

SYSTEM DYNAMICZNEJ REDUKCJI OBCIĄŻENIA PODSTACJI TRAKCYJNEJ, DZIAŁAJĄCY Z WYKORZYSTANIEM ZASOBNIKA DUŻEJ MOCY

Damian Artyszak

mgr inż., Starszy Specjalista, Biuro Badań i Rozwoju, PKP Energetyka S.A., ul. Hoża 63/67, 00-681 Warszawa, email: d.artyszak@pkpenergetyka.pl

***Streszczenie.** W artykule opisano nowoczesny trakcyjny magazyn energii dużej mocy, który został wdrożony do eksploatacji przez spółkę PKP Energetyka S.A. w ramach projektu badawczo-rozwojowego dofinansowanego ze źródeł unijnych. Opis instalacji został poprzedzony przeglądem rozwiązań technicznych stosowanych na świecie w zakresie magazynowania energii trakcyjnej dla sieci zasilanych napięciem stałym. W tekście przedstawiono sposób działania pilotażowej instalacji, opisano jej poszczególne komponenty i pokazano wpływ magazynu energii na pracę towarzyszącą mu podstacji trakcyjnej. Artykuł jest zwieńczony rozdziałem dotyczącym dalszych możliwości rozwoju tej technologii w Polsce.*

***Słowa kluczowe:** trakcyjny magazyn energii, obniżenie mocy zamówionej, redukcja strat energii*

1. Wprowadzenie

Podstacje trakcyjne są obiektami, które charakteryzują się znaczną nierównomiernością obciążenia, dużą dynamiką zmian zasilania oraz wysokimi mocami szczytowymi w porównaniu z mocą średnią. Z formalnego punktu widzenia przekłada się to na konieczność zapewnienia wysokiej wartości mocy umownej, co generuje znaczące koszty stałe eksploatacji. Zapas mocy musi być jednak na tyle wysoki, aby zagwarantować stabilność zasilania na danym odcinku linii kolejowej.

Powyżej opisane problemy są również potęgowane przez rozwój kolei dużych prędkości. Nowoczesne lokomotywy wymagają do zasilania większych mocy niż te, które były dotychczas wymagane w systemie. Przykładowo, Alstom EMU250 z rodziny Pendolino, najszybszy pociąg wykorzystywany przez PKP Intercity, ma moc ciągłą 5664 kW [1]. Szereg podstacji musiało przejść gruntowną modernizację, aby mogły dostarczać taką moc do sieci trakcyjnej.

Konieczność zapewnienia dużej mocy w krótkim czasie jest również problematyczna ze względu na stan krajowej sieci dystrybucyjnej dostarczającej energię do podstacji trakcyjnej. Aż 76% linii wysokich i średnich napięć ma ponad 25 lat, a 37-42% nawet ponad 40 lat [2]. Ten problem dotyczy również sektora odnawialnych źródeł energii (OZE), którego rozwój jest ograniczony ze względu na braki mocy przyłączeniowej (problem dotyczy przede wszystkim farm fotowoltaicznych).

Jednym ze sposobów na rozwiązanie powyższych problemów jest zastosowanie trakcyjnych zasobników energii, które mogłyby stabilizować dostawy energii, pokrywać zapotrzebowanie na wysoką moc i bilansować produkcję z OZE. Pierwszy tego typu magazyn dużej mocy w Polsce został uruchomiony przez spółkę PKP Energetyka S.A. W niniejszym artykule opisano parametry urządzenia, sposób jego pracy oraz uzyskane efekty po kilku miesiącach eksploatacji.

2. Przegląd trakcyjnych magazynów litowo-jonowych

Trakcyjne zasobniki energii można podzielić na dwa główne typy. Pierwszy to zasobniki mobilne - instalowane bezpośrednio w pojazdach trakcyjnych. Ze względu na ograniczoną przestrzeń i możliwości instalacyjne, charakteryzują się niewielkimi gabarytami i pojemnościami. Zasobniki mobilne pracują głównie w stanach dynamicznych z wykorzystaniem układów hamowania odzyskowego. Podczas pracy, układ przyjmuje część wytracanej energii podczas wyhamowywania pojazdu trakcyjnego i oddaje zgromadzoną energię podczas jego przyspieszania. Pozwala to m.in. na ograniczenie energii pobieranej z sieci elektroenergetycznej, a tym samym redukcję kosztów. Drugi typ to zasobniki stacjonarne, instalowane w podstacjach trakcyjnych lub bezpośrednio w bliskości sieci zasilającej. Zasobniki tego typu mogą pracować również w trybie odzyskiwania energii, ale przede wszystkim służą do ograniczenia (redukcji) obciążeń szczytowych podstacji. W porównaniu z magazynami mobilnymi charakteryzują się większymi gabarytami, a co za tym idzie znacznie większymi pojemnościami oraz osiągalną mocą. Nie podlegają również ograniczeniom technicznym ze względu na technologię magazynowania i możliwości instalacyjne w pojeździe. W przypadku zasobników stacjonarnych, obok technologii elektrochemicznych spotykane są również zasobniki kinetyczne, czy nadprzewodnikowe.

Na chwilę obecną najczęściej wykorzystywane technologie magazynowania to przede wszystkim zasobniki akumulatorowe (Li-ion, Ni-MH), superkondensatorowe (EDLC) i mechaniczne (koła zamachowe). W fazie badawczej są również zasobniki nadprzewodnikowe elektromagnetyczne (SMES) [3]. Niekwestionowanym, światowym liderem w obszarze stacjonarnych systemów magazynowania energii implementowanych w sieciach trakcyjnych jest Japonia [4,5,6]. Początkowo, z uwagi na słabą dojrzałość technologii litowych, implementowano systemy z zasobnikami kinetycznymi – pierwszy taki system do praktycznego zastosowania w sieci trakcyjnej o mocy 2 MW zainstalowano w 1988 roku [5]. Systemy magazynowania energii z litowymi (Li-ion), niklowymi (Ni-MH), czy superkondensatorowymi (EDLC) zasobnikami energii zaczęto instalować od 2006 roku. Od tego czasu notuje się coraz większy udział tych technologii w systemach trakcyjnych. Ich głównym celem jest kompensacja spadków napięcia, wykorzystanie energii regeneracyjnej, czy zasilanie awaryjne [6].

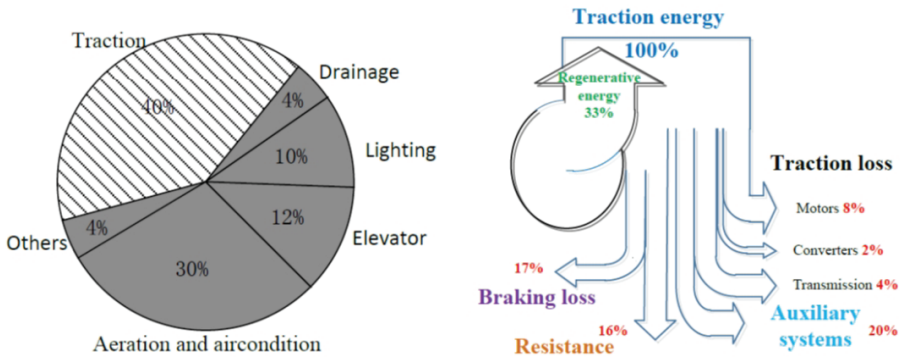


Rys. 1. Systemy magazynowania energii zainstalowane w sieciach trakcyjnych DC w Japonii [6]

Podobny trakcyjny system magazynowania energii współpracujący z siecią 3 kV DC został zaimplementowany na trasie szybkiej kolei we Włoszech na odcinku Magliana – Fiumicino (fragment linii łączącej dworzec Roma Termini z portem lotniczym Roma-Fiumicino). Układ jest wykorzystywany do redukcji prądów rozruchowych i spadków napięć podczas rozruchu pojazdów trakcyjnych o dużych prędkościach przejazdowych [7]. System zasobnikowy wykorzystuje hamowanie regeneracyjne pojazdów trakcyjnych typu ETR 1000, magazynując w tym czasie energię i oddając ją podczas rozruchu. Pozwala to na ograniczenie prądów w liniach zasilających podstację. Algorytm sterowania, obok parametrów eksploatacyjnych systemu zasobnikowego kontroluje poziom napięcia w sieci trakcyjnej oraz stan naładowania (ang. *State of Charge*) zasobnika. Jeżeli SoC mieści się w odpowiednim zakresie, to w przypadku wykrycia hamowania regeneracyjnego (wzrost napięcia

w sieci trakcyjnej) magazyn się ładuje, natomiast w przypadku spadku napięcia w sieci następuje rozładowywanie magazynu. Jeżeli SoC przekroczy wartość maksymalną lub spadnie poniżej minimalnej, algorytm odpowiednio nie zezwoli na ładowanie lub głębsze rozładowywanie zasobnika. Ponadto w przypadku, gdy poziom SoC spadnie poniżej minimalnego, a napięcie w linii będzie większe niż założona wartość minimalna, algorytm rozpocznie procedurę wolnego doładowywania zasobnika energii. Bez systemu magazynowania energii wahania napięcia w linii wynoszą 1500 V i osiągają wartości graniczne. System zasobnikowy pozwala na ograniczenie zmian napięcia w linii do wartości ok. 700 V, dzięki czemu napięcie nie osiąga minimalnych i maksymalnych wartości granicznych [7].

Stacjonarne systemy magazynowania energii z zasobnikami litowo-jonowymi znalazły zastosowanie również w systemach trakcyjnych metra, gdzie pomimo odbiorników takich jak oświetlenie, napędy wind, schodów, wentylacji czy klimatyzacji, większość energii (ok. 40%) zużywana jest w trakcji elektrycznej (rys. 2).



Rys. 2. Zużycie energii elektrycznej w systemach metra [8]

Taki system został zaimplementowany m.in. w podstacji trakcyjnej jednej z linii metra w Seulu [9]. Głównym zadaniem zasobnika energii jest stabilizacja napięcia w sieci trakcyjnej podczas hamowania regeneracyjnego i rozruchu pojazdów trakcyjnych. Magazyn energii jest przyłączony do sieci DC przez dwukierunkowy przekształtnik. Moc znamionowa systemu to 1 MW, a pojemność 38 kWh. Wykorzystanie energii generowanej podczas hamowania regeneracyjnego pozwala ograniczyć ilość energii elektrycznej pobieranej z sieci. Średnio układ pozwala zaoszczędzić 1500 kWh dziennie (ok. 16,7% dziennego zużycia). Maksymalnie w szczytowym zapotrzebowaniu na energię oszczędności przekraczają 25% [9].

Analizując dane dotyczące pracujących układów można wykazać, że głównym celem instalacji systemów magazynowania energii w sieciach trakcyjnych jest ograniczenie prądów rozruchowych podczas startu pojazdów trakcyjnych, a tym samym obniżenie zapotrzebowania na energię elektryczną w stanach dynamicznych. Opisane powyżej przykłady systemów umożliwiają odzysk energii podczas hamowania – tzw. hamowanie regeneracyjne (rekuperacja energii). Zjawiska te są silnie związane z charakterystyką pracy transportu kolejowego. W przypadku

przejazdu pociągu przez odcinek sieci zasilanej przez stację trakcyjną, dochodzi do gwałtownego poboru mocy oraz spadku napięcia. W przypadku hamowania pojazdu zachodzi zjawisko odwrotne. Dzięki zastosowaniu magazynu energii, oddana podczas procesu hamowania energia może zostać zgromadzona i wykorzystana na przyszłe przejazdy. Stabilizacja napięcia w sieci zasilania oraz redukcja szczytowego zapotrzebowania na moc stanowią kluczowe założenia trakcyjnych zasobników energii, czym wpływają na bezpieczeństwo dostaw oraz poprawę jakości energii elektrycznej.

3. Prototypowa instalacja magazynowania energii trakcyjnej PKP Energetyka S.A.

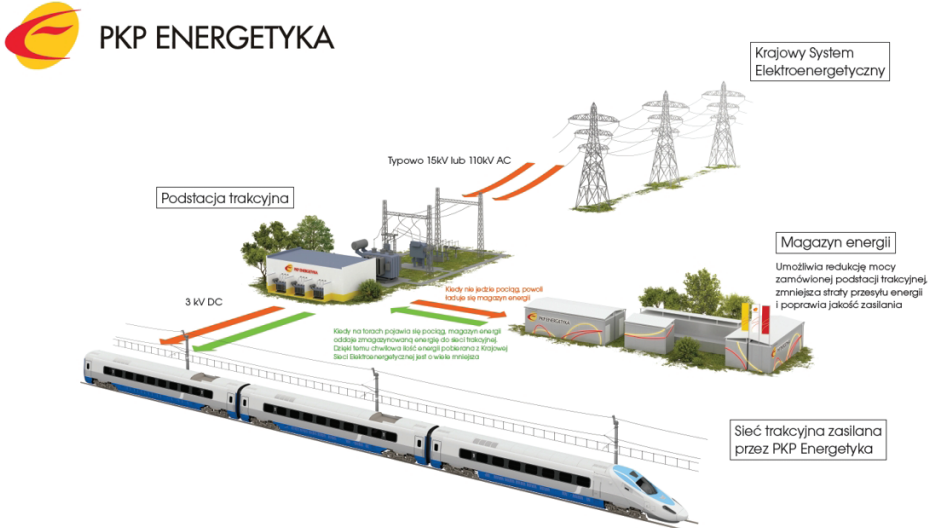
3.1. *Prace badawcze poprzedzające budowę instalacji*

Układy magazynowania energii charakteryzują się budową modułową, co daje szerokie możliwości ich dostosowania do docelowego przeznaczenia. Aby zapewnić optymalną pracę instalacji, należy dokładnie dobrać jej parametry, w związku z czym pierwszym etapem prac badawczych było opracowanie wytycznych do wyboru docelowej lokalizacji. Do dalszej analizy wytypowano podstacje charakteryzujące się znaczną zmiennością mocy obciążenia. W obiektach spełniających określone kryteria przeprowadzono badania zmienności mocy po stronie prądu stałego oraz prądu zmiennego, co pozwoliło opracować rekomendacje w zakresie wyboru technologii i parametrów systemu magazynowania energii.

Wstępne wyniki zostały zweryfikowane w uproszczonym matematycznym modelu podstacji trakcyjnej i sieci zasilającej – na tej podstawie wyznaczono wstępnie moc maksymalną i pojemność w zależności od przyjętego progu redukcji mocy po stronie prądu zmiennego. Model posłużył również do symulacji działania opracowywanych algorytmów sterowania, które zostały poddane weryfikacji wraz z odpowiednimi nastawami. Jako docelową lokalizację wybrano podstację trakcyjną Garbce, gmina Żmigród, położoną przy linii kolejowej nr 271 (Wrocław Główny – Poznań Główny).

3.2. *Instalacja prototypowa systemu magazynowania energii*

Uruchomiona instalacja jest pierwszym wielkoskalowym magazynem energii w spółce PKP Energetyka S.A. Jest to również jedna z pierwszych tego typu instalacji dużej mocy na świecie, która bezpośrednio współpracuje z siecią trakcyjną 3 kV DC, jako że magazyn jest bezpośrednio przyłączony do szyny prądu stałego w podstacji za pomocą dedykowanej celki liniowej (rys. 3). Magazyn energii jest bezpośrednio ładowany prądem stałym, co dodatkowo pozwala zmniejszyć straty energii ze względu na brak konwersji DC/AC/DC.



Rys. 3. Schematyczne pokazanie współpracy magazynu z podstacją

Źródło: materiały własne

Instalacja magazynowania energii składa się z dwóch głównych systemów:

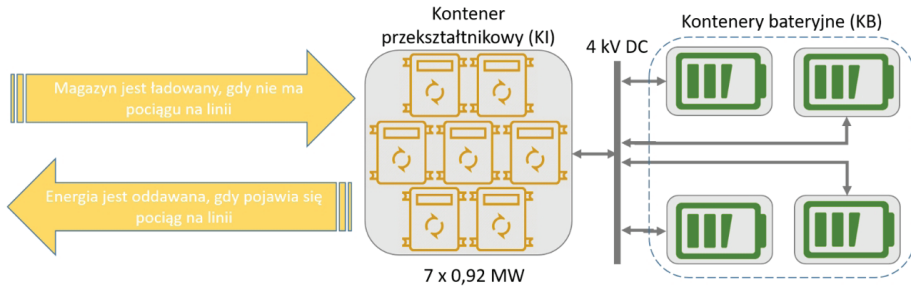
- system bateryjny – w jego skład wchodzi 4240 ogniw litowo-jonowych wykonanych w technologii NMC (z elektrodą niklowo-manganowo-kobaltową). Baterie pogrupowane są w moduły, a moduły z kolei w cztery łańcuchy bateryjne – każdy z nich jest zamontowany w osobnym kontenerze 20ft (rys. 4). Łańcuchy są połączone równoległe do wspólnej szyny 4 kV DC. Każda bateria wyposażona jest we własny zestaw czujników, który pozwala na bieżąco monitorować jej podstawowe parametry: napięcie, prąd oraz temperaturę. System bateryjny jest wyposażony w punktowy system gaszenia gazem, który umożliwi gaszenie wyłącznie wadliwych modułów.



Rys. 4. Baterie litowo-jonowe zamontowane w jednym z kontenerów

Źródło: materiały własne

- system przekształcania energii – jego główny element stanowi dwukierunkowy przekształtnik energoelektroniczny DC/DC składający się z 7 równoległe pracujących modułów (7 x 0,92 MW), którego zadaniem jest odpowiednie dostosowanie parametrów energii elektrycznej wpływającej i wypływającej z magazynu (rys. 5). W przypadku awarii jednego z modułów przekształtnikowych zapewniona jest ciągła praca systemu magazynowania z niezmiennymi parametrami, a w przypadku awarii kolejnych modułów ciągłość pracy jest zachowana, jednak z mniejszą mocą. Przekształtnik jest zainstalowany w osobnym kontenerze 20ft.



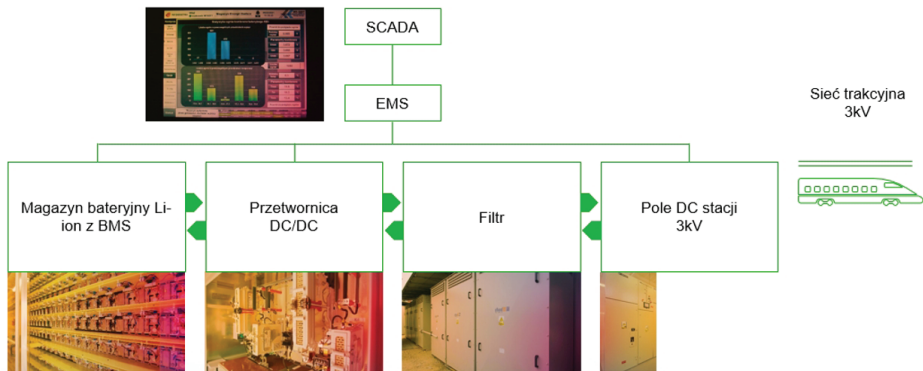
Rys. 5. Schematyczne pokazanie połączenia kontenera przekształtnikowego z kontenerami bateryjnymi
Źródło: materiały własne

Oprócz czterech kontenerów bateryjnych i jednego kontenera przekształtnikowego, w skład instalacji magazynowania energii wchodzi dodatkowo kontener zawierający instalację chłodniczą (baterie są chłodzone powietrzem, natomiast przekształtnik posiada dedykowany system chłodzenia wodnego) oraz dedykowana celka liniowa 3 kV DC zamontowana w istniejącej rozdzielni prądu stałego w podstacji trakcyjnej. Cały obiekt zajmuje powierzchnię ok. 180 m² (rys. 6).



Rys. 6. Widok z góry na magazyn energii (po prawej) położony obok PT Garbce (po lewej)
Źródło: materiały własne

Prawidłowa praca baterii jest zagwarantowana przez działanie systemu BMS (ang. *Battery Management System*). Jego rolą jest równomiernie ładowanie oraz rozładowanie ogniw bateryjnych w taki sposób, aby były zachowane bezpieczne poziomy napięcia oraz prądu. Nadrzędnym systemem dla całej instalacji magazynowania energii jest EMS (ang. *Energy Management System*), który dba o to, aby magazyn pracował optymalnie i zgodnie z zapotrzebowaniem sieci trakcyjnej, a także gromadził dane i parametry pracy układu. Gromadzenie i dystrybucja danych odbywa się za pomocą systemu SCADA (rys. 7), dzięki czemu pracownicy instalacji mogą nadzorować dyspozytorzy w Rejonowej Dyspozyturze Energetyki, a także inni pracownicy biorący udział w pracach projektowych. Wyniki uzyskane w trakcie realizacji prac badawczych pozwolą na wypracowanie odpowiednich standardów wdrożenia kolejnych magazynów energii w innych podstacjach należących do PKP Energetyka S.A.



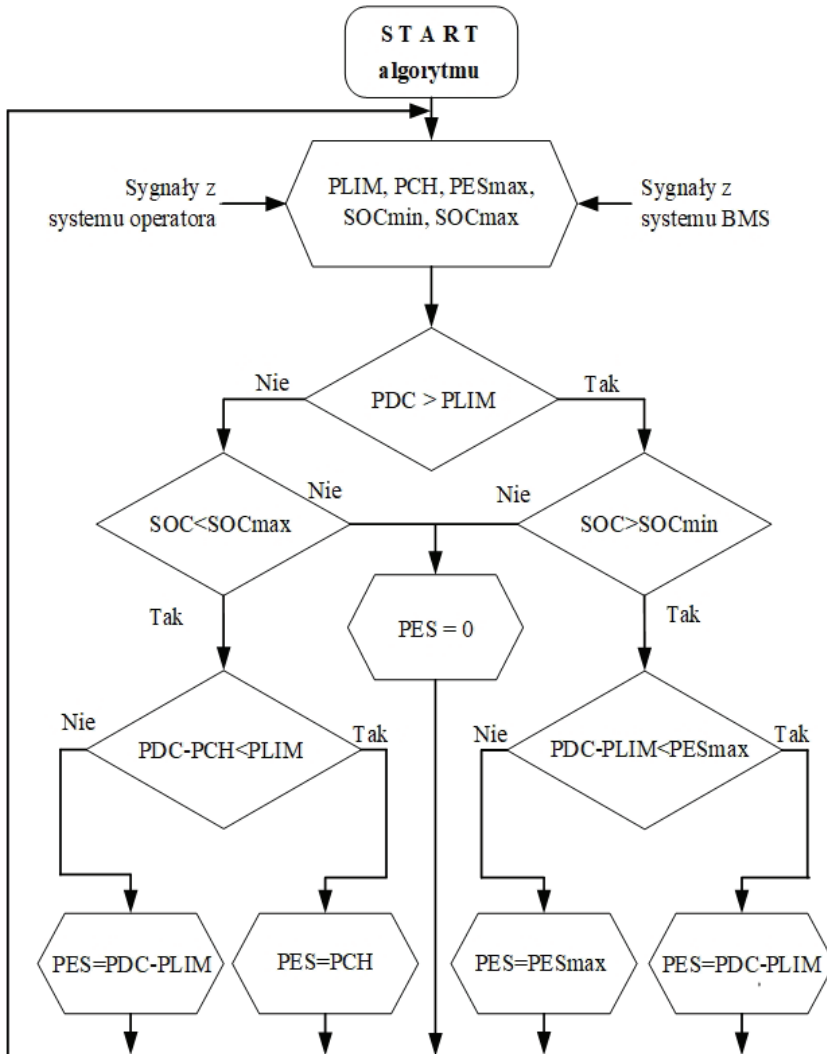
Rys. 7. Schematyczna struktura magazynu energii trakcyjnej w Garbcach

Źródło: materiały własne

Prototypowa instalacja ma moc 5,5 MW i pojemność użyteczną na poziomie ok. 1,8 MWh (pojemność gwarantowana po upływie 10 lat eksploatacji wynosi 1,2 MWh) przy co najmniej 15-letniej żywotności układu. Głównym celem skonstruowanego prototypu jest redukcja szczytowego obciążenia podstacji trakcyjnej wynikającej z ruchu kolejowego na pobliskiej linii. W konsekwencji, pozwala to obniżyć moc zamówioną obiektu, co przekłada się na wymierne korzyści ekonomiczne (zmniejszenie kosztów stałych eksploatacji).

Powyższy efekt jest możliwy do uzyskania ze względu na tryby pracy ładowania i rozładowania magazynu. Są one kształtowane przez zaimplementowane algorytmy sterowania (rys. 8) oraz nastawy, które mogą być ręcznie zmieniane przez obsługę. Podstawową nastawą jest próg redukcji mocy podstacji trakcyjnej PLIM – wartość ta określa maksymalną moc z jaką może być zasilana podstacja z krajowego systemu dystrybucyjnego. Jeżeli zapotrzebowanie na moc trakcyjną PDC jest mniejsze lub równe wartości PLIM, to podstacja w całości pokrywa to zapotrzebowanie, a magazyn nie rozładowuje się. Z kolei, gdy zapotrzebowanie na moc trakcyjną PDC przewyższa wartość PLIM, to wtedy magazyn rozładowuje

się z mocą PES będącą różnicą wartości PDC i PLIM, podczas gdy moc o wartości PLIM jest dostarczana bezpośrednio z krajowego systemu dystrybucyjnego przez podstację. Technicznie możliwe jest ustawienie wartości PLIM w zakresie 1,0-3,0 MW (z rozdzielczością 0,1 MW), ale dotychczas przeprowadzone prace badawcze wykazały, że możliwe jest obniżenie nastawy poniżej 1,0 MW bez zaburzenia funkcjonalności instalacji. Druga zaimplementowana nastawa określa maksymalną moc PCH z jaką może być ładowany magazyn. Można ustalić jej wartość w zakresie 0,2-0,5 MW (z rozdzielczością 0,01 MW). Jest to jednak nastawa podrzędna w stosunku do nastawy PLIM. W algorytmie zaszyto też progi zabezpieczające baterie przed nadmierną eksploatacją, tj. minimalny oraz maksymalny poziom naładowania magazynu SoC.



Rys. 8. Opracowany algorytm sterowania instalacji magazynowania energii [10]

Wdrożenie powyższego algorytmu przekłada się na to, że w okresie, gdy nie ma ruchu pociągów na linii kolejowej, magazyn jest ładowany niską mocą z krajowej sieci dystrybucyjnej. Długotrwałe ładowanie mocą poniżej progu PLIM nie ma znaczącego wpływu na średnią moc 15-minutową, która jest wykorzystywana do rozliczeń z operatorem systemu dystrybucyjnego dostarczającego energię do podstacji. Kiedy na odcinku zasilanym przez konkretną podstację pojawi się pojazd i zostanie wykryte zapotrzebowanie na moc trakcyjną PDC, magazyn oddaje energię w bardzo krótkim czasie (rzędu kilku sekund) i zapewnia odpowiedni poziom mocy. Dzięki temu podczas ruchu pociągu pobierana jest o wiele mniejsza moc z krajowej sieci dystrybucyjnej, co pozwala na znaczące obniżenie zamówionej mocy szczytowej. Zasobnik ponadto umożliwia osiągnięcie tego celu bez ograniczania wielkości i parametrów dystrybuowanej energii. Jest to rozwiązanie uwzględniające specyfikę zasilania kolei, umożliwiające powolne ładowanie magazynu i szybkie oddanie zgromadzonej energii, kiedy przejeżdża pociąg.

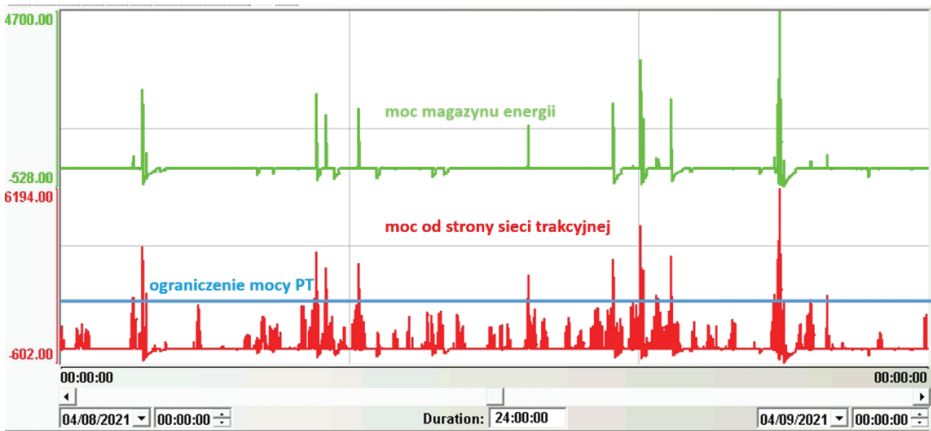
Zastosowanie określonego trybu pracy przynosi również inne korzyści. Po pierwsze, poprzez zniwelowanie przesyłania dużych wartości mocy w krótkim czasie przez podstację trakcyjną, ulega poprawie stabilność napięcia po stronie prądu stałego podstacji trakcyjnej. To z kolei pozwala na zwiększenie natężenia ruchu pojazdów trakcyjnych i w konsekwencji wzrost wolumenu dystrybuowanej energii bez konieczności zwiększania mocy przyłączeniowych. W rezultacie spodziewane jest również zmniejszenie oddziaływania poszczególnych podstacji trakcyjnych na zasilające je sieci dystrybucyjne poprzez redukcję wahań mocy oraz mocy szczytowych. Ten efekt może być także wykorzystany do świadczenia komercyjnych usług systemowych, polegających na czasowym intencjonalnym ograniczeniu mocy na żądanie. Po drugie, przesyłanie prądu o wielokrotnie mniejszym natężeniu wpływa na redukcję strat energii w liniach zasilających, co zostało szczegółowo opisane w kolejnym rozdziale.

4. Efekty pracy instalacji pilotażowej magazynowania energii

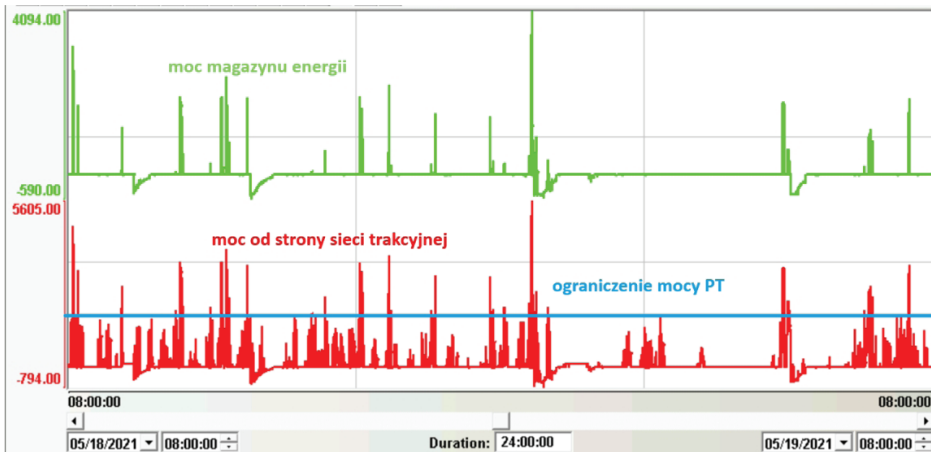
4.1. *Zmniejszenie maksymalnej mocy podstacji*

Wykorzystanie instalacji magazynowania energii pozwoliło zmniejszyć zarówno maksymalną moc podstacji trakcyjnej jak również moc średnią 15-minutową, czyli moc zamówioną. Ze względu na trwające prace badawcze i nowatorski charakter projektu nie dokonano jeszcze formalnego zmniejszenia mocy zamówionej dla obiektu w Garbcach, która na chwilę obecną wynosi 3,6 MW (2,1 MW dla przyłącza podstawowego oraz 1,5 MW dla przyłącza rezerwowego). Magazyn energii pozwolił zmniejszyć tę moc do poziomu 1,5 MW, tj. do wielkości nastawy wybranej dla wstępnego etapu pracy instalacji. Przeprowadzone badania oraz dotychczasowe doświadczenia z eksploatacji magazynu pokazują, że możliwa jest dalsza redukcja mocy zamówionej do poziomu 1,0 MW. Obrazują to poniższe

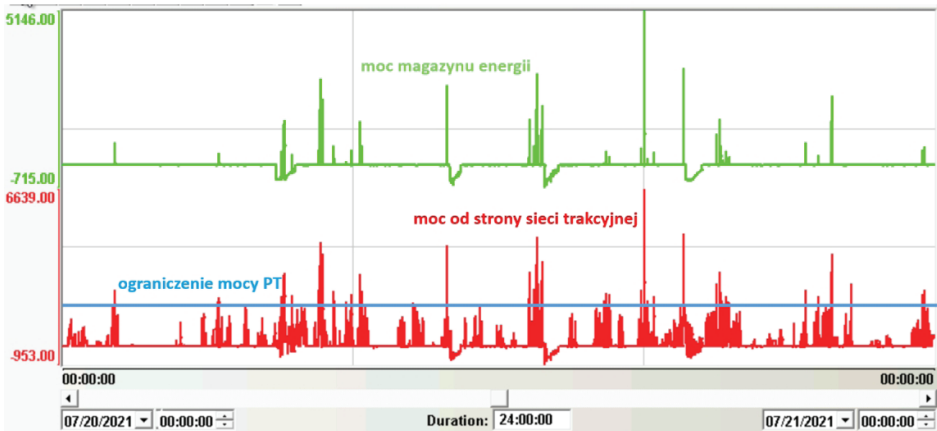
trendy pracy magazynu wybrane dla kilku przykładowych okresów – na górze wykresu pokazano moc magazynu (moc dodatnia oznacza rozładowanie, a moc ujemna ładowanie), a na dole moc od strony sieci trakcyjnej (rys. 9-12). Ponadto naniesiono linię obrazującą ograniczenie mocy podstacji trakcyjnej PLIM. Wyraźnie widać, że magazyn pokrył wszystkie piki mocy przekraczające nastawione ograniczenie, a także, że istnieje potencjał do dalszej redukcji mocy podstacji, co jest celem dalszych prac badawczych.



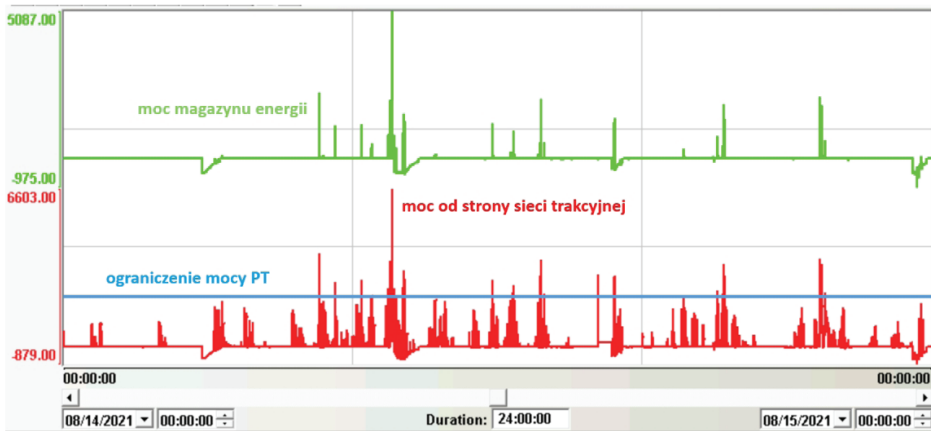
Rys. 9. Maksymalna moc magazynu – 4,7 MW
Źródło: materiały własne



Rys. 10. Maksymalna moc magazynu – 4,1 MW
Źródło: materiały własne



Rys. 11. Maksymalna moc magazynu – 5,1 MW
Źródło: materiały własne



Rys. 12. Maksymalna moc magazynu – 5,1 MW
Źródło: materiały własne

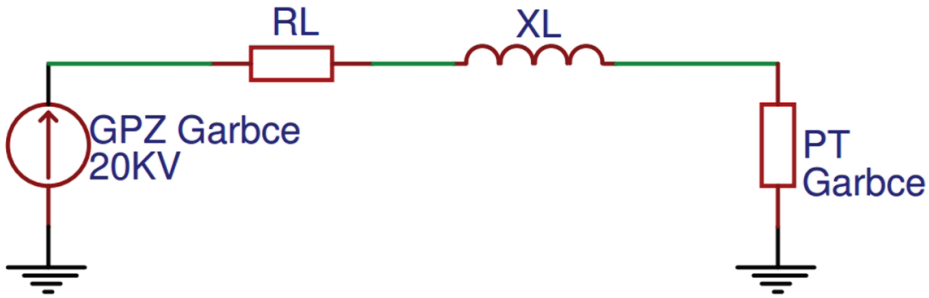
4.2. Zmniejszenie strat w liniach zasilających podstację trakcyjną

Jak wcześniej wspomniano, wykorzystanie magazynu energii i jego trybów pracy powinno również pozwolić na obniżenie strat energii w liniach zasilających podstację trakcyjną. Wysokość strat określono na podstawie pomiarów z liczników energii zamontowanych na linii podstawowej i rezerwowej doprowadzających energię do obiektu oraz na podstawie parametrów zastępczych linii zasilających, które zostały wyznaczone w trakcie projektu.

Parametry zastępcze linii zasilającej (rys. 13):

- rezystancja linii zasilającej podstawowej $RL1 = 1,244 \Omega$;
- reaktancja linii zasilającej podstawowej $XL1 = 2,379 \Omega$;
- rezystancja linii zasilającej rezerwowej $RL2 = 1,244 \Omega$;

- reaktancja linii zasilającej rezerwowej $X_{L2} = 2,379 \Omega$;
- napięcie międzyfazowe linii zasilającej $U = 20 \text{ kV}$.



Rys. 13. Schemat zastępczy linii zasilającej PT Garbce
Źródło: materiały własne

Straty mocy w linii dla każdego i -tego, 15 minutowego przedziału czasu, liczone są z zależności:

$$\Delta P_{line}[i] = R_{L1} \cdot \frac{(\frac{60}{\tau} \cdot E_{P1}[i])^2}{U^2} + X_{L1} \cdot \frac{(\frac{60}{\tau} \cdot E_{Q1}[i])^2}{U^2} + R_{L2} \cdot \frac{(\frac{60}{\tau} \cdot E_{P2}[i])^2}{U^2} + X_{L2} \cdot \frac{(E_{Q2}[i])^2}{U^2} \quad (1)$$

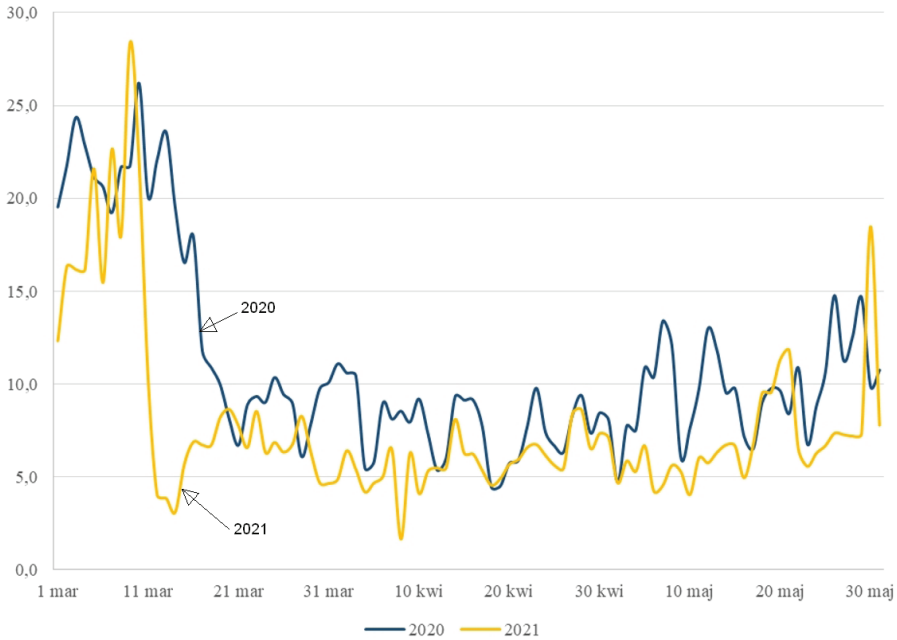
gdzie:

- τ – 15-minutowy okres czasu całkowania (uśredniania);
- E_{P1} – energia czynna 15-minutowa pierwszego zestawu prostownikowego (linia podstawowa) [kWh];
- E_{P2} – energia czynna 15-minutowa drugiego zestawu prostownikowego (linia rezerwowa) [kWh];
- E_{Q1} – energia bierna indukcyjna 15-minutowa pierwszego zestawu prostownikowego (linia podstawowa) [kVarh];
- E_{Q2} – energia bierna indukcyjna 15-minutowa drugiego zestawu prostownikowego (linia rezerwowa) [kVarh].

Sumaryczne straty energii w linii zasilającej, za n -15 minutowych odcinków czasu, zostały wyznaczone ze wzoru:

$$\Delta E_{line} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_{line}[i] \cdot \tau}{60} \quad (2)$$

Porównano straty energii dla dwóch analogicznych okresów: marzec – maj 2020 (gdy magazyn energii nie został jeszcze wybudowany) oraz marzec – maj 2021 (gdy magazyn energii był już eksploatowany). Wyniki przedstawiono na poniższym wykresie i w tabeli (rys. 14, Tab. 1).



Rys. 14. Porównanie dobowych straty energii elektrycznej (w kWh) w liniach zasilających PT Garbce w okresie od marca do maja w 2020 i 2021 r.

Źródło: materiały własne

Tabela 1. Straty energii w linii zasilającej dla PT Garbce za miesiące marzec – maj

Rok	2020	2021
Maksymalne dobowe straty energii [kWh]	26,20	28,38
Średnie dobowe straty energii [kWh]	11,01	7,82
Sumaryczne straty energii [kWh]	1012,47	719,63

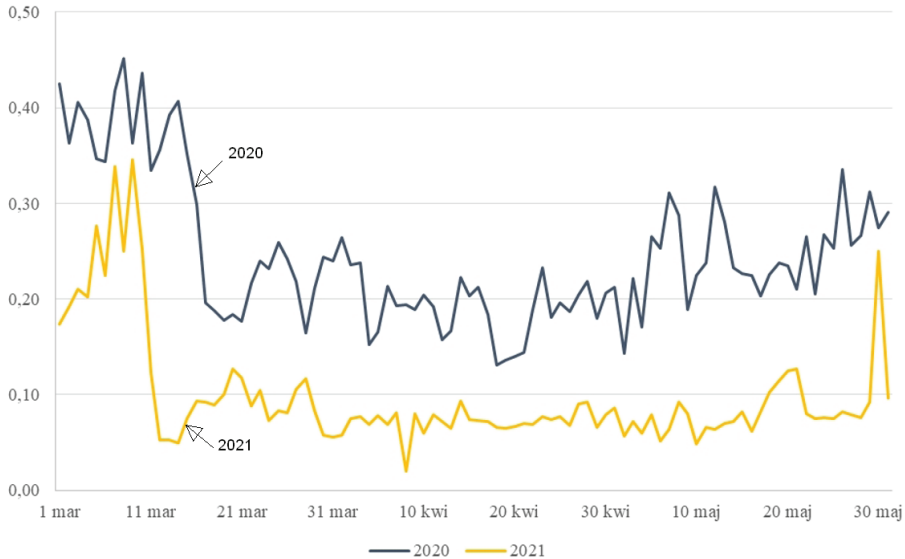
Z przeprowadzonych powyżej analiz wynika, że straty energii w liniach zasilających zmalały z 1012,47 kWh do 719,63 kWh, co oznacza zmniejszenie strat o ok. 28,9%. Zużycie energii w przypadku podstacji trakcyjnej są bezpośrednio zależne od liczby przejazdów pociągów przy danej podstacji. Do wyznaczenia wpływu natężenia ruchu kolejowego na straty energii w liniach zasilających wprowadzono odpowiedni współczynnik:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta E_{line_i}}{L_i} \quad (3)$$

gdzie:

ΔE_{line_i} – straty energii w liniach zasilających PT Garbce w analizowanym okresie,

L_i – liczba pociągów zasilanych przez PT Garbce w analizowanym okresie.



Rys. 15. Porównanie jednostkowych strat energii w liniach zasilających PT Garbce w zależności od liczby zasilanych pociągów w okresie od marca do maja w 2020 i 2021 r.

Źródło: materiały własne

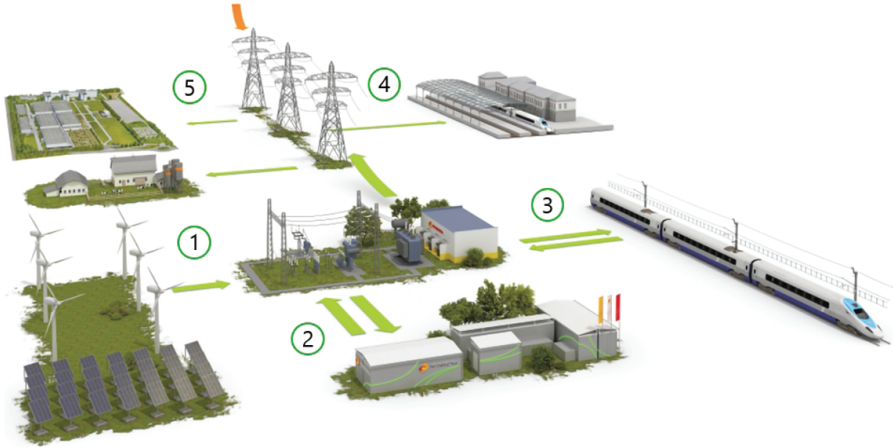
Średni jednostkowy wskaźnik strat w analizowanych okresach wynosi odpowiednio 0,255 dla 2020 r. oraz 0,098 dla 2021 r. To oznacza, że jednostkowe straty energii odniesione do liczby przejazdów pociągów zmniejszyły się aż o ok. 61,6%.

5. Dalsze możliwości rozwoju

Magazyn energii trakcyjnej nadal jest obiektem prac badawczych, chociaż dotychczasowe wyniki pokazały, że jest on w pełni funkcjonalny. W 2022 roku w jego bezpośrednim sąsiedztwie powstanie farma fotowoltaiczna, co pozwoli rozszerzyć zakres projektu. W ten sposób magazyn zyska również dodatkową funkcjonalność, tj. współpracę ze źródłami odnawialnymi i stabilizację jej dostaw, co jest typowym przeznaczeniem większości tego typu obiektów budowanych w Polsce i na świecie. Farma fotowoltaiczna, wraz z podstacją trakcyjną i magazynem energii, będzie też stanowić załączek Lokalnego Systemu Bilansowania (LOB), do którego będą mogli przyłączać się inni lokalni odbiorcy energii, czy prosumenci/producenci (rys. 16). Inną możliwością wykorzystania magazynu energii jest pobieranie energii trakcyjnej z rekuperacji. Obecnie energia generowana w trakcie hamowania pociągu jest w znacznej mierze tracona. Zasobnik energii będzie mógł zgromadzić powstałą energię i przechować ją do późniejszego wykorzystania.

Spółka PKP Energetyka S.A. planuje w kolejnych latach wybudować blisko 300 trakcyjnych zasobników energii. To działanie jest nieodzowne dla dalszego rozwoju polskiej kolei i wzmocnienia zasilającego ją systemu elektroenergetyczne-

go, ponieważ potrzeby transportu kolejowego w Polsce systematycznie rosną. Budowa kolejnych magazynów energii ma również ogromne znaczenie dla realizacji Programu Zielona Kolej. To sektorowa inicjatywa podmiotów z branży kolejowej należących do Centrum Efektywności Energetycznej Kolei (CEEK), zakładająca osiągnięcie w 2030 r. zasilania kolei energią trakcyjną pochodzącą w 85% z OZE. Aby plany te się powiodły, niezbędne będzie m.in. zapewnienie równowagi w systemie wykorzystującym rozproszone i nierównomiernie pracujące odnawialne źródła energii. Nowoczesne zasobniki sprawią, że dostawy energii będą stabilne także wtedy, gdy nie będzie świeciło słońce lub wiał wiatr.



Rys. 16. Przykładowy model Lokalnego Obszaru Bilansowania (LOB): 1) lokalne OZE generują energię, 2) nadmiar energii gromadzony jest w zasobniku, 3) zasobnik umożliwia również gromadzenie energii z rekuperacji, 4) i 5) do LOB mogą też przyłączać się lokalni odbiorcy energii

Źródło: materiały własne

Projekt „System dynamicznej redukcji obciążenia podstacji trakcyjnej, działający z wykorzystaniem zasobnika dużej mocy” jest współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020 i realizowany w ramach konkursu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju: nr 8 Programu sektorowego „PBSE”. Wartość przedsięwzięcia to 19.978.431,20 zł, a dofinansowanie z NCBR wyniosło 8.819.597,28 zł.



Fundusze Europejskie
Inteligentny Rozwój

Unia Europejska
Europejski Fundusz
Rozwoju Regionalnego



Bibliografia

- [1] Wawrzyniak A., Elektryczne pociągi zespołowe ETR610 serii ED250 dla PKP Intercity S.A., TTS Technika Transportu Szynowego, 2013, nr 9, s. 20-24.
- [2] Tomaszewski R., Sieć do zmiany. Jak zreformować polski sektor dystrybucji energii elektrycznej., Polityka Insight, Warszawa 2019.
- [3] Ratniyomchai T., Hillmansen S., Tricoli P., Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways, IET Electrical Systems in Transportation, 2014, Vol. 4, Iss. 1, pp. 9–20.
- [4] Suzuki T., Hayashiya H., Yamanoi T., Kawahara K., Application Examples of Energy Saving Measures in Japanese DC Feeding System, „International Power Electronic Conference”, pp. 1062 – 1067, Hiroshima, Japan, 2014.
- [5] Okui A., Hase S., Shigeeda H., Konishi T., Yoshi T., Application of Energy Storage System for Railway Transportation in Japan, „International Power Electronic Conference”, pp. 3117-3123, Sapporo, Japan, 2010.
- [6] Hayashiya H., Suzuki T., Hino M., Hara D., Tojo M., Shimeda S., Kudo K., Kato T., Takahashi H., Effect evaluation of Li-ion battery for regenerative energy utilization in traction power supply system, „17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)”, Geneva, Switzerland, 2015.
- [7] Calderaro V., Galdi V., Graber G., Piccolo A., Capasso A., Lamedica R., Ruvio A., Energy Management of Auxiliary Battery Substation Supporting High-Speed Train on 3 kV DC Systems, „4th International Conference on Renewable Energy Research and Applications”, pp.1224-1229, Palermo, Italy, 2015.
- [8] Shuai Su, Tao Tang, Yihui Wang, Evaluation of Strategies to Reducing Traction Energy Consumption of Metro Systems Using an Optimal Train Control Simulation Model, *Energies* 2016, vol 9, 105, pp.1-19.
- [9] M. Teshima, H. Takahashi, „Lithium ion battery application in traction power supply system,” in Proc. The 2014 International Power Electronics Conference, pp. 1068-1072, Hiroshima, Japan 2014
- [10] Jarnut M., Kaniewski J., Benysek G., Obrycki P., Artyszak D., Dzienis W., Anielak P., Sposób sterowania stacjonarnym systemem magazynowania energii do zastosowań w podstacjach trakcyjnych, zgłoszenie patentowe nr P.431402, Polska, 2019.

