresy np. na rysunku 5, straty przełączania można w przybliżeniu przyjąć także jako liniową funkcję prądu. Ogólnie, średnią moc strat przełączania można zapisać jako

$$(12) \quad P_{SW} = P_{SW0} + A_{SW} I_P f_{SW}$$

gdzie I_P jest to wartość przełączanego prądu w przekształtniku, zaś A_{SW} nachyleniem wykresu energii strat przy przełączaniu w funkcji prądu. Wartość P_{SW0} wynika z aproksymacji charakterystyki łamaną linią prostą. Przy szacowaniu strat przy dużych prądach I_P czynnik P_{SW0} często można zaniedbać.

Ostatecznie straty mocy w układzie przełączającym P_{CTD} można opisać jako sumę strat podczas przewodzenia tranzystorów i diod oraz strat podczas przełączania. Przy uwzględnianiu strat przewodzenia należy wziąć pod uwagę stosunek czasu przewodzenia elementu do okresu przełączania D . Ostatecznie można zapisać, że moc strat P_{CTD} wynosi

$$(13) \quad P_{CTD} = u_{CE0} I_P D + r_C I_P^2 D + u_{D0} I_P (1-D) + r_D I_P^2 (1-D) + A_{SW} I_P f_{SW}$$

Warto zwrócić uwagę na to, że zależność mocy strat od współczynnika D nie ma istotnego wpływu na średnią wartość całkowitych strat, bowiem tranzystory i diody przewodzą naprzemiennie, a ich charakterystyki są zbliżone (rys. 3). Ponadto, zgodnie z (1) oraz (2), wypełnienie okresu modulacji stanem przewodzenia tranzystorów i diod jest zamienne w zależności od kierunku przepływu prądu.

W rezultacie w artykule do szacowania strat mocy przyjęto uśrednione wartości strat w tranzystorach i diodach.

$$(14) \quad P_{CTD} = \frac{u_{EC0} + u_{D0}}{2} I_P + \frac{r_C + r_D}{2} I_P^2 + A_{SW} I_P f_{SW}$$

Podsumowując można stwierdzić, że całkowita moc strat w zasobniku, uwzględniająca straty w przełącznikach, dławiku oraz baterii wynosi

$$(15) \quad P_S = P_{SC} + P_{LR} + P_{CTD}$$

gdzie P_{SC} jest opisane zależnością (5), P_{CTD} zależnością (14), zaś P_{LR} zależnością (6), powiększoną o straty energii w rdzeniu dławika.

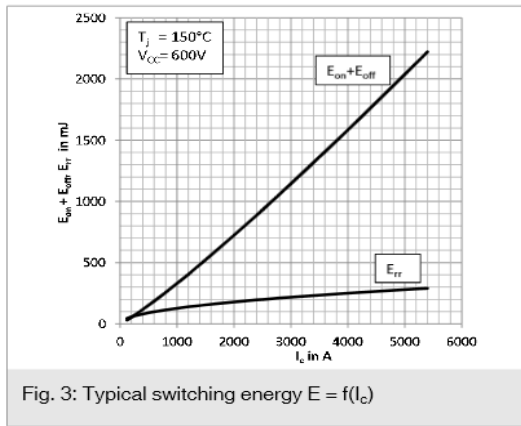


Fig. 3: Typical switching energy $E = f(I_c)$

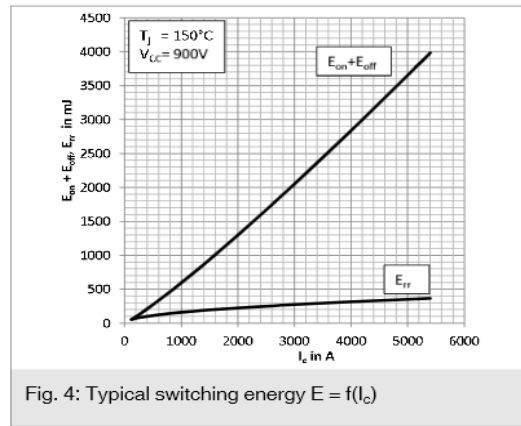


Fig. 4: Typical switching energy $E = f(I_c)$

Rys. 5. Energia przełączania w funkcji prądu w SKiIP 3614 [6]

Straty mocy w rezystancji wewnętrznej baterii

Wykorzystanie zasobnika energii powinno wiązać się z możliwie niewielkimi stratami energii. Jednym z parametrów zasobnika, które trzeba wziąć pod uwagę podczas jego konstrukcji jest nominalne napięcie baterii superkondensatorów U_{SC} .

Bateria SC musi zapewnić możliwość zgromadzenia energii, koniecznej do rozruchu tramwaju. Składa się ona z wielu SC o typowym napięciu pracy dochodzącym do 2,7 V, połączonych równolegle i szeregowo oraz wyposażonych w układy wyrównywania napięć. Moduły kondensatorów SC z których można zbudować baterię, charakteryzują się pojemnością C_0 , rezystancją szeregową R_0 i dopuszczalnym napięciem pracy U_{0max} . Parametry modułów SC, rozpatrywanych podczas analizy, są zestawione w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry modułów superkondensatorów [3,9,12]

Moduł	Firma	C_0 [F]	U_0 [V]	R_0 [mΩ]	P_d [kW/kg]	E' [Wh/kg]	W_{SC} [s]
125V Heavy Transportation Module	Maxwell	63	125	18	1,7	2,3	4,9
iMOD162V021P3L	loxus	20,8	162	45	3,6	3,7	3,7
SMOD/160V/36F	Skeleton	36	160	12	6,7	3,4	1,8

C_0 – pojemność, U_0 – napięcie nominalne, R_0 – rezystancja szeregową, P_d – użyteczna gęstość mocy, E' – gęstość energii, W_{SC} – iloraz gęstości energii i użytecznej gęstości mocy superkondensatora

W przypadku połączenia równoległego takich modułów w bloki po N sztuk, a następnie szeregowego połączenia M takich bloków uzyskuje się baterię o pojemności C_{SC} oraz rezystancji R_{SC} o wartościach

$$(16) \quad C_{SC} = \frac{N}{M} C_0$$

$$(17) \quad R_{SC} = \frac{M}{N} R_0$$

która ma dopuszczalne napięcie pracy

$$(18) \quad U_{SCmax} = MU_{0max}$$

Energia, możliwa do zgromadzenia w takiej baterii wynosi

$$(19) \quad E_{max} = \frac{C_{SC} U_{SCmax}^2}{2} = MN \frac{C_0 U_{0max}^2}{2}$$

Energia ta zależy jedynie od liczby $k_{SC} = MN$ zastosowanych modułów SC. Przy zachowaniu tej samej liczby k_{SC} pojedynczych modułów i zmianie liczby M

szeregowo połączonych bloków dla zmiany napięcia U_{SCmax} (18), uzyskuje się rezystancję szeregową baterii SC, która wynosi

$$(20) \quad R_{SC} = \frac{M}{N} R_0 = \frac{M^2}{MN} R_0 = \frac{M^2}{k_{SC}} R_0$$

Biorąc pod uwagę zależności (17) – (20), można zapisać, że straty mocy na rezystancji wewnętrznej R_{SC} przy przekazywaniu mocy P z baterii o napięciu U_{SC} , złożonej z k_{SC} modułów o napięciu U_0 , wynoszą

$$(21) \quad P_{SC} = I_P^2 R_{SC} = \left(\frac{P}{MU_0} \right)^2 \frac{M^2}{k_{SC}} R_0 = \left(\frac{P}{U_0} \right)^2 \frac{R_0}{k_{SC}}$$

a więc nie są zależne o napięcia tej baterii. Można zatem zastosować taką jej konfigurację, która jest najdogodniejsza ze względu na inne kryteria wyboru.

Dla spełnienia założonych warunków eksploatacyjnych zasobnika, umieszczonego na końcu linii tramwajowej [2], konieczne jest zastosowanie baterii, która gromadzi energię 10 MJ, czyli 2,8 kWh. Przykładowe parametry baterii, spełniających to wymaganie przy różnych wartościach M oraz N , przedstawia tabela 2.

Tabela 2. Parametry baterii superkondensatorów o różnych konfiguracjach

Konfiguracja		C_0 [F]	U_0 [V]	R_0 [mΩ]	I_{600} [A]	S_{600} [kW]
M	N					
125V Heavy Transportation firmy Maxwell						
1	20	1260	125	0,9	4800	21
2	10	315	250	3,6	2400	21
4	5	78,75	500	14,4	1200	21
iMOD162V021P3L firmy loxus						
3	12	83	486	11,3	1230	16
SMOD160V36F firmy Skeleton Technologies						
3	7	84	480	5,1	1250	8

C_0 – pojemność, U_0 – napięcie nominalne, R_0 – rezystancja szeregową, I_{600} – prąd przy 600 kW, S_{600} – straty przy 600 kW

Przy wstępnym wyborze modułów do budowy baterii można posłużyć się danymi dotyczącymi gęstości energii i mocy. Pożądana energia baterii E_{SC} określa minimalną masę m_{SC} modułów składowych. Wynosi ona

$$(22) \quad m_{SC} = \frac{E_{SC}}{E'_m}$$

gdzie E'_m jest gęstością energii modułu.

Masa m_{SC} jest powiązana także z użyteczną gęstością mocy baterii P'_d , zdefiniowaną przez normę IEC 62391-2 [11] jako:

$$(23) \quad P'_d = 0,12 \frac{U_{SC}^2}{R_{SC} m_{SC}}$$

Przy eliminacji masy m_{SC} z równań (22) i (23) można uzyskać równanie o postaci

$$(24) \quad \frac{R_{SC}}{U_{SC}^2} = 0,12 \frac{E'_m}{E_{SC} P'_d}$$

Oznaczając iloraz gęstości energii i użytecznej gęstości mocy

$$(25) \quad W_{SC} = \frac{E'_m}{P'_d}$$

można po podstawieniu (25) do (21) zapisać, że wstępnie szacowane straty mocy na rezystancji wewnętrznej baterii, zbudowanej z modułów o określonym współczynniku W_{SC} wynoszą

$$(26) \quad P_{SC} = \left(\frac{P}{U_{SC}} \right)^2 R_{SC} = 0,12 \frac{P^2}{E_{SC}} W_{SC}$$

Przy dokładniejszym wyznaczaniu mocy strat należy uwzględnić możliwość realizacji baterii, powstającej w wyniku połączenia określonej liczby modułów (tab. 2).

Dla omawianych wariantów zasobnika masa baterii SC wynosi 800 kg – 1200 kg, W bateriach zasobników energii, montowanych w pojazdach gęstość energii E'_m użytych modułów SC może być jednym z najważniejszych kryteriów wyboru. Natomiast w urządzeniach stacjonarnych masa jest mniej istotna. W tym przypadku dużo ważniejszym kryterium jest minimalizacja strat mocy. W efekcie kryterium wyboru właściwych modułów powinien być współczynnik W_{SC} , opisany zależnością (25), prezentowany w tabeli 1.

Przy zastosowaniu modułów firmy Maxwell o $W_{SC}=4,9$ s straty na rezystancji wewnętrznej baterii podczas przekazywania mocy 300 kW wynoszą ok. 5,2 kW, zaś przy przekazywaniu mocy 600 kW straty te wynoszą ok. 21 kW. Natomiast przy użyciu baterii, zbudowanej z modułów SMOD firmy Skeleton o $W_{SC}=1,8$ s, przy przekazywaniu mocy 300 kW ponosi się straty 2 kW, zaś przy 600 kW ponosi się straty 8 kW.

Straty w dławiku przekształtnika

Równanie (3) określa zależność między indukcyjnością dławika a amplitudą tętnień prąd, przepływającego przez ten dławik. Przy założeniu maksymalnej amplitudy tych tętnień ΔL_{max} można na tej podstawie określić minimalną indukcyjność dławika. Wynosi ona [4]

$$(27) \quad L_{min} = \frac{\left(1 - \frac{U_{SC}}{U_Z}\right) U_{SC}}{2 \Delta L_L f_{SW}}$$

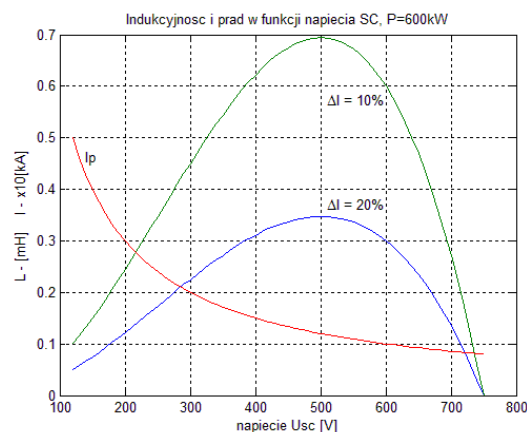
Przyjmijmy, że napięcie linii wynosi 750 V, wartość przekazywanej mocy wynosi 600 kW, zaś częstotliwość modulacji jest równa 1 kHz. Wykres na rysunku 6 przedstawia wykres prądu I_p oraz L_{min} w funkcji napięcia U_{SC} dla amplitud tętnień prądu dławika o wartości 10% oraz 20% prądu średniego I_p .

Na potrzeby prezentowanej analizy zostały zaprojektowane dławiki przekształtnika DC/DC dla trzech wariantów napięcia nominalnego superkondensatorów U_{SC} ,

wynoszącego 125 V, 250 V oraz 500 V. Odpowiada to wariantom baterii z modułami Maxwell, przedstawionym w tabeli 2. Wartości indukcyjności przyjęto dla tętnień prądu dławików o amplitudzie równej 20% maksymalnego prądu cewki przy przekazywaniu przez przekształtnik mocy 600 kW. Parametry dławików są zaprezentowane w tabeli 3.

Zaprojektowane dławiki zawierają pakietowane rdzenie o przekroju kołowym, wykonane z blachy zimnowalcowanej M110-235. Magnetowód zawiera 6 lub 8 szczelin. Uzwojenie jest wykonane z drutów profilowych. Przyjęto krótkookresową pracę tych dławików przy maksymalnym obciążeniu prądowym. Dławiki są chłodzone powietrzem o prędkości przepływu 2 m/s. Należy podkreślić, że wraz ze wzrostem prądu maksymalnego rosną problemy technologiczne rozpatrywanych dławików.

Tabela 3 przedstawia straty mocy w dławikach przy przepływie prądu równego połowie wartości maksymalnej oraz przy prądzie maksymalnym z uwzględnieniem zjawisk termicznych. Z zestawienia wynika, że zastosowanie dławików dla niższych napięć U_{SC} , a zarazem większych prądów I_p , jest związane z większymi stratami przy przesyłaniu tej samej mocy.



Rys. 6. Wykres prądu I_p przy 600 kW oraz L_{min} dla 10% i 20% amplitudy tętnień w stosunku do wartości średniej I_p

Straty mocy w elementach przełączających

Jak wspomniano, dla obliczeń strat mocy przy przełączaniu prądu przekształtnika za pośrednictwem modułów IGBT przyjęto wykorzystanie modułów dużej mocy firm Semikron typu SKiP [5,6] oraz Infineon typu IGBT [7,8]. Moduły te pozwalają przełączać prądy ciągłe o wartościach do kilku kA przy napięciu przekraczającym 1000 V. Podstawowe parametry tych modułów są przedstawione w tabeli 4.

Parametry modułów przełączających, na podstawie których są określone straty mocy, odpowiadają temperaturze złącza rzędu 125°C. Przy niższych temperaturach straty są nieco mniejsze. Obliczenia mocy są dokonane dla tych samych prądów pracy, co obliczenia dla dławików. Przyjęto częstotliwość modulacji przekształtnika f_{sw} równą 1 kHz, czyli zalecaną przez wytwórców wspomnianych modułów przełączających [5,6]. Wyniki obliczeń strat mocy są zaprezentowane także w tabeli 4.

Straty mocy w układzie przełączającym, podobnie jak w dławiku, maleją wraz ze wzrostem wartości U_{SC} , a zarazem zmniejszaniem się prądu I_p . Dla maksymalnego prądu pracy tego układu I_{max} dla napięcia baterii superkondensatorów $U_{SC}=125$ V straty wynoszą ok. 14 kW, zaś dla napięcia $U_{SC}=500$ V są rzędu 2,5 kW, czyli są ponad

pięciokrotnie mniejsze. Przy przepływie połowy prądu maksymalnego stosunek ten jest podobny.

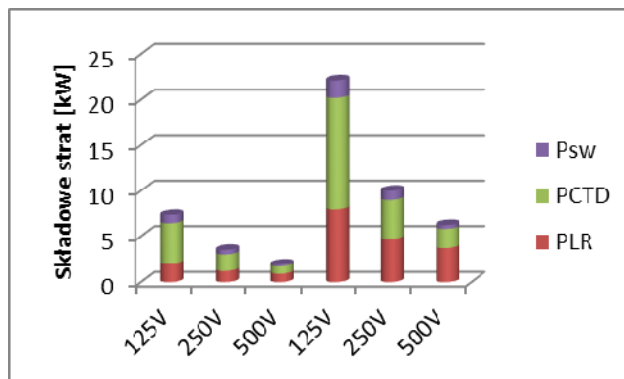
Z tabeli 4 wynika, że straty mocy przy zastosowaniu modułów IGBT firmy Infineon szacowane straty mocy dla założonych warunków pracy są nieco mniejsze niż przy zastosowaniu modułów SKiiP firmy Semikron. Dlatego dla dalszej analizy zostanie przyjęte korzystniejsze w tym przypadku rozwiązanie z modułami firmy Infineon. Ponadto umożliwia to rozpatrzenie wariantu dla prądu 4800 A, który jest na granicy dopuszczalnych warunków pracy tych modułów.

Tabela 3. Parametry dławików i straty mocy w uzwojeniach i rdzeniach

Parametr-oznaczenie	Jedn	Wartość		
		500	250	125
Napięcie U_{sc}	V	500	250	125
typ dławika		D-0,35/0,6	D-0,17/1,2	D-0,054/2,4
Dane znamionowe				
Indukcyjność	mH	0,35	0,17	0,054
prąd maksymalny I_{max}	A	1200	2400	4800
prąd ciągły $I = 0,5 I_{max}$	A	600	1200	2400
Wyniki obliczeń				
Liczba zwojów		36	20	20
masa dławika	kg	115	223	216
masa uzwojenia	kg	25,4	49,2	63,3
masa rdzenia	kg	78,7	159,2	133
objętość gabarytowa	dm ³	33	69,9	61,4
rezystancja uzwojenia w temp. 20 °C	mΩ	1,62	0,491	0,223
przyrost temperatury uzwojenia	°C	117	114	117
Straty przy $I = 0,5 I_{max}$				
w uzwojeniu ΔP_u	W	855	1040	1880
w rdzeniu ΔP_{fe}	W	79	153	113
sumaryczne $\Delta P_u + \Delta P_{fe}$	W	934	1193	2013
Straty przy $I = I_{max}$				
w uzwojeniu ΔP_u	W	3420	4160	7510
w rdzeniu ΔP_{fe}	W	275	532	463
sumaryczne $\Delta P_u + \Delta P_{fe}$	W	3695	4692	7963

Sumaryczne straty mocy w zasobniku

Straty mocy w istotnych elementach zasobnika są zaprezentowane w poprzednich tabelach. Podsumowanie wszystkich strat przedstawia tabela 5. Uwzględnia ona trzy wersje napięcia baterii SC, złożonych z modułów 125 V Heavy Transportation, które były rozpatrywane w poprzednich pracach [2]. Przedstawione są przypadki przekazywania maksymalnej mocy 600kW oraz połowy tej mocy. Warto przypomnieć, że zaprezentowane wyniki dotyczą średnich strat na przełącznikach przy przekazywaniu mocy z zasobnika i do zasobnika, zgodnie z zależnością (14). Dla łatwiejszego porównania wyników, dane z tabeli 4 połączone ze stratami, występującymi przy zastosowaniu modułów Maxwell, są przedstawione również na wykresie na rysunku 7



Rys. 7. Podsumowanie strat mocy w przekształtniku dla przekazywania mocy 300 kW (trzy początkowe kolumny) oraz 600 kW (trzy końcowe kolumny)

Tabela 4. Parametry modułów przełączających

Napięcie nominalne U_{sc}	125V	250V		500V	
		Infineon IGBT	Infineon IGBT	Semikron SKiiP	Infineon IGBT
Napięcie maksymalne [V]	1200	1200	1200	1200	1200
Nominalny prąd ciągły [A]	3600 ^{*)}	3600	3600	1200	1200
Napięcie U_{ECO} przy 125°C [V]	0,9	0,9	0,7	0,8	0,8
Rezystancja r_d przy 125°C [mΩ]	0,35	0,35	0,5	0,8	1,2
Napięcie U_{DO} przy 125°C [V]	1,3	1,3	0,7	1,1	0,7
Rezystancja R_D przy 125°C [mΩ]	0,25	0,25	0,5	0,5	0,8
Wsp. energii przełączania [mJ/A]	0,4	0,4	0,8	0,3	0,3
Prąd I_{max} dla obliczeń strat [A]	4800	2400	2400	1200	1200
Średnia moc strat dla $I_{max}/2$ [kW]	5,3	2,2	2,5	1,0	1,0
Średnia moc strat dla I_{max} [kW]	14,1	5,3	6,5	2,4	2,7

^{*)} W warunkach wymuszonego chłodzenia można przełączać prąd 4800 A

Z tabeli 4 oraz rysunku 7 jednoznacznie wynika, że korzystniejsze energetycznie jest zastosowanie wyższego napięcia baterii SC, przy którym dla tej samej mocy prąd I_p przekształtnika jest mniejszy. Wynika to z faktu, że straty w dławiku i elementach przełączających są mniejsze dla mniejszych prądów.

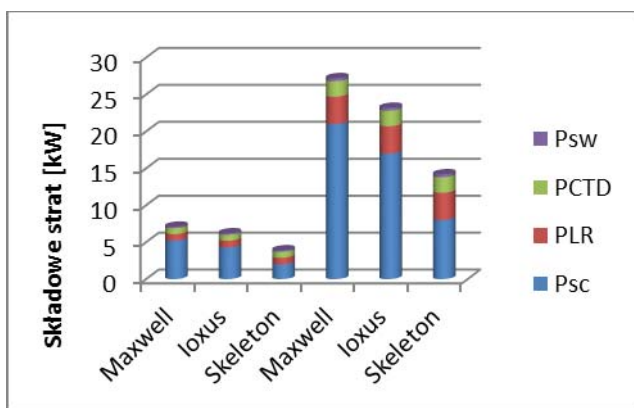
Przy zastosowaniu rozwiązania z większym napięciem baterii istotną składową strat w ogólnym bilansie stają się straty na rezystancji szeregowej użytej baterii. W analizowanych przypadkach można je zmniejszyć zastępując moduły Maxwell innymi, co ilustruje tabela 2.

Zależność (26) łączy straty na rezystancji wewnętrznej baterii ze współczynnikami W_{sc} , których wartości podaje tabela 1. Efekty zastąpienia modułów SC o współczynniku $W_{sc}=4,9$ s modułami o wartości 3,7 s (Ioxus) oraz 1,8 s (Skeleton) są przedstawione na rysunku 8. Zastosowanie modułów SMOD160V36F firmy Skeleton w miejsce modułów 125V Heavy Transportation firmy Maxwell pozwala przy napięciu baterii U_{sc} ok. 500 V i przekazywanej mocy 600 kW zmniejszyć straty na rezystancjach R_{sc} z 21 kW do 8 kW. W ogólnym bilansie rozważanych strat mocy

udział tego czynnika maleje z wartości 78% do 56%. Polepsza to sprawność zasobnika o ok. 2%.

Tabela 5. Podsumowanie strat mocy w przekształtniku

Napięcie baterii U_{SC}	125V		250V		500V	
	2400	4800	1200	2400	600	1200
Prąd dławika I_P [A]	2400	4800	1200	2400	600	1200
Przekazywana moc kW	300	600	300	600	300	600
Straty P_{SC} w rezystancji baterii Maxwell kW	5,2	21	5,2	21	5,2	21
Straty P_{LR} w dławiku kW	2,0	8,0	1,2	4,7	0,9	3,7
Straty statyczne przełączania P_{CTD} dla IGBT Infineon kW	4,4	12,2	1,8	4,3	0,8	2,1
Straty dynam, przełączania P_{SW} dla IGBT Infineon kW	1,0	1,9	0,5	1,0	0,2	0,4
Straty sumaryczne kW	12,6	43,1	8,7	31	7,1	27,2
Sprawność przekazywania energii %	95,8%	92,8%	97,1%	94,8%	97,6%	95,5 %



Rys. 8. Porównanie strat mocy z baterią o napięciu 480-500 V przy zastosowaniu modułów, wyszczególnionych w tabeli 5, przy przekazywaniu mocy 300 kW (trzy początkowe kolumny) oraz 600 kW (trzy końcowe kolumny)

Straty podczas eksploatacji zasobnika energii występują zarówno podczas jego ładowania jak i poboru energii przez linię trakcyjną. Przy ocenie efektywności zastosowania zasobników należy dodatkowo wziąć pod uwagę ograniczoną pojemność energetyczną zasobnika. W przypadku pełnego naładowania zasobnika nie ma dalszej możliwości magazynowania w nim energii. Natomiast przy rozładowaniu poniżej pewnego poziomu napięcia możliwości dostarczenia do linii mocy do rozpędzania pojazdu ulega ograniczeniu. Zagadnienia te są omówione między innymi w [2].

Podsumowanie

Badania określiły główne składowe strat mocy w zasobniku energii, przeznaczonych dla linii tramwajowej o strukturze określonej na wstępie artykułu. W strukturze tej napięcie baterii superkondensatorów jest mniejsze niż napięcie linii.

Straty energii na elementach przekształtnika są tym mniejsze im mniejszy jest prąd przekształtnika od strony

baterii SC. Jednym z wniosków badań jest zalecenie stosowania rozwiązania, ograniczającego wartość tego prądu. Wiąże się to z przyjęciem napięcia baterii SC o napięciu co najmniej większym od połowy napięcia linii.

Istotną składową strat energii są straty na rezystancji szeregowej baterii SC. Straty te zależą od parametrów użytych elementów baterii. Ponieważ konkretne wartości rezystancji danego modułu SC zależą napięcia i pojemności, ważną wskazówką wyboru właściwych elementów może być stosunek gęstości energii do użytecznej gęstości mocy W_{sc} , który powinien być jak najmniejszy.

Przy szacowaniu kosztów sprzętowych zasobnika należy zwrócić uwagę na to, że przy danym maksymalnym napięciu pracy ceny układów przełączających istotnie zależą od wartości maksymalnej przełączanych prądów. Bloki przełączników IGBT dużej mocy są zestawiane z równoległe połączonych tranzystorów i diod. W efekcie rozwiązania dla większych prądów są droższe. Koszt wytworzenia dławika na wyższe prądy jest też znacznie większy, gdyż musi on mieć istotnie większe gabaryty i pochłania więcej materiałów. Ponadto przy wydzieleniu się w przekształtniku większej mocy zwiększają się koszty chłodzenia dławika oraz bloku przełączającego.

Autorzy: Mirosław Lewandowski, Politechnika Warszawska, Instytut Maszyn Elektrycznych, pl. Politechniki 1, 00-661 Warszawa, miroslaw.lewandowski@ee.pw.edu.pl; Marek Orzyłowski Spoleczna Akademia Nauk w Łodzi, Instytut Technologii Informatycznych, ul. Sienkiewicza 9, 90-113 Łódź, Marek.Orzylowski@gmail.com; Andrzej Buze Instytut Elektrotechniki, ul. Pożarskiego 28 04-703 Warszawa, a.buze@iel.waw.pl

LITERATURA

- [1] Szeląg A.; Wpływ napięcia w sieci trakcyjnej 3 kV DC na parametry energetyczno-trakcyjne zasilanych pojazdów. Instytut Naukowo-Wydawniczy SPATIUM. 2013r.
- [2] Lewandowski M., Orzyłowski M., Bramson E., Badania zastosowania superkondensatorowego zasobnika energii ulokowanego na końcu linii tramwajowej, *Logistyka nr 3*, 2015, str. 2814-2818.
- [3] Datasheet 125V Heavy Transportation, Document number: 1014696.7, Maxwell, www.maxwell.com
- [4] Leuchter J., Bauer P., Bojda P., Rerucha V., Bi-Directional DC-DC Converters for Supercapacitor Based Energy Buffer for Electrical Gen-Sets, *European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, 2-5 Sept. 2007
- [5] Datasheet SKiiP 1813 GB123-3DUFV V3, Semikron, www.semikron.com
- [6] Datasheet SKiiP 3614 GB12E4-6DUL, Semikron, www.semikron.com
- [7] Technical Information FF1400R12IP4, Infineon, www.infineon.com
- [8] Technical Information FZ3600R12KE3, Infineon, www.infineon.com
- [9] Technical Information SkelMod Series, Skeleton Technologies, www.skeletontech.com
- [10] <http://www.greentechmedia.com/articles/read/cash-flush-skeleton-targets-premium-markets>
- [11] IEC 62391-2, Fixed electric double-layer capacitors for use in electronic equipment
- [12] Technical Information iMOD162V021P3L-00A, Ioxus, <http://www.ioxus.com/module>