

Analiza wpływu generacji odnawialnych źródeł energii na ceny energii na Towarowej Giełdzie Energii

Streszczenie

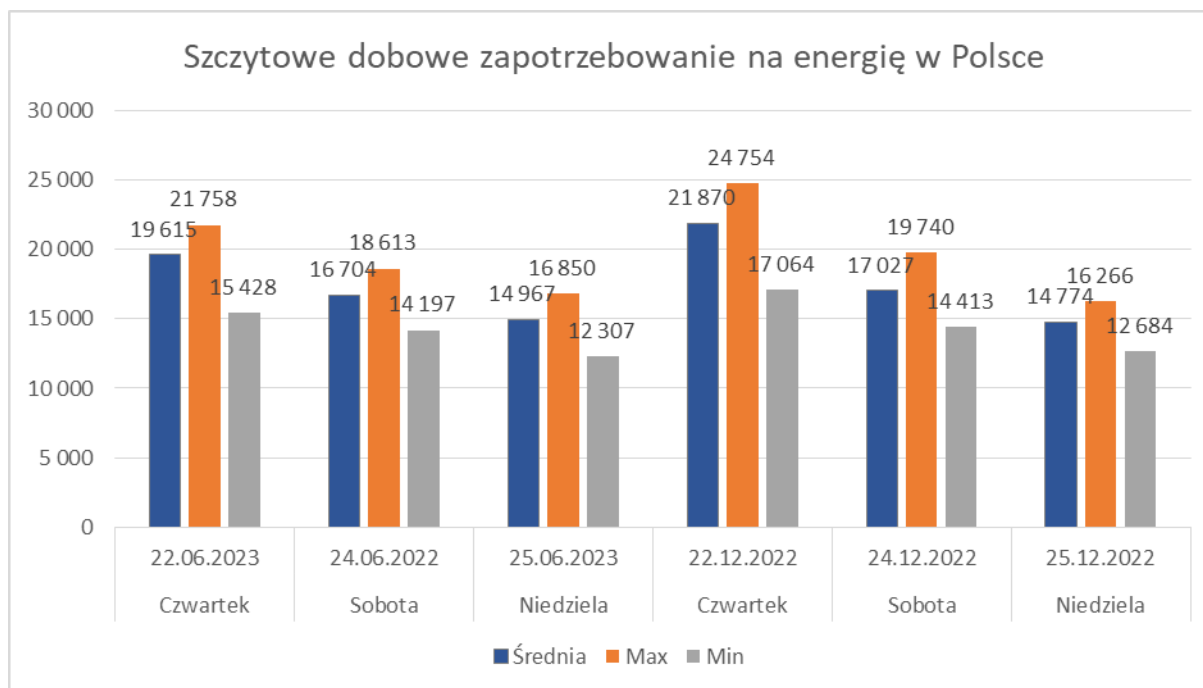
Od ponad 20 lat realizowana jest w Polsce transformacja energetyczna polegająca na rozwoju odnawialnych źródeł energii. Przez wiele lat ich udział w zainstalowanej mocy wytwórczej był niezauważalny. W 2023 roku to się zmieniło. NA towarowej Giełdzie Energii odnotowano po raz pierwszy ujemne ceny energii, a operator systemu przesyłowego wydał polecenie przewencyjnego odłączenia odnawialnych źródeł energii, kierując się dbałością o bezpieczeństwo pracy Krajowego Systemu Elektroenergetycznego. NA chwilę obecną za znaczącą generację źródeł odnawialnych w polskim systemie można wyróżnić energetykę wiatrową i fotowoltaikę. Celem niniejszego artykułu jest zaprezentowanie wyników badań, których celem było zweryfikowanie czy generacja ze źródeł odnawialnych może być traktowana jako czynnik implikujący ceny na Towarowej Giełdzie Energii, a co za tym idzie czy możliwe jest prognozując generację ze źródeł odnawialnych jednocześnie prognozować ceny energii.

Słowa kluczowe

Towarowa Giełda Energii, odnawialne źródła energii, fixing, merit order, krzywa kaczki

WPROWADZENIE

Rok 2023 można uznać za przełomowy z perspektywy rozwoju odnawialnych źródeł energii w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym Polski. Najlepszym na to dowodem były ujemne ceny energii na Rynku Dnia Następnego na Towarowej Giełdzie Energii. Za przyczynę tego zjawiska wskazuje się chwilową nadpodaż energii, która była efektem niekontrolowanej generacji ze źródeł odnawialnych. Celem nadrzędnym krajowego systemu elektroenergetycznego jest zapewnić zaopatrzenie w energię elektryczną w ilości wymaganej przez odbiorców w każdym momencie. Na rysunku 1 przedstawiono wartości zapotrzebowania na energię w Polsce w dni robocze, soboty i niedziele dla okresu przesilenia letniego i zimowego. Jak można zauważyć, zapotrzebowanie na energię oscyluje pomiędzy wartościami 12,3 do 24,8 GW w przeciągu roku, ale równie istotna jest zmienność w ciągu doby, która może wynieść blisko 7,7 GW.



Rys. 1. Zapotrzebowanie na energię elektryczną w dni robocze, soboty i niedziele w okresie przesilenia letniego i zimowego

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych PSE S.A.

W tabeli nr 1 przedstawiono zestawienie rodzajów generacji funkcjonujących w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym.

Tab. 1. Moce rodzajów jednostek wytwórczych funkcjonujących w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym w czerwcu 2023 roku

Rodzaj generacji	Moc
JWCD	27 770
Węgiel kamienny	16 114
Węgiel brunatny	8 249
Elektrownie gazowe	3 407
nJWCD	8 773
Węgiel kamienny	7 450
Węgiel brunatny	128
Elektrownie gazowe	1 195
Elektrownie wodne	2 504
Farmy wiatrowe	9 698
Fotowoltaika	16 190
Biomasa	275
Olej opałowy	747
Gaz koksowniczy	158
Suma	66 115

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych PSE S.A.

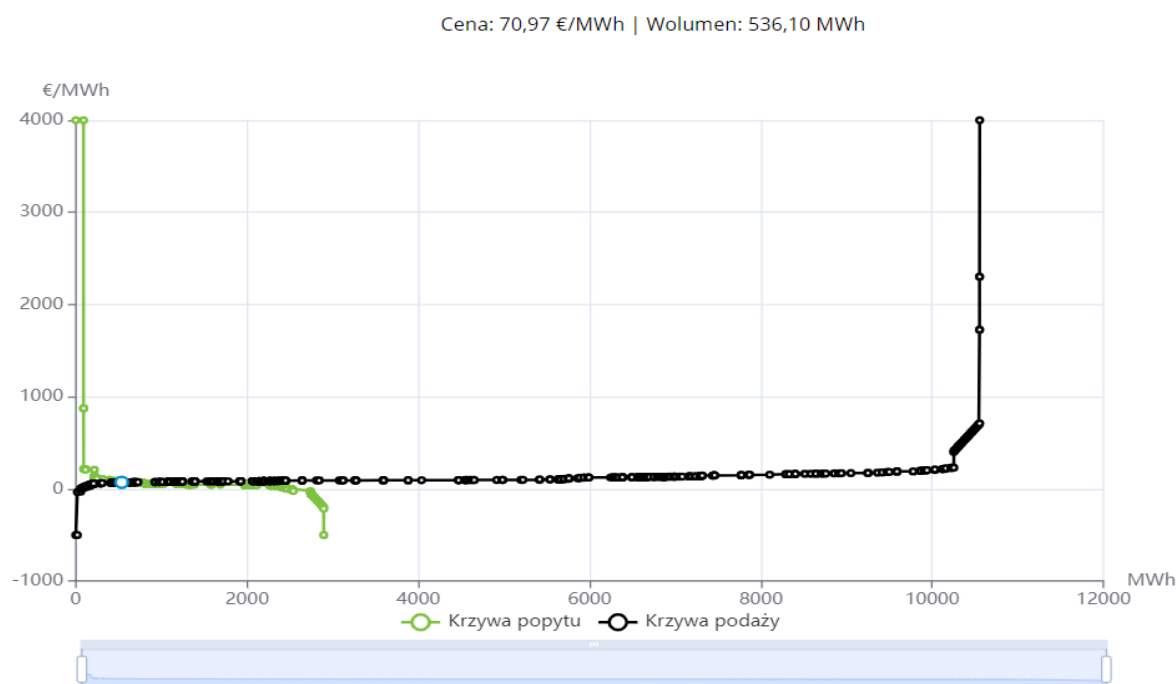
Zgodnie z obowiązującymi przepisami prawa energia wytworzona w odnawialnych źródłach energii ma pierwszeństwo w kwestii wprowadzenia jej do krajowego systemu elektroenergetycznego.

Niemniej w związku z obowiązkiem zapewnienia bezpieczeństwa funkcjonowania Krajowego Systemu Elektroenergetycznego, w roku 2023 PSE S.A. po raz pierwszy wykonało wyłączenia prewencyjne części jednostek odnawialnych źródeł energii. Wynika to z parametrów pracy jednostek konwencjonalnych, które w celu zachowania możliwie długiej żywotności charakteryzują się tzw. minimum technicznym, co łącznie tworzy podstawę wirującą systemu, poniżej której nie powinno się redukować mocy jednostek konwencjonalnych (Trzeczyski, Dobosiewicz, Stanek 2019). Zgodnie z komunikatem PSE z dnia 23.04.2023 podstawa wirująca kształtowała się na tamten moment na poziomie 9 GW mocy wytwórczej, ale wartość ta jest zmienna w zależności od pory roku.

Mechanizmem ważnym do uwzględnienia w bilansowaniu sieci jest wymiana transgraniczna z krajami ościennymi. Analiza danych publikowanych przez PSE S.A. wskazuje na silną korelację generacji krajowych jednostek fotowoltaicznych z wymianą z Litwą i Słowacją (Włoch 2023).

Mając na uwadze specyfikę pracy systemu, które stanowi że energia elektryczna powinna być konsumowana w czasie jej produkcji, przestrzeń dla uprzywilejowanej energii odnawialnej determinują trzy czynniki, tj. chwilowe zapotrzebowanie, podstawa wirująca oraz chwilowa możliwość wymiany transgranicznej.

Na Towarowej Giełdzie Energii ceny w Notowaniach Rynku Dnia Następnego są wyznaczone zgodnie z zasadą Merit Order, czyli ceny krańcowej. Metoda ta jest stosowana w krajach europejskich. W miarę rozwoju energetyki odnawialnej zauważalne jest zjawisko penetracji rynku energii energią ze źródeł odnawialnych, co ostatecznie określono „zjawiskiem Merit Order” (Merit Order Effect, Kusz 2017) polegającym na wypychaniu energii ze źródeł konwencjonalnych energią ze źródeł odnawialnych. Na wykresie 2 przedstawiono przykład krzywych zagregowanych dla wyznaczania ceny transakcyjnej energii.



Rys. 2. Przykład krzywych zagregowanych ofert kupna i sprzedaży energii dla jednej doby, w miesiącu lipcu 2023 roku
Źródło: TGE S.A.

Pojawia się zatem pytanie, czy wypychanie konwencjonalnych źródeł energii ze stosu ofert dla kształtowania się cen na Towarowej Giełdzie Energii, może być czynnikiem determinującym te ceny, a co za tym idzie czy prognozując produkcję z odnawialnych źródeł energii można jednocześnie prognozować ceny na Towarowej Giełdzie Energii?

Celem niniejszego artykułu jest zaprezentowanie wyników badań, które skupiły się na weryfikacji czy generacja ze źródeł odnawialnych może być traktowana jako czynnik implikujący ceny na Towarowej Giełdzie Energii, a co za tym idzie czy możliwe jest prognozując generację ze źródeł odnawialnych jednocześnie prognozować ceny energii.

ENERGIA ELEKTRYCZNA W KRAJOWYM SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM I NA TOWAROWEJ GIEŁDZIE ENERGII

Planowanie pracy Krajowego Systemu Elektroenergetycznego odbywa się w różnych reżimach czasowych, tj. wieloletnim, średnioterminowym, dobowym i bieżącym (IRiESP 2021). Z perspektywy handlu energią praktykowane są różne formy transakcji, tj. kontrakty terminowe, PPA, taryfy, transakcje OTC oraz handel na rynku energii. Uzupełniającą przestrzeń do zawierania transakcji energii jest rynek bilansujący, ale nie powinien być on wykorzystywany do efektywnego handlu, a jedynie być narzędziem do bieżącego bilansowania systemu (Urbanek, Paska, Pawlak, Terlikowski, Kaliński 2013). Do kluczowych zasad determinujących handel energii i kształtowanie się cen na Towarowej Giełdzie Energii na Rynku Dnia Następnego należy zaliczyć:

1. Chwilowe zapotrzebowanie na energię elektryczną,
2. Chwilowe możliwości wymiany transgranicznej,
3. Chwilową wartość podstawy wirującej,
4. Chwilową produkcję odnawialnych źródeł energii.

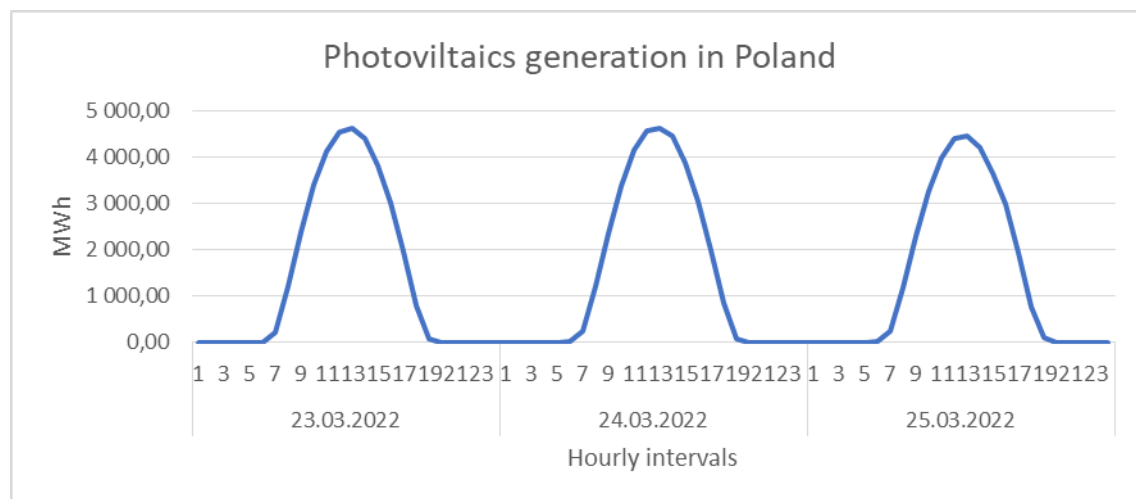
Zgodnie z informacjami publikowanymi przez PSE S.A. planowanie ilości energii w reżimie bieżącym powinno zakładać rezerwę mocy na poziomie 9% ponad zapotrzebowanie¹. Zśród jednostek wytwórczych funkcjonujących w systemie blisko 28 GW stanowią JWCD (jednostki wytwórcze centralnie dysponowane). Jednostki konwencjonalne mają strategiczne znaczenie dla bilansowania bieżącego zapotrzebowania energetycznego, dlatego kierując się kwestiami bezpieczeństwa pracy systemu operator zmuszony jest uwzględniać specyfikę pracy tych jednostek (Kasztelewicz, Patyk 2015).

Zjawiskiem postępującym w systemie jest zwiększenie penetracji energią pochodzącą z odnawialnych źródeł energii. W roku 2023 odnotowano szczytową produkcję dla 1 godziny pracy systemu odpowiednio 8384 MWh dla energetyki wiatrowej i 9274 MWh dla fotowoltaiki (PSE 2024). W miarę wzrostu udziału energii odnawialnej w systemie następuje przesunięcie w prawo krzywej generacji, co skutkuje wypchnięciem z rynku jednostek konwencjonalnych (Roland – Fernandez, Burgos – Payan, Riquelme – Santos, Trigo – Garcia 2016). W miarę wzrostu udziału energii ze źródeł odnawialnych, również wyzwaniem staje się kwestia rezerwy mocy. Ponieważ plany inwestycyjne są długoterminowe i nie ma perspektyw na duże zmiany w krótkim horyzoncie czasowym wśród konwencjonalnych źródeł wytwórczych, nie można liczyć na zwiększenie mocy regulowanej

¹ <https://www.pse.pl/jak-funkcjonuje-krajowy-system-elektroenergetyczny/planowanie-pracy-systemu> [data dostępu: 23 lipca 2025r.]

Analiza wpływu generacji odnawialnych źródeł energii na ceny energii na Towarowej Giełdzie Energii w systemie, którą można bilansować pracą systemu. Dlatego jako alternatywne działanie sugerowane jest prewencyjne ograniczanie generacji źródeł odnawialnych (Przygodzki, Chmurski 2015).

Zarówno energetyka wiatrowa jak i fotowoltaika są uznawane za źródła stochastyczne, których generacja uzależniona jest od uwarunkowań pogodowych. Z pośród tych dwóch większą przewidywalnością charakteryzuje się fotowoltaika, dla której generacja energii odbywa się w ciągu dnia, a swój szczyt osiąga o godzinie 12.30, co pokazano na rysunku 3.

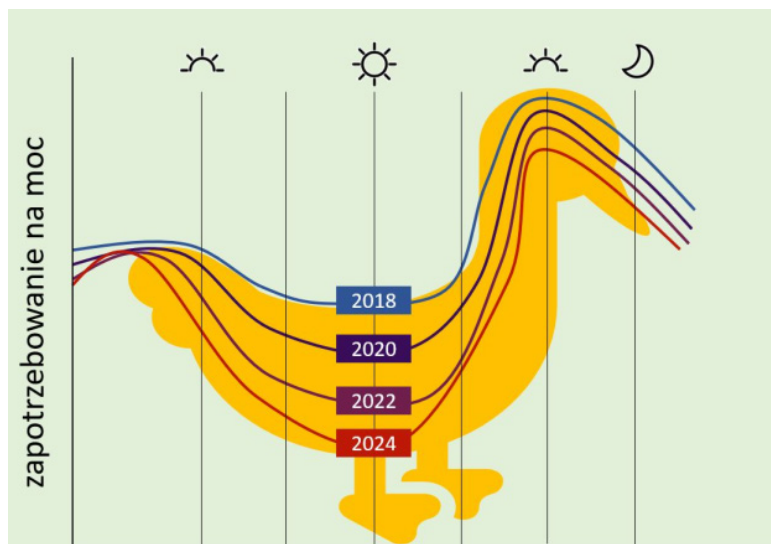


Rys. 3. Krajowa produkcja źródeł fotowoltaicznych dla trzech wybranych dni

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych z PSE S.A.

Fotowoltaika zaliczana jest do rodzaju źródeł rozproszonych, dla których ogromne znaczenie ma efekt skali.

Energetyka fotowoltaiczna jest technologią rozwijaną na całym świecie. Jej specyfika pracy, oraz wzrost zainstalowanej mocy doprowadził do obserwacji specyficznego zjawiska, w efekcie czego w 2012 roku Karen Edson z Kalifornijskiego Niezależnego Operatora Systemu określiła go jako tzw. „krzywa kaczki”. Zjawisko to wskazuje na spadek zapotrzebowania na energię ze źródeł konwencjonalnych w miarę przyrostu generacji ze źródeł fotowoltaicznych (Qingchun, Ning, Ershun, Miao, Chongqing 2019). Ma to miejsce w określonych godzinach doby, co na wykresie przypomina przystawioną kaczkę. Istotę krzywej kaczki zaprezentowano na rysunku nr 4.

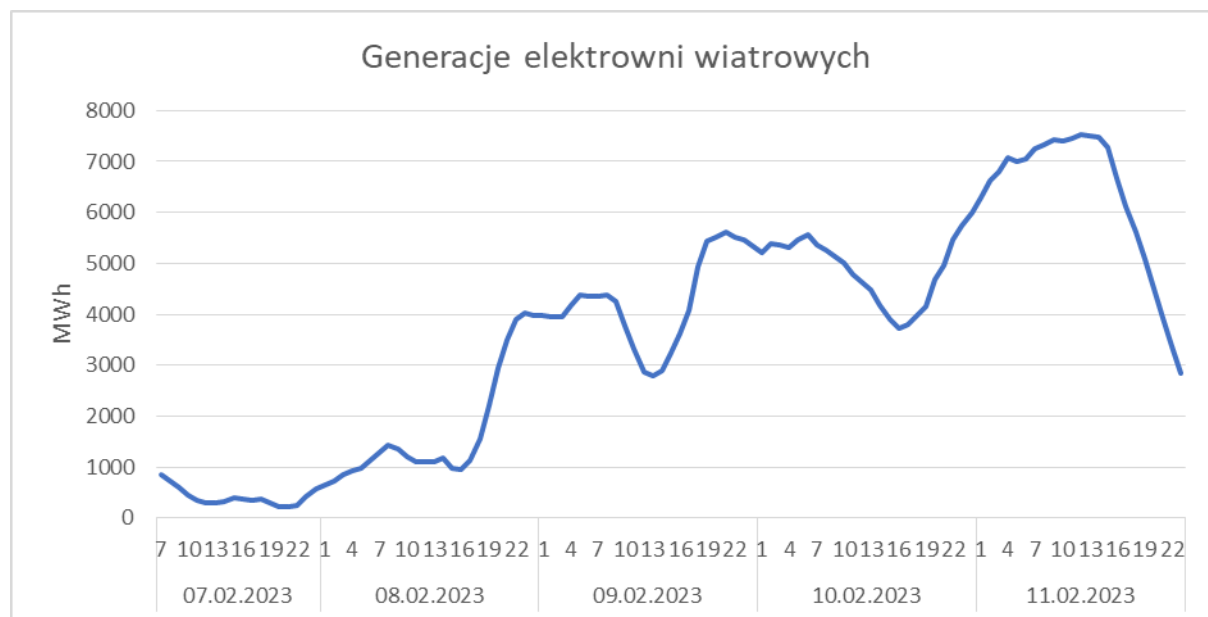


Rys. 4. Krzywa kaczki.

Źródło: <https://eko-broker.com/dlaczego-ceny-pradu-bywaja-ujemne-krzywa-kaczki/>, [data dostępu: 15 listopada 2023r.]

W konsekwencji pojawiły się poglądy, że generacja ze źródeł fotowoltaicznych w bezpośredni sposób wpływa na kształtowanie się cen energii na Towarowej Giełdzie Energii. Ponieważ energia elektryczna powinna być konsumowana w chwili jej generacji, dla sytuacji nadmiernej generacji ze źródeł fotowoltaicznych prowadzono szereg analiz uwzględniających systemy magazynowania energii (Ahmand, Al-Ismaïl, Almehizia, Khalid 2020). Badanie przeprowadzone w 2021 roku wskazało, że w polskim systemie elektroenergetycznym tzw. krzywa kaczki jeszcze nie jest zauważalna, ale z całą pewnością należy się go spodziewać w niedalekiej przyszłości (Olczak, Jaśko, Kryzia, Matuszewska, Fyk, Dyczko 2021). Nastąpiło to właśnie w 2023 roku, a objawiło cenami energii bliskimi wartości zerowej oraz prewencyjnymi wyłączeniami instalacji fotowoltaicznych.

Większą zmiennością charakteryzuje się energetyka wiatrowa. W przeciwieństwie do fotowoltaiki nie charakteryzuje się ona dobową powtarzalnością, co zaprezentowano na rysunku 5.



Rys. 5. Krajowa produkcja źródeł wiatrowych dla wybranych dni

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych z PSE S.A.

Jednak i w tym przypadku w roku 2023 miały miejsca tzw. przewencyjne wyłączenia lub ograniczenia mocy, oraz odnotowano znacząco niskie ceny energii. Takie zjawisko miało miejsce np. 1 stycznia o godzinie 3 rano, jak również w wieczór wigilijny, 24 grudnia.

Znaczący wzrost w ostatnich latach zainstalowanej mocy źródeł wiatrowych i fotowoltaicznych, skłonił Towarową Giełdę Energii do stworzenia dwóch nowych indeksów. TGePVm i TGeONSHOREm które stanowią średnie ceny ważone wolumenem produkcji odpowiednio źródeł fotowoltaicznych i elektrowni wiatrowych w danym miesiącu.² Oba wskaźniki mają reprezentować odstępstwo cenowe zauważalne dla handlu energią ze źródeł fotowoltaicznych w odniesieniu do średnich cen energii notowanych na giełdzie. Należy zauważyć, że handel energią na Towarowej Giełdzie Energii realizowany jest w interwałach godzinowych. Mając na uwadze profil generacji źródeł fotowoltaicznych oraz wiatrowych, można określić uzyskaną cenę ze sprzedaży energii wyprodukowanych w tych źródłach, która będzie odbiegać od średniej ceny giełdowej.

Ważnym również aspektem jest fakt, że na chwilę obecną nie funkcjonuje tzw. obbligo giełdowe, według którego handel energią elektryczną miał być w każdym przypadku realizowany na giełdzie. W efekcie w tabeli 2 przedstawiono wartości energii elektrycznej która była przedmiotem obrotu w Polsce w poszczególnych miesiącach, oraz wolumen energii jaki był przedmiotem transakcji na Towarowej Giełdzie energii. Można zauważyć, że w każdym miesiącu wolumen transakcji na giełdzie stanowił ok. 50%.

² https://tge.pl/aktualnosci-tge-czytaj?cmn_id=91483&title=Towarowa+Gie%C5%82da+Energii+wprowadza+nowe+indeksy+dla+sektora+OZE, [data dostępu: 16 listopada 2023r.]

Tab. 2. Porównanie wolumenu całkowitego energii oraz wolumenu obrotu na Towarowej Giełdzie Energii w poszczególnych miesiącach

Miesiąc	zapotrzebowanie - eksport	TGE	TGE/TOTAL
Styczeń 2023	14 979 414 MWh	6 279 317 MWh	41,92%
Luty 2023	13 756 748 MWh	4 495 844 MWh	32,68%
Marzec 2023	14 502 769 MWh	8 443 682 MWh	58,22%
Kwiecień 2023	12 720 856 MWh	6 449 310 MWh	50,70%
Maj 2023	12 510 135 MWh	5 824 942 MWh	46,56%
Czerwiec 2023	11 719 397 MWh	7 766 633 MWh	66,27%
Lipiec 2023	12 211 676 MWh	5 804 029 MWh	47,53%
Sierpień 2023	12 625 586 MWh	6 939 531 MWh	54,96%
Wrzesień 2023	12 749 697 MWh	7 640 132 MWh	59,92%
Październik 2023	14 216 035 MWh	8 122 455 MWh	57,14%
Listopad 2023	14 522 578 MWh	7 897 403 MWh	54,38%
Grudzień 2023	15 407 801 MWh	8 583 340 MWh	55,71%

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych PSE S.A. i TGE S.A.

GENERACJA ZE ŹRÓDEŁ ODNAWIALNYCH A CENY ENERGII NA TOWAROWEJ GIEŁDZIE ENERGII

Celem przeprowadzonego badania była weryfikacja zbieżności kształtowania się cen energii w interwałach godzinowych w Notowaniach Dnia Następnego na Towarowej Giełdzie Energii z produkcją energii ze źródeł fotowoltaicznych. Zdaniem autora pozornie widoczna taka zależność, nie znajduje potwierdzenia w danych. Gdyby taka zależność byłaby potwierdzona, można by dążyć do prognozowania cen energii w oparciu o prognozę pogody. Autor jednak przyjął hipotezę, że powyższe założenie jest zbyt dużym uproszczeniem.

Należy podkreślić, że energia elektryczna jest produktem, który nie posiada terminu przydatności do spożycia, tzn. musi być skonsumowana w chwili jej wyprodukowania. W Krajowym Systemie Elektroenergetycznym przyłączone jest sześć elektrowni szczytowo – pompowych³, które stanowią mechanizm magazynu energii, ale ich moc stanowi nie więcej jak 5% szczytowego zapotrzebowania na energię, przez co nieuzasadnionym jest twierdzenie o możliwym magazynowaniu energii w dużej ilości na długi okres czasu.

Zjawiskiem identyfikowanym z „krzywą kaczką” były najpierw ceny energii bliskie zeru, następnie pojawienie się ujemnych cen w notowaniach „Rynku Dnia Następnego”, najpierw w fixingu II, a później również w fixingu I. Niskie ceny energii również były zauważalne przy wysokiej generacji elektrowni wiatrowych.

Na podstawie obserwacji cen energii w notowaniach „Rynku Dnia Następnego” poszukiwano powtarzalności w powiązaniu z generacją ze źródeł fotowoltaicznych oraz energetyką wiatrową. W tabeli 3 zestawiono kilka przykładowych cen dla interwałów godzinowych, dla których generacja

3 <https://www.gov.pl/web/premier/komunikat-cir-raport-zespolu-eksperckiego-ds-budowy-elektrowni-szczytowo-pompowych>, [data dostępu: 16 listopada 2023r.]

Analiza wpływu generacji odnawialnych źródeł energii na ceny energii na Towarowej Giełdzie Energii ze źródeł fotowoltaicznych była możliwie zbliżona. Również przedstawiono przykłady rozbieżnych cen energii przy bardzo zbliżonej generacji z elektrowni wiatrowych.

Tab. 3. Zestawienie wybranych cen energii oraz odpowiadającym im wolumenom dla interwałów godzinowych

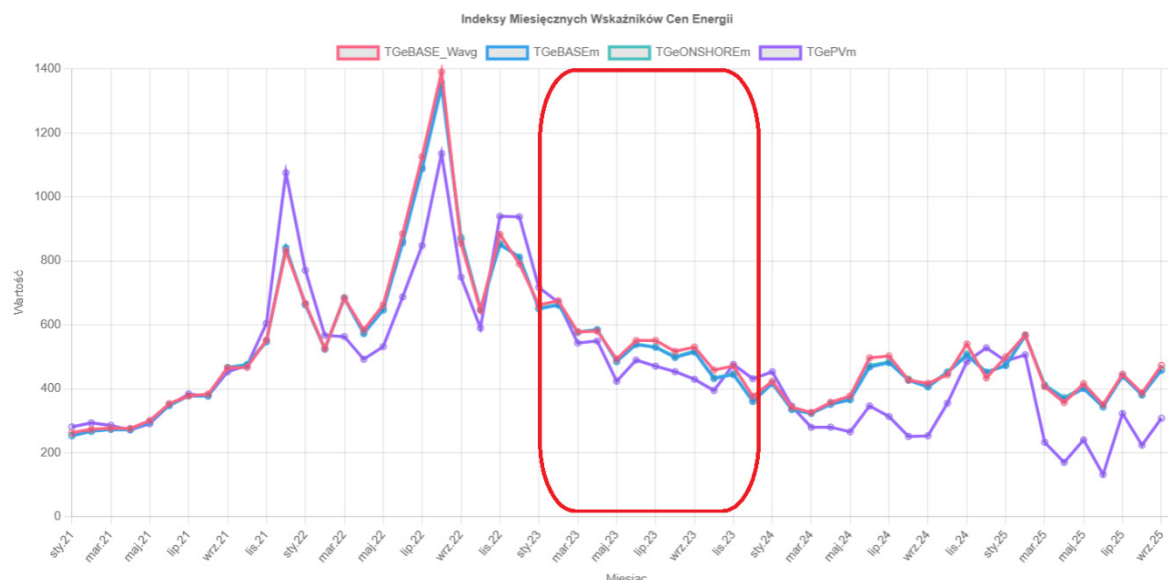
Data	Godz.	Real zapotrz.	Eksport/import	Fixing I	Onshore	PV	OZE
10.09.2023	13	15 565	-712	100,00 zł	329	8 845	9 175
21.09.2023	13	20 401	-1 710	320,00 zł	3 243	8 838	12 081
08.09.2023	13	20 614	-1 572	333,22 zł	262	8 797	9 059
16.09.2023	12	17 053	-1 894	215,20 zł	2 180	8 793	10 973
11.09.2023	13	21 119	-171	430,22 zł	55	8 758	8 813
10.09.2023	12	15 711	-889	80,00 zł	227	8 627	8 854
12.09.2023	13	21 788	-834	450,00 zł	72	8 604	8 677
09.09.2023	15	17 791	279	364,10 zł	296	7 533	7 829
08.10.2023	12	15 685	-4 615	0,01 zł	5 847	7 481	13 328
17.10.2023	13	21 809	-74	496,60 zł	1 325	6 980	8 305
08.10.2023	13	14 893	-4 884	0,01 zł	6 100	6 965	13 065
20231014	6	15136,725	-1226,44	1,01 zł	7487,013	0	7487,013
20231013	20	22197,125	-770,235	510,33 zł	7441,25	0	7441,25
20231006	21	21289,488	618,28	445,00 zł	7266,013	0	7266,013
20231014	5	14891,525	-1036,115	1,01 zł	7256,813	0	7256,813

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych PSE S.A. i TGE S.A.

Już samo porównanie powyższych wartości wskazuje, że generacja ze źródeł fotowoltaicznych, jak również elektrowni wiatrowych nie przekłada się w sposób powtarzalny na ceny energii. Przy generacji ze źródeł fotowoltaicznych na poziomie 8 800 MWh (zakres zmienności na poziomie 0,5%), ceny na fixingu I oscylowały w przedziale od 100 zł do 430,22 zł. Kolejne przykłady są jeszcze bardziej dosadne, np. przy generacji na poziomie 6 980 MWh różnica cen sięgała od 0,01 zł do 496,60 zł. Powyższa obserwacja stawia w wątpliwość bezpośrednią zależność generacji instalacji fotowoltaicznych i cen energii notowanych na rynku SPOT. Taką samą obserwację identyfikujemy dla energetyki wiatrowej. Generacja na poziomie 7 266 MWh/h miała miejsce przy cenach na fixingu I odpowiednio 1,01 zł oraz 445 zł. Mając powyższe na uwadze, trudno o hipotezę, że generacja energii ze źródeł odnawialnych implikuje kształtowanie się cen na Towarowej Giełdzie Energii.

METODYKA BADAŃ

Dane będące obszarem badań stanowiły wielkości charakteryzujące zapotrzebowanie na energię elektryczną, generację z elektrowni wiatrowych, fotowoltaicznych oraz wymianę transgraniczną w okresie od 1 stycznia do 31 grudnia 2023 roku. Na rysunku 6 przedstawiono indeksy miesięczne notowań cen energii na Towarowej Giełdzie Energii na Rynku Dnia Następnego.



Rys. 6. Indeksy miesięczne Towarowej Giełdy Energii Rynku Dnia Następnego

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych PSE S.A. i TGE S.A.

Wybrany zakres danych odpowiada okresowi, w którym nastąpiło uspokojenie notowań cen energii, które wcześniej zostały zdynamizowane odejściem od importu paliw z Rosji w związku z jej agresją na Ukrainę.

Dane te uzupełnione były danymi cen energii w interwałach godzinowych dla notowań „Rynku Dnia Następnego” na fixingu I. Z całą stanowczością można stwierdzić, że cykl roczny jest okresem reprezentatywnym zarówno od strony zmiennego zapotrzebowania na energię, jak i udziału różnych technologii w parytecie generacji energii. Wybrany okres jest o tyle istotny, że pozwalał zaobserwować zarówno znaczącą generację instalacji fotowoltaicznych (maksymalna wartość dla 1 godziny to 9274 MWh) jak i wiatrowych (maksymalna wartość dla 1 godziny to 8206 MWh).

Dla potrzeb badań stworzono dwie nowe wielkości. Pierwszą z nich jest zagregowana generacja odnawialnych źródeł energii (OZE). Kolejna zmienna o nazwie „delta”, reprezentowała następujące równanie:

$$\text{Delta} = \text{zapotrzebowanie} - \text{Import} - \text{OZE}$$

Gdzie:

Zapotrzebowanie – stanowi wartość krajowego zapotrzebowania na energię elektryczną.

Import – odpowiada ilość energii importowanej z krajów ościennych

OZE – odpowiada generacji energii ze źródeł wiatrowych i fotowoltaicznych.

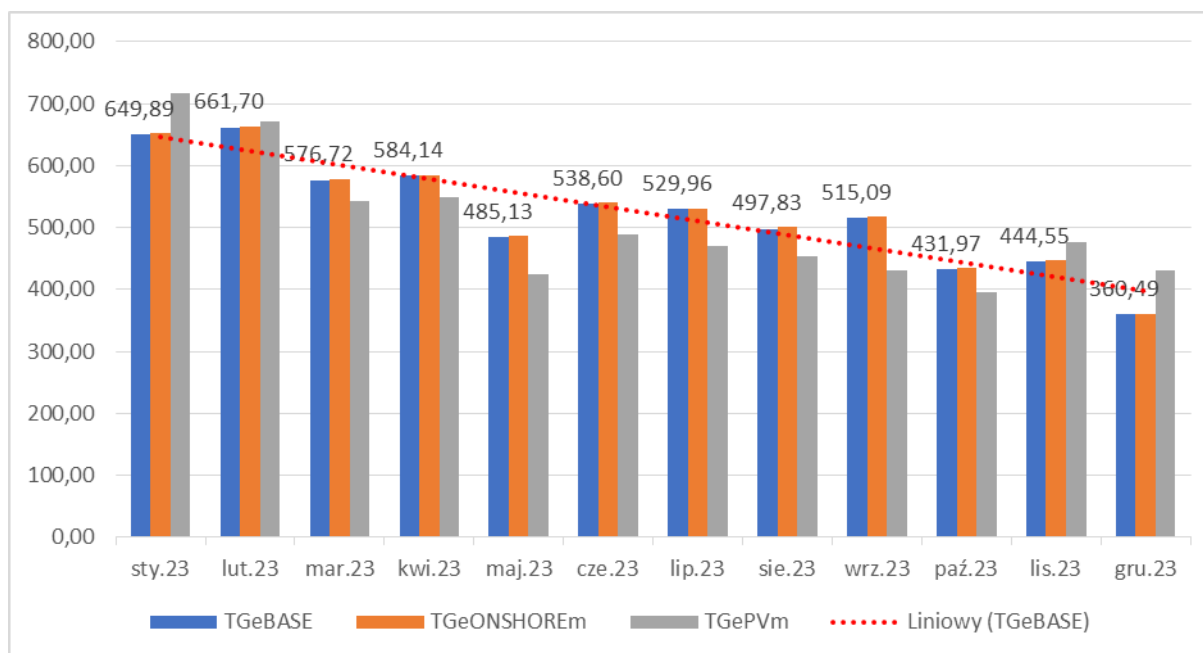
Innymi słowy zmienna „delta” oznacza możliwą do wypełnienia lukę w zapotrzebowaniu energii elektrycznej ze źródeł innych niż odnawialne źródła energii oraz importowana energia.

Tab. 4. Zestawienie wybranych cen energii i odpowiadającym im wolumenom uzupełniony o zmienne OZE i Delta

Data	Godz.	Real zapotrz.	Eksport/import	Fixing I	Onshore	PV	OZE	DELTA
10.09.2023	13	15 565	-712	100,00 zł	329	8 845	9 175	7 103
21.09.2023	13	20 401	-1 710	320,00 zł	3 243	8 838	12 081	10 030
08.09.2023	13	20 614	-1 572	333,22 zł	262	8 797	9 059	13 127
16.09.2023	12	17 053	-1 894	215,20 zł	2 180	8 793	10 973	7 974
11.09.2023	13	21 119	-171	430,22 zł	55	8 758	8 813	12 476
10.09.2023	12	15 711	-889	80,00 zł	227	8 627	8 854	7 746
12.09.2023	13	21 788	-834	450,00 zł	72	8 604	8 677	13 945
09.09.2023	15	17 791	279	364,10 zł	296	7 533	7 829	9 683
08.10.2023	12	15 685	-4 615	0,01 zł	5 847	7 481	13 328	6 972
17.10.2023	13	21 809	-74	496,60 zł	1 325	6 980	8 305	13 579
08.10.2023	13	14 893	-4 884	0,01 zł	6 100	6 965	13 065	6 711
14.10.2023	6	15136,725	-1226,44	1,01 zł	7487,013	0	7487,013	8 876
13.10.2023	20	22197,125	-770,235	510,33 zł	7441,25	0	7441,25	15 526
06.10.2023	21	21289,488	618,28	445,00 zł	7266,013	0	7266,013	13 405
14.10.2023	5	14891,525	-1036,115	1,01 zł	7256,813	0	7256,813	8 671

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych PSE S.A. i TGE S.A.

W tabeli nr 4 przedstawiono wybrane wartości wyselekcjonowane dla potrzeb analizy porównawczej, uzupełnione o nowe zmienne. Na wykresie 6 przedstawiono wartości indeksów TGeBASE, TGeONSHOREm i TGePVm, stanowiące odpowiednio średnią cenę miesięczną energii, miesięczną cenę profilu wiatrowego i miesięczną cenę profilu fotowoltaicznego. Na wykresie oznaczono czerwoną kreską przerywaną linię trendu dla ceny TGeBASE, która wskazuje tendencję spadkową cen energii na giełdzie. Jednym z bardziej uzasadnionych powodów jest twierdzenie, że jest to efekt spadku i stabilizacji cen energii po peak'u spowodowanym zamieszaniami z dostępnością paliw (wybuch wojny Rosja – Ukraina i konsekwencje z tym związane). Na rysunku 7 oznaczono również wartości indeksu TGeBASE.



Rys. 7. Krajowa produkcja źródeł wiatrowych dla wybranych dni

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych z PSE S.A.

W tabeli nr 5 przedstawiono wyniki podstawowej analizy zmienności indeksów.

Tab. 5. Zestawienie podstawowych wielkości analizy statystycznej charakteryzujących poszczególne zbiory danych

	TGeBASE	TGeONSHOREm	TGePVM
Średnia	523,01 zł	524,93 zł	504,33 zł
Maksium	661,70 zł	664,03 zł	717,19 zł
Minimum	360,49 zł	361,15 zł	394,90 zł
Odchylenie standardowe	88,03 zł	88,08 zł	100,21 zł
Percentyl 25	474,99 zł	476,85 zł	431,20 zł
Percentyl 75	578,58 zł	580,05 zł	544,78 zł

Źródło: Opracowanie własne.

Jak można zauważyć w tabeli 3 oraz na wykresie 4 indeksy miesięczny TGeBASE i TGeONSHOREm mają bardzo zbliżone wartości, o bardzo podobnej dynamice zmian. Znacznie odbiega od nich zmienność indeksu TGePVM. W tabeli 6 przedstawiono odstępstwa cen indeksów w odniesieniu do TGeBASE.

Tab. 6. Zestawienie podstawowych wielkości analizy statystycznej charakteryzujących odstępstwo indeksów dedykowanych fotowoltaice i energetyce wiatrowej od indeksu średniej ceny

	TGeBASE v. TGeONSHOREm	TGeBASE v. TGePVm
Odchylenie standardowe	0,82 zł	51,32 zł
Maksimum	3,20 zł	71,14 zł
Minimum	0,66 zł	85,17 zł

Źródło: Opracowanie własne.

W tabeli nr 7 przedstawiono wartości podstawowych wielkości analizy statystycznej charakteryzujących poszczególne zbiory danych. Wielkość odchylenie standardowe wyrażone w wartości procentowej prezentują dynamikę zmienności poszczególnych zbiorów. Można tu zauważyć, że najbardziej zbliżonymi do notowań cen na fixingu I są wartości zmiennych OZE i delta. Dynamika zmienności generacji fotowoltaicznej charakteryzuje się znacznie większą zmiennością niż notowania cen na fixingu I.

Tab. 7. Zestawienie podstawowych wielkości analizy statystycznej charakteryzujących poszczególne zbiory danych

	Zapotrzebowanie	OZE	Wiatr	PV	Fixing I	Import/ eksport	Delta
Średnia	18 961,29	4 031,64	2 517,20	1 514,44	512,30 PLN	476,97	14 452,68
Odchylenie standardowe	3 265,84	2 696,17	2 051,50	2 297,12	177,48 PLN	1 188,93	3 575,67
Odchylenie standardowe [%]	12%	19%	24%	25%	17%	27%	14%
Minimum	11 454,20	22,58	19,00	0,00	-50,00 PLN	-4 972,94	3 114,42
Maksimum	27 105,73	13 848,45	8 384,34	9 274,86	1 064,00 PLN	4 458,05	25 318,83

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych PSE S.A. i TGE S.A.

W tym miejscu należy wskazać, że sam mechanizm określania cen energii dla fixingu I i fixingu II dla „Rynku Dnia Następnego” oparty jest o zasadę „merit order”, czyli ostatniej ceny.⁴ Metoda ta dopuszcza wpływ każdej technologii wytwórczej przyłączonej do Krajowego Systemu Elektroenergetycznego na kształtowanie się ceny, ale ostateczna cena wynika z poziomu zapotrzebowania na energię, który determinuje parytet źródeł wytwórczych zaangażowanych w zaspokojenie potrzeb.

W tabeli nr 8 przedstawiono wartości współczynnika korelacji dla różnych kombinacji zmiennych, skupiając się na poszukiwaniu zbieżności z cenami fixinku I i wymianą transgraniczną energii.

4 K. Kusz, „Bilansowanie handlowe niespokojnych źródeł wytwórczych – ujęcie i wycena”, Polityka energetyczna – Energy Policy Journal, 2017, ISSN 1429 - 6675

Tab. 8. Wartości współczynnika korelacji dla różnych par czynników wpływających na pracę Krajowego Systemu Elektroenergetycznego oraz cen z fixingu I Rynku Dnia Następnego Towarowej Giełdy Energii

Delta v. fixing I	0,54018459
OZE v. Fixing I	-0,356344
PV v. fixing I	-0,1858458
Wind v. fixing I	-0,2609958
Demand v. import	0,18468085
OZE v. import	-0,4336962
PV v. import	-0,1443575
Wind v. import	-0,4083425

Źródło: Opracowanie własne

W przeprowadzonym badaniu skupiono się na poszukiwaniu czynników zbieżnych z kształtowaniem się cen energii, jak również z poziomem wymiany transgranicznej. Oczywiście wymiana transgraniczna ma charakter dwukierunkowy, tzn. realizowany jest zarówno import jak i eksport energii w zależności od danej sytuacji.

Tab. 9. Wartości współczynnika korelacji dla różnych par czynników wpływających na pracę Krajowego Systemu Elektroenergetycznego oraz cen z fixingu I Rynku Dnia Następnego Towarowej Giełdy Energii dla miesięcznych szeregów czasowych, oraz niedziel w poszczególnych miesiącach

	Tydzień				Niedziela			
	Delta	OZE	Wiatr	PV	Delta	OZE	Wiatr	PV
sty.23	0,73	-0,32	-0,34	0,07	0,69	-0,24	-0,22	-0,10
lut.23	0,54	-0,14	-0,22	0,13	0,64	-0,33	-0,27	-0,17
mar.23	0,56	-0,25	-0,11	-0,26	0,54	-0,53	-0,34	-0,49
kwi.23	0,61	-0,33	-0,07	-0,31	0,51	-0,70	-0,09	-0,69
maj.23	0,69	-0,45	-0,05	-0,44	0,70	-0,78	0,31	-0,78
cze.23	0,73	-0,39	-0,06	-0,36	0,80	-0,72	-0,12	-0,62
lip.23	0,75	-0,42	-0,29	-0,33	0,73	-0,79	-0,25	-0,79
sie.23	0,85	-0,59	-0,53	-0,32	0,83	-0,78	-0,19	-0,69
wrz.23	0,62	-0,49	-0,08	-0,44	0,75	-0,48	-0,19	-0,38
paź.23	0,37	-0,21	-0,18	-0,11	0,44	0,06	0,07	0,03
lis.23	0,79	-0,30	-0,32	-0,04	0,78	-0,14	-0,15	0,00
gru.23	0,85	-0,59	-0,62	0,00	0,85	-0,25	-0,29	0,17
średnia	0,67	-0,37	-0,24	-0,20	0,69	-0,47	-0,14	-0,37
Max	0,85	-0,14	-0,05	0,13	0,85	0,06	0,31	0,17
Min	0,37	-0,59	-0,62	-0,44	0,44	-0,79	-0,34	-0,79

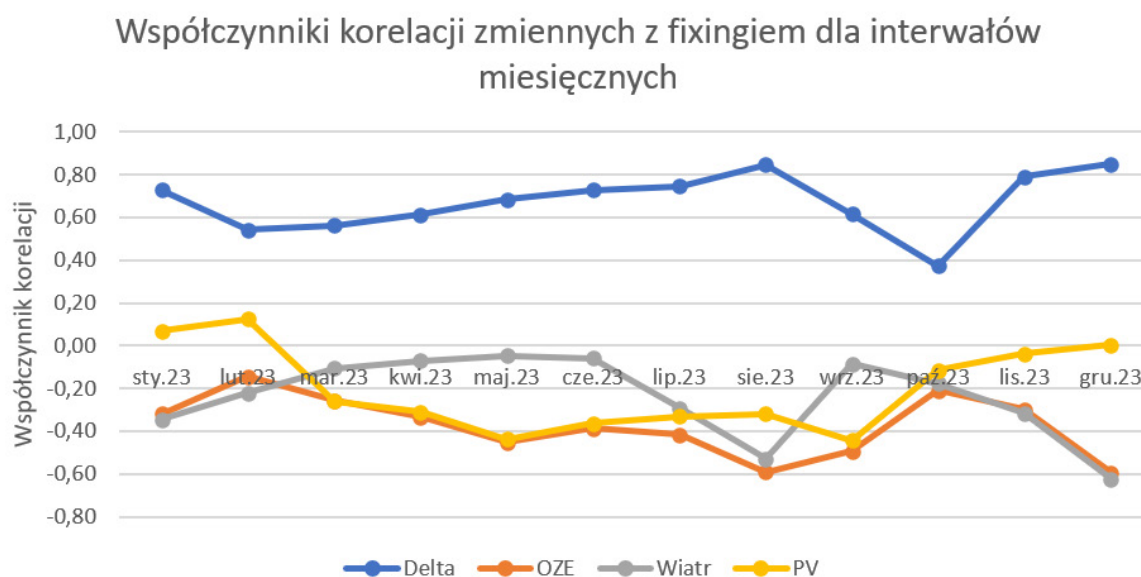
Źródło: Opracowanie własne

W tabeli nr 9 przedstawiono wyniki badania współczynnika korelacji pomiędzy różnymi źródłami energii a cenami energii na Rynku Dnia Następnego tj. fixing I. Wartości współczynników były wyznaczane dla poszczególnych miesięcy. Szczególnym przypadkiem były szeregi czasowe reprezentujące niedziele w poszczególnych miesiącach. Niedziele stanowią szczególny przypadek pracy systemu, w którym notowane jest najniższe zapotrzebowanie na energię, co zaprezentowano na wykresie 1.

DYSKUSJA DO UZYSKANYCH WYNIKÓW

Na wykresie 4 wskazano spadkowy trend kształtowania się cen energii. Ważnym jest zauważyć to zjawisko, ponieważ wysokie ceny energii pozwalały w sposób bardziej jaskrawy zauważyć penetrację rynku energii, energią ze źródeł odnawialnych. Wysokie ceny były efektem mechanizmu merit order i pochodziły od jednostek konwencjonalnych, zasilanych paliwami kopalnianymi. Ceny te, ze względu na wysoki koszt paliw, znacznie odstawały od cen energii ze źródeł odnawialnych. Analiza cen przy tak dużej rozbieżności ułatwiłaby wskazanie momentu pełnego wyparcia cen pochodzących z jednostek konwencjonalnych (gdzie przykładem takich sytuacji były ceny ustalane poniżej LCOE jednostek konwencjonalnych. Ponieważ jednak ceny gwałtownie malały z poziomu średniej 649,89 zł/MWh w styczniu do średniej 360,49 zł/MWh w grudniu, czyli o blisko 45%, uchwycenie momentu całkowitego wyparcia stawało się bardziej utrudnione. Należy jednak mieć na uwadze, co zaprezentowano na wykresie 2, że mechanizm merit order kształtuje funkcjonowanie rynku na zasadzie wypychania cen oferowanych przez jednostki droższe w miarę rozwoju jednostek tańszych, w tym przypadku odnawialnych źródeł energii. Jednak aby odnawialne źródła energii implikowały kształtowanie się cen, ich energia musiałaby zdominować funkcję ostatniej ceny.

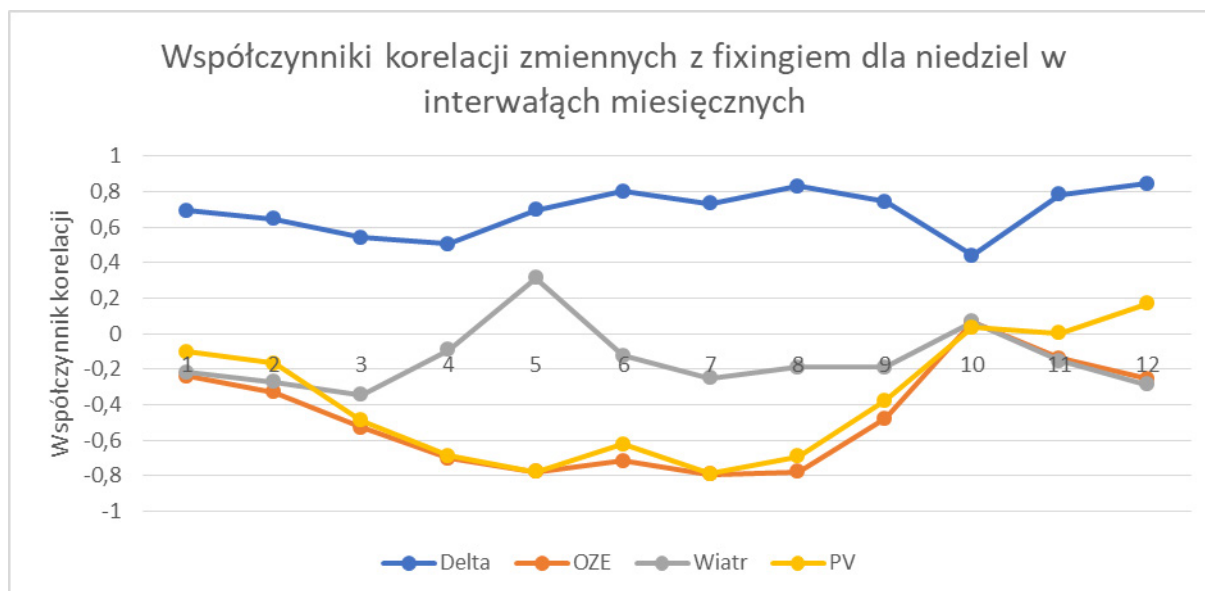
Na rysunku 8 zaprezentowano wartości współczynników korelacji dla poszczególnych miesięcy, pomiędzy cenami z fixingu na Rynku Dnia Następnego a różnymi pakietami energii.



Rys. 8. Wartości współczynników korelacji dla różnych wielkości z fixingiem I dla interwałów miesięcznych

Źródło: opracowanie własne

Najwyższy poziom korelacji z cenami z fixingu I posiada wyznaczona zmienna Delta, reprezentująca ilość energii niezbędnej do zbilansowania systemu z jednostek konwencjonalnych. Zależność ta charakteryzuje się silną i bardzo silną korelacją. Uzasadnia to twierdzenie, że wciąż ceny energii z jednostek konwencjonalnych, na zasadzie ceny końcowej, dominują przy wyznaczaniu cen dla fixingu I. Można zauważyć również, że okazjonalnie zachodzi silna ujemna korelacja zarówno dla źródeł fotowoltaicznych, wiatrowych czy łącznie dla źródeł OZE. Ujemna wartość odpowiada zasadzie, że im więcej energii ze źródeł odnawialnych na rynku energii, tym ceny niższe.



Rys. 9. Zależności cen fixingu I od poziomu poziomu generacji OZE.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych PSE S.A.

Na rysunku 9 przedstawiono wartości współczynników korelacji fixingu z różnymi pakietami energii dla niedziel w interwałach miesięcznych. Uzasadnieniem takiego podejścia była specyfika niedzieli jako dnia tygodnia charakteryzującego się najniższym zapotrzebowaniem na energię, a co za tym idzie najszybszym dojściem do ceny krańcowej. Jak można zauważyć, wartości współczynnika korelacji dla zmiennej Delta nie uległy istotnej zmianie. Znacząco wzrosły wartości współczynników korelacji dla fotowoltaiki i co za tym idzie wartości zbiorczej OZE, natomiast korelacja fixingu z produkcją z wiatru zubożniała.

Uzasadnieniem dla zmiany wartości współczynników dla energii z wiatru i fotowoltaiki dla tygodnia i niedziel wynika ze specyfiki generacji z tych źródeł. Fotowoltaiki charakteryzują się krótkimi (od świtu do zmierzchu) oknami generacji, ale z dużą częstotliwością powtarzania (codziennie). Wiatr pracuje w dłuższych okresach, nawet do kilkudziesięciu dni. Jednak szczyty generacji z wiatru przypadają najczęściej z chwilą występowania tzw. bryzy dziennej i nocnej, która zbiega się z dobowymi szczytami zapotrzebowania na energię. Dlatego też, tak trudno jest jej wyprzeć energetykę konwencjonalną.

PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań można uznać, że nie znajduje potwierdzenia w danych twierdzenie, że dla badanego okresu generacja ze źródeł fotowoltaicznych lub wiatrowych ma istotny wpływ na kształtowanie się cen energii na Rynku Dnia Następnego Towarowej Giełdy Energii. Zauważalna jest umiarkowana korelacja pomiędzy generacją z odnawialnych źródeł energii, aczkolwiek silna korelacja jest pomiędzy cenami energii, a poziomem energii wymagającym pokrycia ze źródeł konwencjonalnych. Powyższe badanie utwierdza przekonanie, że Krajowy System Elektroenergetyczny i w ślad za nim Towarowa Giełda Energii funkcjonują w oparciu o udział wielu graczy (elektrownie konwencjonalne, elektrownie wiatrowe, elektrownie fotowoltaiczne, wymianę transgraniczną itd.) przez co upraszczanie zależności kształtowania się cen energii do specyfiki jednego uczestnika, jest błędną strategią.

Specyfika zasady merit order, oraz wynikający z niej efekt merit order, definiują charakterystyczną zależność pakietów energii z różnych źródeł z tzw. ceną końcową. W efekcie o znaczeniu konkretnej technologii wytwórczej dla kształtowania się cen na Rynku Dnia Następnego decyduje wolumen energii wygenerowanej w danej technologii. Choć są już zauważalne momenty (interwały godzinowe) gdzie ceny sięgają wartości zerowych, a nawet ujemnych, w ujęciu całorocznym wciąż jest jeszcze duże zapotrzebowanie na uzupełnianie zapotrzebowania na energię elektryczną ze źródeł konwencjonalnych.

Należy jednak wskazać że Rynek Dnia Następnego jest tylko jednym z kilku platform do handlu energią, przez co reprezentuje jedynie fragment tego obszaru. Jako kontynuację badań należy rozważyć poszukiwanie relacji pomiędzy mocą zainstalowaną w poszczególnych technologiach wytwórczych, a zasadą Merit Order, oraz poszukiwanie zależności mocy wytwórczych z innymi platformami handlu, tj. Rynek Dnia Bieżącego, Rynek Bilansujący czy Rynek towarów Terminowych.

BIBLIOGRAFIA:

1. Qingchun H., Ning Z., Ershun D., Miao M., F.P., Chongqing K, „Probabilistic duck curve in high PV penetration power system: Concept, modeling, and empirical analysis in China”, Applied Energy, Volume 242, 15 May 2019, Pages 205-215
2. ARE S.A., “Informacja statystyczna o rynku energii. Biuletyn miesięczny”, grudzień 2023, ISSN 1232 – 5457
3. Olczak P., Jaśko P, Kryzia D. Matuszewska D, Fyk M, Dyczko A, „Analyses of duck curve phenomena potential in polish PV prosumer households’ installations”, Energy Reports 2021, 4609 – 4622,
4. Sulaiman A., Fahad A, Abdullah A, Muhammad K., “Model predictive control approach for optimal power dispatch and duck curve handling under high photovoltaic power penetration”, IEEE Access, 2020,
5. Roldan J., Burgos M., Riquelme J., Trigo A., “The merit order effect of energy efficiency”, Energy Procedia 2016, 175 – 184,
6. Loumakis S., Giannini E., Maroulis Z., “Merit order effect modeling: The case of the Hellenic electricity market”, Energies 2019,
7. Aiento D., Iranzo J., Lemus L., Onaindia E, Urchueguia J, “On the influence of renewable energy sources in electricity price forecasting in the Iberian market”, Energies 2019,
8. Majka K., “Bilansowanie zapotrzebowania godzinowego energii elektrycznej przez odbiorców z wykorzystaniem profili obciążeń”, Energetyka, 2006,
9. Trzeczyski J., Dobosiewicz J., Stanek R., „Safe and available power units class 200 MW”, Pronovum, 2/2019.
10. Wójcicki R., “Rozproszone źródła PV – potencjał kształtowania profilu KSE w sezonie (szczycie) letnim”, Biblioteka Źródłowa Energetyki Prosumenckiej, 2015,

11. PSE S.A., „Informacje o zasobach wytwórczych KSE” , IRiESP, 2021,
12. Przygrodzki M., Chmurski P., „Ocena poziomu rezerw mocy w KSE przy dużym udziale źródeł odnawialnych”, epia.org, 2015,
13. Kusz K., „Bilansowanie handlowe niespokojnych źródeł wytwórczych – ujęcie i wycena”, Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal 2017,
14. https://tge.pl/aktualnosci-tge-czytaj?cmn_id=91483&title=Towarowa+Gie%C5%82da+Energii+wprowadza+nowe+indeksy+dla+sektora+OZE, dostęp 16.11.2023
15. https://www.pse.pl/biuro-prasowe/aktualnosci/-/asset_publisher/fwWgbbtxcZUt/content/pse-polecily-redukcje-generacji-zrodel-oze-ze-wzgladow-bilansowy, dostęp 16.11.2023,
16. <https://www.gov.pl/web/premier/komunikat-cir-raport-zespolu-eksperckiego-ds-budowy-elektrowni-szczytowo-pompowych>, dostęp 16.11.2023
17. K. Kusz, „Bilansowanie handlowe niespokojnych źródeł wytwórczych – ujęcie i wycena”, Polityka energetyczna – Energy Policy Journal, 2017, ISSN 1429 – 6675
18. <https://www.next-kraftwerke.pl/leksykon/merit-order>, dostęp 16.11.2023

ANALYSIS OF THE IMPACT OF RENEWABLE ENERGY GENERATION ON ENERGY PRICES ON THE POLISH POWER EXCHANGE

Abstract

For over 20 years, Poland has been undergoing an energy transition focused on the development of renewable energy sources. For many years, their share in installed generating capacity was negligible. This changed in 2023. On the Polish Power Exchange, negative energy prices were recorded for the first time, and the transmission system operator issued a preventive order to disconnect renewable energy sources to ensure the secure operation of the National Power System. Currently, wind and photovoltaic power can be considered the main contributors to renewable generation in Poland's energy system. The aim of this article is to present the results of research conducted to verify whether generation from renewable sources may be treated as a factor influencing prices on the Polish Power Exchange and, consequently, whether forecasting renewable generation also allows for forecasting energy prices

Keywords

Polish Power Exchange, renewable energy sources, fixing, merit order, duck curve