

Praca KSE w dobie transformacji – perspektywa Krajowej Dyspozycji Mocy

Praca KSE w dobie transformacji – perspektywa Krajowej Dyspozycji Mocy

Marek Kornicki PSE, Krajowa Dyspozycja Mocy

Streszczenie

Artykuł przedstawia wybrane aspekty pracy Krajowego Systemu Elektroenergetycznego w warunkach intensywnej penetracji Odnawialnych Źródeł Energii przyłączonych do sieci przesyłowej i rozdzielczej. Omówione zostały zagadnienia związane z bilansowaniem systemu oraz wpływem OZE na pracę sieci. Zwrócono uwagę na dynamikę wprowadzaną do systemu przez OZE, kwestie sterowalności i obserwowalności i wynikające stąd ryzyka dla poprawnego bilansowania systemu. Konieczność „ręcznego” modyfikowania punktów pracy OZE prowadzi do niedokładności w utrzymywaniu salda kraju a co za tym idzie wpływa na częstotliwość europejską. Dodatkowe wyzwania kreowane przez OZE pojawiają się w sieci przesyłowej i rozdzielczej poprzez zmianę charakterystyki ich pracy. Na zakończenie wskazano na docelowy model energetyki po transformacji.

1. Wstęp

Na wstępie warto wspomnieć nieco o historii. W roku 2025 obchodziliśmy jubileusz 75-lecia istnienia służb dyspozytorskich zintegrowanego systemu elektroenergetycznego w Polsce. W roku 1950 powstała pierwsza nadrzędna dyspozycja zarządzająca ruchem sieciowym i bilansem kraju – Główny Rozrząd Mocy. W ciągu kilku następnych lat ukształtowała się struktura służb ruchu istniejąca do dnia dzisiejszego. Warto więc pamiętać, że jesteśmy spadkobiercami pracy i myśli kilku już pokoleń inżynierów i dyspozytorów zajmujących się zarządzaniem Krajowym Systemem Elektroenergetycznym.

Jednak trzeba też zaznaczyć, że warunki pracy KSE zmieniły się diametralnie począwszy od pierwszej dekady XXI wieku. Rozpoczęła się transformacja energetyki, zmiana sposobu działania olbrzymiego mechanizmu, największej maszyny zbudowanej kiedykolwiek przez człowieka. Dokonywana jest w tempie niebywałym, wręcz ekspresowym patrząc z perspektywy olbrzymiego systemu. Pojawienie się na masową skalę nowego rodzaju generacji zmieniło diametralnie sposób zarządzania pracą KSE. Sieć przesyłowa stanęła w obliczu szybkozmiennych (z punktu widzenia ruchu sieciowego) stanów pracy, przepływów, które zmieniają charakterystyki funkcjonowania elementów sieciowych. Współpraca międzynarodowej (międzyoperatorska) uległa daleko idącym zmianom wymuszonym przez ogromny rozwój rynku energii elektrycznej. Energii, która stała się de facto towarem - krótkoterminowym bez prawa składu.

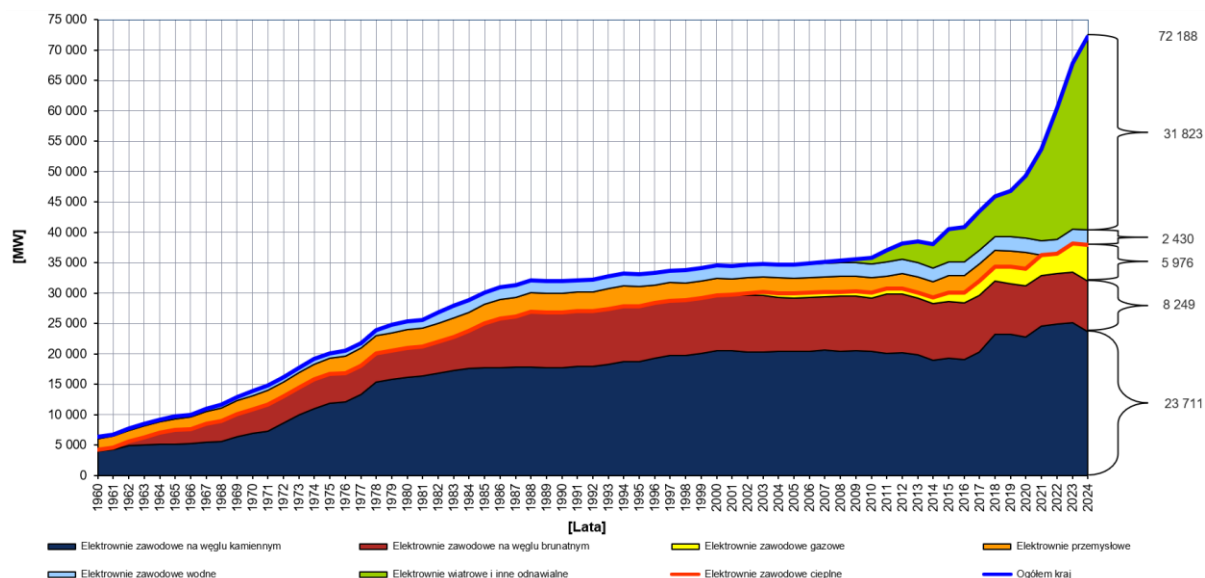
2. Statystyka KSE

Zacznijmy od najważniejszej konstatacji, którą ilustruje rys 1: utrwalony przez dziesięciolecia skład jednostek wytwórczych został nagle (patrząc oczywiście z perspektywy 75 lat) zmieniony. Zmiana ta wywołana polityką jest widoczna w postaci zielonego pola. Przez lata bazą wytwórczą energetyki polskiej były bloki energetyczne opalane rodzimymi paliwami kopalnymi. Moc tych jednostek rosła wraz z rozwojem gospodarczym kraju. Towarzyszył temu proces rozwoju sieci elektroenergetycznych. Rozwój tych dwóch gałęzi energetyki był mniej więcej harmonijny, choć bywały okresy, że sieć przegrywała ten wyścig. Od roku 2010 pojawia się pierwsza istotna moc z wiatraków. Wkrótce następuje boom na budowę elektrowni wiatrowych i fotowoltaicznych (rys 2). Gradient przyrostu mocy instalowanej tych źródeł nie ma precedensu w historii energetyki polskiej. Dla bezpiecznej pracy systemu energetycznego wymagana jest harmonia – równoległy przyrost wytwarzania oraz sieci. Ta harmonia w latach 2020 – 2025 została zakłócona.

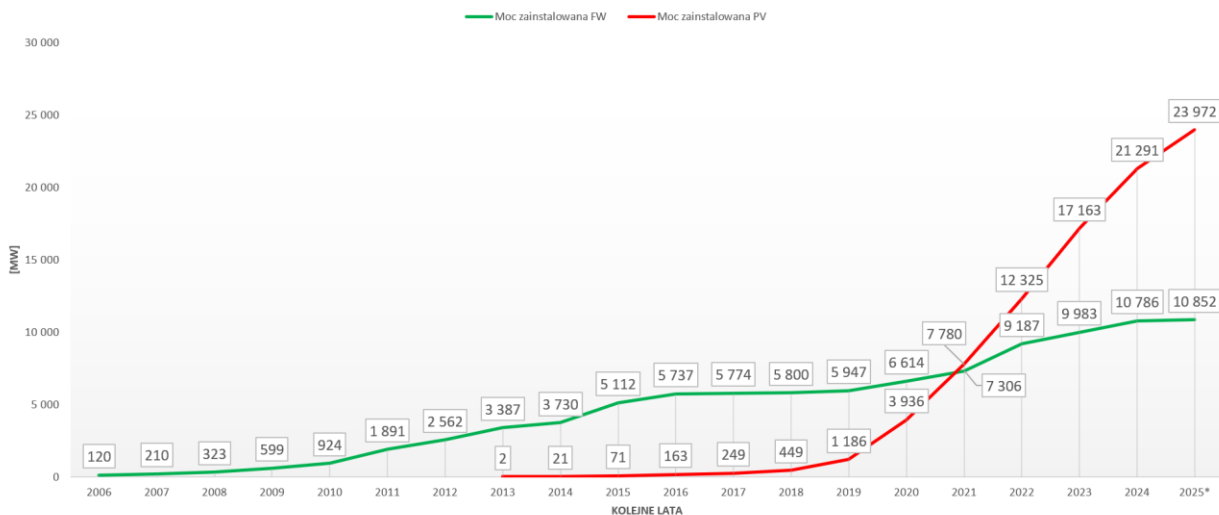
Obecna struktura sektora wytwarzania pokazana jest na rys 3. O ile stosunek zainstalowanych mocy OZE do nie-OZE ma się jak 51% do 49%, to produkcja energii ma proporcje odwrotne: 28% do 72%. W rocznej produkcji dominują elektrownie na węgiel kamienny: (41%), następnie na węgiel brunatny: (20 %) w trzeciej kolejności plasuje się wiatr (14%), potem ex equo słońce i gaz (po 11 %). Średnio rocznie wytwórcy OZE produkują na poziomie ok 15% swojego zainstalowanego potencjału (rys 4).

Zużycie energii. Budując tak dużo źródeł wytwórczych, oczekuje się, że energia ta będzie odbierana, przysyłana i konsumowana. Tu warto wskazać na kolejny element tego niezharmonizowanego rozwoju KSE: zapotrzebowanie na moc w Polsce od 2020 roku nie przyrasta. Porównanie średniotygodniowych krzywych zapotrzebowania szczytowego z dni roboczych pokazuje jasno: mamy do czynienia ze stagnacją. Nawet biorąc pod uwagę rosnącą autokonsumpcję podmiotów przyłączonych do sieci, nie dostrzegamy wzrostu zużycia energii. Oznacza to, że w szczytach produkcji OZE mamy do czynienia z energią niechcianą, której wartość na rynku spada poniżej zera (ceny ujemne).

Elektrownie konwencjonalne. Regulacje prawne dają pierwszeństwo w dostępie do sieci energii produkowanej przez OZE. Stąd oczywiste stało się wypychanie z systemu (z rynku) elektrowni nie - OZE. Przyczyny eliminowania z systemu jednostek konwencjonalnych (nie - OZE) są dwojakie: po pierwsze nie mieszczą się w bilansie razem z OZE, po drugie nasze elektrownie ciepłe nie są konkurencyjne na rynku energii w Europie. Obciążone opłatami klimatycznymi nie są w stanie sprzedać swojej produkcji za granicę – stąd silny trend importowy w kierunku Polski w okresach z niską generacją OZE.



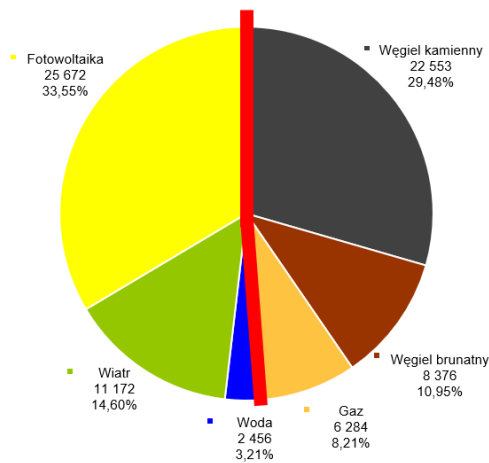
Rys. 1. Mix energetyczny w Polsce od lat 60-ych do roku 2025



Rys. 2. Przyrost instalowanej mocy w źródłach OZE w latach 2006 - 2025

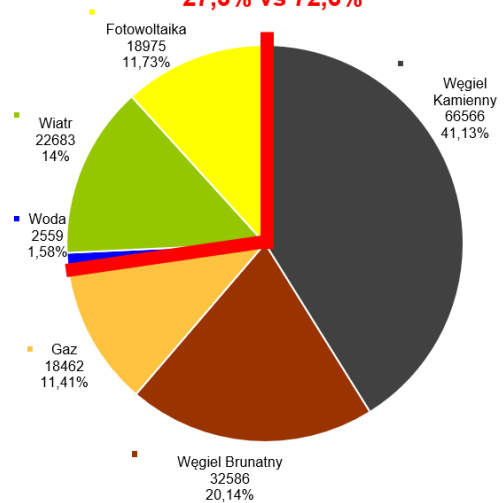
Moc osiągalna w podziale na źródła do dnia 01.03.2026

OZE vs nieOZE
51,4% vs 48,6%

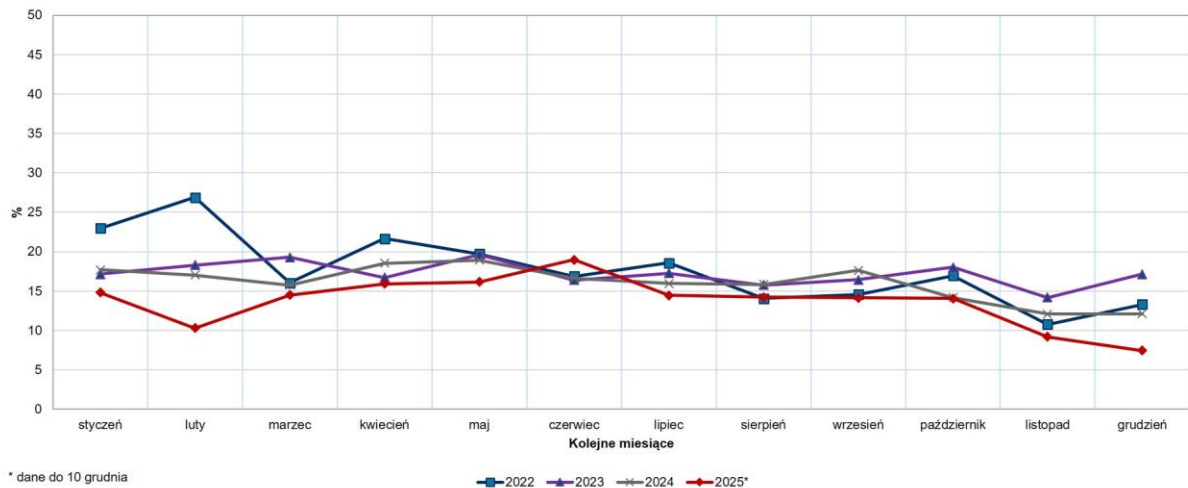


Produkcja energii w podziale na źródła za rok 2025

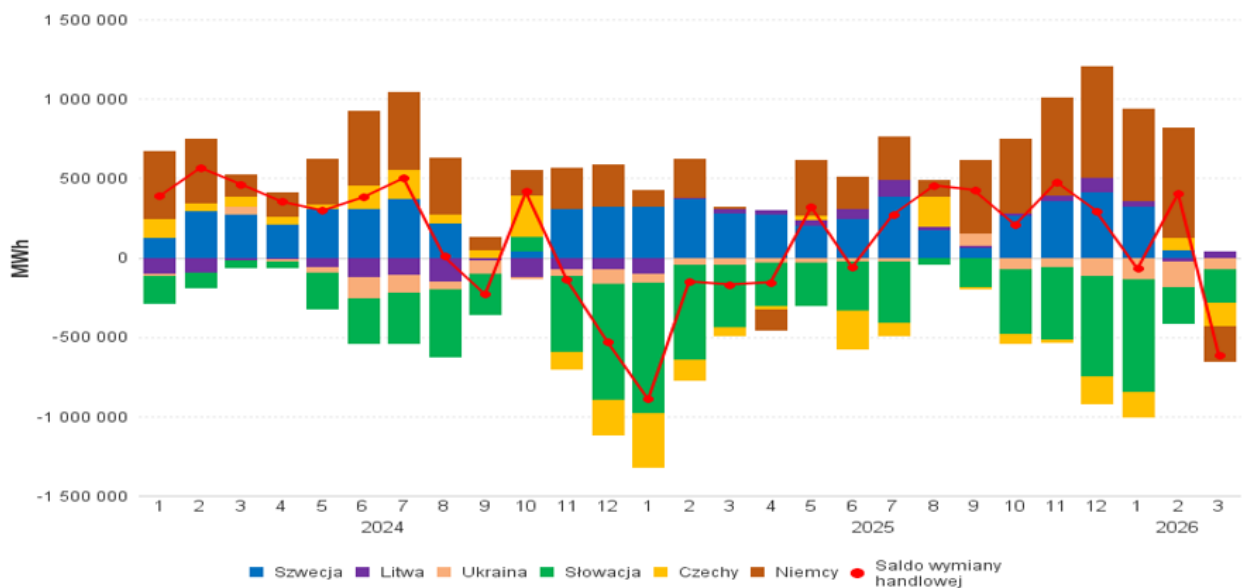
OZE vs nieOZE
27,3% vs 72,6%



Rys. 3. Struktura mocy instalowanej i produkcji w KSE



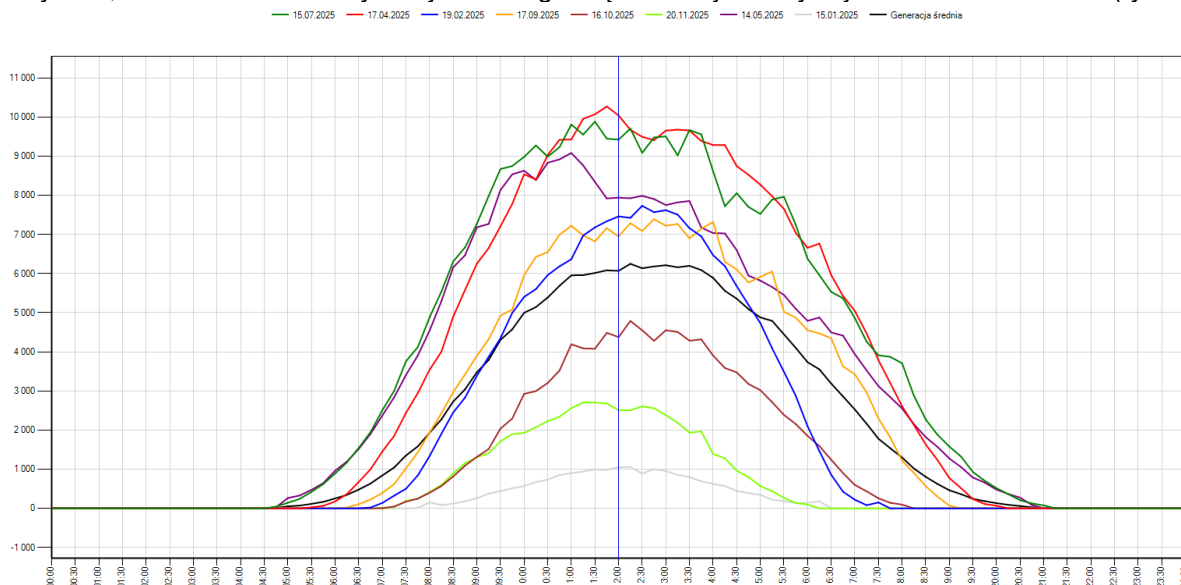
Rys. 4. Wykorzystanie mocy osiągalnej OZE (FW+PV) w latach 2022-2025 (na podstawie generacji odniesionej do mocy osiągalnej)



Rys. 5. Wymiana międzysystemowa handlowa w latach 2024-2026.

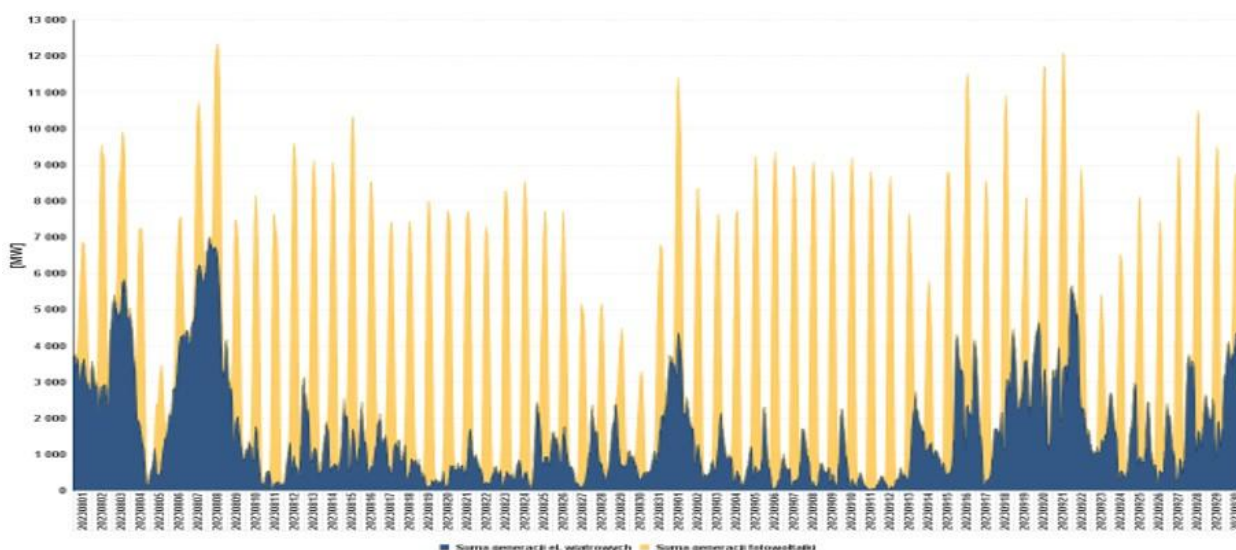
3. OZE a bilansowanie

Wiele mówi się o tym, że źródła OZE są trudno prognozowalne i częściowo nieobserwowalne. Mało uwagi poświęca się dynamice pracy tych źródeł. Z samej swej natury, fotowoltaika uzależniona jest od nasłonecznienia. Te zaś zmienia się w cyklu półdobowym, który jest znany i dość przewidywalny, jednak zmienność zachmurzenia wprowadza w ten cykl element stochastyczny. Ma ona wpływ głównie lokalny bądź regionalny, ale gdy dotyczy to kilku GW, to problem staje się ogólnopolski. Sam kształt wykresu generacji słonecznej jest ustalony i znany, niemniej jednak występują tu niepewności dotyczące początku, nachylenia, wielkości szczytowej i zgaśnięcia tej krzywej o zmierzchu (rys 4).



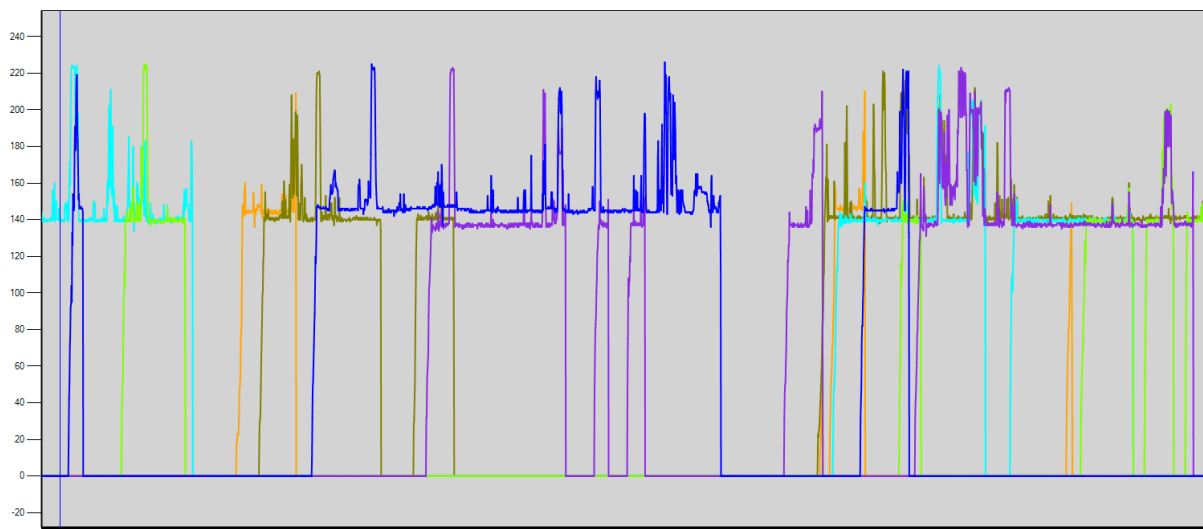
Rys. 6. Roczna zmienność kształtu i wysokości krzywej generacji fotowoltaicznej w kraju

Do niepewności sektora PV dodajemy teraz kaprysy generacji wiatrowej. Statystycznie wiatry „lubią” wiać pod koniec doby, po wieczornym szczycie zapotrzebowania. Więcej też, oczywiście podczas zmian układów barycznych przyjmując formę frontów. Są również efektem określonych cyrkulacji atmosferycznych zależnych od pory roku, ale i innych czynników. Czyli rozkład generacji wiatrowej jest mniej regularny, ale za to, dzięki poprawiającej się jakości prognoz i dobrej obserwowalności wiatraków, lepiej przewidywalny. Należy zwrócić uwagę, że obydwa rodzaje OZE cechują się zdolnością do bardzo dużych gradientów przyrostu i spadku mocy. Nałożmy więc je na siebie i otrzymamy obraz pracy głównej siły determinującej bilans kraju (rys 5).

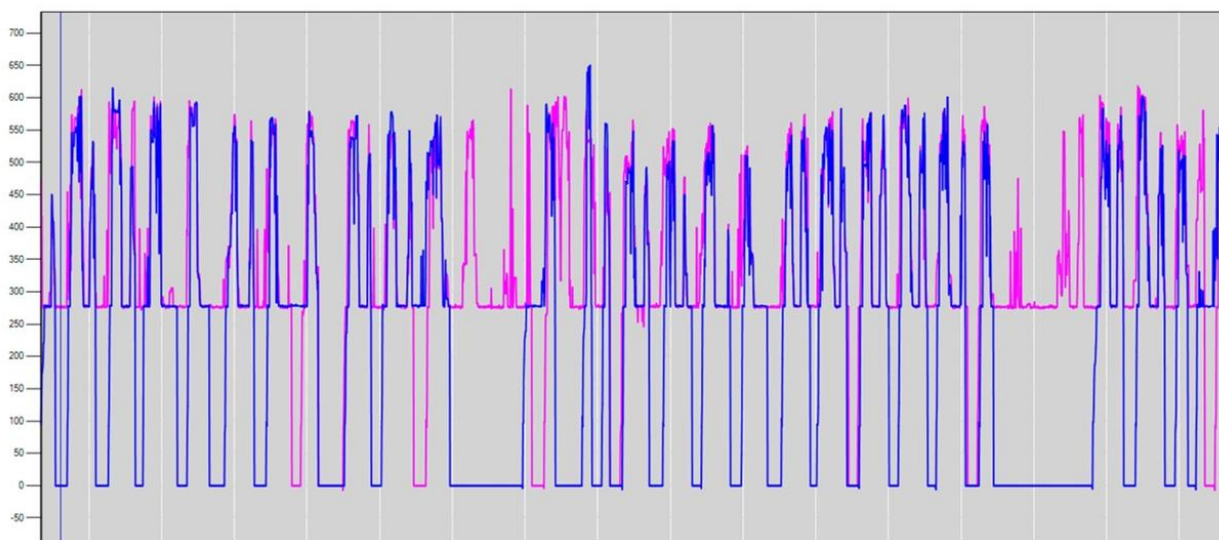


Rys. 7. Praca OZE w okresie dwóch miesięcy letnich (sierpień/wrzesień)

W takim rytmie, pulsującym, pracuje OZE, więc w taki samy rytmie, tylko w przeciwfazie, musi pulsować generacja konwencjonalna – głównie węglowa. Rytm ten, czyli częstotliwość zmian punktów pracy i stanów pracy bloków energetycznych jest dla tego sektora olbrzymim wyzwaniem. Nigdy w historii nie oczekiwaliśmy od jednostek wytwórczych opartych na procesach cieplnych tak dużej elastyczności pracy i nigdy nie były one do takiej pracy projektowane. Zwiększenie ilości odstawień i uruchomień, skrócenie czasów pracy i postoju, skrócenie rampowania naboru i zrzutu mocy oraz ustawiczna praca na minimum technicznym – to obecny standard wymagany od jednostek konwencjonalnych – w praktyce węglowych bowiem źródła gazowe pracujące w KSE to w większości elektrociepłownie dostarczające ciepło technologiczne o bardzo niskiej regulacyjności. Spośród 6,2 GW zainstalowanych mocy opartych na gazie tylko 1,4 GW to jednostki o charakterze elektrowni zawodowej, w pełni odpowiadające na potrzeby regulacyjne systemu.



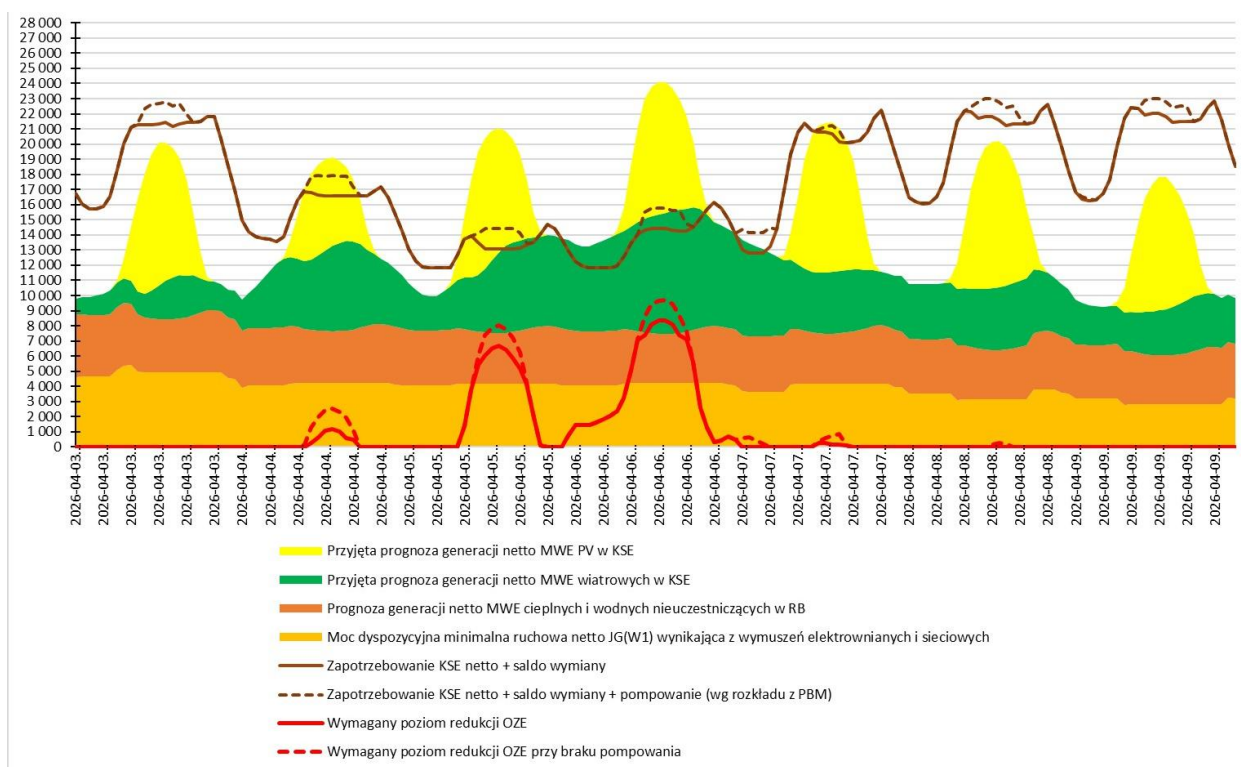
. Rys. 8. Wykres pracy elektrowni opalanej węglem kamiennym w okresie 1.07 – 31.07.2025



Rys.9. Wykres pracy elektrowni opalanej gazem w okresie od 30.07 do 28.08.2025

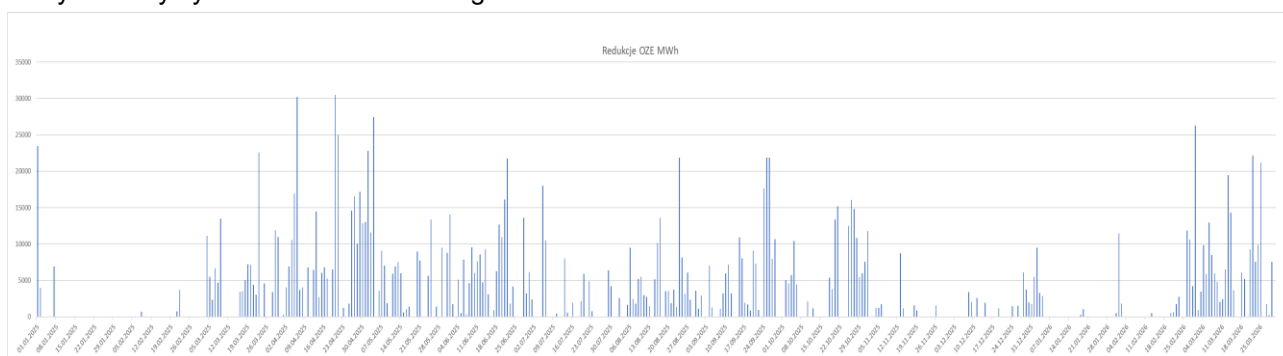
Zachowanie bezpieczeństwa pracy każdego systemu elektroenergetycznego wymaga jego zbilansowania, czyli dopasowania generacji do zapotrzebowania z uwzględnieniem salda wymiany. Pokazana wyżej dynamika pracy źródeł odnawialnych w istotny sposób utrudnia ten proces. Bezpieczne wprowadzanie tej produkcji do systemu wymaga nowej właściwości – elastyczności. Obecnie (maj 2026) tę elastyczność polskim systemie uzyskujemy od elektrowni szczytowo – pompowych oraz od elektrowni węglowych. W praktyce składy węgla obecnie są najważniejszymi magazynami energii w dyspozycji KDM. Oczywiście

w świetle przedstawionych faktów elastyczność ta jest zbyt mała i nie jesteśmy w stanie zapewnić bezprzerwowego odbioru energii odnawialnej z zachowaniem bezpieczeństwa systemu. Okresy świąteczne, wolne od pracy weekendy są szczególnie trudne do zbilansowania dla operatora systemu przesyłowego. W miarę przybywania mocy instalowanej OZE problem nadprodukcji zaczął dotyczyć również dni powszednich. Typowy okres niezbilansowania z punktu widzenia planowania pracy z perspektywy D-3 pokazano na rys. 10.



Rys. 10. Przewidywane niezbilansowanie systemu w okresie wielkanocnym 2026

Jak wygląda mitygowanie niezbilansowania przy obecnej strukturze wytwarzania? W obecnych realiach prawnych, oraz przy braku uczestnictwa tych źródeł w Rynku Bilansującym oznacza konieczność administracyjnego polecenia źródłom OZE zaprzestania bądź zmniejszenia ich generacji. Polecenia takie wydaje Krajowa Dyspozycja Mocy po wyczerpaniu wszystkich innych rynkowych i nierynkowych możliwości zbilansowania kraju. Okresy głębokiego niezbilansowania zawsze stawiają przed KDM pytanie: czy wystarczy nam potencjału do redukcji OZE? Musimy pamiętać, że spośród 26 GW zainstalowanych źródeł PV ponad 13,8 GW to instalacje prosumenckie, całkowicie niesterowalne, więc nie podlegające redukcji. I to jest źródłem ryzyka niezbilansowania kraju, które może pewnego dnia (najprawdopodobniej świątecznego) sprawić, że odchylenie salda wymiany podniesie częstotliwość europejską wytrącając kontynentalny system ze stanu stabilnego.



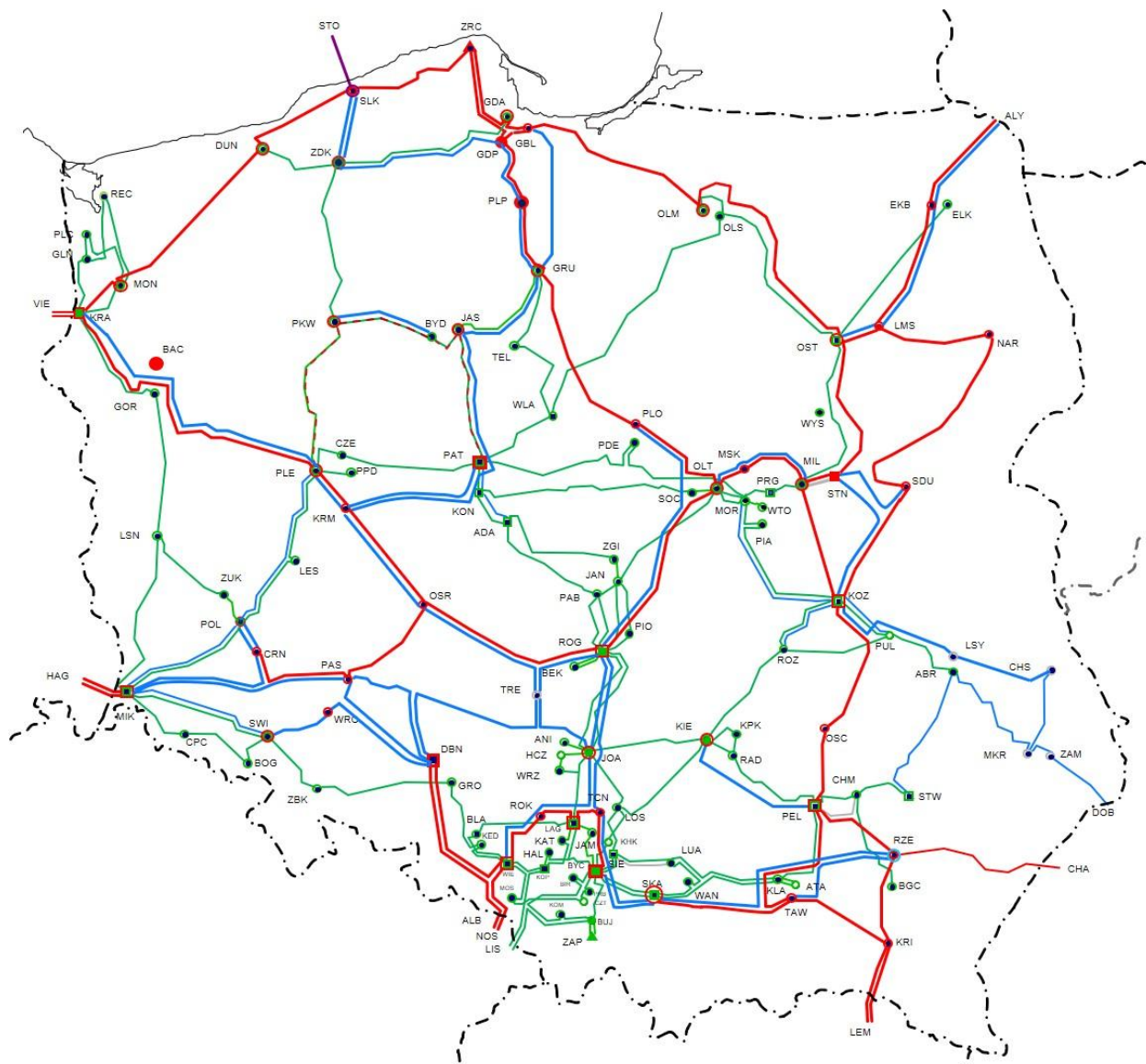
Rys. 11. Dni z nierynkową redukcją OZE od 1.01.2025 do 31.03.2026

4. OZE a sieć przesyłowa

Wstrzyknięcie tak dużej generacji w różne punkty systemu nie mogło być obojętne dla sieci elektroenergetycznej. Projektowana i rozbudowywana od lat 50-ych ubiegłego wieku miała ona jeden cel: przesłanie energii z wielkich ośrodków produkcji do odbiorców przy użyciu linii wszystkich napięć. Ten kierunek determinował geograficzne rozmieszczenie linii, sposób ich łączenia oraz wyposażenia sieci w elementy sterujące przepływami. Rozbudowa sieci przeważnie nie nadszała za rozbudową mocy wytwórczych, co przejawiało się w sporej ilości ograniczeń systemowych. Spełnienie standardów bezpieczeństwa zasilania i niezawodności pracy sieci bywało okresowo trudne. Jednak masowe wejście rozproszonych OZE na wszystkich poziomach napięć i ich zupełnie różna od dotychczasowej lokalizacja zmieniły sposób pracy sieci, rozwiązując jedne i kreując inne problemy.

Znów musimy podzielić OZE na dwa rodzaje. Farmy wiatrowe, z przyczyn geograficznych, znalazły najkorzystniejsze warunki pracy w północno-zachodniej ćwiartce kraju. Tam skoncentrowała się, i nadal koncentruje większość potencjału wytwórczego – 75% spośród 11 GW zainstalowanych elektrowni wiatrowych tam się znajduje. 25% rozproszone jest na pozostałym obszarze. Co to oznacza dla sieci przesyłowej? W dobrych warunkach wiatrowych, północno-zachodnia część Polski staje się ośrodkiem generacji, podczas gdy w południowej części generacja jest zaniżana. Sieć transportuje energię z północy na południe. Następnie, szybkozmienny wiatr w ciągu np. 8 godzin przestaje wiać i sytuacja się odwraca, teraz to Śląsk jest centrum generacji. Rozpływy w sieci, oprócz zmian wielkości, zmieniają także kierunek. Ujawniają się nowe słabe punkty, miejsca gdzie spełnienie kryteriów niezawodności wymaga innych niż dotychczas działań. I w ten sposób stosowane środki zaradcze poniekąd „pulsują” w rytmie wiatru. Oczywiście, jak wspomniano sieć nie była i ciągle jeszcze nie jest dostosowana do transportu ogromnych ilości mocy z północy na południe – pogoń za wytwarzaniem trwa.

Fotowoltaika jest bardziej sprawiedliwa, jeśli chodzi o rozmieszczenie geograficzne. Jest w miarę równomiernie rozłożona i w większości przyłączona do sieci nn i SN. Jeżeli nasłonecznienie kraju jest jednorodne, to źródła PV odciążają sieć przesyłową – duża część tej generacji konsumowana jest na napięciach rozdzielczych. W przypadkach nierównomiernego nasłonecznienia, różnice w ilości generacji PV potrafią stworzyć problemy - głównie na poziomie sieci 110 kV. Ważniejszą konsekwencją pracy źródeł PV jest trudność w bilansowaniu mocy biernej. Generacja na nn i SN spowodowała odciążenie zarówno linii jak i transformatorów 110/SN. Zgodnie z charakterystykami, odciążone transformatory przestają być naturalnymi dławikami – przestają konsumować moc bierną. Zważywszy skalę zjawiska stajemy w obliczu kilku tysięcy MVAR pozostających w sieci 110 kV i w sieci przesyłowej. Kompensacja tej nadwyżki wymaga wielkich nakładów w dławiki oraz skutecznego wmontowania rozproszonych źródeł PV i FW w mechanizmy nadrzędnej regulacji napięć. W okresach obniżonego zapotrzebowania nie wystarcza nam środków regulacyjnych i uciekamy się do ostatniej deski ratunku: wyłączania mało obciążonych linii przesyłowych. Dekompozycja układu przesyłowego osiągnęła w roku 2025 liczbę 51 elementów przesyłowych (linii 400 i 220 kV i transformatorów 400/110 kV).



Rys. 12. Sieć przesyłowa zdekomponowana w Wielkanoc 2025 – niebieskim kolorem oznaczno wyłączone elementy z powodów napięciowych

5. Podsumowanie

Reasumując:

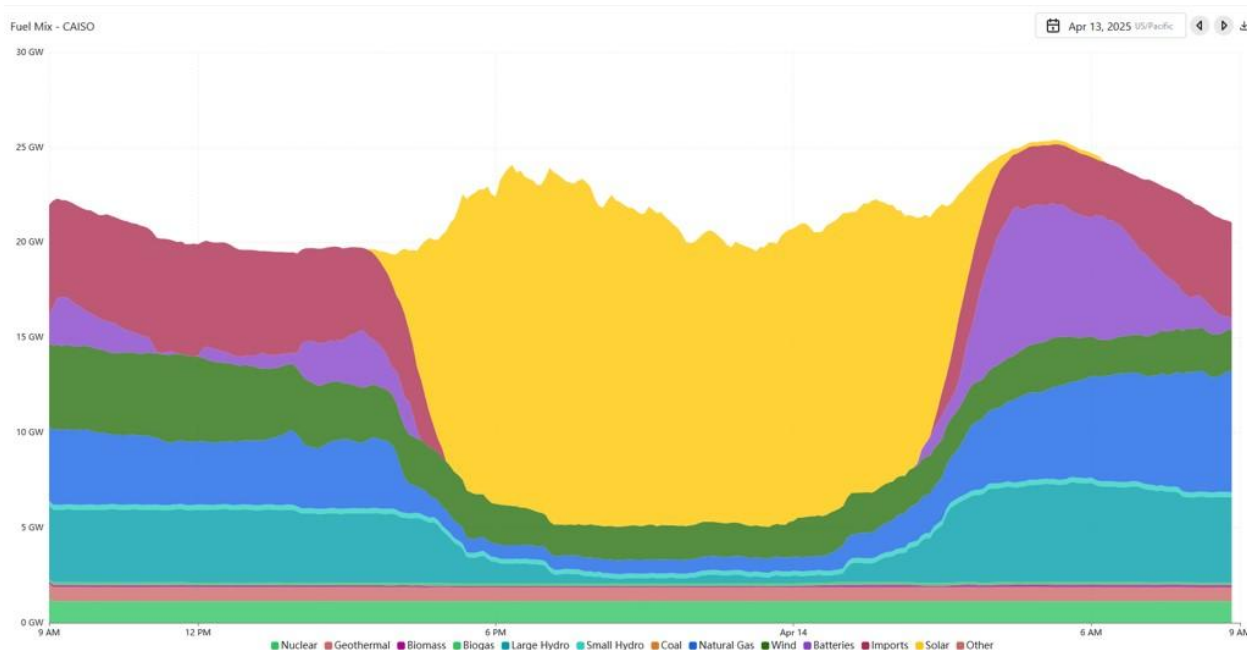
- Niestabilne bilanse, spowodowały wzrost niepewności planowania pracy systemu, skróciły horyzont decyzyjny, przeniosły część analiz bezpośrednio w pobliże czasu rzeczywistego. Niepewność ta jest dodatkowo potęgowana nieobserwowalnością i niesterowalnością części generacji PV (prosumenci)
- Elastyczność systemu pozyskiwana z elektrowni ciepłych jest niewystarczająca, czego skutkiem są odchylenia parametrów współpracy równoległej systemów kontynentalnej Europy
- Uprzywilejowanie OZE na rynku (a właściwie nieobecność OZE na rynku bilansującym) prowadzi do „ręcznego” sterowania ich pracą bazującego na administracyjnym wydawaniu poleceń redukcji. Koszty wykonywania tych poleceń są rekompensowane wytwórcom przez operatorów sieci. Ręczne sterowanie nie obejmuje 13 GW fotowoltaiki dachowej która jest poza wszelką kontrolą
- Dostosowanie sieci do OZE wymaga ogromnych inwestycji zarówno na poziomie krajowym (sieć przesyłowa) jak i lokalnym (sieci dystrybucyjne). Inwestycje te to: budowa nowych linii, modernizacja istniejących, budowa nowych stacji, transformatorów i dławików. Rozwój systemów zdalnego sterowania oraz lokalnych i nadrzędnych systemów regulacji. To wszystko wymaga czasu i pieniędzy.
- Dynamika pracy systemu jest dodatkowo zwiększana przez stale skracający się horyzont połączonego rynku energii w Europie. Salda wymiany operatorów zmieniają się obecnie co 15

minut, sprawiając, że zadana wielkość wymiany nieustannie rampuje, a za niedługi czas ma to być rynek 5 minutowy. Funkcjonujące platformy wymiany nadwyżek regulacyjnych on-line skutecznie utrudniają obserwowalność odchyłek regulacyjnych

- Wejście OZE rozwiązało dużą część problemów związanych z deficytem mocy, okresy niezbilansowania w kierunku dodatnim (brak rezerw) występują sporadycznie i mają charakter krótkotrwały.

6. Dokąd dążymy ?

Przyszłość systemu to, zgodnie z polityką energetyczną państwa, OZE wspierane źródłami gazowymi i ogromną elastycznością pozyskaną z bateryjnych magazynów energii osadzone na rozbudowanej sieci geograficznie dostosowanej do ich pracy. Dążymy do idealnego obrazu krzywej dobowej pokrycia zapotrzebowania, w którym zamiast pracy elektrowni konwencjonalnych węglowych do bilansu wchodzi magazyny energii. Za wzór może posłużyć nam kalifornijski operator systemu przesyłowego – CAISO. Do osiągnięcia tego celu potrzebne są nam inwestycje, wsparte rozwiązaniami prawnymi preferującymi elastyczne rozwiązania, pełna obserwowalność i sterowalność systemu oraz last but not least wytrwałość w realizacji tych zamierzeń zaplanowanych na dziesięciolecia.



Rys. 12. Dobowy bilans CAISO – fioletowym kolorem oznaczono pracę magazynów energii w kierunku generacji

Sieć przesyłowa przyszłości, by umożliwić realizację planu marzeń powinna być elastyczna w zakresie kierunków przesyłu mocy, powinna:

- umożliwić zasilanie rejonów kraju, w których zaniknie generacja konwencjonalna (Śląsk),
- umożliwić wyprowadzenie mocy z nowych obszarów generacji (morze),
- wzmocnić połączenia międzynarodowe (Litwa – bezpieczeństwo pracy Krajów Bałtyckich),
- umożliwić likwidację ograniczeń systemowych,
- umożliwić przyłączenie wielu dziesiątek podmiotów energetycznych (OZE, magazyny i kombinacje tychże)
- umożliwiać rozbudowę sieci rozdzielczych, a w przyszłości zmienić charakter ich pracy z zamkniętego na promieniowy

Realizacja tych celów, obok procesu inwestycyjnego, wymagać będzie zautomatyzowania procesu zarządzania ruchem sieci, co oznacza rozwój nadrzędnych systemów sterowania i regulacji i narzędzi wsparcia dyspozytorskiego.

