
Analiza potencjału magazynów energii w zakresie świadczenia usług inercji syntetycznej w KSE

Maksymilian Przygodzki, Rafał Gwóźdź

Kazimierz Dolny, 17-19 marca 2026 r.

www.pse-innowacje.pl

01

| Transformacja energetyczna i wyzwania długoterminowego bilansowania systemu elektroenergetycznego

| Wyzwania transformacji energetycznej



Zmiany w sektorze energetycznym

Sektor energetyczny przeszedł istotne zmiany wynikające z potrzeby ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, dekarbonizacji gospodarki oraz wzrostu udziału odnawialnych źródeł energii



Rozwój OZE

Dynamiczny rozwój energetyki wiatrowej i fotowoltaicznej, które coraz częściej konkurują kosztowo z konwencjonalnymi źródłami



Magazynowanie energii

Wzrost znaczenia technologii magazynowania energii, która może stabilizować system elektroenergetyczny w warunkach rosnącej niestabilności podaży

02

| Problem i analiza

| Identyfikacja i analiza problemu



Analiza miksu dla KSE

Wyznaczenie optymalnych struktur zasobów pokrycia zapotrzebowania.



Oszacowanie inercji

Ocena inercji synchronicznej w KSE w perspektywie rozwoju.



Rozwój zasobów magazynowych

Prognoza skali rozwoju magazynów energii (baterijnych) i ich możliwości wykorzystania.



Oszacowanie inercji

Wkład magazynów energii w inercję systemu.



Wnioski

Podsumowanie analiz i wnioski, w zakresie wykorzystania magazynów.

03

| Analiza miksu dla KSE

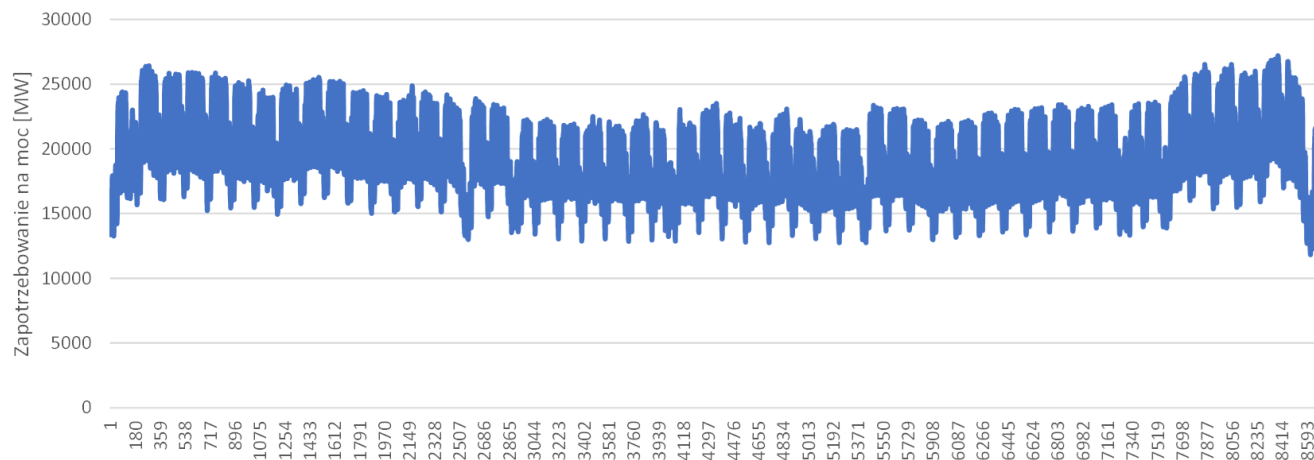
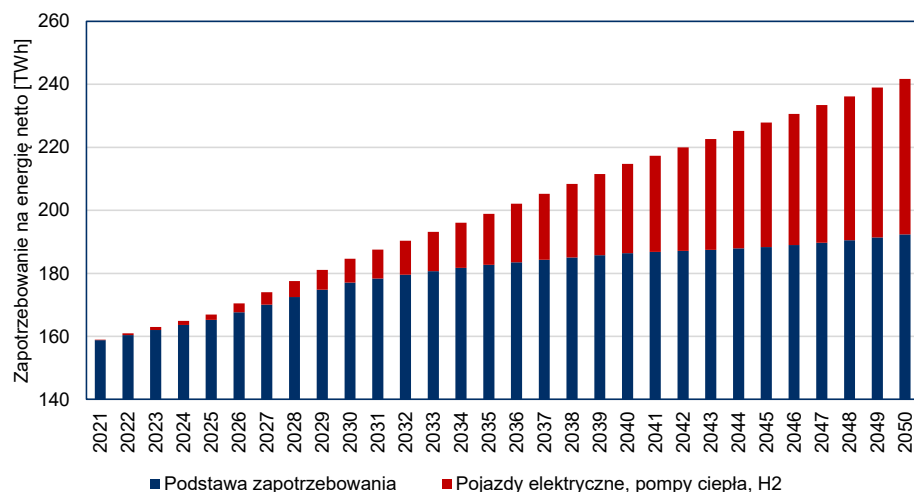
| Założenia scenariuszowe (1)

- ➔ Horyzont obliczeń: 2023 – 2050
- ➔ Obliczenia prowadzone za pomocą modułu LT Plan narzędzia PLEXOS z rozdzielczością godzinową przy uproszczeniu 30 bloków na miesiąc (wynikowo 360 bloków na rok)
- ➔ Doboru rozdzielczości dokonano na podstawie przeprowadzonych testów. Najbardziej optymalna pod względem dokładności odwzorowania parametrów oraz czasem obliczeń okazała się rozdzielczość 30 bloków na miesiąc. Poniżej przedstawiono wyniki analizy.

			Błąd odwzorowania zapotrzebowania [%]		
Chronologia	Liczba bloków	Czas obliczeń [h:min,s]	Średni	Max	Min
Fitted	12 na miesiąc	01:29,2	9,80	57,65	0
	24 na miesiąc	03:11,4	8,09	53,97	0
	30 na miesiąc	01:43,4	0,74	3,63	0

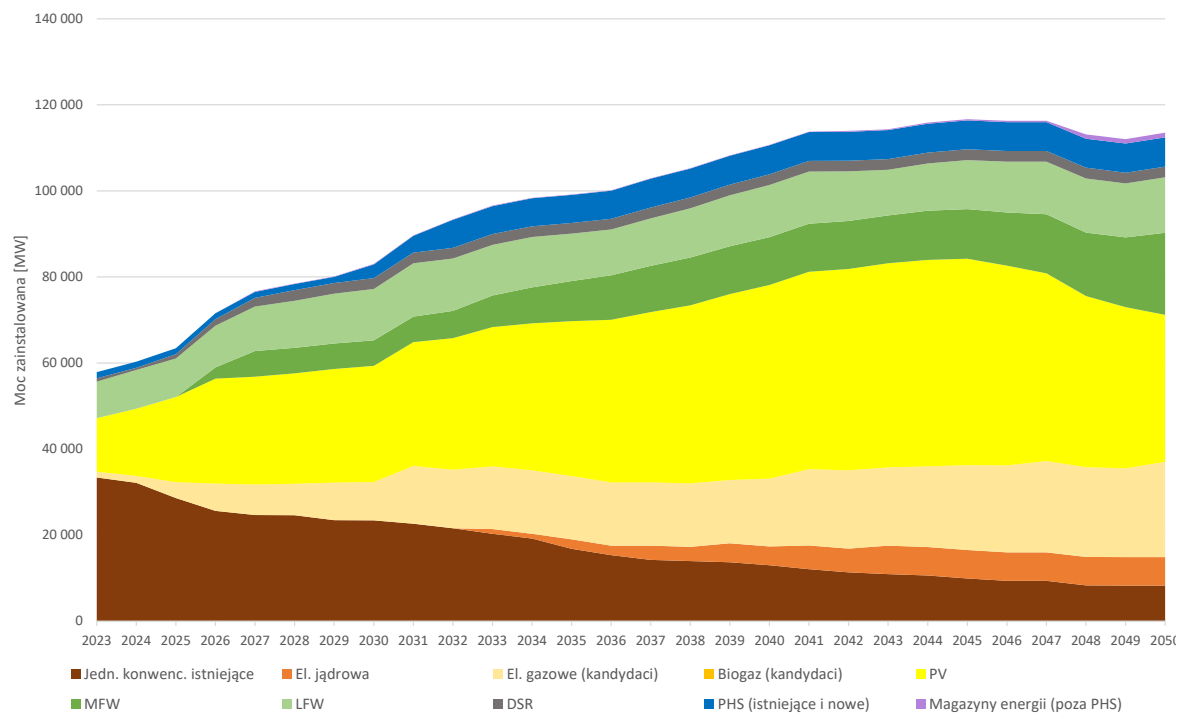
| Założenia scenariuszowe (2)

- ➔ Ceny paliw gazowych (prognoza oparta na TTF Natural Gas) + ograniczenia
- ➔ Ceny węgla kamiennego (IFO.de – Hard Coal), indeksacja cen węgla brunatnego
- ➔ Ceny uprawnień do emisji CO2 (ERAA 2023)
- ➔ Prognoza zapotrzebowania
- ➔ Potencjał energetyki wiatrowej (PEP 2040)
- ➔ Potencjał fotowoltaiki (scenariusz prekonsultacji KPEIK/PEP 2040)

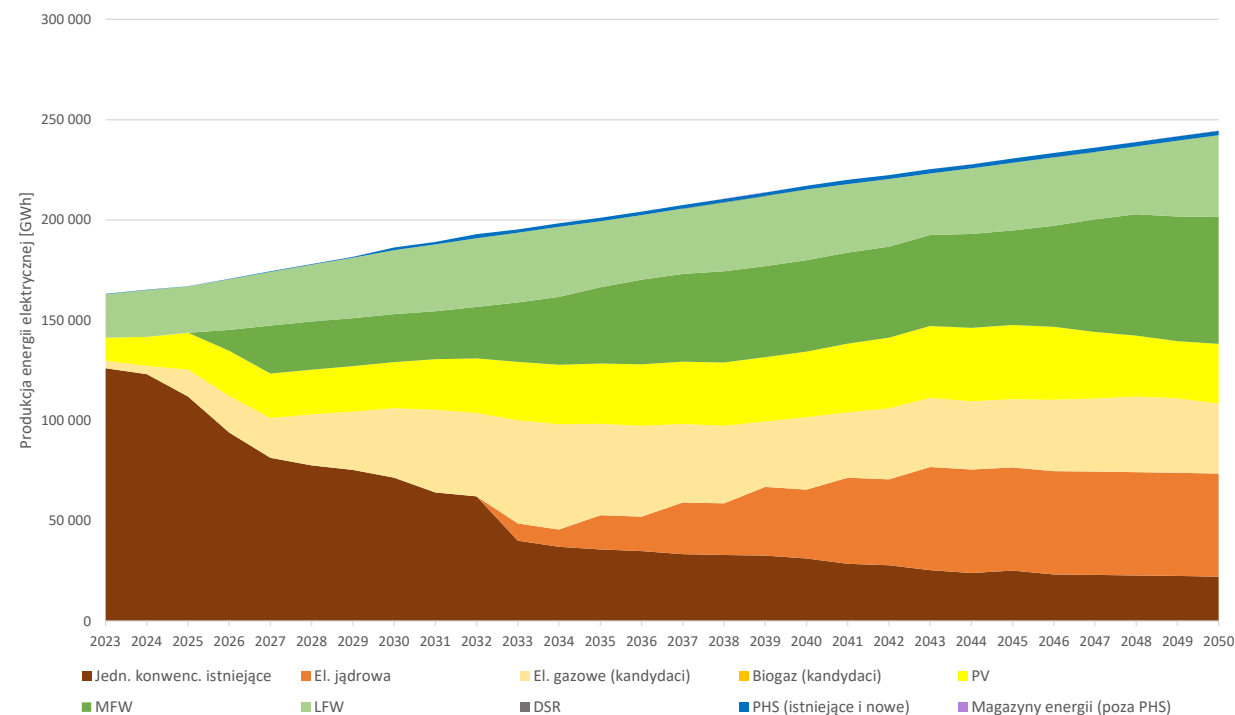


Szczegółowe wyniki obliczeń (1)

➡ Moc zainstalowana poszczególnych grup jednostek wytwórczych



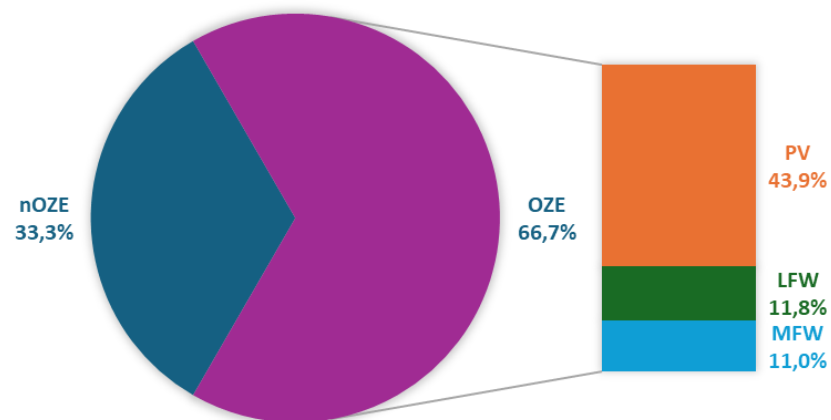
➡ Produkcja energii elektrycznej poszczególnych grup jednostek wytwórczych



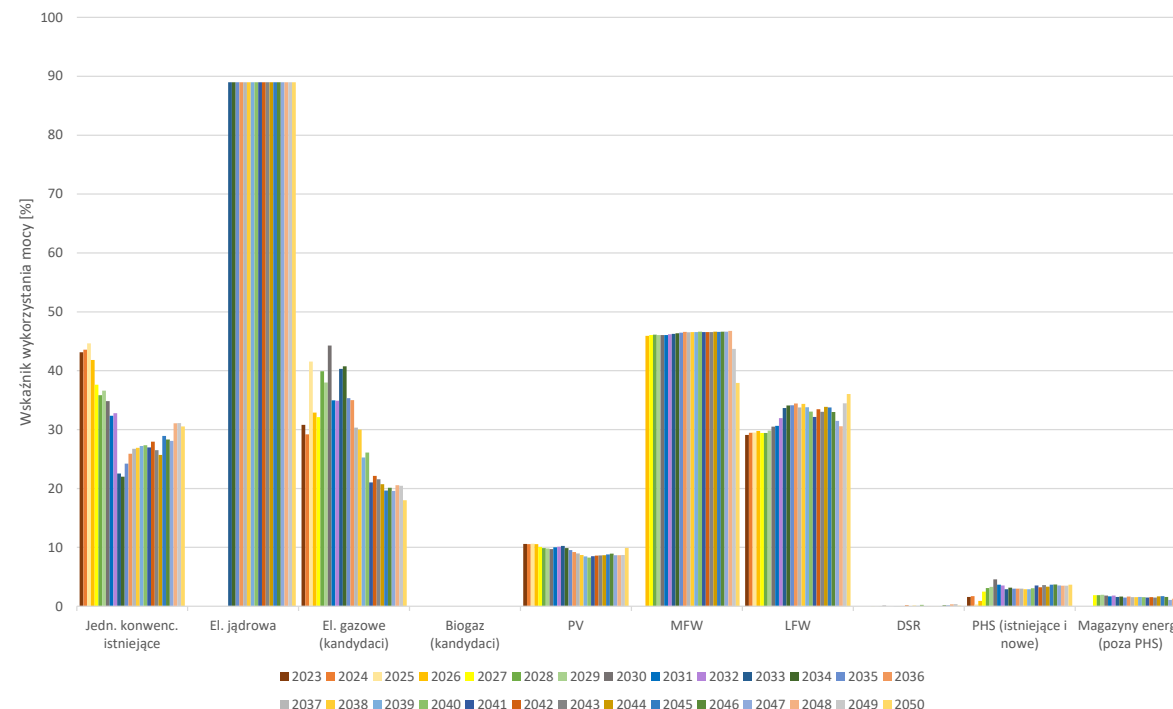
Szczegółowe wyniki obliczeń (2)

➡ Moc zainstalowana w 2040r [MW]

Technologia	Scenariusz
Konwencjonalne	34 179
OFFSHORE_Wind	11 233
ONSHORE_Wind	12 124
PV	44 991
SUMA	102 527



➡ Współczynnik wykorzystania mocy poszczególnych grup jednostek wytwórczych



04

| Oszacowanie inercji (synchronicznej)

| Zagadnienia metodyczne – inercja (1)

- ⊕ Rozpatrując zbiór N generatorów synchronicznych można wyznaczyć, dla wydzielonego obszaru w którym zapotrzebowanie jest pokrywane przez te generatory, inercję zastępczą jako wagę pracujących źródeł do ich sumarycznej mocy:

$$H_{eq} = \frac{\sum_i^N H_i \cdot S_{SG,i}}{\sum_i^N S_{SG,i}}$$

{

⊕ H_{eq} – bezwładność zastępcza,

⊕ H_i – bezwładność i -tego generatora,

⊕ $S_{SG,i}$ – moc znamionowa i -tego generatora synchronicznego.

- ⊕ Przyszłe systemy elektroenergetyczne będą obejmować zróżnicowany zbiór urządzeń przyłączonych za pomocą układów energoelektronicznych. Bezwładność tych urządzeń różni się od bezwładności generatora synchronicznego. W związku z tym nie mogą one zapewnić odpowiedniej reakcji bezwładnościowej. Dla takiego układu należy skorygować powyższą zależność wprowadzając do mianownika moc układów przyłączonych przez przekształtniki, a w dalszej kolejności można założyć, że jest to równoważne zapotrzebowaniu układu na moc.

$$H_{eq} = \frac{\sum_i^N H_i \cdot S_{SG,i}}{\sum_i^N S_{SG,i} + \sum_j^M S_{C,j}} = \frac{\sum_i^N H_i \cdot \frac{P_{SG,i}}{\cos\varphi_{SG,i}}}{P_{Load}}$$

{

⊕ S_c – moc generowana wprowadzana do systemu przez przekształtnik,

⊕ M – liczba takich urządzeń,

⊕ P_{Load} – sumaryczne zapotrzebowanie na moc.

- ⊕ Jak można zauważyć wzrost udziału układów wytwórczych, w tym OZE przyłączanych przez przekładniki prowadzi do obniżenia bezwładności systemu.
- ⊕ System o niskiej bezwładności może być potencjalnie narażony na ryzyko nadmiernej zmiany częstotliwości po wystąpieniu zdarzenia awaryjnego. Do oceny tej sytuacji stosuje się wskaźnik RoCoF (Rate of Change of Frequency). Wskaźnik ten określa szybkość zmian częstotliwości jako pochodną po czasie częstotliwości systemu elektroenergetycznego (df/dt). Jest on uznawany jako ważna wielkość kwalifikująca odporność sieci elektroenergetycznej.
- ⊕ Przyjmuje się, że jest to początkowa wartość zmiany częstotliwości df/dt tuż po wystąpieniu niezbilansowania mocy w systemie elektroenergetycznym (tj. po odłączeniu generatora/wyłączeniu obciążenia), przed rozpoczęciem działania jakiegokolwiek sterowania (uruchomieniu regulacji pierwotnej). Wartość RoCoF można wyznaczyć z poniższej zależności.

$$RoCoF = \frac{\Delta P}{P_{Load}} \cdot \frac{f}{2 \cdot H}$$

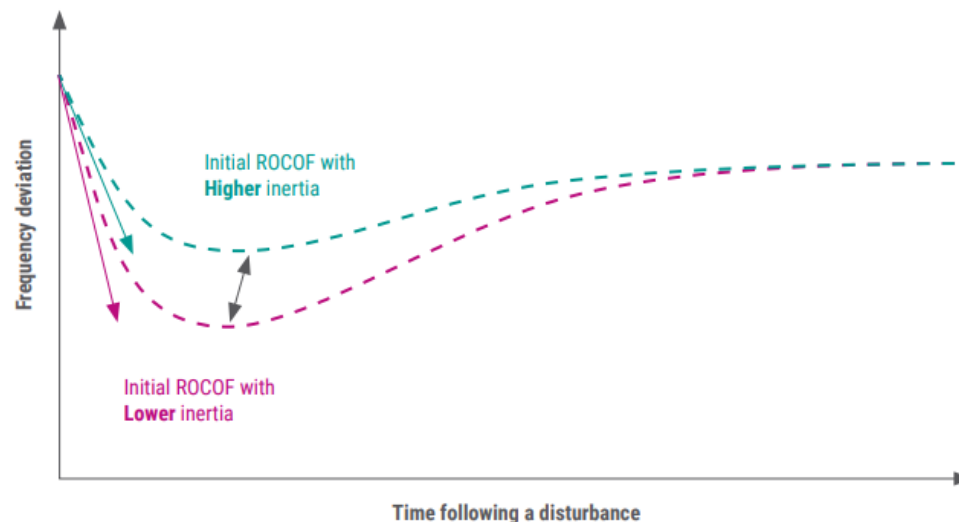
{

⊕ ΔP – niezbilansowanie mocy (ubytek mocy),

⊕ f – częstotliwość.

| Zagadnienia metodyczne – inercja (2)

- ⌚ Wysoka wartość RoCoF może powodować wyłączenie innych generatorów. W tych warunkach odpowiedź częstotliwościowa systemu może stać się bardziej podatna na zmiany (niestabilna), a system może być narażony na znaczne zrzuty obciążenia wpływające na częstotliwość i na ryzyko awarii zasilania, co obrazowo przedstawiono poniżej:

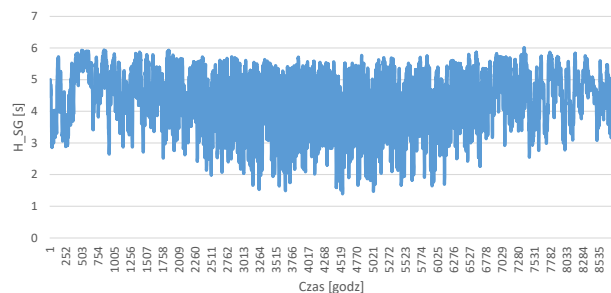


- ⌚ Obecny limit pracy systemu przyjmuje RoCoF określony na poziomie 1 Hz/s. Jest to granica, którą uznaje się za taką, przy której stabilność częstotliwości może być zapewniona przy wykorzystaniu istniejących systemów sterowania (ograniczonej regulacji pierwotnej - wzrost częstotliwości, ograniczonej regulacji pierwotnej - spadek częstotliwości, zrzut obciążeń). Jednak analizy niektórych przypadków pokazują, że może być to również wielkość niewystarczająca.
- ⌚ Z uwagi na dynamikę opisywanych procesów weryfikację wystarczalności inercji prowadzi się poprzez wykorzystanie dedykowanych narzędzi symulacji dynamicznej i szczegółowe modele systemu. Dla obliczeń wykonywanych za pomocą narzędzia PLEXOS można zastosować jedynie proste podejście wykorzystywane przez ENTSO-E w ramach procesów TYNDP.
- ⌚ Zgodnie z tym podejściem wyznacza się inercję w systemie elektroenergetycznym dla każdego stanu pracy korzystając z określonych punktów pracy jednostek wytwórczych.
- ⌚ Do tego celu można wykorzystać standardowe stałe inercji dla poszczególnych technologii.
- ⌚ Dodatkowo można jeszcze określić energię kinetyczną mas wirujących oraz wskaźnik RoCoF (przy założonym ubytku mocy).
- ⌚ **Rekomendowaną wartością minimalną ekwiwalentu inercji dla systemów elektroenergetycznych krajów członkowskich ENTSO-E jest $(H_{eq})_{min} = 2$ s.**

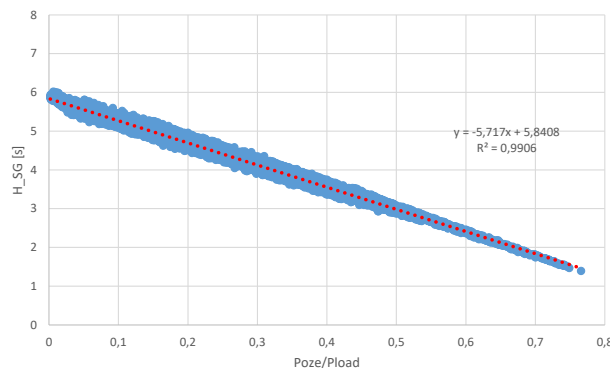
Ocena inercji synchronicznej (1)

- ⇒ Wyznaczono graniczne udziały źródeł OZE pogodozależnych w bilansie produkcji energii elektrycznej.
- ⇒ Wykorzystano wyniki analiz prowadzonych dla układów z 2025 r. (2025_Generation) oraz 2040 r. (2040_Generation).
- ⇒ Przy danym poziomie zapotrzebowania można określić kilka poziomów inercji, co wynika z danego zestawu jednostek wytwórczych i ich technologii.
- ⇒ Zauważalne jest rozproszenie (zakres wyników) oszacowania inercji dla warunków 2040 r. – jest to wynik wzrostu udziału OZE, a w szczególności OZE pogodozależnych.

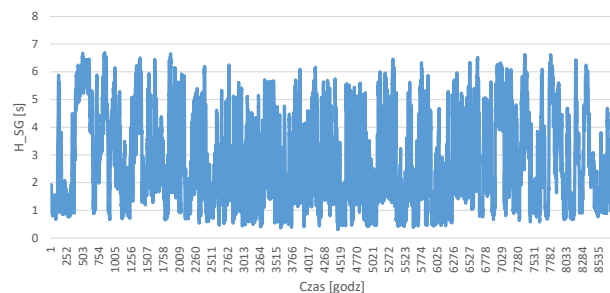
⇒ **Zastępcza inercja systemu KSE oszacowana dla wyników 2025 r.**



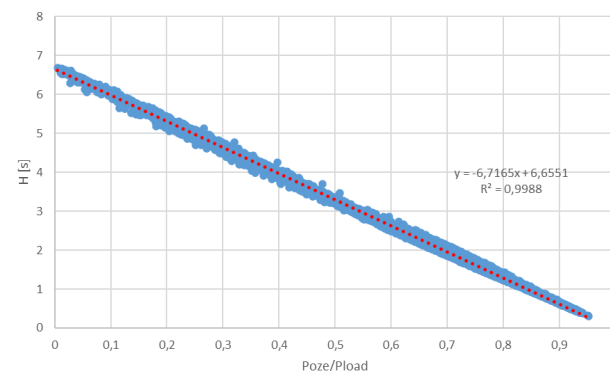
⇒ **Zależność zastępczej inercji KSE od udziału w produkcji źródeł OZE pogodozależnych w 2025 r.**



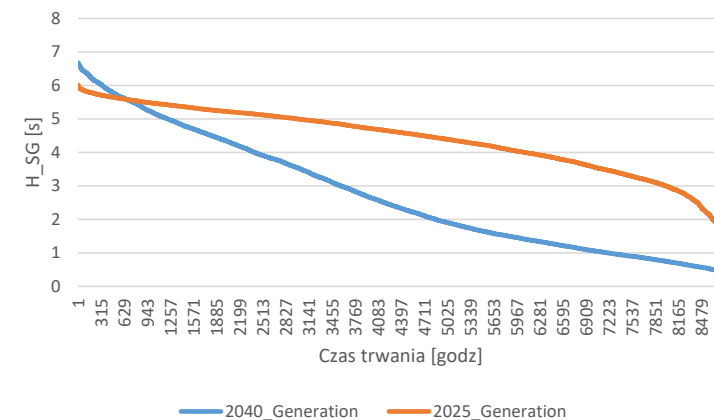
⇒ **Zastępcza inercja systemu KSE oszacowana dla wyników 2040 r.**



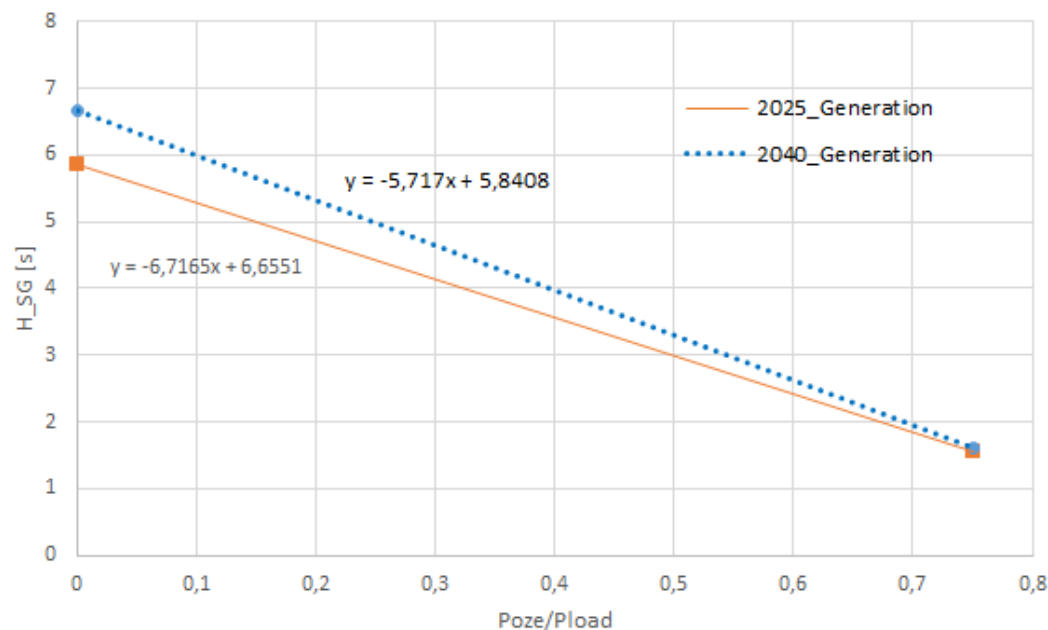
⇒ **Zależność zastępczej inercji KSE od udziału w produkcji źródeł OZE pogodozależnych w 2040 r.**



⇒ **Krzywe uporządkowane zastępczej inercji KSE dla warunków generacji w 2025 r. i 2040 r.**



Ocena inercji synchronicznej (2)



- Na powyższym rysunku można zauważyć, że zależność oszacowanej inercji zastępczej systemu od udziału OZE pogodozależnych jest praktycznie liniowa.
- Zakres zmienności udziałów OZE w 2040 roku jest odnotowywany w każdej godzinie i jest znacznie większy (od 3,5% do 92%) niż w 2025 roku.
- Można również zauważyć, że nachylenie aproksymacji liniowej w 2040 roku jest większe niż w 2025, ale trzeba dodać, że nie jest to duża zmiana.
- Dzięki liniowej aproksymacji, przy bliskim jedności współczynnika korelacji R^2 , można wyznaczać graniczny udział OZE pogodozależnych biorąc pod uwagę rekomendacje ENTSO-E (*).
- Zgodnie z tymi rekomendacjami **przyjmując $H_{min} = 2 \text{ s}$** udział OZE pogodozależnych **nie powinien przekroczyć 69%** w każdej godzinie pracy systemu.

05

| Rozwój zasobów magazynowych

| Szacunki rozwojowe

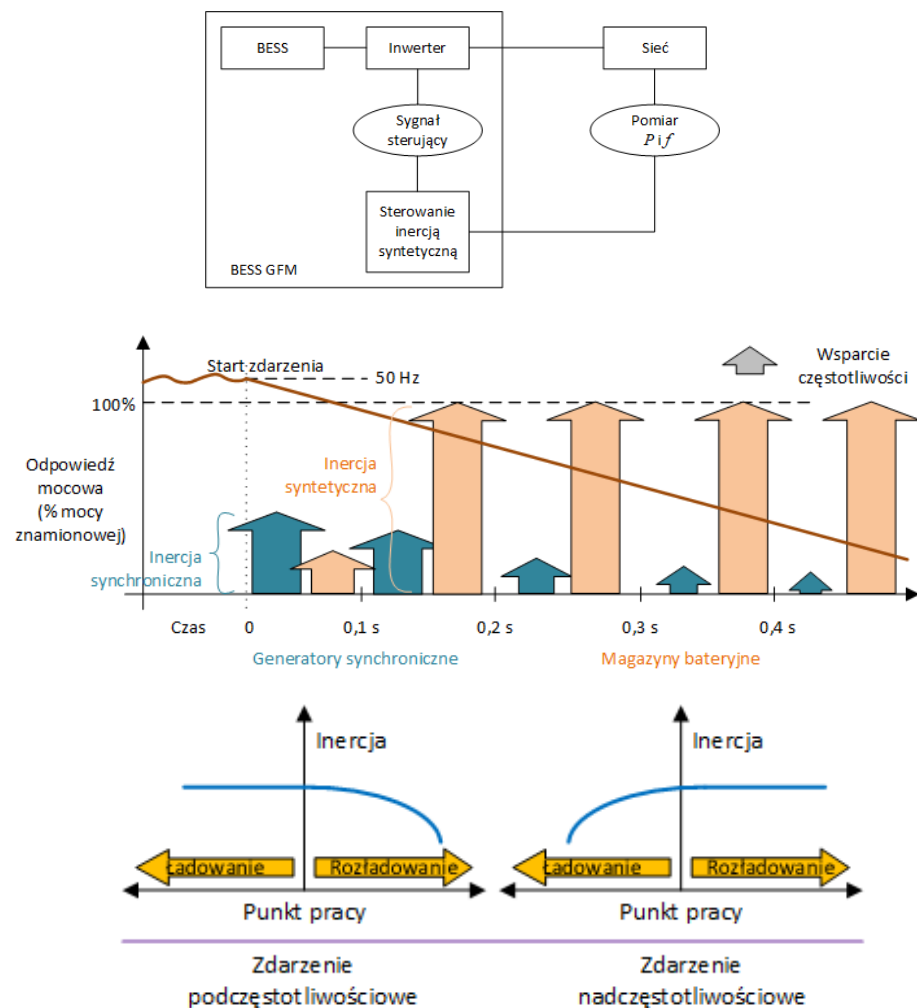
- ➡ Raport ekspertów z PSME oraz AGH: „Wpływ rozbudowy infrastruktury magazynów energii na rozwój gospodarczy w Polsce - prognoza do 2040 r.” podaje 3 scenariusze rozwojowe, w tym scenariusz PEP2040.

	Nowa pojemność zainstalowana [MWh]					
	Magazyny klasy prosumenckiej			Magazyny przemysłowe i wielkoskalowe		
	BAZ	PEP2040	OPT	BAZ	PEP2040	OPT
2021–2025	1000	610	1150	1615	2440	2000
2026–2030	1400	990	1610	9200	3960	11 000
2031–2035	2100	1510	2415	10 400	6040	12 000
2036–2040	2400	1290	2760	12 800	5160	15 000
Łącznie 2021–2040	6900	4400	7935	34 015	17 600	40 000

- ➡ Aktualny projekt „Planu Rozwoju [...]” określa informacje ilościowe na bazie składanych i zatwierdzonych wniosków o określenie warunków przyłączenia. Wg stanu na 31.12.2025 r przyjmuje, że łącznie powstanie 74,2 GW w magazynach energii (moc rozładowania magazynów), z czego w sieci przesyłowej już 8,5 GW ma zawarte umowy o przyłączenie, natomiast 39,1 GW ma wydane warunki przyłączenia. W sieci dystrybucyjnej na poziomie 110 kV jest to odpowiednio 21,9 GW z wydanymi warunkami przyłączenia oraz szacunkowo 4,7 GW jest planowane do przyłączenia na napięciu SN.

Wsparcie systemu elektroenergetycznego

- ⊕ Działanie i odpowiedź magazynów energii jest zróżnicowana z uwagi na technologię wykonania. Najczęściej występujące BESS nie mając części ruchomych nie posiadają naturalnej energii kinetycznej. Ich reakcja jest możliwa dzięki układom sterowania i funkcjonalności GFM.
- ⊕ Reakcja magazynu jest uwarunkowana wykryciem zakłócenia i uruchomieniem zgromadzonego zasobu energii.
- ⊕ Charakterystyka syntetycznej bezwładności dla systemu GFM BESS zmienia się w zależności od: punktu pracy, charakteru i rozmiaru awarii oraz zdolności do przeciążania.



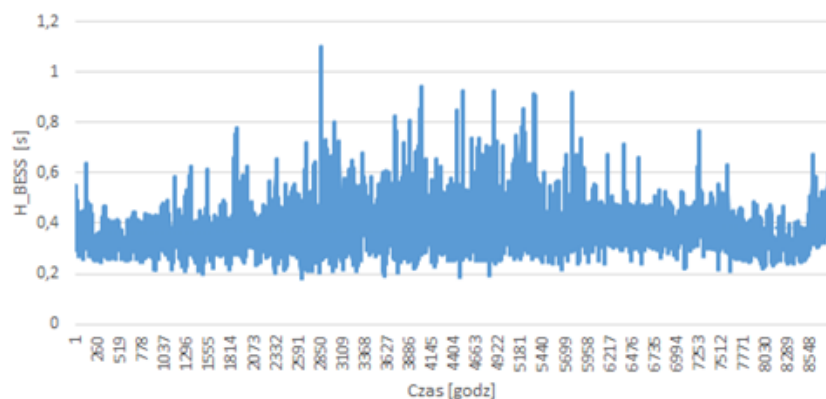
06

| Oszacowanie inercji (synchronicznej i syntetycznej)

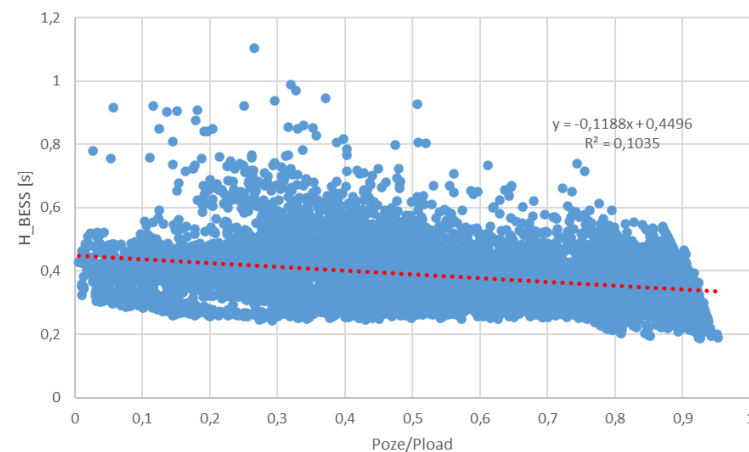
| Ocena inercji ze wsparciem ME (1)

- ⌚ Energię dostępną w magazynach przyjęto na podstawie oceny energii możliwej do oddania/pobrania przez magazyny w krótkiej chwili czasu.
- ⌚ Z uwagi na zróżnicowane warunki pracy i stan magazynów, a także nieznyany charakter potencjalnych zakłóceń zastosowano współczynnik korekcyjny odpowiadający średniemu stanowi naładowania magazynów z uwzględnieniem sprawności procesu rozładowania/ladowania.
- ⌚ Rozkład inercji syntetycznej oparto na wykorzystaniu GFM BESS, przy założeniu 80 GWh pojemności magazynów o czasie rozładowania 4 godziny (Energy to Power Ratio).

⌚ Szacunkowa inercja BESS dla warunków 2040 r.

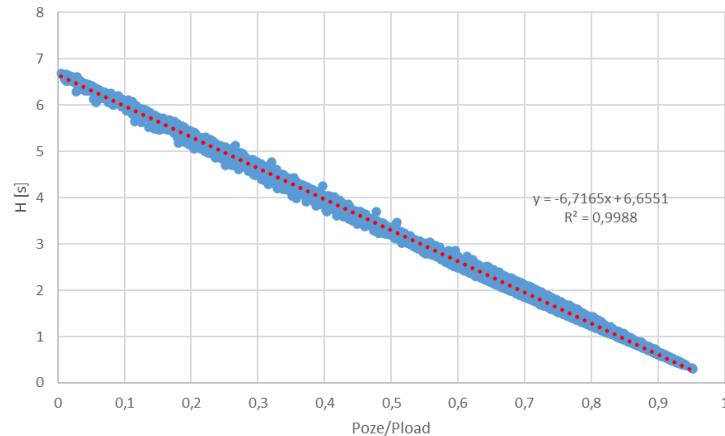


⌚ Zależność szacunkowej inercji BESS od udziału w produkcji źródeł OZE pogodozależnych w 2040 r.

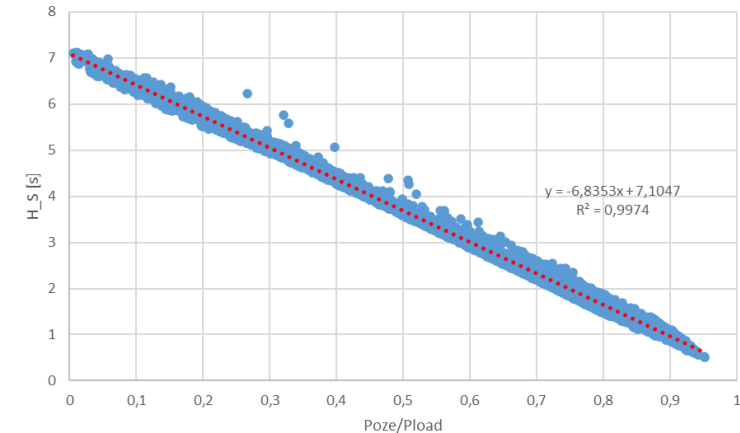


Ocena inercji ze wsparciem ME (2)

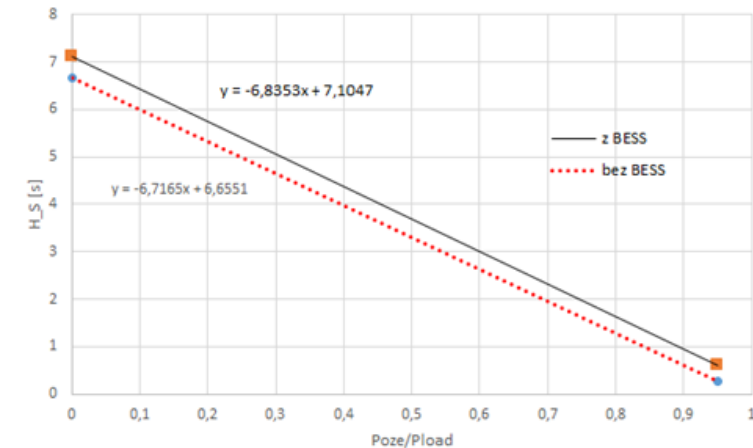
➡ Inercja zastępcza KSE (SG) dla warunków 2040 r.



➡ Inercja zastępcza KSE (BESS+SG) dla warunków 2040 r.



- ➡ Zestawiono aproksymacje wyznaczonych inercji zastępczych dla KSE w warunkach 2040 roku przy uwzględnieniu wykorzystania BESS z funkcjonalności GFM i inercji uzyskiwanej z generatorów synchronicznych.
- ➡ Przyrost wypadkowej inercji systemu po uwzględnieniu GFM BESS wynosi od 0,45 s do 0,34 s odpowiednio dla minimalnego udziału OZE oraz maksymalnego udziału OZE.
- ➡ Biorąc pod uwagę rekomendowaną wartość inercji dla systemu w wymiarze 2 s można określić graniczny udział pogodozależnych OZE po uwzględnieniu wkładu inercji pochodzącej od GFM BESS. W analizowanych warunkach 2040 roku rozwiązanie to pozwala na zwiększenie udziału OZE do 75% w całości generacji pokrywającej zapotrzebowanie.



➡ Zależność zastępczej inercji KSE dla warunków generacji w 2040 r.

07

| Podsumowanie i wnioski

| Podsumowanie i wnioski

- Zmiany struktury wytwarzania energii, w tym zmiana wykorzystywanych technologii wytwórczych rodzi obawy o utrzymanie stabilności pracy systemu. Zaprezentowane analizy pozwalają na szacunkową ocenę zmian, które będą wymagały podejmowania odpowiednich środków zaradczych. W wielu przypadkach wymaga to przygotowania technologii i odpowiedniego doboru.
- Wsparcie poprzez inercję syntetyczną uzyskiwaną dzięki funkcjonalności GFM w inwerterach BESS (i źródeł OZE) może poprawić rezultaty obliczeń. Zwraca się uwagę na ciągle wstępny stan wdrożeniowy tego typu rozwiązań, stąd też podjęte ostrożne szacunki są jedynie próbą oceny ilościowej z bezpieczną perspektywą rozwojową.



Wyniki finalne

Badając sytuację w 2040 roku uwzględniono bardzo duży potencjał OZE. W tych warunkach następuje znacząca utrata inercji synchronicznej, a dzięki GFM BESS uzyskane zwiększenie inercji (syntetycznej) oszacowano w wymiarze 0,34 s w szczycie udziału OZE.



Odporność systemu

Wzrost udziału OZE i wiele innych czynników eliminuje źródła konwencjonalne dostarczające inercję synchroniczną. W związku z powyższym ważnym tematem jest wykorzystywanie inercji syntetycznej.



Efektywność BESS

Przeprowadzone analizy pokazują skalę zmian oraz szacują efekty wykorzystania inercji syntetycznej pochodzącej z zasobników bateryjnych wyposażonych w funkcjonalność tzw. Grid-forming (GFM BESS).



Alternatywa (dyskusyjna)

Dla porównania elektrownia konwencjonalna o stałej bezwładności równej 6 s zapewni przyrost inercji rzędu 0,34 s przy mocy zainstalowanej 2680 MW.

Maksymilian Przygodzki

Katowice BiR PSE Innowacje