

Magazyny energii i lokalne obszary bilansowania jako sposób na Zieloną Kolej

Magazyny energii i lokalne obszary bilansowania jako sposób na Zieloną Kolej

Piotr Biczek, Daniil Holoshchapov, Patryk Klemczak, Piotr Obrycki, Michał Reguła, Alicja Taczalska –
PGE Energetyka Kolejowa Operator

Streszczenie

Referat przedstawia problematykę stosowania magazynu energii (ME) jako zintegrowanego elementu sieci w kolejowych podstacjach trakcyjnych (PT). Obecnie kolej dąży do dalszej minimalizacji śladu węglowego, zwiększanie niezawodności zasilania oraz bezpieczeństwa dostaw energii. Podstacje trakcyjne stanowią małe lokalne obszary bilansowania (LOB). Obszary te są w pewnych warunkach zdolne do pracy wydzielonej. Głównym węzłem LOB jest szyna SN podstacji trakcyjnej. Do niej przyłączone są elementy odbiorcze i źródłowe oraz magazyny energii. Artykuł omawia wybrane zagadnienia przyłączania obiektów, wymagania dla sterowania, przedstawione są wybrane wyniki badań symulacyjnych. Przedstawiono również realizowane i planowane projekty pilotażowe. Istotną częścią zagadnienia jest zastosowanie sterowania cyfrowego PT w oparciu o interfejs IEC 61850.

1. Wstęp

Obecnie obserwujemy nowy rozdział w historii kolejnictwa. Trwa intensywna modernizacja i rozbudowa kolei. Główną przyczyną jest potrzeba rozwoju masowego transportu ludzi i towarów, który z jednej strony będzie przyjazny środowisku, a z drugiej szybki, bezpieczny i niezawodny. Te wszystkie warunki spełnia kolej. Trwające prace modernizacyjne mają zwiększyć prędkości i przepustowości linii kolejowych. Wiele nieczynnych połączeń jest przywracanych inne są modernizowane. Mimo rozpoczęcia budowy linii kolej dużej prędkości, zasilanej napięciem przemiennym 25 kV, w znanym horyzoncie czasowym zasilanie prądem stałym 3 kV będzie systemem dominującym. Należy zatem wciąż pracować nad udoskonaleniem tego systemu.

Z punktu widzenia operatora systemu dystrybucyjnego odpowiedzialnego za zasilanie polskiej kolei kluczowe znaczenie ma program Zielona Kolej [2], którego celem jest ciągła poprawa efektywności energetycznej oraz dalsze ograniczenie emisji CO₂. W liczbach program ma zapewnić zmniejszenie zużycia energii o 1,2 TWh do 2030, co przełoży się na ograniczenie emisji CO₂ o 1 000 000 ton. Program składa się z trzech części:

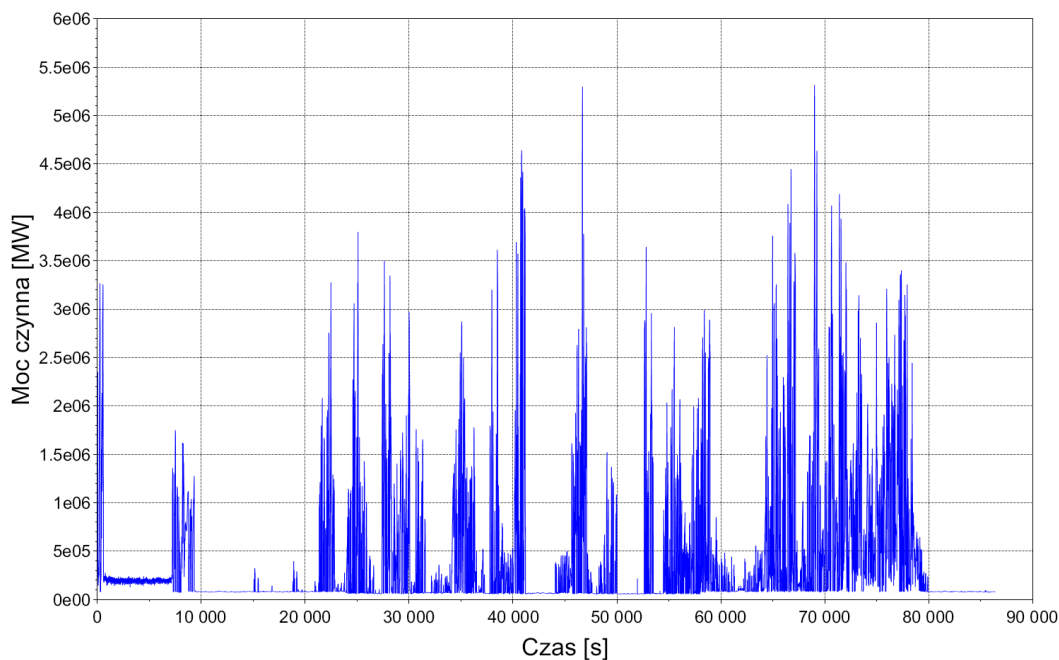
- zwiększenia receptywności sieci trakcyjnej,
- wdrożenia eco-drivingu,
- budowy i przyłączania OZE do obiektów i sieci kolejowych.

Odpowiednio duża receptywność sieci da oszczędności energii trakcyjnej rzędu 10-15%, eco-driving kolejne 5-10%, zaś źródła OZE mogą dostarczyć nawet 20 GWh energii rocznie. Perłą w koronie jest tu projekt Sensum [5] realizowany przez PGE Energetyka Kolejowa.

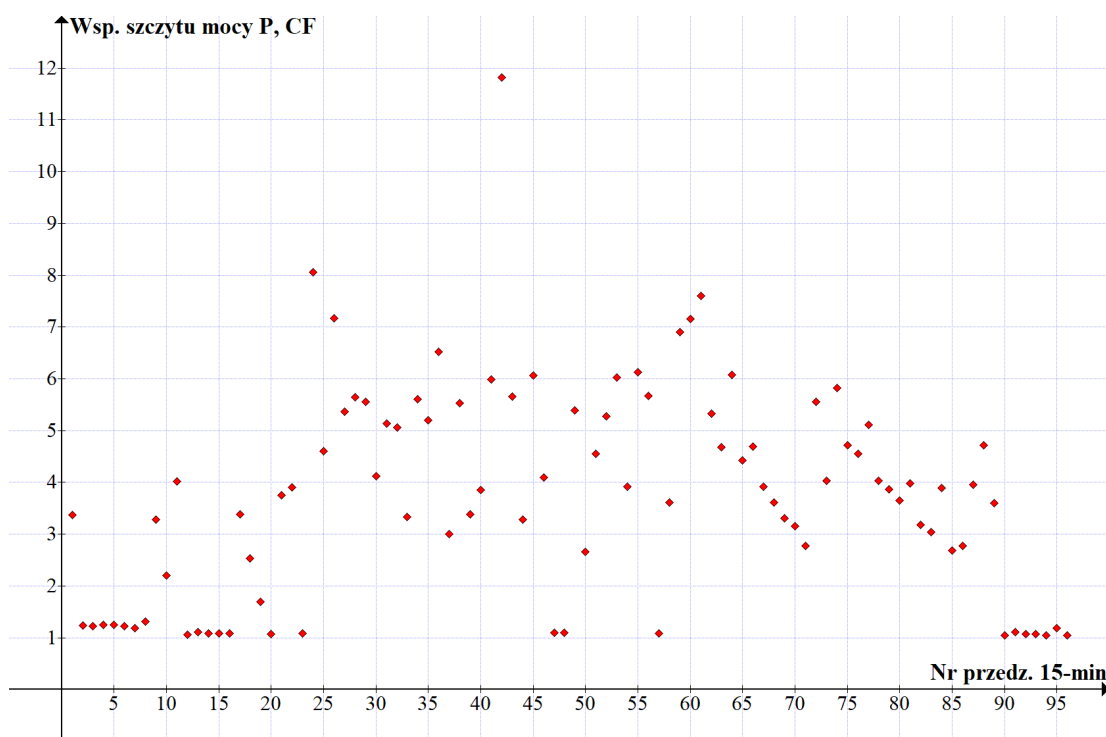
PGE Energetyka Kolejowa Operator jest odpowiedzialna za umożliwienie realizacji tych celów w kontekście sieciowym. Dlatego realizuje i planuje liczne projekty rozwojowe, które mają umożliwić rozwój Zielonej Kolei. Można tu wymienić przede wszystkim następujące projekty:

- DROPT – budowy i eksploatacji mikrosieci prądu stałego przy PT Garbce, LK 271, [1],
- BIKE – opracowanie koncepcji, budowa i eksploatacja kolejowych węzłów energetycznych (KWE),
- PT4.0 – opracowanie i wdrożenie technologii cyfrowych PT oraz uzależnień pomiędzy obiektami, w tym cyfrowy kolejowy węzeł energetyczny (CKWE),
- Mikrosieci – kompleksowe wsparcie zasilania linii kolejowych LK 9, LK 131, LK 351, LK 271 przez KWE.

W obecnym planie rozwoju przewidziano zabudowę 45 CKWE z magazynami energii przy wybranych podstacjach trakcyjnych w całym kraju (rys. 1). Lista ta szybko rośnie i planowane jest już dodanie kolejnych obiektów.



Rys. 4. Przykładowy profil mocy czynnej podstacji trakcyjnej dla linii kolejowej o dość dużym natężeniu ruchu



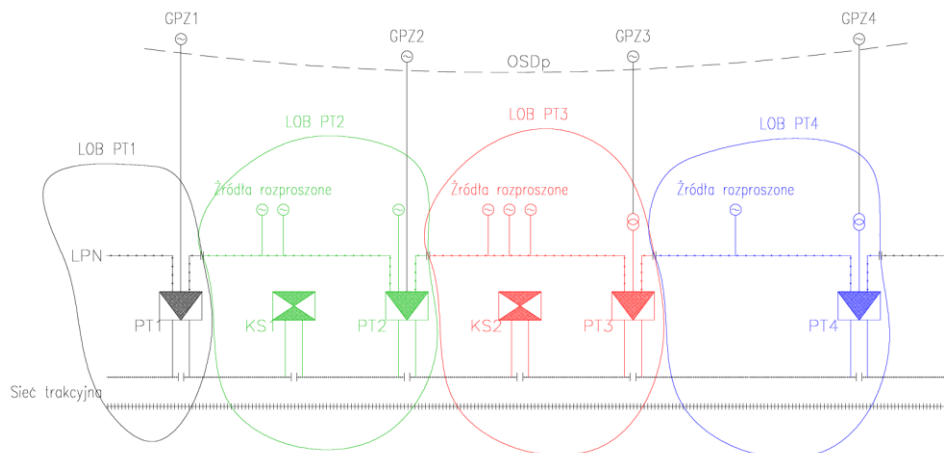
Rys. 5. Dobowy profil współczynnika szczytu mocy czynnej w przedziałach 15-minutowych odpowiadający profilowi mocy z rys. 4

3. Lokalny obszar bilansowania

Jak wspomniano wyżej PT zasilą fragment sieci trakcyjnej oraz linie potrzeb nietrakcyjnych i innych odbiorców. Z punktu widzenia sieci OSDp jest to ograniczona obszarowo gałąź KSE zasilana jednopunktowo. Każdą PT można uznać za swoisty lokalny obszar bilansowania. Coraz częściej bowiem oprócz odbiorów przyłączane są rozproszone jednostki wytwórcze. Przykładowy układ LOB wzdłuż linii kolejowej przedstawia rys. 6. Takie LOB tworzą się wokół PT, którą nazywamy wtedy kolejowym węzłem energetycznym (KWE).

Intencją PGE Energetyka Kolejowa Operator jest zapewnienie możliwości przyłączania do LOB elektrowni rozproszonych oraz ich praca wyspowa, co ma zwiększyć niezawodność zasilania kolei, ale również

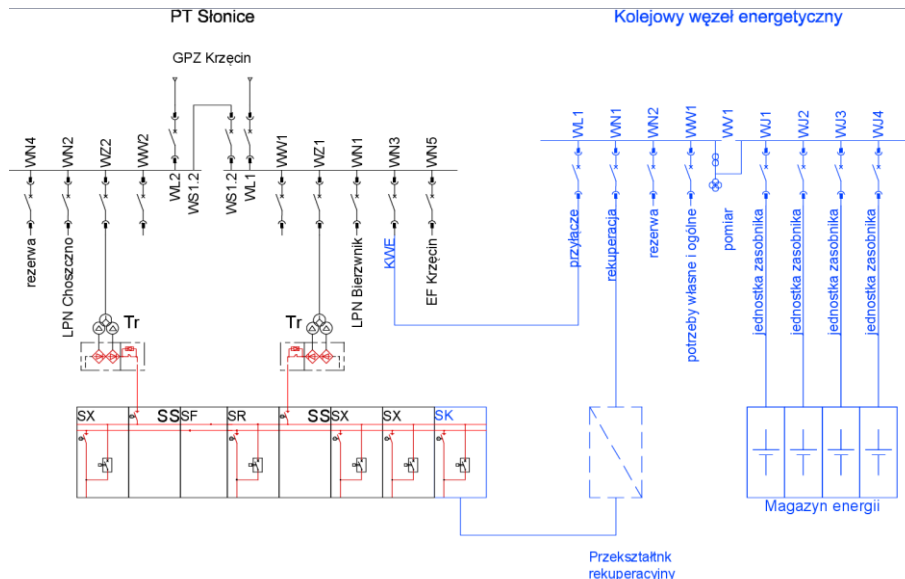
zmniejszyć negatywne oddziaływanie na obiekty sąsiadujące poprzez regulacje przepływów mocy czynnej w liniach zasilających od strony OSDp. Operator nadrzędny będzie obciążany wyłącznie mocą zbliżoną do średniej. Żeby zwiększyć zdolność lokalnego bilansowania mocy planuje się zabudowę magazynów energii jako całkowicie zintegrowanego elementu sieci. Dzięki temu powstanie LOB zdolny do całkowitego lub prawie całkowitego pokrycia zapotrzebowania kolei na energię elektryczną. Instalację pilotażową przygotowuje się przy PT Słonice (LK 351).



Rys. 6. Położenie LOB wzdłuż linii kolejowej

Wielkość elektrowni słonecznych niezbędnych do zbilansowania mocy w danej PT wyznacza się na podstawie danych z liczników energii w narzędziu SOWA, które zostało opracowane w Biurze Badań, Rozwoju i Finansowania Pomocowego PGE Energetyka Kolejowa Operator. Następnie metodami symulacyjnymi wyznacza się wielkość magazynu energii przy założonej strategii sterowania.

KWE umożliwia również przyłączenie przekształtnika rekuperacyjnego lub hybrydowego magazynu energii, które zapewnią receptywność sieci trakcyjnej. Projektowaną strukturę PT z kolejowym węzłem energetycznym tworzącym LOB przedstawia rys. 7.



Rys. 7. Schemat PT Słonice z przyłączonym KWE, magazynem energii i urządzeniem rekuperacyjnym, razem z EF Krzęcin i odbiorami na LPN Choszczno tworzą LOB

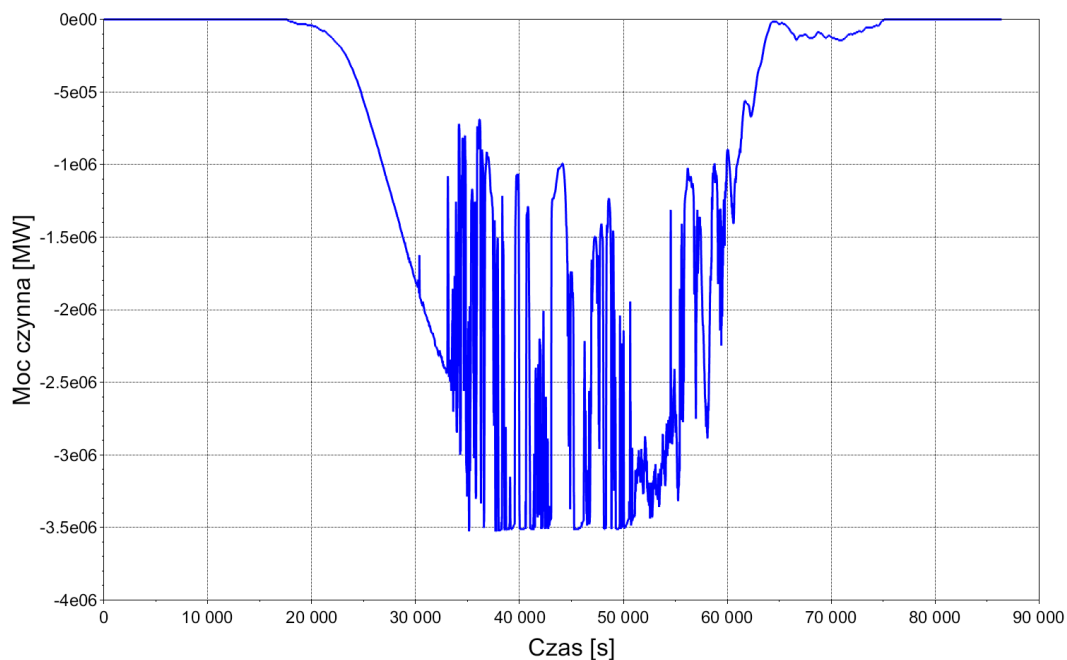
4. Symulacja pracy KWE

Celem potwierdzenia założeń, doboru wielkości magazynu, sprawdzenia algorytmów sterowania przeprowadzono obliczenia symulacyjne, których celem było wyznaczenie zapotrzebowania na pojemność magazynu oraz skuteczność lokalnego bilansowania mocy.

Przygotowano model symulacyjny PT Słonice z KWE (rys. 8), który zasilono profilami obciążenia i generacji PV, zmierzonymi w obiektach PGE Energetyka Kolejowa Operator. Obliczenia wykonano uwzględniając:

-
- Diagram illustrating a power system configuration with two main parts connected by a transmission line.
- Left Part (Main System):**
- Top: A voltage source g_GPZ connected to a series impedance z_SEE .
 - Below z_SEE is a load n_GPZ .
 - A transmission line with series impedance I_PKP1 connects n_GPZ to a busbar.
 - The busbar is labeled $WL1$ and has a fault o_PT34 (represented by a triangle) and a voltage source g_PV1 connected to it.
 - Two other buses are connected to the main busbar: $WN3$ (with series impedance I_PV1) and $WN5$ (with series impedance I_KWE1).
 - The busbar is also connected to a fault n_PT-SN .
- Right Part (Faulted System):**
- A fault n_KWE is connected to the main system via a transmission line with series impedance I_ME .
 - The fault n_KWE is connected to a busbar labeled $WL1$.
 - The busbar $WL1$ has a voltage source g_REK connected to it.
 - A voltage source g_ME is connected to the fault n_KWE via a series impedance I_ME .
- Legend:**
- Blue text: nazwy pól (field names)
 - Green text: nazwy obiektów symulacyjnych (simulation objects)

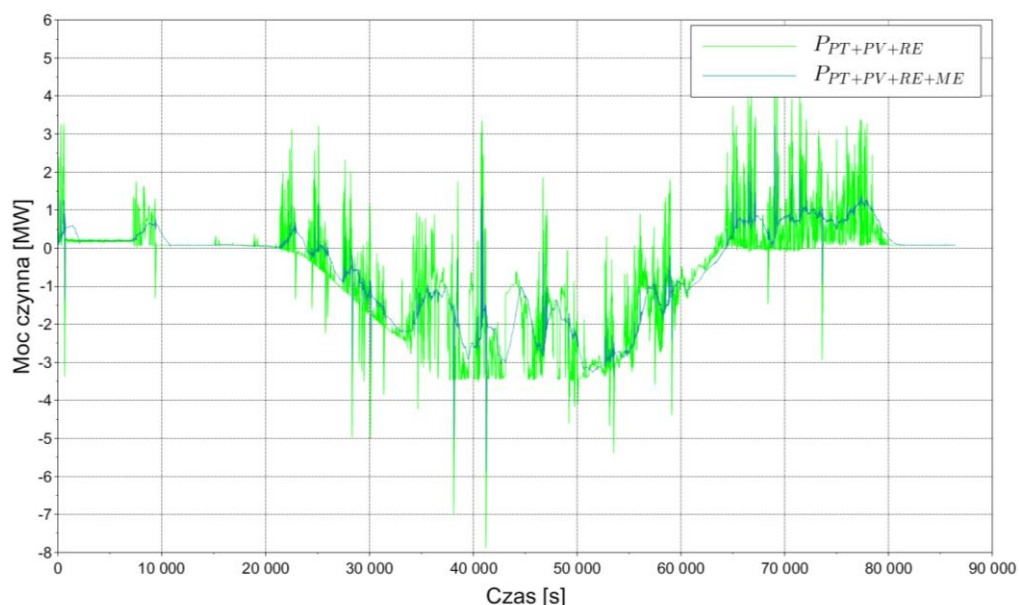
-XXVI KONFERENCJA SPIE ENERGOTEST - REFERAT NR 17-



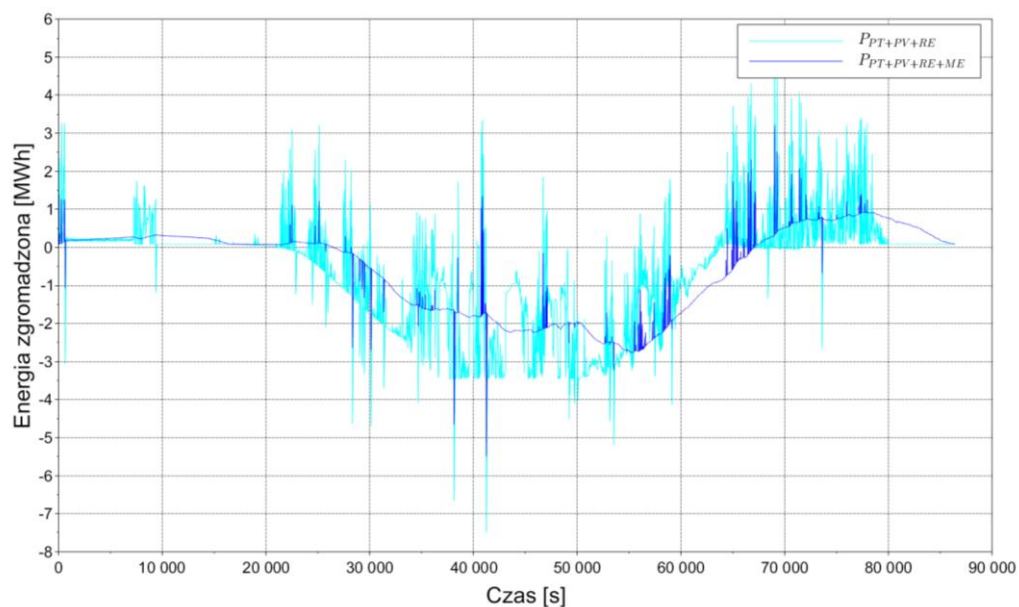
Rys. 10. Profil mocy elektrowni słonecznej wykorzystany w symulacji

Symulacja polegała na rozwiązaniu równania mocy węzła KWE przy zastosowaniu strategii sterowania magazynem opracowanej w Biurze Rozwoju PGE Energetyka Kolejowa Operator. Uwzględniono dynamikę magazynu energii oraz okres dT wystawiania wartości zadanych do magazynu energii. Założono jednoczesność pomiarów mocy wejściowych oraz brak opóźnienia pomiędzy pomiarem a sterowaniem.

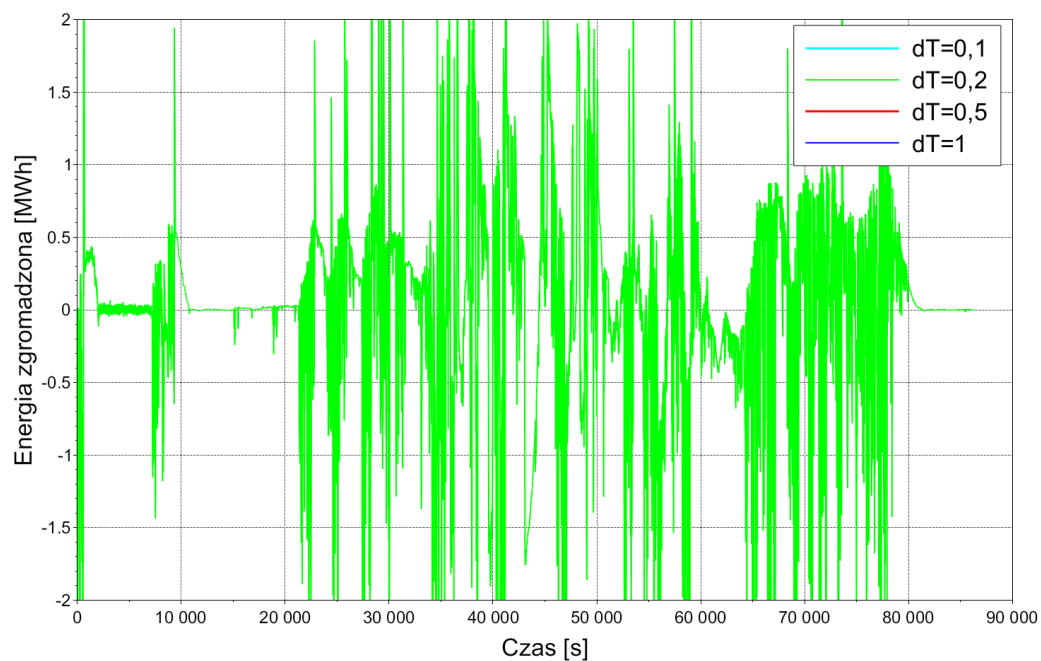
Wyniki obliczeń przedstawia rys. 11 - 15. Przedstawiono tu profil mocy pobieranej z sieci OSDp oraz profil mocy magazynu energii.



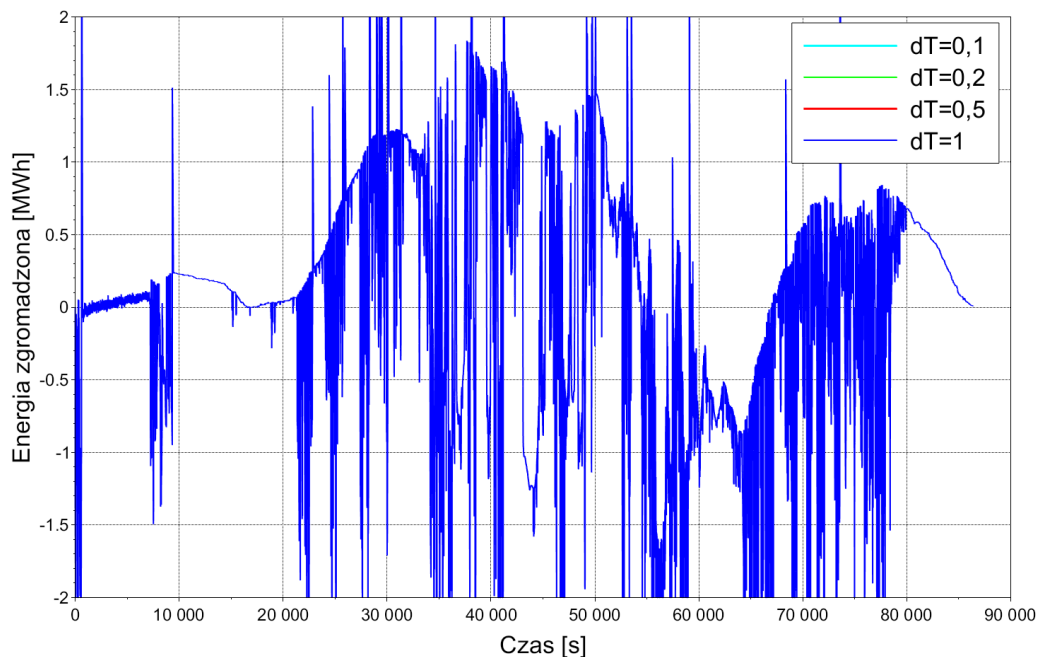
Rys. 11. Profil mocy pobieranej z sieci OSDp przez PT przed i po zabudowie KWE i magazynu energii dla okresu sterowania $dT = 0,2$ s



Rys. 12. Profil mocy pobieranej z sieci OSDp przez PT przed i po zabudowie KWE i magazynu energii dla okresu sterowania $dT = 1$ s

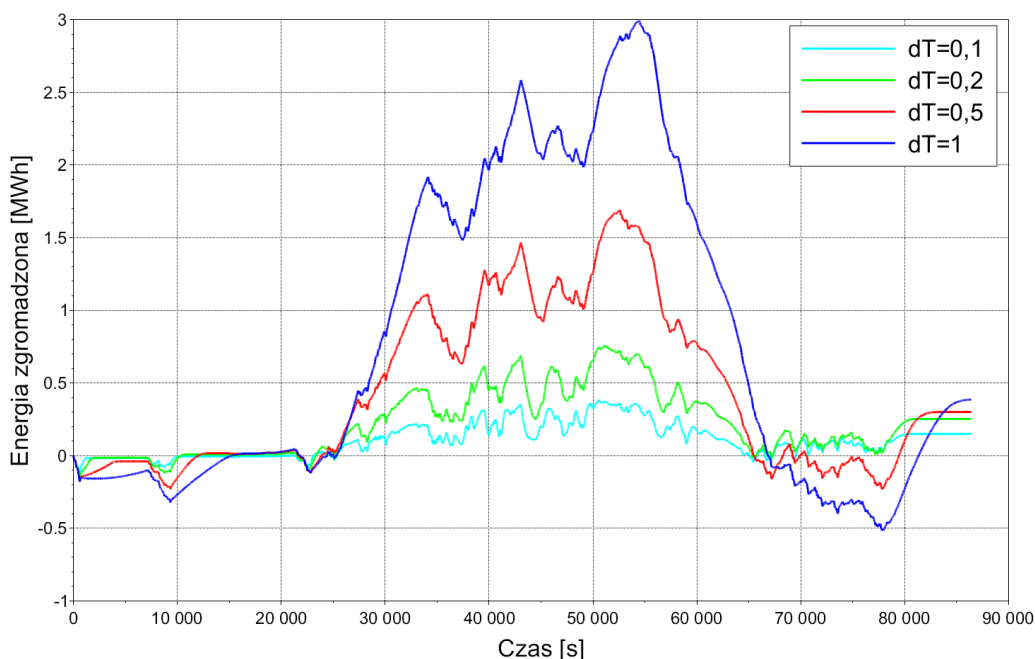


Rys. 13. Profil mocy czynnej magazynu dla okresu sterowania $dT = 0,2$ s



Rys. 14. Profil mocy czynnej magazynu dla okresu sterowania $dT = 1$ s

Zaobserwowano silną zależność zapotrzebowania na pojemność magazynu w funkcji okresu sterowań magazynu energii. Bardzo duża dynamika zmian mocy trakcyjnej wymaga szybkich i precyzyjnie sterowanych magazynów. Niezbędna jest dokładana synchronizacja pomiarów mocy.



Rys. 15. Zapotrzebowanie na pojemność magazynu w zależności od długości kroku sterowania

5. Podstacja cyfrowa IEC 61850

Przeprowadzone analizy oraz omówione wyżej badania symulacyjne pokazują, że dla prawidłowego działania KWE niezbędne jest prowadzenie dokładnych i cechowanych czasem pomiarów mocy w polach rozdzielnic SN oraz 3 kV, a na ich podstawie wyznaczanie sterowań dla ME i elektrowni PV. Wymaga to zabudowy w PT komputera sterującego procesami, zdolnego do szybkiej komunikacji ze sterownikami pól i urządzeń elektroenergetycznych.

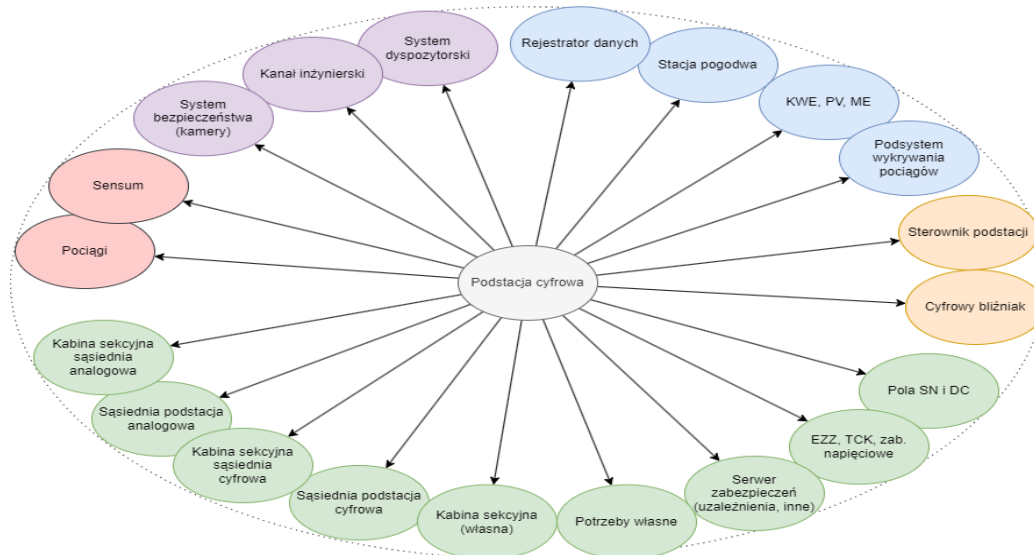
Obecnie sterowanie PT odbywa się wyłącznie zdalnie ze stanowiska dyspozytorskiego. W PT wykorzystywana jest powolna i zamknięta szyna stacyjna CAN z protokołem SWPP2. Protokół ten nie zapewnia cechowania czasem pomiarów i sterowań. Szyna CAN jest zbyt wolna i nie pozwala na swobodne

dołączanie nowych urządzeń. Zabezpieczenia międzypolowe oraz stacyjne realizowane są sygnałami binarnymi. Również uzależnienia międzystacyjne realizowane są prostą logiką bez możliwości wymiany danych pomiarowych pomiędzy obiektami. Ograniczenia te w praktyce uniemożliwiają skuteczną realizację sterowania LOB, szczególnie w wypadku pracy wyspowej oraz implementacji nowych automatyk obszarowych.

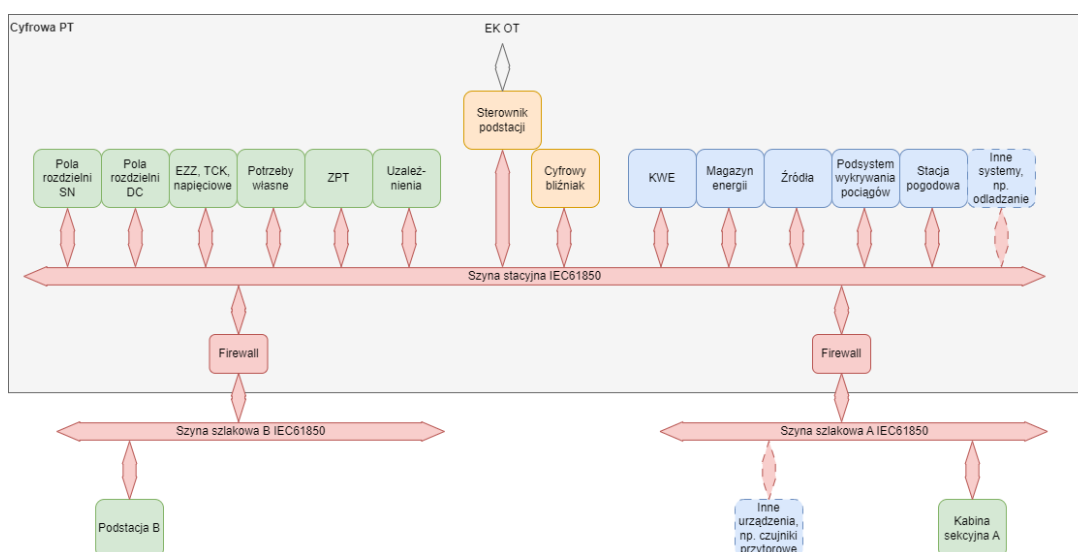
Dla rozwiązania powyższego problemu opracowano koncepcję podstacji trakcyjnej cyfrowej, gdzie szyna stacyjna CAN jest zamieniana na szynę stacyjną IEC 61850. Automatyki polowe, międzypolowe oraz stacyjne realizowane są mechanizmami standardu IEC 61850, przede wszystkim komunikatami GOOSE. Jednocześnie uzależnienia między obiektami realizowane są komunikatami R-GOOSE. Dzięki temu możliwa będzie precyzyjna synchronizacja pomiarów i sterowań. Eksperyment pokaże jakiej dokładności synchronizacja czasu w systemie będzie konieczna. Obecnie zakłada się synchronizację PTP.

Instalacje pilotażowe planuje się na linii kolejowej LK 4. Obejme ona dwie sąsiadujące PT oraz KS pomiędzy nimi. Obiekty zostaną poddane modernizacji poprzez wymianę sterowników polowych pól SN, pól 3 kV, sterowników aparatów sekcjonowania sieci trakcyjnej, ułożenie redundantnej sieci IEC 61850 wewnątrz obiektów. Zostanie wykonane nowe, szybkie, redundantne połączenie światłowodowe pomiędzy obiema PT i KS, umożliwiające przesył komunikatów R-GOOSE. Wszystkie obiekty, w tym KS, zostaną przystosowane do przyłączania magazynów energii. Siłą rzeczy wszystkie urządzenia zabudowywane lub przyłączane do tych podstacji będą musiały mieć zaimplementowane sterowanie, pomiary i raportowanie w oparciu o interfejs IEC 61850.

Zidentyfikowane szereg urządzeń, które staną się aktorami nowego systemu, połączonymi szyną stacyjną i procesową IEC61850. Oprócz istniejących urządzeń, planuje się implementację mechanizmów pozwalających dołączyć lub utworzyć KWE, przyłączyć źródła energii i magazyny oraz urządzenia wspomagające: stację pogodową, system wykrywania pociągów i inne obecnie nieznane.



Rys. 16. Aktorzy w strukturze PT cyfrowej z kolejowym węzłem energetycznym



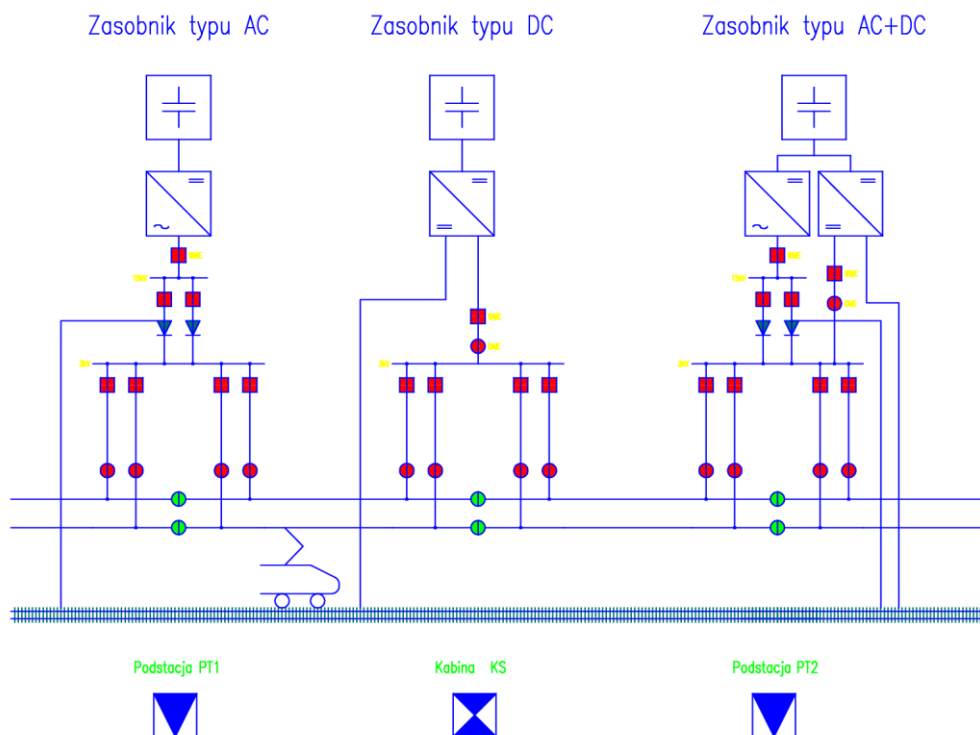
Rys. 16. Struktura PT cyfrowej z kolejowym węzłem energetycznym

6. Wymagania dla magazynów energii

Wyniki opisanych prac oraz doświadczenia eksploatacyjne z eksperymentów przekładają się na wymagania dla urządzeń zabudowywanych w podstacji cyfrowej. Kluczowym urządzeniem dla utworzenia i zarządzania lokalnym obszarem sterownia jest magazyn energii. Stąd szczególną uwagę poświęca się temu zagadnieniu. W odróżnieniu od magazynów powszechnie stosowanych do pracy ze źródłami odnawialnymi lub do świadczenia usług systemowych, te stosowane w podstacjach trakcyjnych jako w pełni zintegrowane elementy sieci PGE Energetyka Kolejowa Operator muszą wyróżniać się w następujących obszarach:

- strukturze,
- sterowalności i obserwowalności,
- parametrach elektrycznych,
- dynamice,
- odporności na zakłócenia i przepięcia.

Na rys. 17 przedstawiono podstawowe struktury magazynów energii. Obecnie zabudowany jest jeden zasobnik w typie DC. Magazyn ten poprawnie realizuje podstawowe funkcje, głównie kompensacji szybkie impulsów poboru mocy trakcyjnej. Może być również zastosowany w kabinach sekcyjnych. W kolejnych dwóch PT zostaną zabudowane magazyny w typie AC. Tutaj celem jest kompensacja impulsów mocy trakcyjnej oraz integracja źródeł słonecznych. W kolejnych aplikacjach pojawia się również magazyny w typie mieszanym AC-DC, które połączą funkcje obu wcześniejszych oraz umożliwią odbiór energii hamowania odzyskowego. Wybór struktury dla danej PT będzie wynikał z analizy potrzeb lokalnych.



Rys. 17. Struktury magazynów energii przy podstacjach trakcyjnych

Magazyn powinien spełniać określone wymagania odnośnie pomiaru napięć, prądów i mocy. Symulacje pokazują, że pomiary prądów i napięć powinny być wykonywane w reżimie normy PN-EN 61000-4-30 dla 10-okresowych przedziałów przylegających, a wyznaczenie mocy odbywać się będzie według normy IEEE 1459. Wartości te są cechowane czasem w momencie wyznaczenia. Wystarczające jest spełnienie wymagań dokładności dla klasy S. Magazyn energii musi również szybko reagować na polecenia sterujące. W wypadku mocy czynnej wymagane jest odbieranie nowego sterowania co 200 ms, a w wypadku niektórych funkcji zabezpieczeniowych w czasie rzędu 20 ms.

Wymagania pomiarowe, sterowania i synchronizacji czasowej powodują, że magazyn energii jest traktowany jako IDE w rozumieniu normy IEC 61850 do pracy w sieci redundantnej PRP. Wymagana jest obsługa protokołów MMS, GOOSE, R-GOOSE. W przyszłości planuje się również wdrożenie szyny procesowej i protokołu SV. Szczegóły wymagań obecnie są przedmiotem opracowania jako standard wewnętrzny Operatora. Wymagana jest realizacja funkcji zabezpieczeniowych i sterujących.

Wysoka standaryzacja podstawacji i kabin sekcyjnych powoduje, że magazyn energii będzie zabudowywany w typoszeregu mocy czynnej użytecznej pod stronie SN lub 3 kV odpowiednio 2, 4, 6 MW zależnie od warunków w danej lokalizacji. Pojemność magazynu ma zapewnić rozładowanie typowo dwugodzinne. Ze względów niezawodnościowych i eksploatacyjnych magazyn powinien być złożony z co najmniej 3 jednostek pracujących równolegle. Napięcie maksymalne baterii jest ograniczone do wielkości 1,5 kV.

Bardzo ważnym parametrem jest dynamika zmian mocy. Obliczenia pokazują, że niezbędna jest dynamika zmiany mocy rzędu mocy znamionowej w czasie 200 ms lub szybciej w obu kierunkach. Dla wspomnianych wyżej wartości mocy czynnej oznacza to odpowiednio 10 MW/s, 20 MW/s lub 30 MW/s.

Podstacja trakcyjna, ze względu na charakter odbioru, współistniejące obwody prądu stałego i przemiennego oraz specyficzne warunki pracy sieci trakcyjnej i pantografu, jest środowiskiem elektromagnetycznie trudnym. Stąd magazyn energii powinien spełniać kolejowe wymagania dotyczące wielkości napięcia, odporności elektromagnetycznej, wytrzymałości napięciowej: odpowiednio normy PN-EN 50163, PN-EN 50121, PN-EN 50124 i być przystosowany do współpracy z kolejową automatyką zabezpieczeniową, w tym gwałtownymi zrzutami mocy i wyłączeniami. Magazyn i bateria powinny spełniać wymagania PN-EN 50122 w zakresie bezpieczeństwa przeciwporażeniowego.

7. Podsumowanie

Przedstawione plany są ambitne. Szereg projektów dotyka jednocześnie wielu aspektów dotyczących podstawacji trakcyjnych. Obecny intensywny rozwój kolei wymaga jednak zdecydowanych działań. Należy spodziewać się wielu wyzwań, nie wszystkie rozwiązania okażą się idealne, być może będą miały inne zastosowanie niż obecnie jest planowane. Na pewno wiele rzeczy jeszcze odkryjemy.

Na kolei nowe rozwiązania wprowadza się stosunkowo powoli, długo się je testuje. Najważniejsze bowiem nie szkodzić. Z drugiej strony obecne problemy wymagają odmiennego podejścia do zasilania. Przedstawione zagadnienia oraz wyniki prowadzonych eksperymentów, prac symulacyjnych i koncepcyjnych pozwalają powiedzieć, że z dużym prawdopodobieństwem projekty zakończą się sukcesem.

Wiemy, że kluczowe są obserwowalność i sterowalność sieci i podstawacji trakcyjnej, szybkość, niezawodność, otwartość i bezpieczeństwo aplikowanych rozwiązań. Doświadczenia z PT Garbce wskazują, że zastosowanie magazynu energii znacząco i odczuwalnie poprawia jakość i bezpieczeństwo zasilania kolei i odbiorów sąsiadujących.

Badania zostały sfinansowane z projektu FP4 – RAIL4EARTH 101101917 — Europe's Rail Flagship Project 4 – Sustainable and green rail systems HORIZON-ER-JU-2022-FA4-01.

Literatura

- [1] M. Jarnut, J. Kaniewski and V. Protsiuk: Energy storage system for peak-power reduction of traction substation. 2018 Innovative Materials and Technologies in Electrical Engineering (i-MITEL), Sulecin, Poland, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/IMITEL.2018.8370468.
- [2] Jeremi Jędrzejkowski: Transport zmierza w zieloną stronę. Rzeczpospolita 23.02.2023. On-line, dostęp w dn. 2.04.2026.
- [3] Kolejowa automatyka w Warszawskim Metrze. Kurier-kolejowy.pl, 28.04.2021. On-line, dostęp w dn. 2.04.2026.
- [4] Karol Kurek: Tester czasu rzeczywistego wykorzystujący platformę Matiab/Srnulink jako środek umożliwiający sprawdzenie urządzeń i układów automatyki zgodnych z IEC 61850. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska, Warszawa 2021.
- [5] PGE Energetyka Kolejowa i Koleje Mazowieckie podpisały umowę na wdrożenie SENSUM. cire.pl 2025-06-26. On-line, dostęp w dn. 2.04.2026.