

Damian ARTYSZAK

Magazyn energii trakcyjnej PKP Energetyka S.A. Rezultaty projektu i dalsze możliwości rozwoju

Abstrakt: W artykule opisano rozwiązanie, które zostało wdrożone do eksploatacji przez spółkę PKP Energetyka S.A. w ramach projektu badawczo-rozwojowego dofinansowanego ze źródeł unijnych. Jest nim nowoczesny trakcyjny magazyn energii dużej mocy. W tekście przedstawiono sposób działania pilotażowej instalacji, opisano jej poszczególne komponenty i pokazano wpływ magazynu energii na pracę towarzyszącą mu podstacji trakcyjnej. Artykuł jest zakończony rozdziałem dotyczącym dalszych możliwości rozwoju tej technologii w Polsce.

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

Podstacje trakcyjne są obiektami, które charakteryzują się znacznym nierównomiernym obciążeniem, 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 duży, aby zagwarantować stabilność zasilania na danym odcinku linii kolejowej.

Powyższe problemy są potęgowane przez rosnący udział kolei dużych prędkości. Przykładowo Alstom EMU250 z rodziny Pendolino, najszybszy pociąg wykorzystywany przez PKP Intercity, ma moc ciągłą równą 5664 kW (Wawrzyniak 2013). Konieczność dostarczenia dużej mocy w krótkim czasie jest również problematyczna ze względu na stan krajowej sieci dystrybucyjnej dostarczającej energię do podstacji trakcyjnej: według ekspertów 76% linii wysokich i średnich napięć ma ponad 25 lat, a 37–42% nawet ponad 40 lat (Tomaszewski 2019). Zły stan infrastruktury dystrybucyjnej negatywnie wpływa również na rozwój sektora odnawialnych źródeł energii (OZE), który jest hamowany ze względu na braki mocy przyłączeniowej.

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.

Prace badawcze poprzedzające budowę instalacji

Układy magazynowania energii charakteryzują się budową modułową, co daje szerokie możliwości ich dostosowania do docelowego przeznaczenia. Dokładne dobranie parametrów zapewni optymalną pracę instalacji. Pierwszym etapem prac badawczych było opracowanie wytycznych do wyboru docelowej podstacji, gdzie powstanie prototypowa instalacja magazynowania energii. Do analizy wytypowano obiekty charakteryzujące się znaczną zmiennością mocy obciążenia. W wytypowanych lokalizacjach przeprowadzono badania zmienności mocy prądu stałego oraz prądu zmiennego, co pozwoliło opracować rekomendacje w zakresie wyboru technologii i parametrów systemu magazynowania energii. Wstępne wyniki zweryfikowano w modelu matematycznym, w efekcie czego wyznaczono moc maksymalną i pojemność w zależności od przyjętego progu redukcji mocy prądu zmiennego zasilającego podstację trakcyjną. Model posłużył również do symulacji działania opracowywanych

algorytmów sterowania, które zostały poddane weryfikacji wraz z odpowiednimi nastawami. Jako docelową lokalizację ostatecznie wybrano podstację trakcyjną Garbce, gmina Żmigród, położoną przy linii kolejowej nr 271 (Wrocław Główny–Poznań Główny).

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. 1). Magazyn energii jest bezpośrednio ładowany prądem stałym, co dodatkowo pozwala zmniejszyć straty energii związane z konwersją DC/AC/DC, która nie zachodzi.

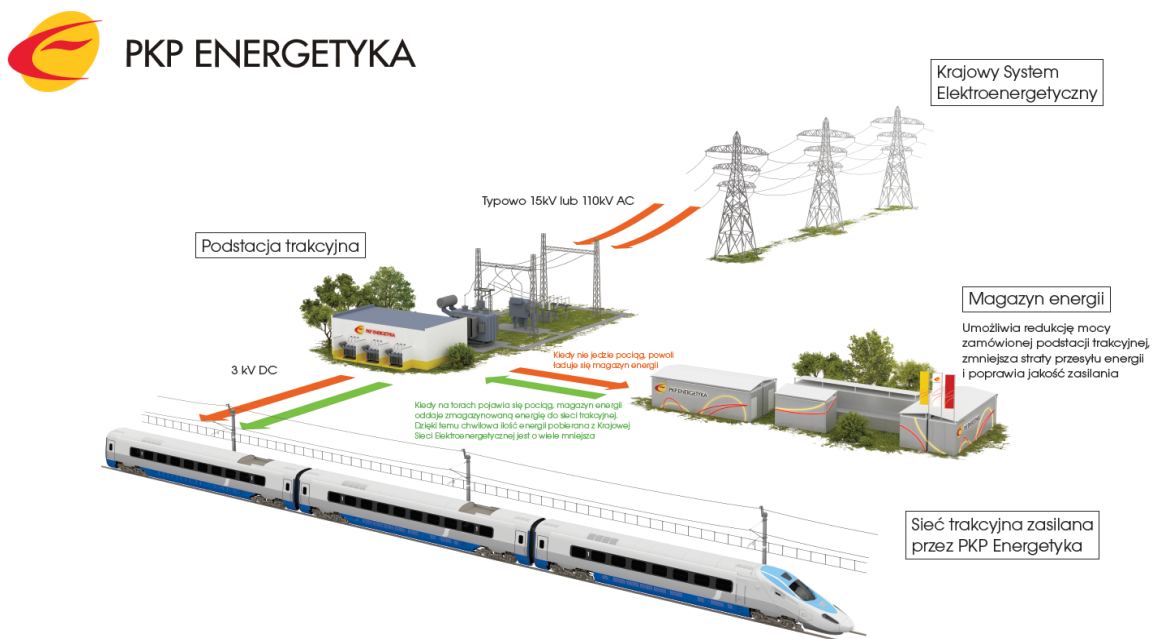
Instalacja magazynowania energii składa się z dwóch głównych systemów:

- systemu bateryjnego,
- systemu przekształcania energii.

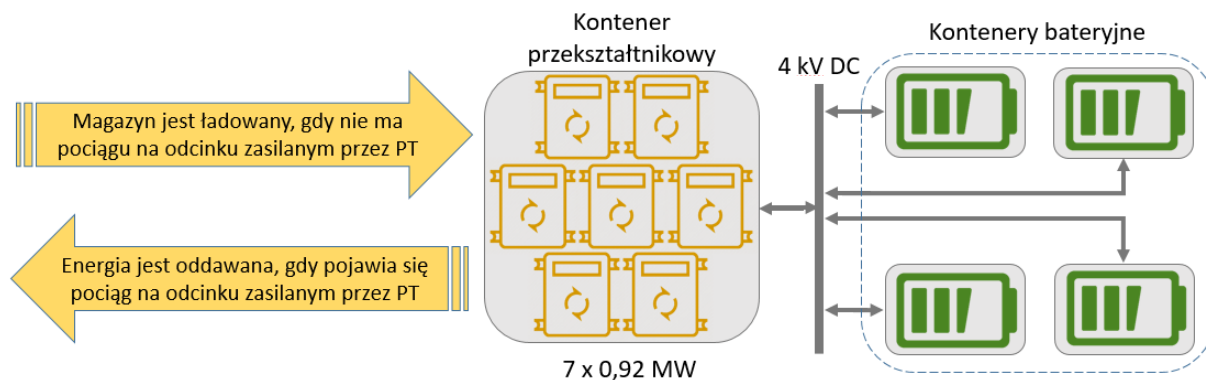
W skład systemu bateryjnego wchodzi 4240 ogniw litowo-jonowych wykonanych w technologii NMC (elektroda niklowo-manganowo-kobaltowa). Baterie są pogrupowane w moduły, a moduły z kolei w cztery łańcuchy bateryjne – każdy z nich jest zamontowany w osobnym kontenerze (Rys. 2). Łańcuchy są połączone równoległe 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 umożliwia gaszenie wyłącznie wadliwych modułów.



Rys. 2. Baterie litowo-jonowe zamontowane w jednym z kontenerów (źródło: materiały PKP Energetyka S.A.)



Rys. 1. Schemat współpracy magazynu z podstacją (źródło: materiały PKP Energetyka S.A.)



Rys. 3. Schemat połączenia kontenera przekształtnikowego z kontenerami bateryjnymi (źródło: materiały PKP Energetyka S.A.)

Z kolei głównym elementem systemu przekształcania energii jest dwukierunkowy przekształtnik energoelektroniczny DC/DC składający się z siedmiu równolegle pracujących modułów ($7 \times 0,92$ MW), którego zadaniem jest odpowiednie dostosowanie parametrów energii elektrycznej wpływającej do magazynu i z niego wypływającej (Rys. 3). 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.

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 ma specjalistyczny system chłodzenia wodnego) oraz dedykowana celka liniowa 3 kV DC zamontowana w istniejącej rozdzielni prądu stałego w podstacji trakcyjnej. Cały obiekt zajmuje powierzchnię około 180 m² (Rys. 4).

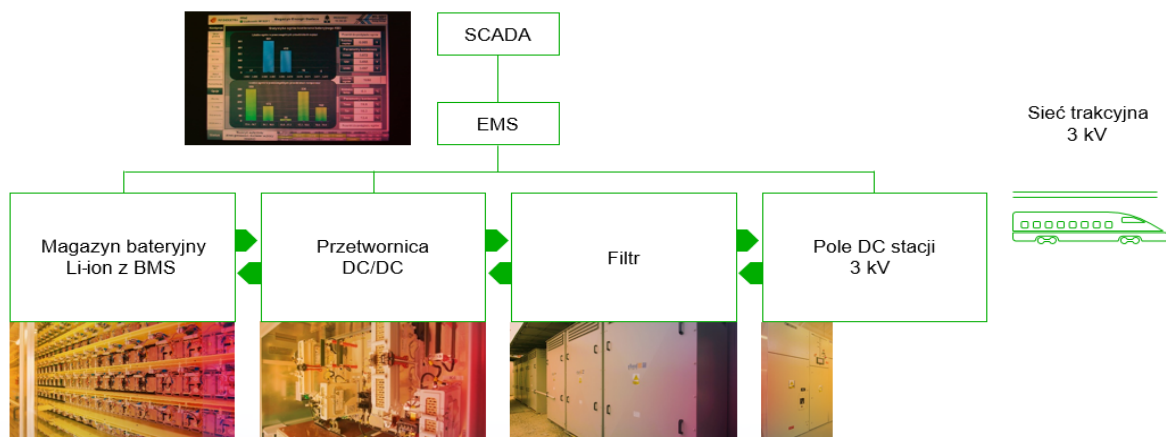
Prawidłowa praca baterii jest zagwarantowana przez działanie systemu BMS (*Battery Management System*). Jego rolą jest równomierne ładowanie oraz rozładowanie ogniw bateryjnych w taki sposób, aby były zachowane bezpieczne poziomy napięcia oraz prądu. Nadzrędnym systemem dla całej instalacji magazynowania energii jest system EMS (*Energy Management System*), który dba o to, aby magazyn pracował optymalnie i zgodnie z zapotrzebowaniem sieci trakcyjnej na moc, a także gromadzi dane i parametry pracy układu. Gromadzenie i dystrybucja danych odbywa

się za pomocą systemu SCADA (Rys. 5), dzięki czemu pracę 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.



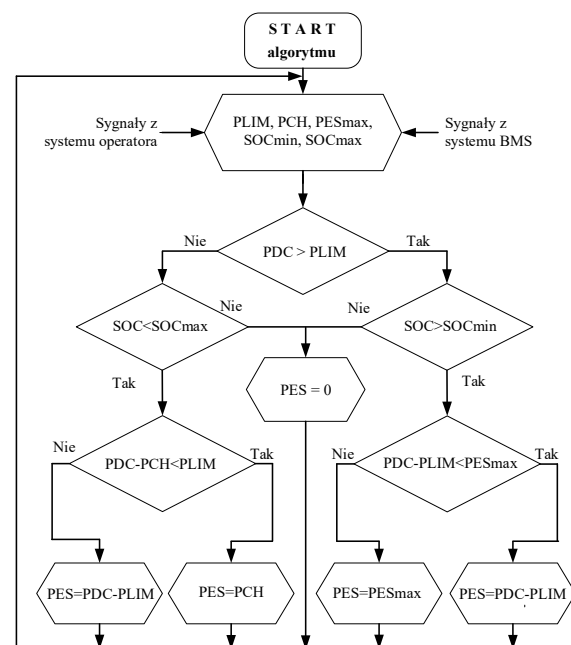
Rys. 4. Widok z góry na magazyn energii (po prawej) położony obok podstacji trakcyjnej Garbce (po lewej) (źródło: materiały PKP Energetyka S.A.)

Prototypowa instalacja ma moc 5,5 MW i pojemność użyteczną na poziomie około 1,8 MWh (pojemność gwarantowana po upływie 10 lat eksploatacji wynosi 1,2 MWh), a żywotność układu wynosi co najmniej 15 lat. Głównym celem skonstruowanego prototypu jest redukcja szczytowego obciążenia podstacji trakcyjnej wynikającego 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).



Rys. 5. Schematyczna struktura magazynu energii trakcyjnej w Garbcach (źródło: materiały PKP Energetyka S.A.)

Powyższy efekt jest możliwy do uzyskania ze względu na tryby pracy ładowania i rozładowania magazynu. Są one kształtowane przez zaimplementowany algorytm sterowania (Rys. 6) oraz nastawy, które mogą być ręcznie zmieniane przez obsługę. Podstawową nastawą jest próg redukcji mocy podstacji trakcyjnej PLIM – maksymalna 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. Z technicznego punktu widzenia istnieje możliwość ustawienia 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. Algorytm uwzględnia też progi zabezpieczające baterie przed nadmierną eksploatacją, tj. minimalny oraz maksymalny poziom naładowania magazynu SoC.



Rys. 6. Algorytm sterowania systemem magazynowania energii (Jarnut et al. 2019)

Algorytm zapewnia, 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, w wyniku zniwelowania przesyłania dużych wartości mocy w krótkim czasie przez podstację trakcyjną następuje poprawa stabilności napięcia po stronie prądu stałego podstacji trakcyjnej. To z kolei pozwala na zwiększenie natężenia ruchu pojazdów trakcyjnych i w konsekwencji na wzrost wolumenu dystrybuowanej energii bez konieczności zwiększania mocy przyłączeniowych. W rezultacie spodziewane jest również zmniejszenie oddziaływania poszczególnych podstacji trakcyjnych na zasilające je sieci dystrybucyjne przez 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.

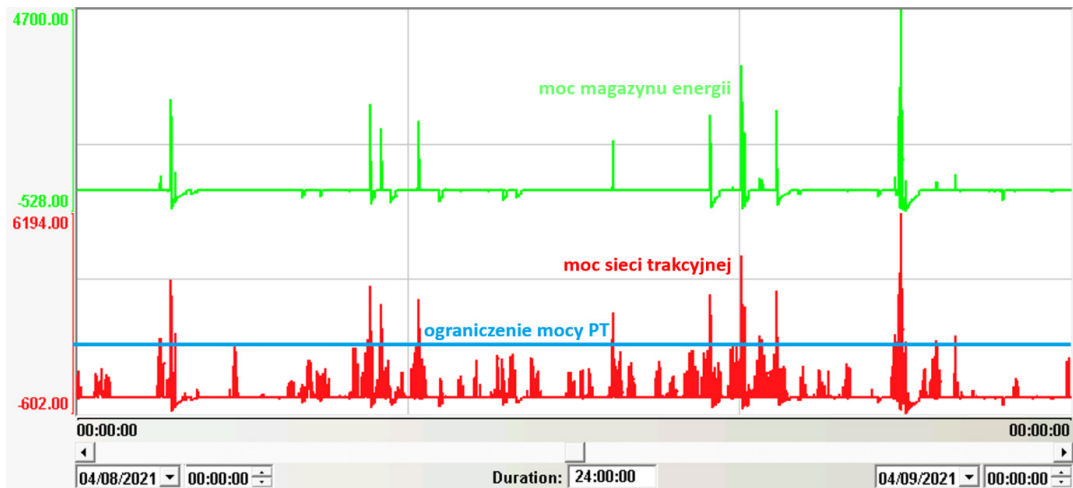
Zmniejszenie maksymalnej mocy podstacji

Wykorzystanie instalacji magazynowania energii pozwoliło zmniejszyć zarówno maksymalną moc podstacji trakcyjnej, jak i 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

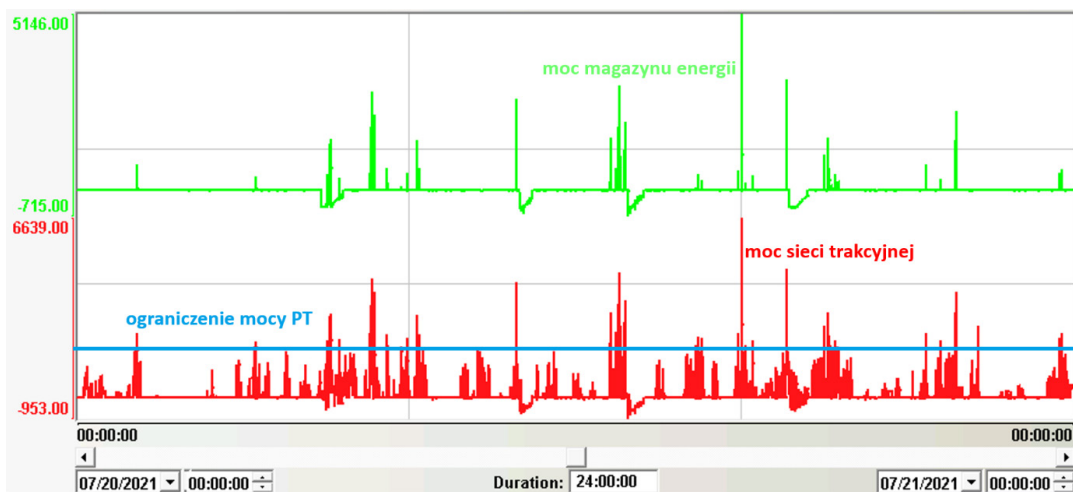
oraz 1,5 MW dla przyłącza rezerwowego). Zastosowanie magazynu energii pozwoliło zmniejszyć tę wartość najpierw do poziomu 1,5 MW, a następnie do poziomu 1,0 MW. Dalsze badania pozwolą określić, czy możliwe jest dodatkowe obniżenie mocy zamówionej poniżej 1,0 MW. Obecnie w projekcie badany jest wpływ zależności pomiędzy nastawami PCH i PLIM, a głównym celem jest określenie optymalnego zestawu tych parametrów.

Efekty zastosowanych limitów mocy zamówionej obrazują poniższe wybrane trendy pracy magazynu energii pochodzące z kilku przykładowych okresów – na górze wykresu kolorem zielonym pokazano moc elektryczną magazynu (moc dodatnia oznacza rozładowanie, a moc ujemna ładowanie), a na dole wykresu kolorem czerwonym moc elektryczną od strony sieci trakcyjnej (Rys. 7–10). Ponadto na wykresy naniesiono linię obrazującą ograniczenie mocy podstacji trakcyjnej PLIM dla dwóch badanych wartości: 1,5 MW oraz 1,0 MW. Na podstawie przedstawionych wykresów można stwierdzić, że instalacja w zdecydowanej większości z powodzeniem pokrywa krótkotrwałe zapotrzebowania na moc o wartościach przekraczających ustawione limity.

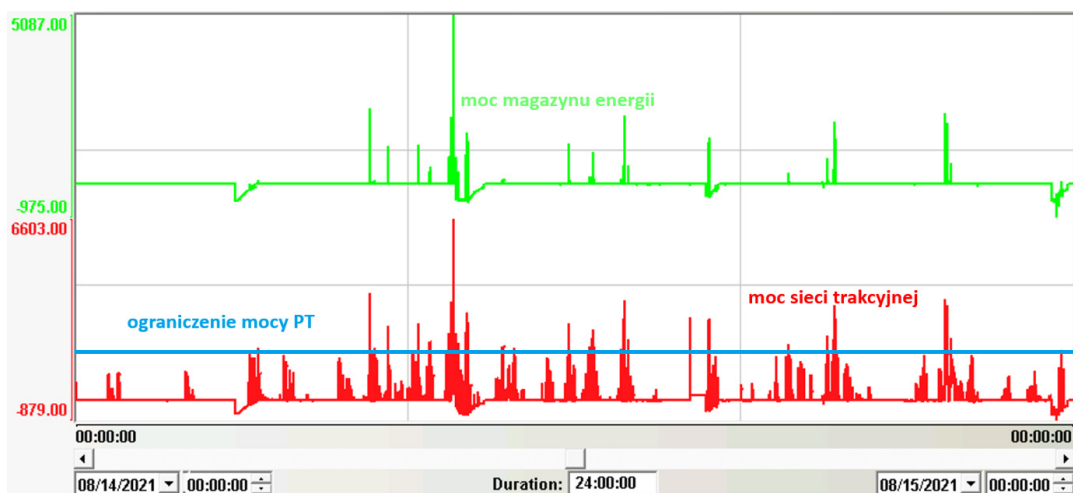
Badania eksploatacji magazynu energii pokazały również, że w ciągu dotychczasowej pracy instalacji przy nastawie PLIM rzędu 1,0 MW kilkakrotnie zdarzyły się sytuacje, gdy zapotrzebowanie sieci trakcyjnej na moc przekraczało możliwości techniczne instalacji i magazyn pracował z maksymalną mocą, tj. 5,5 MW (Rys. 11). Na chwilę obecną można stwierdzić, że wspomniane sytuacje występują sporadycznie oraz są krótkotrwałe, więc nie mają istotnego wpływu na moc średnią 15-minutową będącą obecnie podstawą do rozliczeń kosztów energii. Wskazane przekroczenia mogą mieć jednak znaczenie w przypadku zmiany okresu uśredniania pomiarów rozliczeniowych. Obecny sposób rozliczania poboru energii jest korzystny dla odbiorców cechujących się znaczną fluktuacją zapotrzebowania na moc. Zmiana rozdzielczości pomiarów rozliczeniowych, np. do 1 minuty lub do 5 minut, spowodowałaby konieczność zamówienia o wiele wyższej mocy umownej, niż ma to miejsce obecnie. Jest to jednak bardzo mało prawdopodobne.



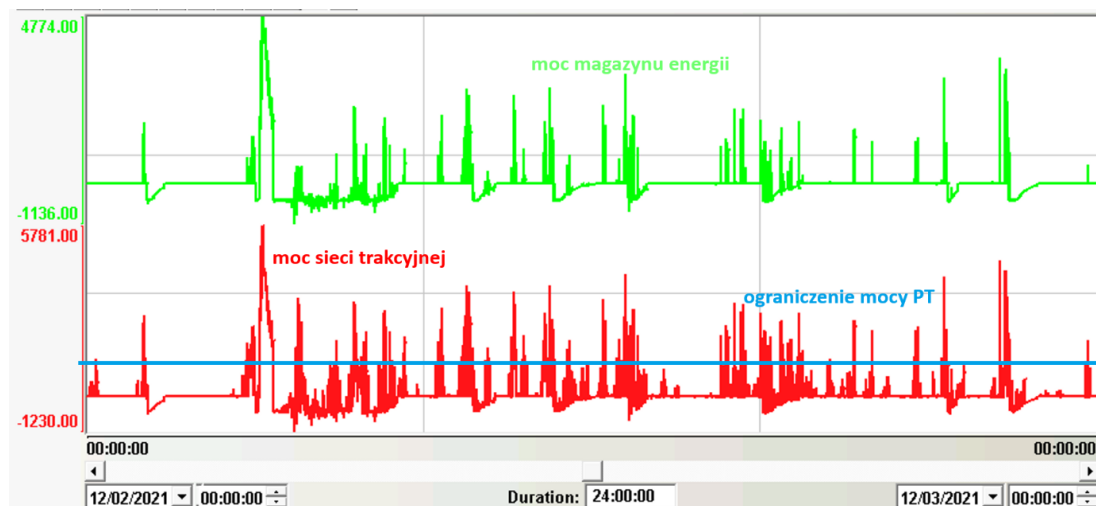
Rys. 7. Porównanie mocy magazynu energii (kolor zielony) z zapotrzebowaniem sieci trakcyjnej na moc (kolor czerwony). Maksymalna moc magazynu 4,7 MW, nastawa PLIM 1,5 MW (źródło: materiały PKP Energetyka S.A.)



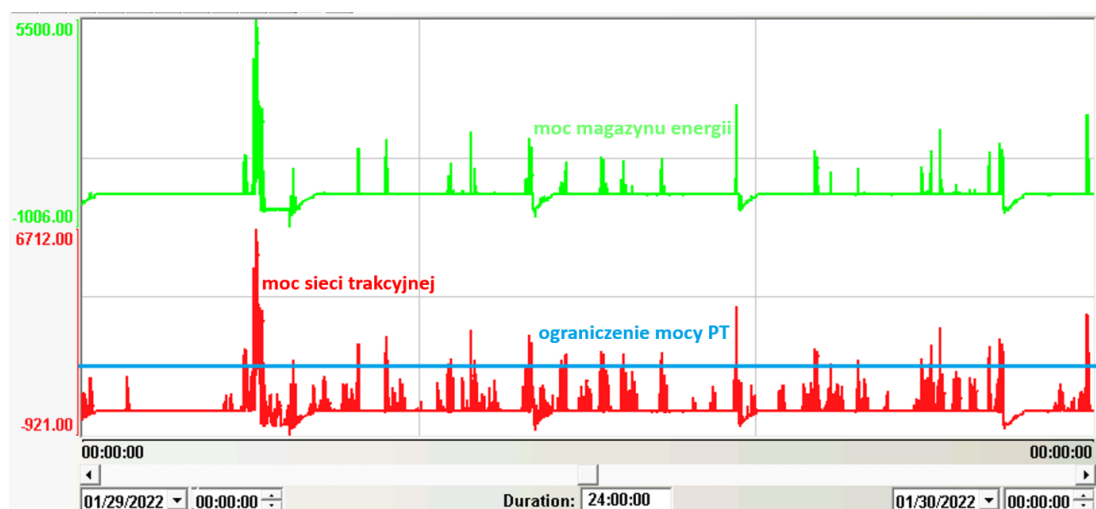
Rys. 8. Porównanie mocy magazynu energii (kolor zielony) z zapotrzebowaniem sieci trakcyjnej na moc (kolor czerwony). Maksymalna moc magazynu 5,1 MW, nastawa PLIM 1,5 MW (źródło: materiały PKP Energetyka S.A.)



Rys. 9. Porównanie mocy magazynu energii (kolor zielony) z zapotrzebowaniem sieci trakcyjnej na moc (kolor czerwony). Maksymalna moc magazynu 5,1 MW, nastawa PLIM 1,5 MW. Maksymalna moc magazynu jest identyczna jak w przypadku pokazanym na Rys. 8, pomimo innego przebiegu pracy (źródło: materiały PKP Energetyka S.A.)



Rys. 10. Porównanie mocy magazynu energii (kolor zielony) z zapotrzebowaniem sieci trakcyjnej na moc (kolor czerwony). Maksymalna moc magazynu 4,8 MW, nastawa PLIM 1,0 MW (źródło: materiały PKP Energetyka S.A.)



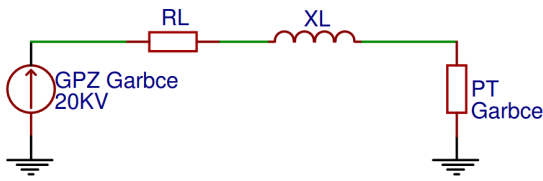
Rys. 11. Porównanie mocy magazynu energii (kolor zielony) z zapotrzebowaniem sieci trakcyjnej na moc (kolor czerwony). Praca magazynu z mocą maksymalną 5,5 MW i przekroczenie wartości PLIM = 1,0 MW (źródło: materiały PKP Energetyka S.A.)

Zmniejszenie strat w liniach zasilających podstawę trakcyjną

Jak wcześniej wspomniano, wykorzystanie magazynu energii i jego trybów pracy powinno również pozwolić na obniżenie strat energii w liniach zasilających podstawę trakcyjną. Wysokość strat określono na podstawie pomiarów z liczników energii zamontowanych na liniach 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. 12):

- rezystancja linii zasilającej podstawowej $R_{L1} = 1,244 \Omega$,
- reaktancja linii zasilającej podstawowej $X_{L1} = 2,379 \Omega$,
- rezystancja linii zasilającej rezerwowej $R_{L2} = 1,244 \Omega$,
- reaktancja linii zasilającej rezerwowej $X_{L2} = 2,379 \Omega$,
- napięcie międzyfazowe linii zasilającej $U = 20 \text{ kV}$.



Rys. 12. Schemat zastępczy linii zasilającej PT Garbce (źródło: materiały PKP Energetyka S.A.)

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

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

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:

$$\Delta E_{\text{line}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_{\text{line}}[i] \cdot \tau}{60}.$$

Porównano straty energii dla dwóch analogicznych okresów: marzec–grudzień 2020 r. (gdy magazyn energii nie został jeszcze wybudowany) oraz marzec–grudzień 2021 r. (gdy magazyn energii był już eksploatowany).

Wyniki przedstawiono w tabeli (Tab. 1) oraz w formie wykresów (Rys. 13).

Tab. 1. Straty energii w linii zasilającej dla PT Garbce za miesiące marzec–grudzień

Rok	2020	2021
Maksymalne dobowe straty energii [kWh]	70,66	28,38
Średnie dobowe straty energii [kWh]	16,51	6,56
Sumaryczne straty energii [kWh]	5051,30	2007,50

Z przeprowadzonych powyżej analiz wynika, że straty energii w liniach zasilających zmalały z 5051,30 kWh do 2007,5 kWh, co oznacza zmniejszenie strat o około 60%. Ponadto można porównać wpływ PLIM na straty energii podczas eksploatacji magazynu energii. Wyniki przedstawiono w Tab. 2.

Tab. 2. Straty energii w linii zasilającej dla PT Garbce dla PLIM = 1,5 MW oraz PLIM = 1,0 MW

Wartość nastawy PLIM [MW]	1,0	1,5
Maksymalne dobowe straty energii [kWh]	26,624	28,382
Średnie dobowe straty energii [kWh]	5,519	6,852

Pobieżna analiza może wskazywać, że osiągnięto oczekiwany cel projektu. Wraz ze zmniejszeniem wartości PLIM rośnie udział magazynu energii w zasilaniu pojazdów trakcyjnych, co w konsekwencji prowadzi do zmniejszenia obciążenia linii zasilających. Jednakże ze względu na krótki czas eksploatacji może to być zbyt pochopny wniosek i wymagane są dalsze prace badawcze.

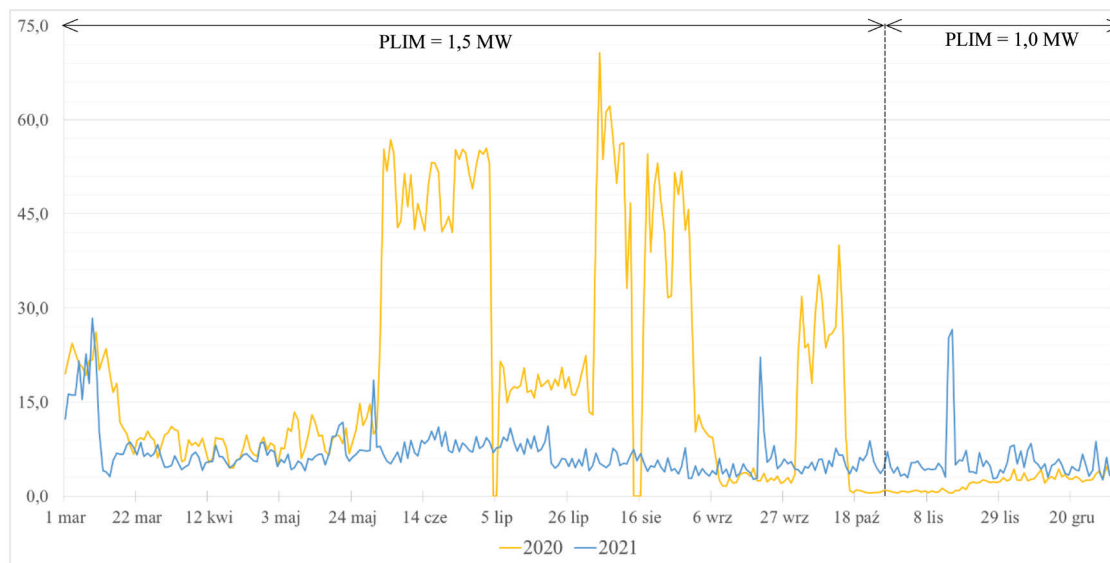
Zużycie energii w przypadku podstacji trakcyjnej bezpośrednio zależy od liczby przejazdów pociągów przy danej podstacji. Do wyznaczenia wpływu natężenia ruchu kolejowego na straty energii w liniach zasilających wprowadzono odpowiedni współczynnik:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta E_{\text{line}_i}}{L_i},$$

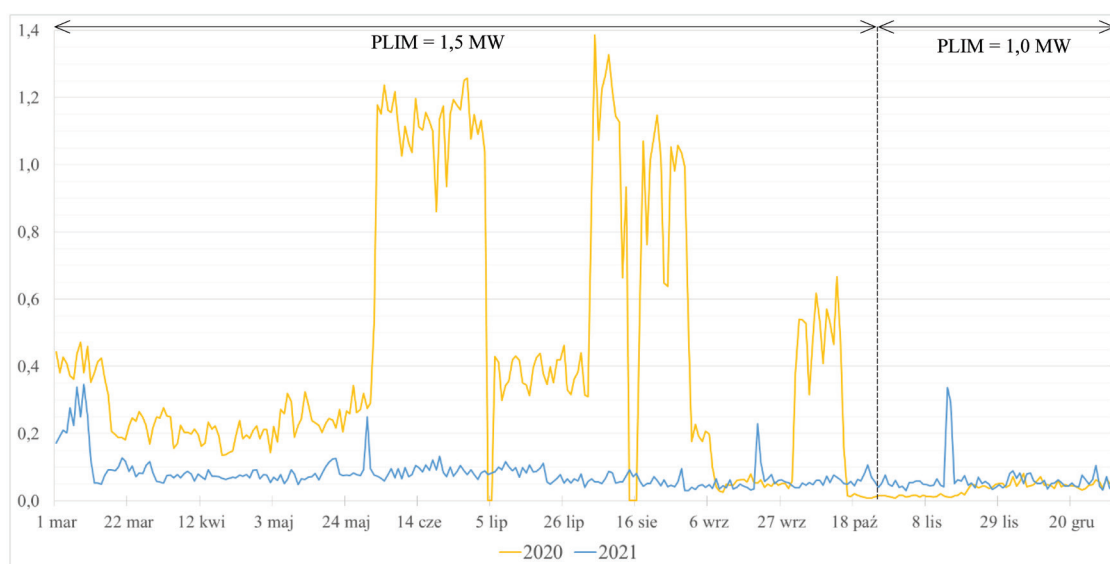
gdzie:

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. 13. Porównanie dobowych strat energii elektrycznej [kWh] w liniach zasilających PT Garbce w okresie od marca do grudnia w latach 2020 i 2021 (źródło: materiały PKP Energetyka S.A.)

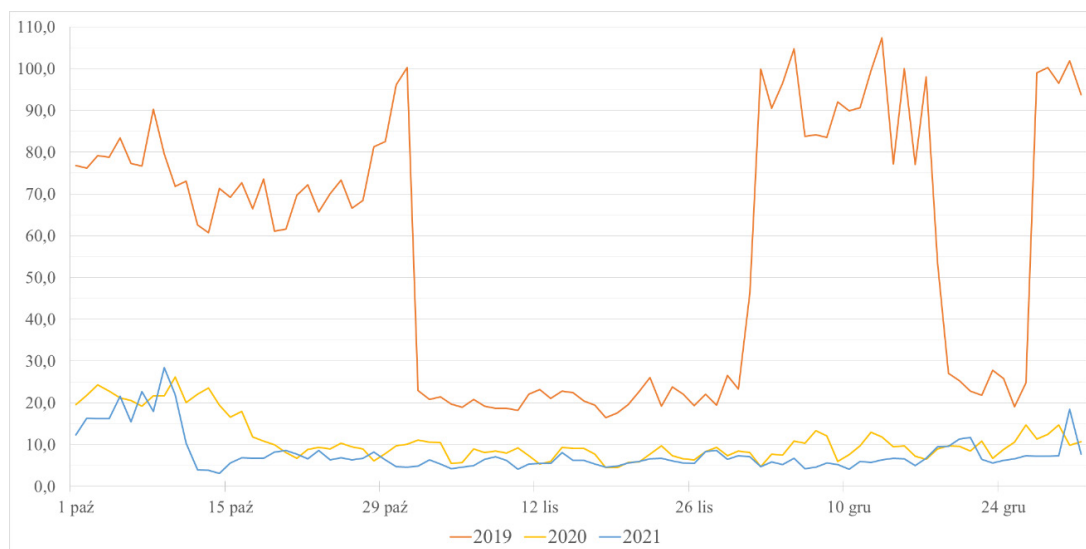


Rys. 14. Porównanie jednostkowych strat energii [kWh] w liniach zasilających PT Garbce w zależności od liczby zasilanych pociągów w okresie od marca do grudnia w latach 2020 i 2021 (źródło: materiały PKP Energetyka S.A.)

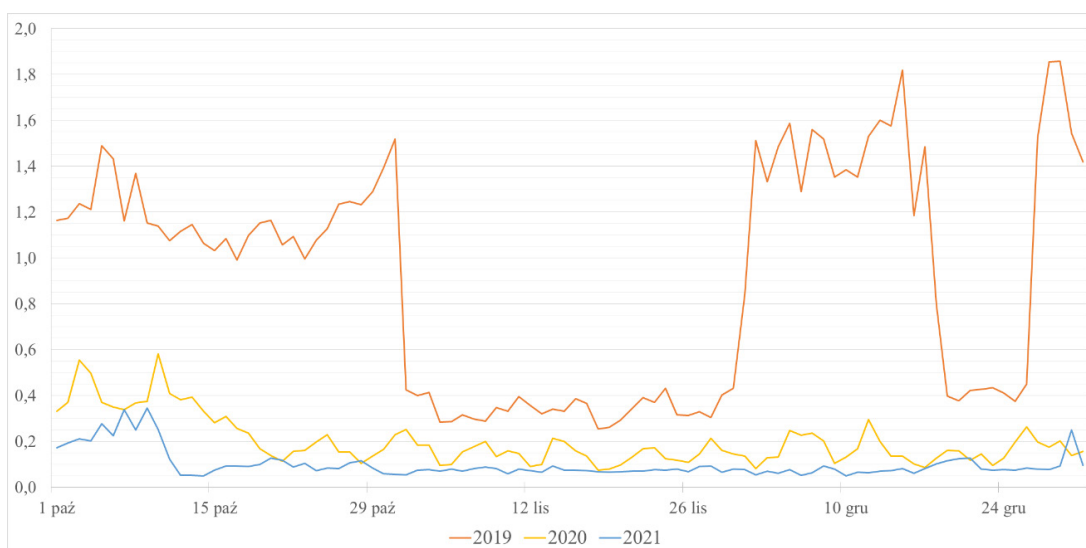
Średni jednostkowy wskaźnik strat w analizowanych okresach wynosi odpowiednio 0,355 dla 2020 r. oraz 0,077 dla 2021 r. (Rys. 14). To oznacza, że jednostkowe straty energii odniesione do liczby przejazdów pociągów zmniejszyły się o około 78%. Ponadto można porównać wpływ PLIM na jednostkowe straty energii podczas eksploatacji magazynu energii. Gdy wartość tej nastawy wyniosła 1,5 MW, to średni dzienny jednostkowy wskaźnik strat wynosił 0,081, natomiast w okresie, gdy wartość nastawy obniżono

do 1,0 MW, wartość jednostkowego wskaźnika strat spadła do poziomu 0,063. Może to stanowić kolejne potwierdzenie wpływu PLIM na osiągnięte efekty.

Aby wykluczyć wpływ zdarzeń losowych na analizowane zjawiska, przeprowadzono analogiczne porównanie dla okresu październik–grudzień dla lat 2019, 2020 i 2021. Na poniższych wykresach porównano dobowe straty energii w liniach zasilających oraz jednostkowe straty energii w liniach zasilających (Rys. 15, Rys. 16, Tab. 3).



Rys. 15. Porównanie dobowych strat energii elektrycznej [kWh] w liniach zasilających PT Garbce w okresie od października do grudnia w latach 2019, 2020 i 2021 (źródło: materiały PKP Energetyka S.A.)



Rys. 16. Porównanie jednostkowych strat energii [kWh] w liniach zasilających PT Garbce w zależności od liczby zasilanych pociągów w okresie od października do grudnia w latach 2019, 2020 i 2021 (źródło: materiały PKP Energetyka S.A.)

Tab. 3. Straty energii w linii zasilającej dla PT Garbce za miesiące październik-grudzień

Rok	2019	2020	2021
Maksymalne dobowe straty energii [kWh]	107,29	26,20	28,38
Średnie dobowe straty energii [kWh]	56,50	11,01	7,88
Sumaryczne straty energii [kWh]	5198,27	1012,47	725,04

Z przeprowadzonych powyżej analiz wynika, że straty energii w liniach zasilających zmalały

w analizowanym okresie z 5198,27 kWh w 2019 r. do 1012,47 kWh w 2020 r., a następnie do 725,04 kWh w 2021 r. Pomiędzy rokiem 2019 a 2020 straty energii zmniejszyły się o ponad 80%, i to bez zastosowania magazynu energii. Dalej, pomiędzy rokiem 2020 a 2021, nastąpiło kolejne zmniejszenie sumarycznych strat energii w liniach zasilających, aż osiągnęły one wartość 14% strat z roku 2019. W przypadku strat jednostkowych średni wskaźnik spadł z poziomu 0,910 w 2019 r. do 0,198 w 2020 r. i 0,090 w 2021 r. Zauważalny jest podobny spadek tego parametru jak

w przypadku strat energii w liniach zasilających (o 78% pomiędzy 2019 a 2020 r.), natomiast w 2021 r. uzyskano poziom 10% jednostkowych strat energii z roku 2019. Powyższa analiza wskazuje, że do gruntownego przeanalizowania wpływu pracy instalacji magazynowania energii na parametry podstacji trakcyjnej i sieci trakcyjnej wymagane jest prowadzenie dalszych prac badawczych w trakcie eksploatacji urządzenia i uwzględnienie dodatkowych czynników.

Dalsze możliwości rozwoju

Magazyn energii trakcyjnej nadal jest obiektem prac badawczych. W 2022 r. w bezpośrednim sąsiedztwie instalacji powstanie farma fotowoltaiczna o mocy około 150 kWp, co pozwoli rozszerzyć zakres projektu. W ten sposób magazyn energii będzie mógł dodatkowo współpracować ze źródłami odnawialnymi i stabilizować ich produkcję energii, co jest typowym przeznaczeniem większości tego typu obiektów budowanych w Polsce i na świecie. Nietypowy jest jednak układ połączeń – zgodnie z planami spółki elektrownia słoneczna będzie jednocześnie przyłączona do rozdzielni potrzeb własnych stacji oraz do

prostownika $3 \times 0,4 \text{ kV AC}/3 \text{ kV DC}$, który zapewni przepływ generowanej mocy do bateryjnego zasobnika trakcyjnego i/lub bezpośrednio do sieci trakcyjnej.

Spółka interesuje się również innymi niż zasobniki bateryjne technologiami magazynowania energii, w szczególności możliwością magazynowania energii elektrycznej pod postacią wodoru. Szacuje się, że roczne zapotrzebowanie na wodór w Polsce w 2040 r. przekroczy 100 TWh, a jako jedną z głównych metod jego produkcji wskazuje się wykorzystanie nadwyżek energii z OZE (Brodacki et al. 2021). Rola wodoru gwałtownie rośnie w całej Europie, co wynika m.in. z polityki klimatycznej Unii Europejskiej określonej w założeniach Europejskiego Zielonego Ładu (*European Green Deal*) czy unijnej strategii wodorowej. W ramach omawianego projektu planowana jest realizacja wodorowego systemu magazynowania energii składającego się z elektrolizerów, systemu magazynowania oraz ogniw paliwowych (Rys. 17). Zgodnie z ogólnymi założeniami, celem instalacji będzie zmagazynowanie całości energii wyprodukowanej przez elektrownię słoneczną i niewykorzystaną na potrzeby trakcyjne. Za pomocą ogniw paliwowych możliwe będzie dalsze wyprodukowanie energii w celu pokrycia potrzeb własnych podstacji trakcyjnej.



Rys. 17. Schemat planowanego wodorowego systemu magazynowania energii (źródło: materiały PKP Energetyka S.A.)

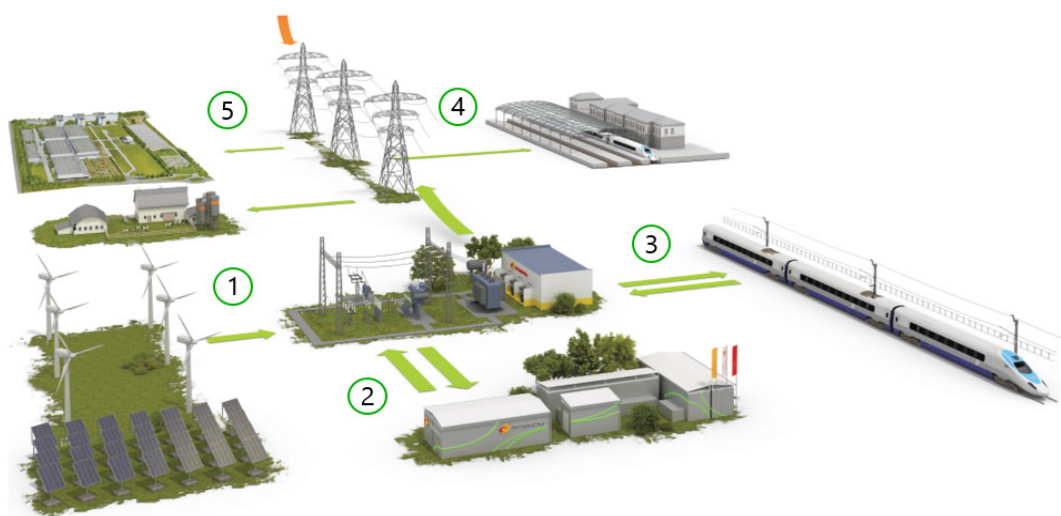
Zastosowanie wodoru nie ogranicza się tylko i wyłącznie do generacji energii elektrycznej. Równie istotny jest wysoki potencjał tego paliwa do wykorzystania w transporcie (zasilanie pojazdów). Samochody zasilane wodorem są znane i dostępne w sprzedaży, wystarczy wspomnieć chociażby takie modele jak Hyundai Nexo czy Toyota Mirai. Udział tego typu pojazdów w Polsce jest na chwilę obecną znikomy. W styczniu 2022 r. w kraju były zarejestrowane zaledwie 102 wodorowe samochody osobowe, przy czym tylko w tym miesiącu dokonano rejestracji 23 pojazdów (Polskie Stowarzyszenie Paliw Alternatywnych i Polski Związek Przemysłu Motoryzacyjnego 2022). Kluczową barierą, poza kosztami samego pojazdu, jest brak infrastruktury przeznaczonej do tankowania pojazdów – podobny problem trafił swego czasu sektor samochodów elektrycznych (Brodacki et al. 2021). Wodór jest wykorzystywany na świecie również do zasilania pojazdów trakcyjnych. Pierwszym pociągiem pasażerskim zasilanym wodorem jest Coradia iLint produkcji firmy ALSTOM. W sierpniu 2018 r. skład był wykorzystywany na liczącej blisko 100 km długości linii pomiędzy Coxhaven a Buxtehude w Dolnej Saksonii w Niemczech. Od tego momentu Coradia iLint była testowana m.in. w Holandii, Austrii i Francji (ALSTOM 2022).

W większości pojazdy zasilane wodorem są *de facto* pojazdami elektrycznymi, dodatkowo

wyposażonymi w ogniwa paliwowe, baterie elektryczne i zbiorniki wodoru. Poza tym możliwe jest również dostosowanie silników tłokowych do spalania tego paliwa – w przypadku samochodów osobowych takie próby podjął m.in. koncern BMW, który w 2005 r. oddał do sprzedaży model BMW Hydrogen 7. Wodór może być również z powodzeniem zastosowany w silnikach tłokowych większej mocy przeznaczonych do samochodów ciężarowych czy lokomotyw zasilanych olejem napędowym.

Pomyślnie wprowadzenie do eksploatacji wodowego systemu magazynowania energii przy podstacji trakcyjnej Garbce pozwoli spółce zdobyć cenne doświadczenie w obszarze nowych technologii. Produkcja własnego wodoru, nawet na małą skalę, będzie stanowiła istotny impuls do dalszych inwestycji w nowoczesne rozwiązania wykorzystujące to paliwo. Wśród najbardziej perspektywicznych można wymienić chociażby hybrydowy pociąg sieciowy służący do wykonywania napraw sieci trakcyjnej, który mógłby być zasilany wodorem zamiast olejem napędowym.

Wodorowy system magazynowania energii, farma fotowoltaiczna oraz podstacja trakcyjna i magazyn energii będą stanowić załączek lokalnego systemu bilansowania (LOB), do którego będą mogli przyłączać się inni lokalni odbiorcy energii czy prosumenci/producenci (Rys. 18).



Rys. 18. Przykładowy model lokalnego obszaru bilansowania (LOB): 1 – lokalne OZE generujące energię, 2 – nadmiar energii gromadzony jest w zasobniku, 3 – zasobnik umożliwia również gromadzenie energii z rekuperacji, 4, 5 – do LOB mogą też przyłączać się lokalni odbiorcy energii (źródło: materiały PKP Energetyka S.A.)

Kolejną 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 planuje w kolejnych latach wybudować blisko 300 trakcyjnych zasobników energii. To działanie jest konieczne do dalszego rozwoju polskiej kolei i wzmacniania zasilającego ją systemu elektroenergetycznego, 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 wiatr nie będzie wiał.

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.

Bibliografia:

- Alstom, informacje prasowe spółki, <https://www.alstom.com/solutions/rolling-stock/coradia-ilitntm-worlds-1st-hydrogen-powered-train> [dostęp: 1.03.2022].
- Brodacki D., Gajowiecki J., Hajduk R. et al. (2021), *Zielony wodór z OZE w Polsce. Wykorzystanie energetyki wiatrowej i PV do produkcji zielonego wodoru jako szansa na realizację założeń Polityki Klimatyczno-Energetycznej UE w Polsce*, opracowanie Dolnośląskiego Instytutu Studiów Energetycznych i Polskiego Stowarzyszenia Energetyki Wiatrowej, Wrocław, <https://dise.org.pl/Raport-Zielony-Wodor-z-OZE.pdf> [dostęp: 1.03.2022].
- Jarnut M., Kaniewski J., Benysek G., Obyrcki P., Artyszak D., Dzienis W., Anielak P. (2019), *Sposób sterowania stacjonarnym systemem magazynowania energii do zastosowań w podstacjach trakcyjnych, zgłoszenie patentowe nr P.431402*, Polska.
- Polskie Stowarzyszenie Paliw Alternatywnych i Polski Związek Przemysłu Motoryzacyjnego (2022), *Licznik elektromobilności – styczeń 2022*, opracowanie.
- Tomaszewski R. (2019), *Sieć do zmiany. Jak zreformować polski sektor dystrybucji energii elektrycznej*, Polityka Insight, Warszawa.
- Wawrzyniak A. (2013), *Elektryczne pociągi zespołowe ETR610 serii ED250 dla PKP Intercity S.A.*, „TTS Technika Transportu Szynowego” 9: 20–24.

Traction energy storage system of PKP Energetyka S.A. Project results and further possibilities for development

Abstract: This article describes a modern high-power traction energy storage system implemented by PKP Energetyka S.A. as a result of a research and development project co-financed from EU sources. The text presents the operation of the pilot installation, describes its individual components and shows the influence of the energy storage on the operation of the accompanying traction substation. The article ends with a chapter on further possibilities for the development of this technology in Poland.

Keywords: traction energy storage system, ordered capacity reduction, reduction of power losses

Damian Artyszak

Starszy Specjalista
Biuro Badań i Rozwoju
PKP Energetyka S.A.
d.artyszak@pkpenergetyka.pl

