

MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWAŃ NADPRZEWODNIKOWEGO ZASOBNIKA ENERGII W UKŁADACH ZASILANIA SIECI TRAKCYJNEJ PRĄDU STAŁEGO

Wdrożenie technologii dynamicznych magazynów energii i jej zintegrowanie z systemem elektroenergetycznym stanowi kolejny ważny krok w rozwoju sektora energetycznego. W artykule omówiono zaawansowanie technologii nadprzewodnikowych zasobników energii oraz możliwości ich wykorzystania w elektroenergetyce, a także innych gałęziach przemysłu. Przedstawiono również perspektywy zastosowań nadprzewodnikowych zasobników energii typu SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) zarówno do celów komercyjnych, jak i przemysłowych oraz ich wpływ na sieć elektroenergetyczną. W artykule dokonano analizy funkcji, jakie mogą pełnić układy z wykorzystaniem nadprzewodnika w systemie elektroenergetycznym. Funkcjonalność układów SMES przeanalizowano w szczególności z punktu widzenia jego głównych potencjalnych korzyści związanych z wykorzystaniem w kolejnictwie.

WSTĘP

Systemy trakcji elektrycznej stanowią elektroenergetyczną sieć przesyłową przeznaczoną do dostawy energii elektrycznej wykorzystywanej przez pojazdy trakcyjne. W celu oszczędności energii, poprawy stabilności napięcia zasilania oraz tam gdzie wymagane jest zasilanie prądem stałym są instalowane magazyny energii, np. w układach zasilania potrzeb własnych sieci trakcyjnej. Konceptcja gromadzenia energii elektrycznej w polu magnetycznym cewki powstała ponad 100 lat temu [1], natomiast wykorzystanie materiałów nadprzewodnikowych w systemach zasilania zaproponowane zostało dopiero w 1960 roku [1]. O ile pierwotnie nadprzewodnictwo było domeną badań w laboratoriach fizycznych, tak obecnie coraz większą uwagę przywiązuje się do zastosowań nadprzewodników w zastosowaniach transportowych. W każdym z systemów trakcji energia elektryczna pobierana jest z systemu źródłowego (elektroenergetycznego), następnie przetwarzana do poziomu napięcia przesyłowego, zaś w podstacjach trakcyjnych transformowana do rodzaju (napięcie stałe, napięcie przemiennie) i poziomu napięcia odpowiedniego do zasilania pojazdów trakcyjnych w danym systemie trakcji, np. tramwajowej, trolejbusowej lub w pojazdach elektrycznych [6]. Pojazdy trakcyjne stanowią zatem ruchome odbiorniki zasilane z obwodu sieć jezdna - sieć powrotna.

Do tej pory nadprzewodnikowe zasobniki energii w zależności od żądanego czasu dostarczania energii, znajdują następujące zastosowania [1] (tab.1):

- dla czasu rozładowania energii zasobnika rzędu mikrosekund - w obciążeniach rezystancyjnych, jak lampy i lasery,
- dla czasu rozładowania energii zasobnika rzędu milisekund, w obciążeniach indukcyjnych np. przy ograniczeniu plazmy w reaktorach syntezy termojądrowej,
- dla czasu rozładowania energii zasobnika rzędu sekund, do ograniczania krótkotrwałych dużych poborów energii w systemie elektroenergetycznym,

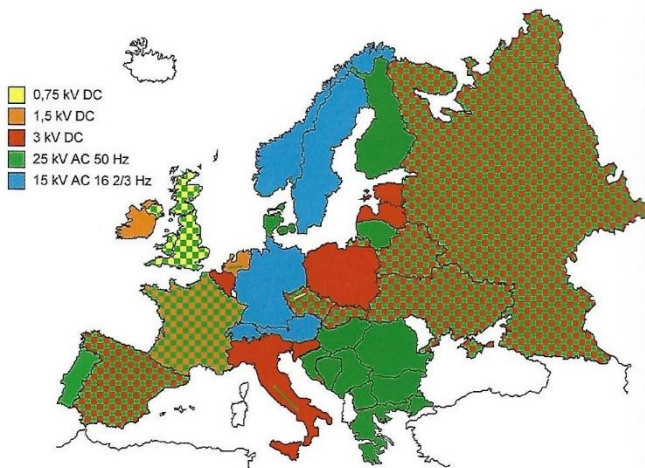
- dla czasu rozładowania energii zasobnika rzędu godzin, do wyrównywania szczytów lub zmian obciążeń w SEE.

Tab.1. Zastosowanie SMES [opracowanie własne]

Zastosowanie	Energia	Czas rozładowania
Wyrównanie szczytów	13,88 kWh ÷ 50 MWh	minuty - godziny
Poprawa jakości energii	0,0277 ÷ 2,77 kWh	sekundy
Lokalne źródło mocy	0,0277 ÷ 2,77 kWh	dziesiątki mikrosekund
Współpraca ze źródłami małej mocy i innymi źródłami energii współpraca z rozproszonymi źródłami energii współpraca z systemami fotowoltaicznymi i akumulatorowymi	0,00138 ÷ 0,01388 kWh	sekundy

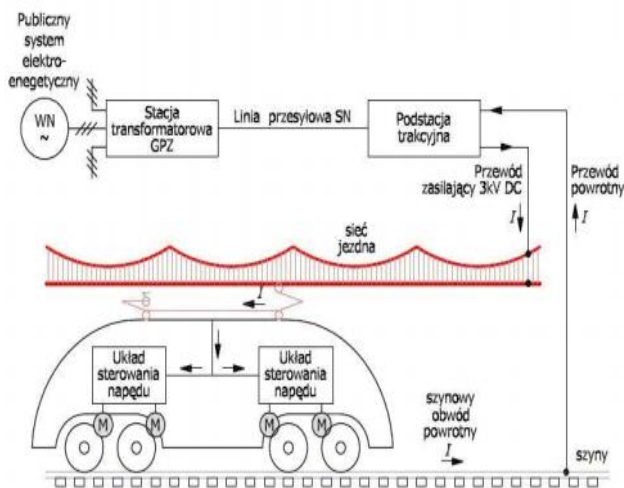
Obecnie istnieje 5 podstawowych systemów kolejowej trakcji elektrycznej (rys.1) [11]:

- sieć napięcia stałego 0,75kV – Wielka Brytania i Irlandia (część);
- sieć napięcia stałego 1,5kV – południowa Francja, Irlandia, Holandia (część);
- sieć napięcia stałego 3kV – Polska, południowa część Czech i Słowacji, Ukraina, Białoruś, Łotwa, Estonia, Belgia, Włochy, Hiszpania, Rosja (część europejska), Holandia, kraje byłej Jugosławii;
- sieć napięcia przemiennego jednofazowego 16 2/3Hz 15kV – Niemcy, Austria, Szwajcaria, Szwecja i Norwegia;
- sieć napięcia przemiennego jednofazowego 50Hz 25kV – pozostałe kraje – Portugalia, Francja (TGV), Litwa, Węgry, Rumunia, Bułgaria, Finlandia, Dania, część Rosji, Czech i Słowacji, Wielkiej Brytanii, Irlandii i byłej Jugosławii.



Rys.1. Zasilanie kolejowej trakcji elektrycznej w Europie [11]

Koleje polskie stosują wyłącznie obwody zasilania pojazdów z systemu o napięciu 3kV. Z publicznych sieci elektroenergetycznych zasilane są podstacje trakcyjne prądu stałego DC [2] (rys.2).



Rys. 2. Schemat zasilania pojazdu trakcyjnego w energię elektryczną [11]

W celu oszczędzania energii w pojazdach trakcyjnych energii (np. gromadzenia energii hamowania pojazdów) stosowane są coraz częściej zasobniki wykonywane z superkondensatorów lub akumulatorów litowych [14]. Są one montowane również stacjonarnie w podstacjach trakcyjnych.

Magazynowanie energii przez elektromagnesy nadprzewodnikowe jest uważane za rozwiązanie o korzystnych właściwościach do zastosowania w sieciach elektroenergetycznych. Niepożądane częstotliwości harmoniczne oraz zapady napięcia spowodowane nadmiernymi obciążeniami zwarciami wpływają na jakość energii w sieci elektroenergetycznej. Układy SMES poprawiają jakość energii elektrycznej w instalacjach, w których przerwa w dostawie energii mogłaby spowodować kosztowny i długotrwały przestój urządzeniach lub linii produkcyjnych [4].

Zasobniki nadprzewodnikowe mają zastosowanie ze względu na realizację następujących zadań:

- zdolność przesyłu wymaganych mocy i energii,
- dopuszczalna minimalna wartość napięcia (średnia i chwilowa),
- wysoka sprawność energetyczna,

- dobór źródeł zasilających o odpowiednich parametrach – moc zwarciowa źródła, będąca miernikiem jego impedancji wewnętrznej [3].

Magazyny SMES charakteryzują się tym, iż gromadzą energię w postaci pola magnetycznego poprzez przepływ prądu stałego DC przez uzwojenie nadprzewodnikowe. Elektromagnesy nadprzewodnikowe pozwalają na wytwarzanie silnego pola magnetycznego w dużych przestrzeniach, a więc umożliwiają gromadzenie znacznej energii w ich polu magnetycznym [9]. Charakteryzuje je niezawodność sięgająca ponad 95%, brak strat, krótki czas rozładowania oraz szybka reakcja, wysoka jakość dostarczanej energii. Wysoka niezawodność SMES-ów wynika z naturalnej przemiany energii pola magnetycznego w energię elektryczną oraz praktycznie nieograniczonego czasu przechowywania energii pola magnetycznego uwarunkowanego jedynie działaniem układu chłodzenia [1]. Ponadto w rzeczywistych rozwiązaniach SMES jest urządzeniem współpracującym z siecią energetyczną, gdzie napięcie ma charakter przemienne – tak jak system zasilania podstacji trakcyjnej.

1. WYNIKI BADAŃ MODELU ZASILANIA SIECI TRAKCYJNEJ

Do analizy systemu zasilania sieci trakcyjnej zostało użyte oprogramowanie do modelowania układów zasilania rozróżnianych ze względu na pobór mocy oraz układów sieci trakcyjnych charakteryzowanych przez poziom napięć. W artykule zostaną omówione wyniki badań zmian napięcia zasilania sieci trakcyjnej podczas przejazdu pociągu. Kierunkiem dalszych badań będzie przedstawienie oddziaływania SMES na zmiany napięcia w zasilaniu sieci podstacji trakcyjnej.

Model wykonano dla typowego polskiego systemu zasilania trakcji kolejowej o napięciu stałym 3kV stosując się tym samym do wymagań interoperacyjności. Przyjęto prędkości maksymalne taboru:

- pociągi pasażerskie – do 120 km/h,
- pociągi towarowe – do 70 km/h.

Analizie poddany zostanie przypadek przejazdu pociągu na odcinku trasy. Przyjęto następujące założenia:

- typ pociągu (pociąg pasażerski), dla którego dane techniczne przedstawia tabela nr 2;
- czas symulacji został założony na 24h dla przykładowego rozkładu jazdy z którego wynika, że na odcinku zasilania maksymalnie mogą się znajdować dwa pociągi;
- rezystancja wewnętrzna zespołów prostowników została przyjęta na poziomie $0,1\Omega$;
- dodatnie pochylenie układu torowego (gradient 10%).

Tab. 2. Dane techniczne taboru [opracowanie własne]

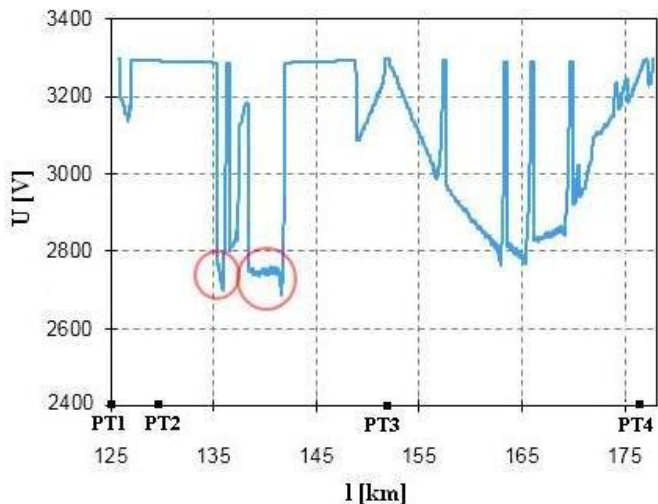
Dane:	Lokomotywa Dragon E6ACT
Ilość i rodzaj taboru	Lokomotywa elektryczna/wagon
Długość pociągu z taborem	20,33 m
Masa pojazdu/pociągu (pustego, obciążonego)	100 t/119,6 t
Współczynnik przyczepności	<374 kN
Prędkość maksymalna	120 km/h
Maksymalny/średni pobór mocy układów pociągu (oświetlenie, klimatyzacja, ogrzewanie)	5 MW
Napięcie zasilania	3 kV DC
Przyspieszenie rozruchu	1 m/s ²

W tabeli numer 3 przedstawiono lokalizację podstacji trakcyjnych.

Tab. 3. Lokalizacja podstacji trakcyjnych dla potrzeb symulacji [opracowanie własne]

Podstacje trakcyjne	Odległość danej podstacji od początku odcinka trasy [km]
PT 1	125
PT 2	129,6
PT 3	152,2
PT 4	176,8

Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku nr 3.



Rys. 3. Napięcie na pantografie (kurs DRAGON E6ACT) [opracowanie własne]

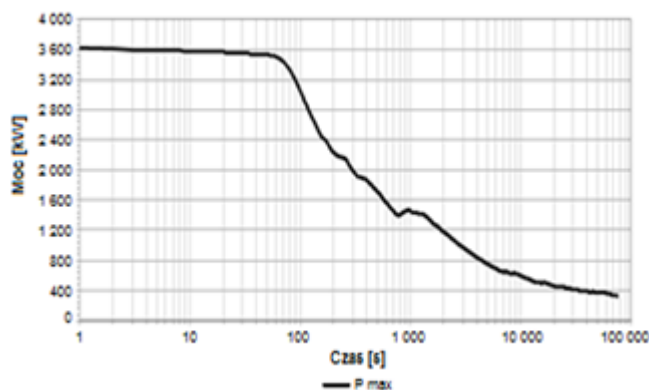
Zaznaczone na rysunku 3. głębokie zapady (udary – norma PN-EN 61000-4-5:2010 [15]) są spowodowane rozruchami pociągu pasażerskiego na przyjętym dodatnim pochyleniu układu torowego (gradient 10%). Dla całego odcinka przejazdowego pomiędzy podstacjami trakcyjnymi PT1-PT4 napięcie na pantografie linii kolejowej przedstawia rys. 3.

Z otrzymanych rezultatów badań przedstawionych na rysunku 3. wynika, że uruchomienie większego pociągu spowodowałoby spadek poniżej polskich norm, co oznacza brak możliwości poruszania się dodatkowego składu pociągu zasilanego z tej samej podstacji trakcyjnej. Wynika to ze spadków napięcia osiągających wartości poniżej 2,6kV (poniżej napięcia użytecznego – według normy PN-EN 50388:2012 [12]).

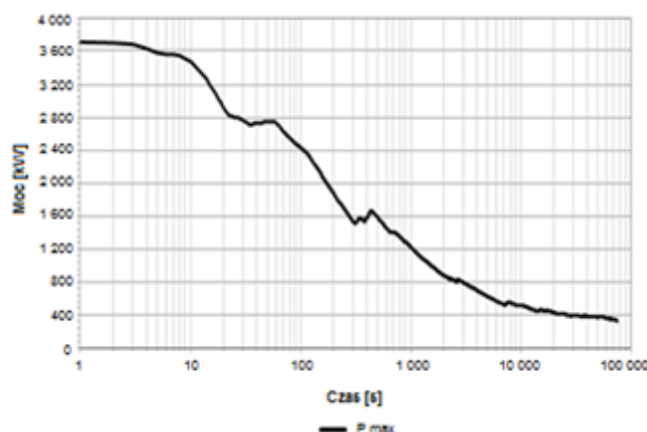
Zastosowanie zasobnika SMES na podstacji trakcyjnej zlikwiduje głębokie zapady napięcia w sieci trakcyjnej i przez to umożliwi jazdę kolejnego pociągu. Jest to podstawowa korzyść stosowania zasobników energii elektrycznej w układach zasilania pojazdów trakcyjnych.

Układ nadprzewodnikowego zasobnika energii może stabilizować napięcie sieci trakcyjnej poprzez równoczesne dostarczanie mocy czynnej i biernej, nawet aż do całkowitego ustabilizowania wartości napięcia sieci [4]. Wówczas sieć trakcyjna nie musiałaby być modernizowana, aby mógł po niej poruszać się dodatkowy pociąg. Rozwiązaniem tego problemu może być ograniczenie prądów rozruchowych do 1kA lub ograniczenie całkowitej masy pociągu, co nie zawsze jest łatwe do wykonania lub powoduje ograniczenie ilości kursowania pociągów na danym odcinku linii [6],[8].

Dla potrzeb symulacji pracy przeprowadzono także analizę poboru mocy dla dwóch podstacji trakcyjnych PT2 i PT3.



Rys. 4. Wykres poboru mocy dla PT2 [opracowanie własne]



Rys. 5. Wykres poboru mocy PT3 [opracowanie własne]

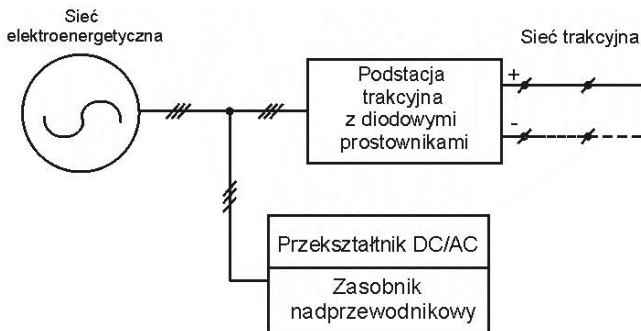
Wykres poboru mocy ze podstacji PT2 (rys. 4) przedstawia nagły spadek mocy wraz z upływem czasu w porównaniu do podstacji PT3 (rys. 5).

Kolejno analizowano uruchomienie dodatkowego pociągu pomiędzy danymi podstacjami. Oprócz spadków napięć (na pantografach) jednocześnie spowodowało to nagły spadek mocy na jednej podstacji trakcyjnej, co może być niebezpieczne dla samej sieci trakcyjnej oraz dla odbiorników z niej zasilanych. Zasobnik nadprzewodnikowy może aktywnie dostarczać energię o mocy i tym samym może zmniejszać oscylacje zarówno mocy czynnej, jak i biernej. Układy SMES mogą stanowić jako urządzenia do równoważenia mocy czynnej i biernej wywołanej obciążeniami impulsowymi, występującymi w podstacjach trakcyjnych.

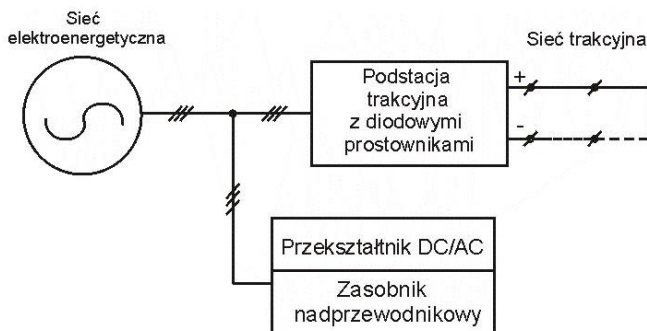
Bezpieczeństwo eksploatacyjne kolejowych sieci trakcyjnych prądu stałego jest zależne od prawidłowego i niezawodnego działania wszystkich elementów układu zasilania. Koncepcję realizacji zasobnika SMES realizującego funkcję równoważenia obciążeń, który jest zainstalowany po stronie napięcia przemiennego zasilającego podstację trakcyjną, przedstawiono na rysunku 6. Zasobnik nadprzewodnikowy energii prądu stałego wraz z przekształtnikiem DC/AC ma cechy aktywnego filtra elektroenergetycznego i umożliwia:

- wyrównanie wartości napięć fazowych w linii elektroenergetycznej,
- eliminację wyższych harmonicznych prądu w sieci elektroenergetycznej, które są powstają na skutek działania prostowników diodowych podstacji trakcyjnej,
- minimalizowanie poboru mocy biernej w sieci elektroenergetycznej (współczynnik mocy $\cos\phi_1 \approx 1$).

Zastosowanie zasobnika w układzie według rysunku 6 uniemożliwia przekazywanie elektrycznej energii hamowania pojazdów trakcyjnych do zasobnika. Możliwość gromadzenia energii hamowania pojazdów trakcyjnych w zasobniku umożliwia lokalizacja zasobnika po wyjściowej podstacji trakcyjnej (po stronie napięcia stałego). Układ połączenia zasobnika nadprzewodnikowego umożliwiającego akumulowanie energii hamowania pojazdów trakcyjnych przedstawiono na rysunku 7. Układ jak na rysunku 7. umożliwia dodatkowo stabilizowanie napięcia stałego sieci trakcyjnej i przez to ograniczenie wartości współczynnika zawartości harmonicznych prądu THD_i w sieci elektroenergetycznej. Podstacje trakcyjne z wejściowymi prostownikami diodowymi są powszechnie stosowane w trakcji kolejowej, tramwajowej i trolejbusowej.



Rys. 6. Schemat połączenia nadprzewodnikowego zasobnika energii elektrycznej po stronie napięcia przemiennego zasilającego podstację trakcyjną z prostownikami diodowymi [opracowanie własne]



Rys. 7. Schemat połączenia nadprzewodnikowego zasobnika energii elektrycznej po stronie napięcia stałego podstacji trakcyjnej zapewniający gromadzenie energii hamowania pojazdów trakcyjnych [opracowanie własne]

2. SMES JAKO UKŁAD ODZYSKIWANIA I OSZCZĘDNOŚCI ENERGII Z SIECI TRAKCYJNEJ PRĄDU STAŁEGO

W układach zasilania trakcji prądu stałego wyznaczenie oszczędności energii jest złożone. Ocenę stosowania zasobnika należy oprzeć na wyznaczeniu ilości energii, którą można zaoszczędzić w systemie oraz dobraniu odpowiednich parametrów zasobnika. Potrzebne są do tego obliczenia dla układu zasilania, stanu wszystkich pojazdów w obszarze zasilania, a także ich chwilowego położenia [7]. Odzyskiwanie energii hamującego pojazdu należy rozpatrywać od układu zasilania aż po pojazd trakcyjny. Możliwość oddania dużej ilości energii przez pociąg powoduje konieczność zamontowania odbiornika na podstacji o wymaganej zdolności do jej przejęcia oraz odebrania od pojazdu hamującego lub dostarczenia do pojazdu pobierającego energię. Brak możliwości odbioru energii przez inny pojazd (w tym przypadku pociąg) oznacza, że zgromadzona energia

jest wytracana na rezystorach taboru hamującego [10]. Jednym z sposobów na przejście nadmiarowej energii jest zastosowanie nadprzewodnikowego zasobnika energii, który jest w stanie przechowywać energię przez bardzo długi czas – aż do chwili, w której pojawi się pociąg pobierający energię. Ze względu na dużą masę i prędkość pociągów w trakcji kolejowej wymagane są odpowiednio większe pojemności zasobników w porównaniu do zasobników systemów zasilania tramwajów czy trolejbusów. Układ typu SMES jest w stanie gromadzić znaczne ilości energii w bardzo krótkim czasie. Zasobnik zainstalowany w pociągu pozwoliłby na pełne wykorzystanie energii hamowania oraz ograniczenie strat energii przesyłowych. [7]. Procesy hamowania pociągów mają wpływ na liczbę cykli pracy zasobnika [7]. Ograniczona jest możliwość zastosowania zasobników w lokomotywach, także ze względu na gabaryty układu SMES – wówczas zwiększyłaby się masa własna pociągów (straty na transport dodatkowej masy). Konieczne byłoby ograniczenie pojemności zasobnika. Rozkład jazdy powinien być tak skonfigurowany, aby w krótkim czasie po zahamowaniu znalazł się odbiorca energii powoduje, że straty zasobników byłyby minimalizowane. Na liniach wielotorowych ruch pociągów odbywa się z odchyleniami rzędu minut w stosunku do rozkładu jazdy [2]. Jeśli rozkład jazdy będzie uwzględniał możliwość zmniejszenia energii układu zasilania znaczącego zużycia energii elektrycznej gdyż nakładanie się hamowania na pobór energii ma charakter losowy. Energię hamowania pojazdu trakcyjnych można przekształcić na energię elektryczną i przekształcić w zasobniku zamiast wytracać ją na klockach hamulcowych, W podstacjach trakcyjnych energia elektryczna dostarczana do pojazdu lub zasobnika oznaczana jest jako E, która może być pobierana ze stacji lub do niej oddawana przez pojazd trakcyjny, np. w czasie hamowania (rekuperacja). Jeśli prąd I przechodzi przez cewkę indukcyjną o indukcyjności L, ilość energii, która musi być dostarczana do cewki indukcyjnej, można wyznaczyć z następujących zależności (1) [16], [17], [18]:

$$\begin{aligned}
 P &= I \cdot V = I \cdot L \frac{dI}{dt} \\
 dE &= P dt = I \cdot L \frac{dI}{dt} dt = L \cdot I dI \\
 E &= \int dE = L \int_0^I I dI = \frac{LI^2}{2}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Energię zmagazynowaną w polu magnetycznym elektromagnesu zasobnika można wyrazić wzorem (2):

$$E = \frac{LI^2}{2}
 \tag{2}$$

gdzie: L – oznacza indukcyjność elektromagnesu (H), I – indukcyjność cewki zasobnika (A).

Energia przechowywana wewnątrz pola magnetycznego w cewce zasobnika, jest wyprowadzona z następujących zależności (3):

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{\mu_0 n^2 A}{l} \\
 B &= \mu_0 \mu_r H = \frac{\mu_0 n I}{l} \\
 E &= \frac{LI^2}{2} = \frac{\left(\frac{\mu_0 n^2 A}{l}\right) \left(\frac{Bl}{n\mu_0}\right)^2}{2} = \frac{\left(\frac{\mu_0 n^2 A}{l}\right) \left(\frac{B^2 l^2}{n^2 (\mu_0)^2}\right)}{2} = \frac{B^2 A l}{2\mu_0}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

gdzie: H – natężenie pola magnetycznego, n - ilość zwojów na jednostkę długości cewki, μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni, μ_r - względna przenikalność magnetyczna substancji (dla próżni równa 1), A - pole przekroju cewki, B – natężenie pola magnetycznego cewki, I - natężenie prądu, l - długość cewki.

Wyrażenie $A \cdot l$ jest objętością cewki, zatem równanie (4) przestawia się w następującej postaci jako gęstość energii znajdującej się w polu magnetycznym. Dzieliąc obustronnie przez objętość cewki otrzymuje się równanie (4):

$$u = \frac{E}{A \cdot l} = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (4)$$

gdzie: u – gęstość energii na jednostkę objętości

Z wzorów (3) i (4) wynika, że dla zgromadzenia całej dostępnej energii zasobnik musi mieć odpowiednią zdolność do gromadzenia energii oraz odpowiednią moc, aby mógł on przejmować energię w każdej sytuacji ruchowej. Niezawodność sięgająca ponad 95% [13], brak strat, szybki czas rozładowania zasobnika oraz reakcji przedstawia nadprzewodnikowy zasobnik energii jako interesującą alternatywę dla wykorzystywanych obecnie w zasobnikach energii superkondensatorów oraz akumulatorów chemicznych (litowo-jonowych).

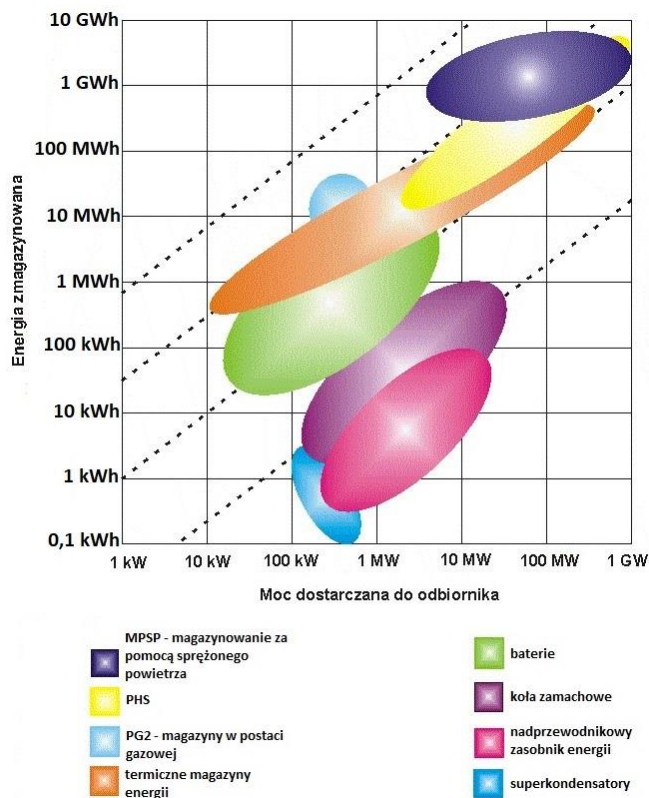
3. POZOSTAŁE FUNKCJE SMES

Układ zasobnika nadprzewodnikowego może stabilizować napięcie sieci trakcyjnej poprzez dostarczanie energii aż do ponownego przyłączenia generatora lub zlikwidowania nadmiernego jej obciążenia. Moc bierna zasobnika Q_s może być sterowana przy użyciu zasobnika nadprzewodnikowego przyłączonego do szyn [3].

W rzeczywistych rozwiązaniach SMES jest urządzeniem współpracującym z siecią energetyczną o napięciu przemiennym. Ponieważ elektromagnes nadprzewodnikowy gromadzi energię prądu stałego, wymagane są układy przekształtników napięcia przemiennego na napięcie stałe, zwane systemem formowania napięcia (PCS). System PCS przeważnie składa się z typowego falownika przetwarzającego prąd stały na napięcie sieci energetycznej przy procesie oddawania energii z cewki i typowego prostownika - gdy wymagane jest naenergetyzowanie cewki. Układem zamiany energii PCS może być, np. przekształtnik AC/DC, który mógłby łączyć elektrycznie sieć energetyczną z zasobnikiem energii, jak i też z jakimkolwiek innym wrażliwym odbiornikiem dołączonym do sieci trakcyjnej [5].

W przyszłości ze względu na energię możliwą do zmagazynowania w cewkach nadprzewodnikowych o typowej konstrukcji, magazyny energii mogą być traktowane jako źródła energii o mocy ponad 10 MW i w pełni przejąć rolę jaką pełnią obecnie podstacje trakcyjne. Ilustruje to rysunek 8. pokazujący wielkość możliwej do zmagazynowania energii, która może być przekazywana do odbiornika charakteryzującego się określoną mocą.

Jak wynika z rysunku 8. w porównaniu do superkondensatorów nadprzewodnikowy zasobnik energii może gromadzić wystarczającą ilość energii (do 100 kWh) oraz mocy potrzebnej do bezpośredniego zasilania sieci trakcyjnej (od ok. 400kW do ok. 40MW). Niestety największe z nich są jeszcze rozwijane i testowane w laboratoriach badawczych, i można się spodziewać że znajdą zastosowanie komercyjne. Wciąż wysokie koszty chłodzenia, będące głównymi składnikami układu nadprzewodnikowego zasobnika energii, stanowią o bardzo wysokich kosztach wytwarzania i eksploatacji całego urządzenia. Niemniej coraz większa dostępność energii słonecznej (fotowoltaiki) może wkrótce mocno obniżyć koszty wytwarzania i eksploatacji magazynów energii typu SMES.



Rys. 8. Porównanie magazynów energii [opracowanie własne]

PODSUMOWANIE

Prezentowane rezultaty badań i symulacji wpływu zasobnika typu SMES na sieć elektroenergetyczną, ze szczególnym uwzględnieniem prac realizowanych w Chinach [21], pozwalają twierdzić, iż układ ten może mieć potencjalnie bardzo szerokie zastosowanie zarówno w elektro-energetyce, jak i w innych gałęziach przemysłu, np. w transporcie.

W ramach prac badawczych przeprowadzonych w światowych ośrodkach badawczych [19,20] udowodniono, iż dzięki technologii z użyciem zasobnika typu SMES można zmniejszać oscylacje napięcia sieci elektroenergetycznej (trakcyjnej), równoważyć obciążenia oraz dostarczać moc czynną do sieci elektroenergetycznej. Wykonanie cewki z nadprzewodzącego materiału (rtęć, wanad, niob-tytan), powoduje w stanie nadprzewodzącym (zwykle w bardzo niskiej temperaturze), występowanie zerowej rezystancji, przez co energia elektryczna może być przechowywana prawie bez strat.

Systemy SMES cechują się stosunkowo wysoką gęstością mocy (ok. 4000W/l) [13], krótkim czasem reakcji (milisekundy), bardzo szybkim pełnym czasem rozładowania zasobnika (poniżej 1min), dużą głębokością rozładowania i ładowania (ok. 95-98%) oraz długą żywotnością (do ok. 30 lat). W przeciwieństwie do akumulatorów elektrochemicznych urządzenia SMES są zdolne do rozładowania prawie w całości zgromadzonej energii z niewielką degradacją po tysiącach pełnych cyklów. Niestety systemy zasilania z zasobnikami SMES posiadają wady, takie jak: wysokie koszty kapitałowe (do 10 000 \$/kWh, 7200 \$/kW) [13]. Cewka jest wrażliwa na niewielkie zmiany temperatury, które mogą powodować straty energetyczne. Powoduje to wysokie dzienne rozładowanie zasobnika SMES na poziomie 10-15%. Z powyższego wynika, że zasobnik SMES nadaje się do krótkotrwałego przechowywania energii w zastosowaniu w zasilaniu urządzeń potrzeb własnych kolei.

Z przedstawionych w artykule wyników badań symulacji komputerowej wynika, że magazyn energii SMES może być wykorzystywany do poprawy stabilności napięcia w systemie zasilania i poprawy jakości energii.

Prognozowany rozwój nadprzewodnictwa, który jest przewidywany w najbliższych latach na świecie, z pewnością stwarza możliwości szerszego wykorzystania tej formy magazynowania energii, niż ma to miejsce dotychczas [19].

Obecnie na świecie postęp w zastosowaniach nadprzewodnikowych zasobników energii związany jest ściśle z trwającymi badaniami, w ramach których budowane są coraz liczniej stanowiska eksperymentalne. Z pewnością warto byłoby zająć się szerzej tą problematyką również w Polsce. W tym kontekście należałoby kontynuować prace badawcze nad możliwościami dalszych praktycznych zastosowań układów z nadprzewodnikowym zasobnikiem energii.

Kolejnym wnioskiem, jaki można wysnuć na podstawie badań w ośrodkach światowych pokazuje iż ten rodzaj zasobnika energii może w przyszłości stać się przełomowy i posłużyć jako doskonała alternatywa dla standardowych magazynów energii. Zamierzeniem autorów artykułu jest wykonanie rzeczywistych pomiarów na podstacjach zasilających sieć tramwajową i dobranie zasobnika energii, (z ogniwami litowo-jonowym Li-Ion) dla potrzeb stabilizacji napięcia tramwajowej sieci trakcyjnej. Należy spodziewać się, że ładowanie zasobnika energią pochodzącą z fotowoltaiki może znacząco poprawić warunki środowiskowe funkcjonowania zasobnika.

BIBLIOGRAFIA

1. Sosnowski J., *Materiały nadprzewodnikowe. Modelowanie własności i zastosowania*, Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, Warszawa 2008, s. 117–121.
2. Podoski J., Kacprzak J., Mysiek J. *Zasady trakcji elektrycznej*. WKiŁ, 1980
3. Janowski T., *Nadprzewodnikowe zasobniki energii*, Wydawnictwo Liber Duo S.C., Lublin 2007, s. 121–128.
4. Zhu, J., Yuan, W., Qiu M., Wei X., Zhang, H., Chen, P., Yang, Y., Zhang M., Huang X., Li Z., *Applied Energy*, Elsevier Ltd 2014, s. 692–698.
5. Komarnicki P., Lombardi P., Styczyński Z., *Electric Energy Storage Systems Flexibility Options for Smart Grids*, Springer, s. 129–132, 146–148.
6. Szelaż A., *Trakcja elektryczna, Program Rozwojowy Politechniki Warszawskiej* s. 122-174
7. Maciołek T., *Problemy zasilania linii kolejowych 3kV o prędkościach do 250 km/h.*, Seminarium Naukowe Sekcji Trakcji Elektrycznej Komitetu Elektrotechniki PAN, Warszawa, Maj 2004 (Materiały seminaryjne)
8. Kacprzak J., *Teoria trakcji elektrycznej. Materiały do wykładów i ćwiczeń rachunkowych*. WPW, 1991
9. Kozak J., *Badania elektromagnesów nadprzewodnikowych w procesie ich wytwarzania i eksploatacji*, Prace Instytutu Elektrotechniki 2014, z. 265, s. 62–63.
10. Maciołek T., *Zastosowanie zasobników energii w trakcji kolejowej 3 kV DC*, TTS, nr 9/2015, str. 39-44
11. Bałuch H., Starczewska M., *Leksykon terminów kolejowych*, Wyd. KOW, Warszawa 2011, s. 356.
12. Norma PN-EN 50388:2012, *Zastosowania kolejowe - System zasilania i tabor - Warunki techniczne koordynacji pomiędzy systemem zasilania (podstacja) i taborem w celu osiągnięcia interoperacyjności*
13. Luo X., Wang J., Dooner M., Clarke J., *Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation*, School of Engineering, The University of Warwick, Applied Energy 137 (2015), s. 511-536.
14. Świątek J., Biczal P., *Baterie litowo-jonowe: zastosowanie produktu w energetyce zawodowej i przemysłowej, w górnictwie miedzi i węgla kamiennego, w motoryzacji*, Elektro Info, nr 3/2016, s. 64–67

15. Norma PN-EN 61000-4-5:2010, PKN. *Kompatybilność elektromagnetyczna (emc) – część 4-5: Metody badań i pomiarów – badanie odporności na udary..*
16. <http://www.aklectures.com/lecture/energy-stored-in-magnetic-fields-of-inductors> (Wykład: Energia zmagazynowana w polach magnetycznych cewek indukcyjnych, dostęp 22.03.18r.)
17. <https://www.youtube.com/watch?v=VgOJ3RsXPHY> (Wykład o nadprzewodnictwie, Uniwersytet Cambridge, dostęp 22.03.18r.)
18. <https://www.youtube.com/watch?v=EakRe6ICM-Q> (Seria wykładów na temat zasobów i technologii energetycznych autorstwa prof.S.Banerjee, Wydział Elektryczny, IIT Kharagpur, dostęp 22.03.18r.)
19. Luo X., Wang J., Dooner M., Clarke J., *Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation*, School of Engineering, The University of Warwick, Coventry CV4 7AL, UK, Applied Energy 137/2015., s.511-536
20. Devotta J.B.X., Rabbani M.G., *Application of Superconducting Magnetic Energy Storage unit in multi-machine power systems*, Energy Conversion and Management, Volume 41, Issue 5, March 2000, s. 493-504
21. Yuan W., Zhang M., *Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) Systems*, Clean Energy Systems, 16 July 2015, Online ISBN: 9781118991978| DOI: 10.1002/9781118991978 (dostęp 23.03.18r.)

Possibilities of using a superconducting energy storage in DC power systems of traction network

Implementation of dynamic energy storage technology and its integration with the power system represents another important step in the development of the energy sector. This article discusses the advancement of superconducting energy storage technologies and the possibilities of their use in power engineering as well as other branches of industry. It also presents the perspective of applications of superconducting energy storage type SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) both for commercial and industrial applications and their impact on power grid. The article analyzes the functions that systems can use with the use of a superconductor in the power system. The functionality of SMES systems has been analyzed in particular from the point of view of its use in railways.

Autorzy:

mgr inż. **Kamil Hebda** – doktorant, Wydział Transportu i Elektrotechniki Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego w Radomiu, Instytut Systemów Transportowych i Elektrotechniki, Zakład Napędu Elektrycznego i Elektroniki Przemysłowej, ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom, tel. +48 48 361-70-63, k.hebda@uthrad.pl

mgr inż. **Marta Żurek-Mortka** – doktorantka, Wydział Transportu i Elektrotechniki Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego w Radomiu, Instytut Automatyki i Telematyki, Zakład Automatyki i Diagnostyki, ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom, tel. +48 48 361-70-63, m.zurek-mortka@uthrad.pl

mgr inż. **Renata Repeć** – doktorantka, Wydział Transportu i Elektrotechniki Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego w Radomiu, Instytut Logistyki i Marketingu, Zakład Logistyki i Marketingu, ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom, tel. +48 48 361-70-63, r.repec@uthrad.pl

JEL: L92 DOI: 10.24136/atest.2018.111

Data zgłoszenia: 2018.05.23 Data akceptacji: 2018.06.15