

BADANIE WSPÓLZALEŻNOŚCI POZIOMÓW GENERACJI WIATROWEJ I POTENCJALNEJ GENERACJI ZE ŹRÓDEŁ PV NA OBSZARZE ENERGA-OPERATOR SA

Michał BAJOR¹, Piotr ZIOŁKOWSKI¹, Grzegorz WIDELSKI²

1. INSTYTUT ENERGETYKI Instytut Badawczy Oddział Gdańsk
tel.: 58 34 98 185; e-mail: m.bajor@ien.gda.pl, p.ziolkowski@ien.gda.pl
2. ENERGA-OPERATOR SA
tel.: 58 347 39 34; e-mail: Grzegorz.Widelski@energa.pl

Streszczenie: W artykule przedstawione zostały wyniki analizy współzależności poziomów generacji wiatrowej i potencjalnej generacji fotowoltaicznej na obszarze sieci ENERGA-OPERATOR SA. W roku 2012 Instytut Energetyki Oddział Gdańsk we współpracy z ENERGA-OPERATOR SA przeprowadził pierwsze badania dotyczące zależności poziomów generacji ww. rodzajów źródeł odnawialnych. Jednym z wniosków pracy było wskazanie konieczności powtórzenia analizy dla większego zbioru danych wejściowych, jako że studium obejmowało okres jednego roku i ograniczoną z oczywistych względów liczbę lokalizacji farm wiatrowych. W prezentowanych badaniach dane wejściowe obejmowały okres czterech lat oraz większą liczbę farm wiatrowych, z uwagi na ciągłe przyłączanie kolejnych obiektów do sieci. Otrzymane wyniki charakteryzują się znacznie wyższym poziomem wiarygodności oraz pozwalają na wyciągnięcie bardziej prawidłowych wniosków dotyczących współzależności będącej przedmiotem badania. Z przeprowadzonych badań zależności rocznych przebiegów poziomów generacji wiatrowej i potencjalnej generacji ze źródeł fotowoltaicznych wynika, że oba typy generacji charakteryzują się wzajemną, obszarową zależnością. W ramach pracy związek ten został skwantyfikowany poprzez wyznaczenie wartości maksymalnego realnego poziomu generacji wiatrowej na poszczególnych obszarach w przypadku wysokiej generacji PV na danym obszarze i vice versa. Otrzymane wyniki mogą pozwolić na uprawdopodobniające modelowane stany pracy systemu w stosunku do rzeczywistości obu typów źródeł w różnych rodzajach analiz systemowych badających ich wpływ na sieć.

Słowa kluczowe: generacja wiatrowa, generacja fotowoltaiczna, modelowanie.

1. WSTĘP

Jednym z aspektów zmian zachodzących we współczesnych systemach elektroenergetycznych jest bardzo duży wzrost penetracji rozproszonych źródeł generacji, przede wszystkim związanych z odnawialnymi źródłami energii. W Polsce największą aktywnością i dynamiką wzrostu charakteryzuje się energetyka wiatrowa – aktualnie łączna moc znamionowa farm wiatrowych przyłączonych do Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE) wynosi ponad 3800 MW [1], a łączna moc planowanych farm wiatrowych posiadających wydane warunki przyłączenia, osiąga ponad 20 GW. Od pewnego czasu można zaobserwować zwiększone zainteresowanie inwestycjami w generację ze źródeł fotowoltaicznych (PV). Aktualna łączna moc znamionowa instalacji fotowoltaicznych w KSE wynosi nieco ponad 20 MW [1], jednak w najbliższej przyszłości możliwy jest dynamiczny rozwój tego rodzaju generacji.

Doświadczenie wynikające z przeprowadzenia licznych analiz systemowych związanych z badaniem wpływu generacji rozproszonej na pracę sieci pozwala stwierdzić, że przyłączenie znaczącej generacji do północnej części KSE może skutkować pojawieniem się problemów przeciążeniowych w sieci dystrybucyjnej i przesyłowej. Dotyczy to sytuacji, kiedy generacja ta będzie pracować jednocześnie ze znaczącą mocą na odpowiednio dużym obszarze. Ze względu na ciągły przyrost mocy odnawialnych źródeł energii przy możliwym zwiększeniu udziału generacji fotowoltaicznej, bardzo ważnym zagadnieniem staje się możliwość jednoczesnego wystąpienia wysokiego poziomu generacji wiatrowej oraz generacji ze źródeł fotowoltaicznych na poszczególnych obszarach sieci, ponieważ wpływ wysokiej generacji rozproszonej na obciążenia linii, a tym samym na przeciążenia, może być znacząco inny w przypadku różnego rozkładu tej generacji pomiędzy instalacje przyłączane w różnych punktach sieci.

Celem niniejszej pracy jest zbadanie ewentualnej zależności między mocą generowaną przez farmy wiatrowe oraz mocą generowaną przez potencjalne źródła fotowoltaiczne na obszarze północnej Polski. Oba rodzaje generacji charakteryzują się znaczną zmiennością, zarówno sezonową (wyższe poziomy generacji PV latem, GW – zimą) jak i dobową (np. brak generacji PV w nocy). Dlatego stwierdzenie czy możliwa jest ich jednoczesna praca z wysoką mocą oraz zbadanie wzajemnej zależności poziomów generowanej mocy jest zagadnieniem kluczowym przede wszystkim w kontekście planowania rozwoju sieci oraz – w przyszłości – bieżącego prowadzenia ruchu systemu. Zbadanie wzajemnej zależności poziomów generowanej mocy pozwoli na udoskonalenie sposobu modelowania źródeł odnawialnych w analizach.

Pierwsze badania dotyczące przedmiotowej zależności poziomów generacji wspomnianych dwóch rodzajów źródeł odnawialnych zostały przeprowadzone przez Instytut Energetyki Oddział Gdańsk we współpracy z Operatorem w roku 2012 [2]. Jednym z wniosków pracy było wskazanie konieczności powtórzenia analizy dla większego zbioru danych wejściowych, jako że studium obejmowało okres jednego roku i ograniczoną z oczywistych względów liczbę lokalizacji farm wiatrowych. W artykule przedstawione zostaną wyniki nowej analizy, obejmującej okres czterech lat.

2. DOSTĘPNE DANE

Dla potrzeb niniejszej pracy wykorzystane zostały dane pochodzące z pracujących farm wiatrowych na terenie ENERGA-OPERATOR SA. Dane zawierają wartość mocy czynnej generowanej przez poszczególne farmy.

Dane dotyczą 30 farm wiatrowych o mocy zainstalowanej od 10 do 100 MW zlokalizowanych na terenie pięciu różnych oddziałów ENERGA-OPERATOR SA.

Pomiary mocy czynnej obejmują okres od 1 stycznia 2011 do 30 października 2014 roku. Wiele farm wiatrowych zostało przyłączonych do sieci w późniejszym czasie niż początek 2011 roku. W dalszej analizie nie zostały wykorzystane dane z kilku farm ze względu na zbyt krótkie okresy pomiarów.

Rozdzielczość pomiarów wynosi 15, 30 lub 60 minut. Dla celów analizy wartości pomiarów zostały uśrednione dla okresu jednej godziny. Wynik wyznaczano jako średnią arytmetyczną pomiarów dostępnych dla okresu danej godziny. Wartości pomiarów zostały też przeliczone na wartości względne (procent mocy znamionowej danej farmy) ze względu na różne znamionowe moce zainstalowane uwzględnianych farm.

Z uwagi na brak możliwości wykorzystania rzeczywistych danych o poziomie generacji źródeł PV (bardzo krótki okres dostępnych pomiarów dla istniejących instalacji), do określenia charakteru generacji PV wykorzystano dane pomiarowe dotyczące nasłonecznienia. Uzyskane dane pochodzą z punktów pomiarowych wdrożonego przez ENERGA-OPERATOR SA systemu wyznaczania dynamicznej obciążalności linii (DOL) na podstawie pomiarów. Liczba punktów pomiarowych, dla których dostępne są dane wynosi 84. Punkty pomiarowe zainstalowane są na liniach 110 kV zlokalizowanych na terenie wszystkich oddziałów ENERGA-OPERATOR SA. Dane zawierają wartości nasłonecznienia mierzone w punkcie pomiarowym wyrażone w W/m^2 , które można interpretować jako względny poziom generacji potencjalnego źródła fotowoltaicznego w danej lokalizacji (znamionowa moc generacji fotowoltaicznej jest możliwa przy nasłonecznieniu ok. $1000 W/m^2$).

Dane określające nasłonecznienie obejmują ten sam okres co dane o generacji wiatrowej i w ich przypadku również dla różnych punktów dostępne są pomiary dla różnych okresów, zgodnie z kolejnością instalacji (lub deinstalacji) stacji DOL. Rozdzielczość pomiarów wynosi 15 minut. Dla celów analizy wartości pomiarów zostały uśrednione dla okresu jednej godziny analogicznie jak w przypadku danych o generacji wiatrowej.

W celu zachowania spójności, niezbędnej w analizie współzależności, ramy czasowe zestawów danych dotyczących poziomu generacji wiatrowej zostały dopasowane do dostępności danych z systemu DOL.

W wyniku procesu pozyskiwania, weryfikacji i agregacji danych otrzymano:

- 25 zestawów danych dotyczących poziomu GW,
- 63 zestawy danych dotyczących poziomu potencjalnej generacji PV, obejmujące trzy 12-miesięczne okresy.

Na podstawie analizy jednoczesności wartości generacji mocy czynnej poszczególnych farm wiatrowych uwzględniane farmy zostały podzielone na pięć grup charakteryzujących się bardzo wysokim stopniem korelacji wewnątrz grupy. Analogicznie wyznaczono dziewięć obszarów jednoczesnej generacji PV.

Dla celów dalszej części pracy utworzono po jednym zestawie danych dla każdej wyznaczonej grupy farm wiatrowych i obszaru spójnej generacji PV. Jako wartości gene-

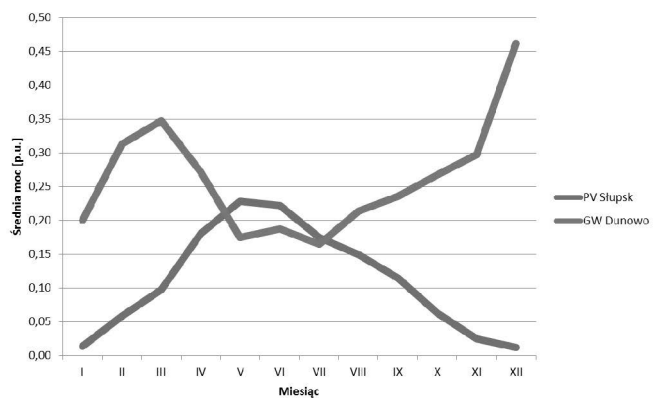
racji w poszczególnych momentach czasu (z rozdzielczością jednej godziny) przyjęto względną wartość łącznej generacji farm wchodzących w skład grupy w stosunku do łącznej mocy znamionowej tych farm, a w przypadku generacji PV – średnią z poziomów generacji odpowiadających punktom pomiarowym na danym obszarze.

3. ANALIZA ZALEŻNOŚCI GW I PV

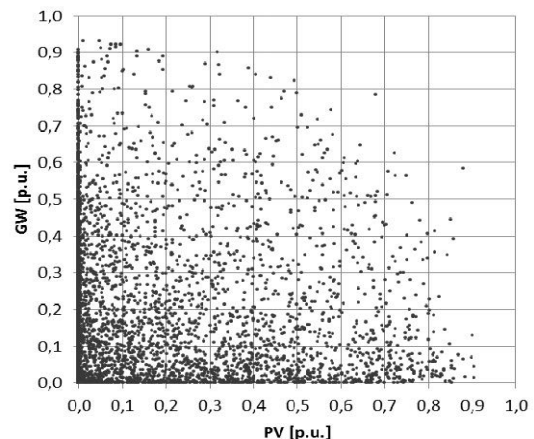
Zgodnie z oczekiwaniami, w stanach wysokiej generacji wiatrowej poziom generacji PV jest znacząco niższy i analogicznie w przypadku wysokiego poziomu generacji PV farmy wiatrowe najczęściej pracują z niższą mocą.

Ta odwrotna zależność poziomów obu rodzajów generacji jest wyraźnie zauważalna na rysunkach 1 i 2, na przykładowym zestawieniu danych statystycznych dla wybranych par grup farm wiatrowych i obszarów spójnej generacji PV.

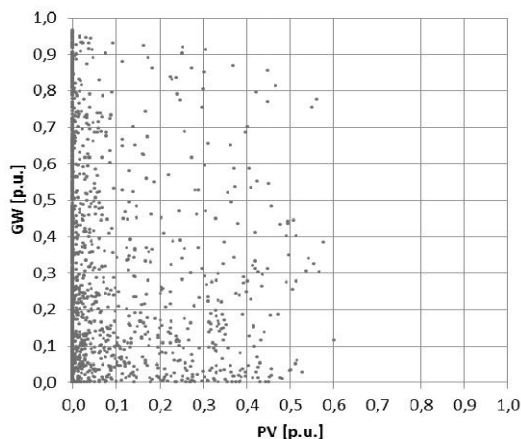
Na wykresach punktowych ilustrujących występujące jednocześnie poziomy GW i PV, jeden punkt na wykresie odpowiada pojedynczej godzinie z danego okresu (latem/zimą) i zanotowanym w niej poziomom PV (współrzędna X) i GW (współrzędna Y). Latem nie są w zasadzie notowane żadne przypadki jednoczesnego wystąpienia poziomów GW i PV (w dowolnej kombinacji grupy i obszaru) przekraczających 70% mocy znamionowej, natomiast zimą w żadnym momencie oba rodzaje generacji nie pracują jednocześnie z mocą przekraczającą nawet 50% mocy znamionowej. Warto również zauważyć, że zwykle w ok. połowie jednogodzinnych okresów poziom żadnego z rodzajów generacji nie przekracza 20% mocy znamionowej. Prezentowane przykłady odnoszą się do okresu jednego roku (2011).



Rys. 1. Średnie poziomy generacji wiatrowej w Grupie Dunowo i generacji PV na Obszarze Słupsk w poszczególnych miesiącach



Rys. 2. Notowane jednocześnie poziomy GW (Dunowo) i PV (Słupsk) – okres letni



Rys. 3. Notowane jednocześnie poziomy GW (Dunowo) i PV (Słupsk) – okres zimowy

Tablica 1. Częstość występowania notowanych jednocześnie poziomów GW (Dunowo) i PV (Słupsk) – okres letni

Poziom GW [p.u.]	Poziom PV [p.u.]									
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,9–1,0	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0,8–0,9	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0,7–0,8	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0,6–0,7	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0,5–0,6	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0,4–0,5	5%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0,3–0,4	8%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0,2–0,3	8%	1%	1%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	0%
0,1–0,2	10%	2%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	0%	0%
0,0–0,1	18%	5%	4%	4%	3%	2%	2%	2%	1%	0%

Tablica 2. Częstość występowania notowanych jednocześnie poziomów GW (Dunowo) i PV (Słupsk) – okres zimowy

Poziom GW [p.u.]	Poziom PV [p.u.]									
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,9–1,0	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0,8–0,9	4%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0,7–0,8	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0,6–0,7	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0,5–0,6	6%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0,4–0,5	8%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0,3–0,4	9%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0,2–0,3	11%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0,1–0,2	13%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0,0–0,1	22%	2%	2%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Aby wyrazić zidentyfikowaną poprzez wstępną analizę zależność poziomów GW i PV, rozpatrywane było następujące zagadnienie:

Jaki jest maksymalny realny poziom GW (PV) w przypadku pracy PV (GW) na danym (wysokim) poziomie?

Algorytm mający na celu kwantyfikację związku między poziomem generacji wiatrowej a poziomem generacji PV (i vice versa) przedstawiał się następująco:

- Dane dotyczące poziomu generacji mocy czynnej w poszczególnych grupach FW zostały podzielone na części odpowiadające wartości generacji w przedziałach z zakresu 0–100% mocy znamionowej o szerokości 10% (tzn. dla wartości w przedziale 0–10%; 10–20%; ...; 90–100%) z podziałem na dane pochodzące z okresu letniego i zimowego.
- Do danych z każdego przedziału przyporządkowano odpowiadające im (tzn. pochodzące z tych samych momentów czasu) wartości potencjalnej generacji PV z poszczególnych obszarów. Otrzymano tym samym zestawy zawierające dane określające poziomy PV dostępne dla każdej kombinacji następujących elementów:
 - zidentyfikowanego obszaru spójnej generacji wiatrowej (grupy farm),
 - przedziału wartości generacji wiatrowej na danym obszarze (0–100% z krokiem 10%),
 - zidentyfikowanego obszaru spójnej generacji PV, pory roku (okres letni/zimowy).
- Analogicznie, dane dotyczące poziomu generacji PV na poszczególnych obszarach zostały podzielone na części odpowiadające wartości generacji w przedziałach z zakresu 0–100% mocy znamionowej o szerokości 10% z podziałem na dane pochodzące z okresu letniego i zimowego.
- Do danych z każdego przedziału przyporządkowano odpowiadające im wartości GW w poszczególnych grupach. Otrzymano tym samym zestawy zawierające dane określające poziomy GW dostępne dla każdej kombinacji następujących elementów:
 - zidentyfikowanego obszaru spójnej generacji PV, przedziału wartości generacji PV na danym obszarze (0–100% z krokiem 10%),
 - zidentyfikowanego obszaru spójnej generacji wiatrowej (grupy farm), pory roku (okres letni/zimowy).
- Następnie przeprowadzono analizę statystyczną wartości w każdym zestawie danych PV i GW – dla wszystkich (blisko 1800) kombinacji powyższych elementów.
- Analizy dla poszczególnych par (grupa GW / obszar PV) były oczywiście prowadzone tylko dla okresu, dla którego dostępne były zarówno dane o generacji wiatrowej jak i PV.

Wynikiem przeprowadzonych analiz statystycznych były maksymalne realne poziomy GW w poszczególnych grupach w przypadku bardzo wysokiej generacji PV na poszczególnych obszarach oraz maksymalne realne poziomy generacji PV na poszczególnych obszarach w przypadku bardzo wysokiej GW w poszczególnych grupach.

W celu uzyskania większej przejrzystości maksymalne poziomy GW w przypadku bardzo wysokiej generacji PV wyznaczano dla trzech obszarów GW:

- generacji wiatrowej lokalnej - położonej na tym samym obszarze co przedmiotowa generacja PV,
- generacji wiatrowej przyległej - położonej na obszarze przyległym do danego obszaru PV,
- generacji wiatrowej odległej - położonej na obszarze znacznie odległym od danego obszaru PV.

Analogiczne wartości wyznaczano w przypadku analizy maksymalnego poziomu PV w przypadku bardzo wysokiej GW.

Jako „bardzo wysoki poziom generacji” przyjęto odpowiednio wartości:

- dla generacji wiatrowej:
 - powyżej 80% mocy znamionowej latem,
 - powyżej 90% mocy znamionowej zimą,
- dla generacji PV:
 - powyżej 80% mocy znamionowej latem,
 - powyżej 50% mocy znamionowej zimą.

Jako maksymalny „realny” poziom generacji przyjęte zostały wartości kwantyli prawdopodobieństwa rzędu 0,9 i 0,95, a więc takie wartości generacji (wyrażonej w p.u.), które były przekroczone odpowiednio w 10% i 5% przypadków. Zestawienie kwantyli prawdopodobieństwa dla poziomów GW w poszczególnych lokalizacjach w stanie bardzo wysokiej generacji PV na danym obszarze przedstawione jest w tablicy 3. Tablica 4 zawiera natomiast wyznaczone wartości kwantyli prawdopodobieństwa dla poziomów generacji PV w poszczególnych lokalizacjach w stanie bardzo wysokiej generacji wiatrowej w danej grupie.

Wartości maksymalnych realnych poziomów generacji PV w stanie bardzo wysokiej GW są zbliżone niezależnie od lokalizacji (generacja lokalna, przyległa, odległa).

Tablica 1. Wartości kwantyli prawdopodobieństwa dla poziomów GW w stanie bardzo wysokiej generacji PV

	Generacja wiatrowa					
	lokalna		przyległa		odległa	
kwantyl rzędu	0,9	0,95	0,9	0,95	0,9	0,95
PV > 80% Pn (lato)	0,40	0,48	0,43	0,52	0,47	0,57
PV > 50% Pn (zima)	0,41	0,54	0,43	0,56	0,46	0,62

INVESTIGATING THE INTERDEPENDENCE BETWEEN WIND GENERATION AND POTENTIAL PV GENERATION IN THE AREA OF ENERGA-OPERATOR SA

This paper presents the results of a study aiming to analyze the correlation between output levels of generation of wind farms located in northern Poland (area where the grid is operated by ENERGA-OPERATOR SA) and potential photovoltaic installations in the same area. With the recent increase of interest in investing in PV in Poland, it has become very important to investigate the likelihood of wind and PV generation installed over a large area to generate a high level of power simultaneously. The first study investing the potential correlation of mentioned two types of renewable sources in the area has been performed by the Institute of Power Engineering in cooperation with ENERGA-Operator SA in 2012. Nevertheless, as the previous study covered a period of only one year, due to a limited amount of available data, it has become necessary to continue the analysis as more data becomes available with new wind farms being connected to the grid. In this paper, the findings of a new study, where data from a four-year period was used, are presented.

Keywords: wind generation, photovoltaic generation

Tablica 2. Wartości kwantyli prawdopodobieństwa dla poziomów generacji PV w stanie bardzo wysokiej GW

	Generacja PV					
	lokalna		przyległa		odległa	
kwantyl rzędu	0,90	0,95	0,90	0,95	0,90	0,95
GW > 80% Pn (lato)	0,32	0,39	0,33	0,42	0,33	0,42
GW > 90% Pn (zima)	0,09	0,15	0,11	0,16	0,11	0,17

4. PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych badań zależności rocznych przebiegów poziomów generacji wiatrowej i potencjalnej generacji ze źródeł fotowoltaicznych reprezentacyjnych dla zdefiniowanych obszarów wynika, że oba typy generacji charakteryzują się wzajemną, obszarową zależnością. Generalnie w stanach wysokiej generacji wiatrowej poziom generacji PV jest znacząco niższy i analogicznie w przypadku wysokiego poziomu generacji PV farmy wiatrowe najczęściej pracują z niższą mocą. Otrzymane na podstawie analizy statystycznej szczegółowe wyniki mogą pozwolić m.in. na uprawdopodobniające modelowane stany pracy systemu w stosunku do rzeczywistości uwzględnianie obu typów źródeł w różnych rodzajach analiz systemowych badających ich wpływ na sieć.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Urząd Regulacji Energetyki, <http://www.ure.gov.pl/uremapoze/mapa.html>, data dostępu: 5.03.2015
2. Bajor M., Ziolkowski P., Widelski G.: „Korelacja generacji wiatrowej i potencjalnej generacji ze źródeł fotowoltaicznych w północnej i środkowej Polsce”. „Energia elektryczna” 4/2013, s. 22