

Agnieszka MAĆKOWIAK\*

## WYSTARCZALNOŚĆ GENERACJI W LOKALNYCH SYSTEMACH DYSTRYBUCYJNYCH

Coraz większa integracja źródeł rozproszonych w sieci elektroenergetycznej powoduje konieczność uwzględnienia wystarczalności generacji na danym obszarze. Zagadnienie to jest bardzo istotne ze względu na rosnącą liczbę klastrów energii w Polsce. Artykuł ten formułuje problem wystarczalności generacji przy pomocy wskaźników niezawodnościowych, takich jak LOLP lub EENS. Wskaźniki te określają prawdopodobieństwo niepokrycia zapotrzebowania oraz oczekiwaną wielkość niedostarczonej energii i zostały szczegółowo opisane w tym artykule. W celu analizy wystarczalności generacji, przykładowy lokalny system elektroenergetyczny, zawierający generację rozproszoną został zamodelowany w programie DIgSILENT PowerFactory. Wystarczalność generacji wyznaczona została za pomocą symulacyjnej metody Monte Carlo. Artykuł przedstawia wpływ generacji rozproszonej na wystarczalność generacji i niezawodność całego badanego systemu elektroenergetycznego w zależności od stopnia wykorzystania źródeł rozproszonych.

SŁOWA KLUCZOWE: wystarczalność generacji, niezawodność, generacja rozproszona, klastry energii.

### 1. WPROWADZENIE

Rosnąca liczba klastrów energii i związanych z nimi odnawialnych źródeł energii powoduje konieczność rozpatrywania systemu elektroenergetycznego w bardziej rozproszony sposób, biorąc pod uwagę lokalnych odbiorców i wytwórców energii, a odchodząc od całościowego, systemowego ujęcia sieci elektroenergetycznej.

Idea powstawania klastrów energii ma liczne zalety, takie jak kształtowanie energetyki obywatelskiej i zwiększanie świadomości odbiorców w zakresie wytwarzania i dostaw energii. Jednak dla operatorów systemów dystrybucyjnych, zwiększająca się liczba źródeł rozproszonych o małej mocy stanowi zagrożenie stabilnej pracy sieci elektroenergetycznej, a jednocześnie bezpieczeństwa energetycznego, ponieważ operatorzy nie są w stanie przewidzieć ilości energii wytworzonej w źródłach odnawialnych o stochastycznym charakterze generacji. Sytuacja taka powoduje konieczność rozpatrywania bezpieczeństwa energetycz-

---

\* Politechnika Poznańska

nego, w tym niezawodności dostaw energii na szczeblu lokalnym. Ważnym elementem niezawodności jest wystarczalność generacji, która dotychczas rozpatrywana była tylko na poziomie krajowym, obejmując jedynie elektrownie systemowe. W artykule zaproponowano możliwość oceny wystarczalności generacji na poziomie lokalnych systemów dystrybucyjnych, obejmujących rozproszone źródła energii, o charakterze zbliżonym do klastrów energii.

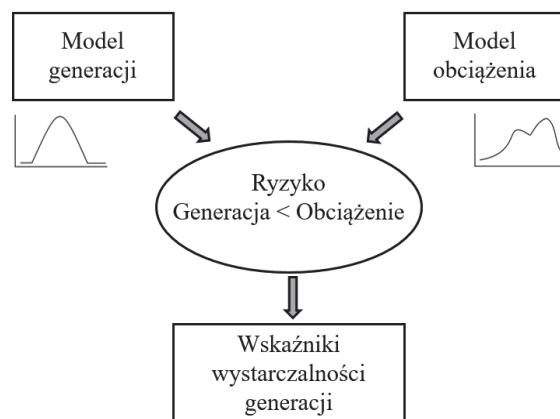
## 2. WYSTARCZALNOŚĆ GENERACJI

Wystarczalność generacji jest kluczowym elementem niezawodności systemów elektroenergetycznych. Niezawodność określana jest jako zdolność systemu elektroenergetycznego do zapewniania zasilania odbiorców energią o odpowiedniej jakości [7]. Wystarczalność natomiast określa się jako zdolność systemu do pokrywania zapotrzebowania na energię i moc u odbiorców w określonym przedziale czasu, dla stanów ustalonych systemu elektroenergetycznego [7]. Niezawodność systemu elektroenergetycznego tradycyjnie ocena się dla trzech poziomów hierarchii, przedstawionych w tabeli 1.

Tabela 1. Hierarchia oceny niezawodności systemu elektroenergetycznego [7].

Poziom hierarchiczny	Obiekty	Stosowana metoda oceny
Poziom pierwszy – HL I	Źródła wytwórcze – głównie elektrownie systemowe	Ocena wystarczalności generacji – zdolności elektrowni do pokrywania zapotrzebowania
Poziom drugi – HL II	Sieci przesyłowe	Ocena niezawodności wytwarzania i dostaw do poszczególnych węzłów sieci przesyłowej
Poziom trzeci – HL III	Sieci dystrybucyjne	Ocena niezawodności wytwarzania i dostaw do odbiorców

Ocena wystarczalności systemu, bazująca na modelach generacji oraz obciążenia, przedstawia prawdopodobieństwo, że wartość mocy generowanej będzie mniejsza niż wartość mocy obciążenia, co zostało schematycznie przedstawione na rysunku 1. Przeprowadzenie analizy wystarczalności wymaga przypisania każdemu generatorowi w systemie pewnej liczby probabilistycznych stanów, które określają prawdopodobieństwo ich pracy z poszczególnymi mocami. Konieczne jest również przypisanie profili obciążeń wszystkim odbiorcom, które będą określały obciążenie całego systemu.



Rys. 1. Schemat oceny wystarczalności generacji [1]

Na podstawie określonego prawdopodobieństwa wyznaczane są wskaźniki wystarczalności, z których najczęściej stosowane są następujące [7]:

- LOLP (ang. *Loss of Load Probability*) – prawdopodobieństwo niepokrycia zapotrzebowania,
- LOLE (ang. *Loss of Load Expectation*) – oczekiwany czas niepokrycia zapotrzebowania,
- EENS (ang. *Expected Energy Not Supplied*) – oczekiwana energia niedostarczona.

Wskaźnik LOLP określa bezpośrednio prawdopodobieństwa zaistnienia sytuacji, w której zapotrzebowanie przekroczy zdolność wytwórczą systemu i definiowany jest według wzoru [1, 6, 7]:

$$LOLP = \sum_i p_i (G_i - L_i \leq 0) \quad (1)$$

gdzie:  $p$  – prawdopodobieństwo,  $G$  – zdolność wytwórcza,  $L$  – obciążenie,  $i$  – rozpatrywany stan systemu.

Wskaźnik ten określa jedynie prawdopodobieństwo wystąpienia niedoboru, nie określa natomiast wielkości deficytu mocy. Bardziej adekwatnym do oceny wystarczalności jest wskaźnik LOLE, który przedstawia liczbę dni lub godzin w roku, w których wystąpi deficyt mocy wytwórczych i definiowany jest następująco [7]:

$$LOLE = \sum_i t_i p_i (P_d) \quad (2)$$

gdzie:  $t_i$  – czas, w którym obciążenie jest większe niż moc dyspozycyjna w stanie  $i$ ,  $p_i(P_d)$  – prawdopodobieństwo ubytku mocy w systemie.

Najbardziej kompleksowym jest wskaźnik EENS, który przedstawia przewidywaną ilość energii, która nie zostanie dostarczona do odbiorców w danym okresie czasu. EENS, tak jak wskaźnik LOLE przedstawia prawdopodobieństwo

wystąpienia niedoboru, ale również wielkość deficytów mocy. Wskaźnik ten definiowany jest następująco [7]:

$$EENS = \sum_i \Delta A_i p_i(P_d) \quad (3)$$

gdzie:  $\Delta A_i$  – ilość niedostarczonej energii,  $p_i(P_d)$  – prawdopodobieństwo ubytku mocy w systemie.

### 3. KONCEPCJA WPROWADZENIA KLASTRÓW ENERGII W POLSCE

Przykładowymi systemami lokalnymi mogą być klastry energii. Klaster energii stanowić ma porozumienie dotyczące wytwarzania i równoważenia zapotrzebowania, dystrybucji lub obrotu energią z odnawialnych źródeł energii lub z innych źródeł lub paliw, w ramach sieci dystrybucyjnej o napięciu znamionowym niższym niż 110 kV, na obszarze działania tego klastra nieprzekraczającym granic jednego powiatu lub 5 gmin [5]. Powstawanie klastrów energii ma na celu stworzyć w Polsce energetykę obywatelską, poprzez umożliwianie poszczególnym odbiorcom wyboru sposobu wytwarzania i dostawy energii elektrycznej, ale również powinno zmniejszyć koszty energii związane z dystrybucją. Teoretycznie jest to możliwe poprzez zmniejszenie dystansu, na który przesyłana jest energia, a jednocześnie zmniejszenie strat energii podczas przesyłu i dystrybucji.

Dystrybucja energii elektrycznej na terenie klastra może odbywać się w oparciu o współpracę z operatorem istniejącej sieci dystrybucyjnej, w oparciu o własną infrastrukturę dystrybucyjną lub w połączeniu powyższych możliwości. Klastry energii mogą być oparte na różnych źródłach rozproszonych, takich jak małe elektrownie wodne, biogazownie rolnicze, elektrownie wiatrowe lub elektrownie fotowoltaiczne. Przykładowe parametry klastrów przedstawionych w [5] zostały opisane w tabeli 2. Przedstawione warianty zakładają, że odbiorcy energii w klastrze rozliczani są według taryfy G11, a średnie roczne zapotrzebowanie na energię wynosi 1806 kWh/odbiorcę/rok. Zaproponowane rozwiązania przedstawiają zarówno źródła o stabilnym, jak i niestabilnym charakterze pracy, a ich lokalizacja jest silnie zależna od warunków geograficznych na danym obszarze.

Przedstawione warianty klastrów energii stanowią jedynie modele, które mogą być wykorzystywane przy analizach energetycznych oraz ekonomicznych. Modele te powinny zostać dostosowane do rzeczywistych fragmentów sieci w celu analizy konkretnego przypadku.

Tabela 2. Parametry analizowanych wariantów systemów dystrybucyjnych [5].

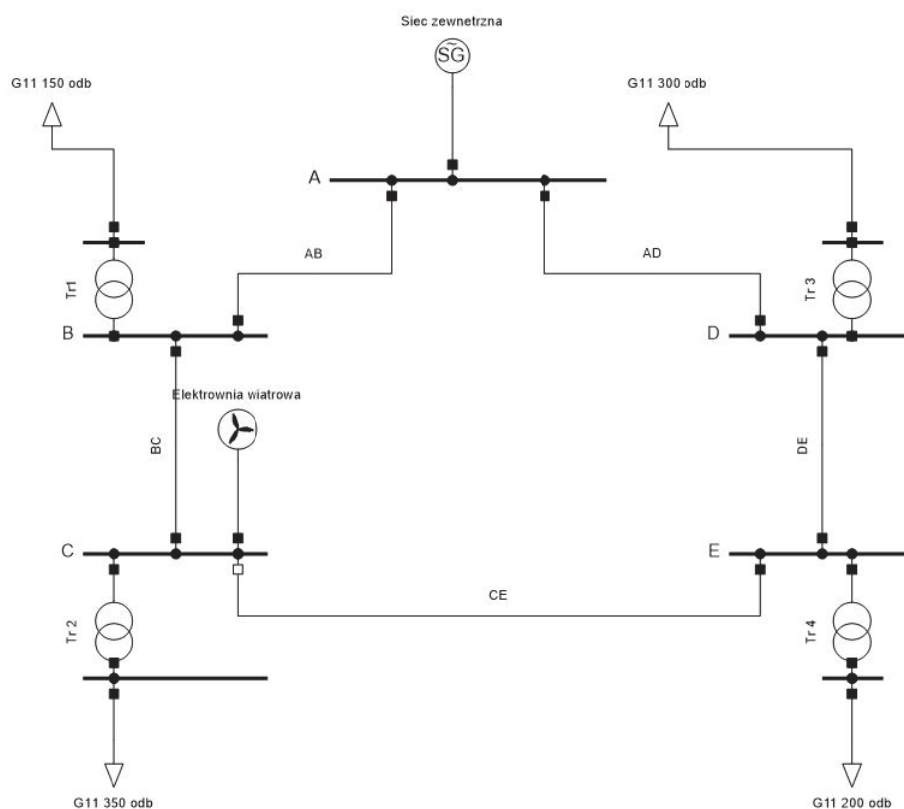
Wariant	Wytwórcy	Łączna moc zainstalowana źródeł [kW]	Liczba odbiorców
I	Elektrownie wodne (3 szt.)	820	1000
II	Biogazownia rolnicza	300	1000
III	Elektrownia wiatrowa	1000	1000
IV	Elektrownia fotowoltaiczna	1000	1000
V	Elektrownia fotowoltaiczna (500 kW) + elektrownia wiatrowa (1000 kW)	1500	1000
VI	Elektrownia fotowoltaiczna (1000 kW) + elektrownia wiatrowa (1000 kW) + elektrownia biogazowa (600 kW)	2600	5000

#### 4. OCENA WYSTARCZALNOŚCI GENERACJI DLA LOKALNYCH SYSTEMÓW DYSTRYBUCYJNYCH

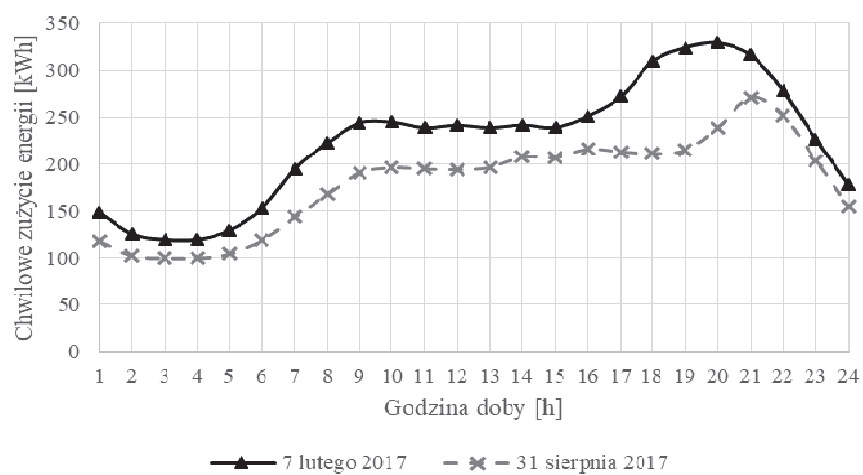
Ze względu na eskalację źródeł rozproszonych w Polsce i tendencje do tworzenia klastrów opartych na energii odnawialnej, które mogą w przyszłości dążyć do częściowego lub nawet całkowitego samobilansowania, proponowana jest ocena wystarczalności generacji dla systemów lokalnych.

W programie DIgSILENT PowerFactory zaprojektowana została przykładowa sieć odwzorowująca wybrany model klastra energii. Analizowany model przedstawiony został jako wariant III w tabeli 2 i zakłada zainstalowanie elektrowni wiatrowej o mocy 1 MW. W badanym klastrze znajdować się będzie 1000 odbiorców w taryfie G11, charakteryzujących się rocznym zużyciem równym 1806 kWh/odbiorcę, zgodnie z założeniami przedstawionymi powyżej. Analizowana sieć została przedstawiona na rysunku 2.

Poszczególnym odbiorcom analizowanej sieci przypisana została liczba odbiorców oraz profil obciążenia dla taryfy G11, zgodnie ze standardowym profilem obciążenia w tej taryfie jednego z polskich operatorów sieci dystrybucyjnej [9]. Przy ocenie wystarczalności zaimplementowany został standardowy profil obciążeń dla całego roku 2017, natomiast na rysunku 3. przedstawione zostały przykładowe przebiegi obciążeń dla dwóch wybranych dni w roku dla całego systemu złożonego z 1000 odbiorców.



Rys. 2. Sieć analizowana pod kątem wystarczalności

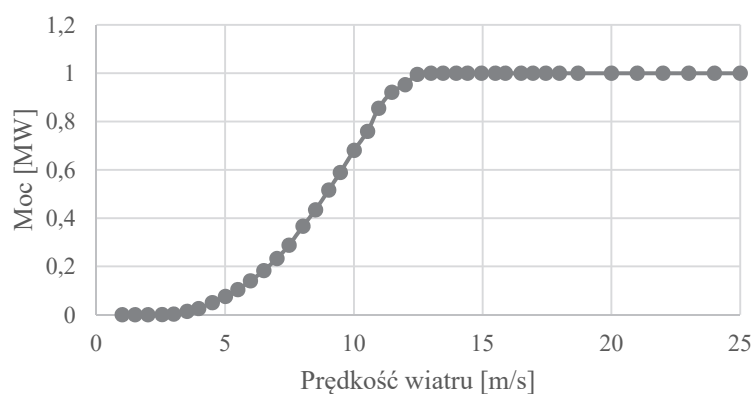


Rys. 3. Standardowy profil obciążeń taryfy G11 dla dwóch wybranych dni roku 2017

Aby ocenić prawdopodobieństwo niepokrycia zapotrzebowania na energię w rozpatrywanym systemie konieczne jest przedstawienie stochastycznych modeli generacji. Sieć zewnętrzna, przedstawiająca połączenie z operatorem systemu dystrybucyjnego, zamodelowana jest za pomocą generatora synchronicznego. Model stochastyczny generatora zakłada 3 stany pracy – praca z pełną wydajnością (występująca z największym prawdopodobieństwem), praca z ograniczoną wydajnością oraz postój [11]. Charakter pracy zewnętrznej sieci dystrybucyjnej jest analogiczny do pracy zamodelowanego generatora. Zaprojektowany model odwzorowuje możliwe zakłócenia w sieci. W celu stworzenia stochastycznego modelu generacji turbiny wiatrowej wykorzystany został model trzech bloków zastępczych, opisany w [10]. Zaimplementowane zostały średnie wartości prawdopodobieństwa pracy turbiny z określoną wydajnością, które przedstawia tabela 3. Odpowiednie zamodelowanie elektrowni wiatrowej umożliwia wykorzystanie rozkładu Weibulla jako stochastycznego modelu wiatru, opisanego szczegółowo w [4] a także krzywej mocy przykładowej turbiny wiatrowej przedstawionej na rysunku 4 [3].

Tabela 3. Prawdopodobieństwo pracy turbiny wiatrowej z określoną wydajnością [10].

Wydajność [%]	Prawdopodobieństwo [%]
100,00	4,33
79,66	25,06
14,64	56,78
0,00	13,84



Rys. 4. Krzywa mocy turbiny wiatrowej [3]

Do oceny wystarczalności wykorzystana jest probabilistyczna metoda Monte Carlo zaimplementowana w programie DIgSILENT PowerFactory. W tym celu generowany jest losowy stan systemu, dla którego obliczana jest wielkość nie-

pokrytego zapotrzebowania DNS (ang. Demand Not Supplied). Oprogramowanie PowerFactory wykorzystuje pseudo-losowy generator liczb (ang. PRNG Pseudo Random Number Generator) do generowania stanów systemu elektroenergetycznego. Proces ten powtarzany jest dla określonej liczby iteracji. Po zakończeniu symulacji dla wielu stanów losowych, obliczane są wskaźniki wystarczalności, takie jak LOLP oraz EENS. Zastosowanie metody Monte Carlo pozwala wyznaczać wskaźniki wystarczalności w następujący sposób [2]:

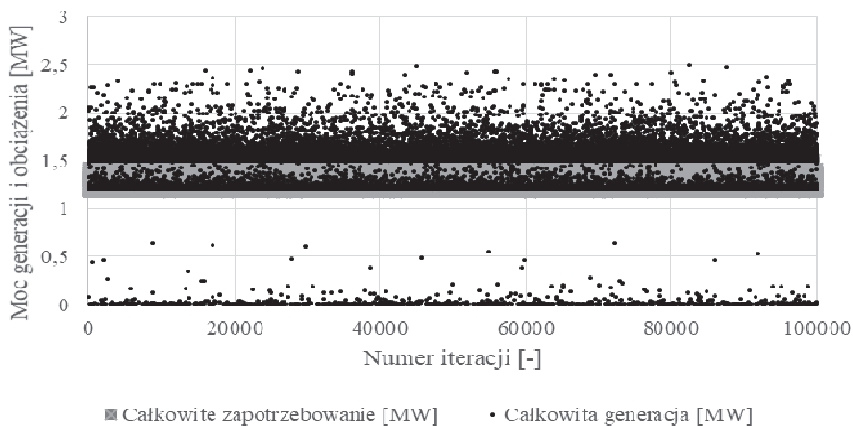
$$DNS = \sum P_L - \sum P_G \quad (4)$$

$$LOLP = \frac{N_{DNS}}{N} \cdot 100\% \quad (5)$$

$$EENS = \frac{\sum DNS}{N} \quad (6)$$

gdzie:  $DNS$  – wielkość niepokrytego zapotrzebowania,  $P_L$  – moc obciążenia,  $P_G$  – moc wytwarzana,  $N_{DNS}$  – liczba iteracji, dla których  $DNS > 0$ ,  $N$  – całkowita liczba iteracji.

Wyniki symulacji otrzymane z metody Monte Carlo przedstawić można na wykresie punktowym, przedstawiającym stany systemu w poszczególnych iteracjach. Przykładowy wykres dla analizowanej sieci dla 100 000 iteracji, przedstawiony został na rysunku 5. Zagęszczenie wyników w poszczególnych pasmach wartości mocy świadczy o zwiększonym prawdopodobieństwie wystąpienia stanu o danych parametrach.

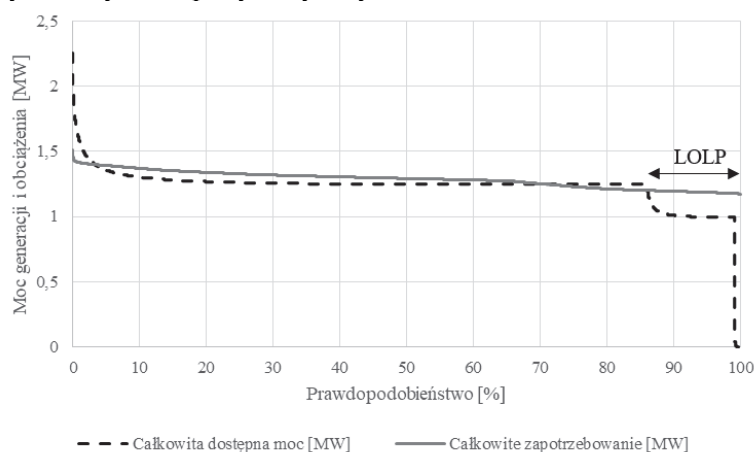


Rys. 5. Wykres iteracji metody Monte Carlo dla wartości mocy generowanej i pobieranej, przy mocy dostarczanej z sieci dystrybucyjnej równej 1,50 MW

Na podstawie pasm, w których poszczególne wartości mocy występują w znacznym zagęszczeniu możliwe jest wyznaczenie prawdopodobieństwa wy-

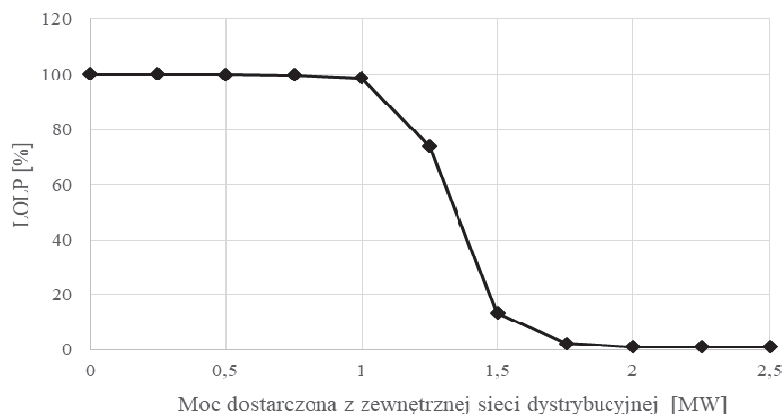


stąpienia poszczególnych stanów systemu, zarówno dla mocy obciążenia jak i generacji. Wykres przedstawiający prawdopodobieństwo wystąpienia poszczególnych wartości mocy dla obciążenia jak i generacji, przedstawiony jest na rysunku 6. Punkt przecięcia się krzywej mocy generowanej i pobieranej w systemie wyznacza na wykresie wartość wskaźnika prawdopodobieństwa wystąpienia deficytu mocy w rozpatrywanym systemie LOLP.

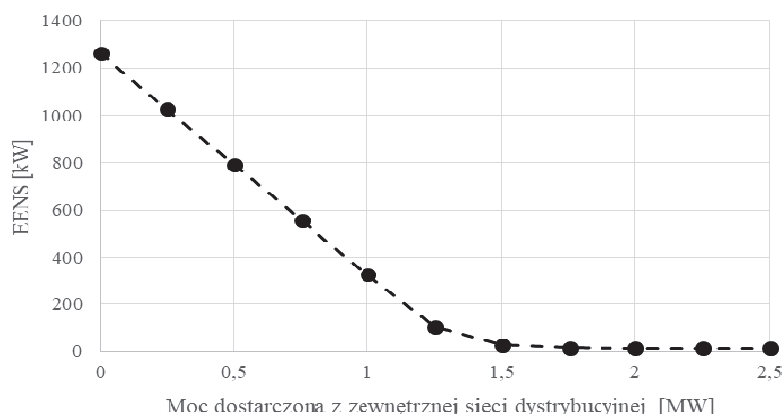


Rys. 6. Prawdopodobieństwo otrzymania stanu systemu o danych wartościach mocy generowanej i pobieranej, przy mocy dostarczanej z sieci dystrybucyjnej równej 1,25 MW

Dla rozpatrywanego systemu elektroenergetycznego zbadano jak zmieniają się parametry wystarczalności dla różnych wartości mocy dostarczanej z zewnętrznej sieci dystrybucyjnej. W rzeczywistych obiektach ilość mocy dostarczanej do klastrów energii może być technicznie ograniczona parametrami infrastruktury rozdzielczej, takimi jak przepustowość linii czy obciążalność transformatora. Zależność prawdopodobieństwa wystąpienia niedoboru mocy, przedstawionego za pomocą wskaźnika LOLP, od mocy dostarczonej z sieci dystrybucyjnej przedstawiono na rysunku 7, natomiast na rysunku 8 przedstawiona jest zależność ilości niedostarczonej energii EENS od mocy dostarczonej z sieci zewnętrznej. Na przedstawionych wykresach widocznie zaznaczona jest granica wystarczalności systemu, określająca wartość mocy dostarczonej z sieci dystrybucyjnej poniżej której wystarczalność systemu radykalnie spada. Dla mocy dostarczonej z sieci dystrybucyjnej o wartości 1,5 MW i powyżej rozpatrywaną sieć można uznać za wystarczającą. W przypadku dostarczenia z sieci dystrybucyjnej mocy o wartości mniejszej lub równej od 1 MW prawdopodobieństwo wystąpienia deficytu mocy waha się w przedziale 98 – 100%.



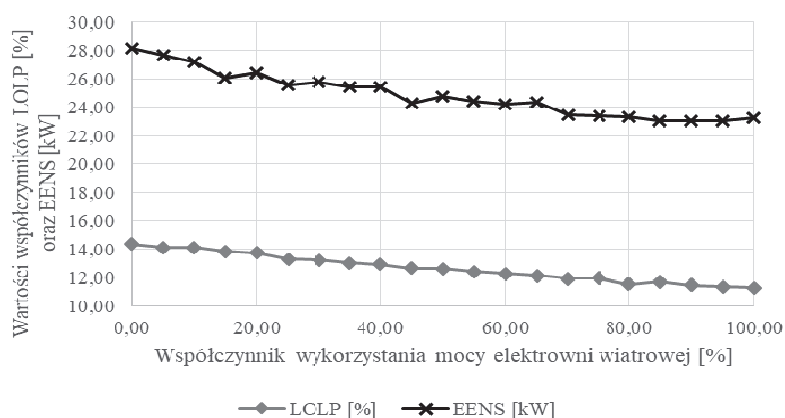
Rys. 7. Zależność wskaźnika LOLP od wartości mocy dostarczanej z zewnętrznej sieci



Rys. 8. Zależność wskaźnika EENS od wartości mocy dostarczanej z zewnętrznej sieci

Odpowiednie projektowanie klastra musi uwzględnić, poza przepustowością połączenia z siecią dystrybucyjną, możliwość zmiany parametrów pracy elektrowni wiatrowej. Do wcześniejszych analiz przyjęte zostały średnie parametry dostępności elektrowni wiatrowej, oparte na modelu trzech bloków zastępczych pracy turbiny wiatrowej [10]. Rzeczywisty współczynnik wykorzystania mocy turbiny wiatrowej może się jednak znacznie różnić od modelu statystycznego, w zależności od rodzaju, a tym samym sprawności zainstalowanej turbiny, a także w zależności od położenia geograficznego źródła i warunków wietrznych w wybranej lokalizacji [8]. Średni współczynnik wykorzystania mocy turbin wiatrowych zainstalowanych w Polsce dla roku 2014 wynosił 24 % [8]. Konieczne jest więc wyznaczenie zależności wystarczalności od stopnia wykorzystania mocy w elektrowni wiatrowej, która została przedstawiona na rysunku 9.

Wskaźniki wystarczalności są niemal liniowo zależne od współczynnika wykorzystania mocy turbiny. Zarówno wskaźnik LOLP, jak i EENS maleją wraz ze wzrostem współczynnika wykorzystania mocy. Zmiany te są jednak nieznaczne, ze względu na stosunkową małą moc zainstalowaną w elektrowni wiatrowej.



Rys. 9. Zależność wystarczalności od współczynnika wykorzystania mocy elektrowni wiatrowej

## 5. PODSUMOWANIE

Rozwijająca się koncepcja powstawania klastrów energii w Polsce ma liczne zalety, jednak konieczne jest uwzględnienie aspektu niezawodności i wystarczalności generacji przy ich projektowaniu. Konieczne jest zapewnienie stabilnej współpracy klastrów z siecią dystrybucyjną, zwłaszcza gdy zainstalowane źródła mają stochastyczny charakter produkcji energii. Na przykładzie modelowanej sieci, można stwierdzić, że niedopuszczalne jest autonomiczne funkcjonowanie klastrów, ze względu na dotkliwe niedobory energii elektrycznej powstające w systemie. Wystarczalność generacji w systemie podłączonym do sieci dystrybucyjnej przyłączem o odpowiedniej przepustowości jest bardzo wysoka. Zapewnienie odpowiedniej współpracy klastra energii z operatorem sieci dystrybucyjnej warunkuje opłacalność ekonomiczną jego eksploatacji oraz odpowiedni poziom cen energii dla odbiorców. Zapewnienie odpowiednich warunków pracy klastrów wymaga również uwzględnienia znacznych różnic w profilach zapotrzebowania odbiorców i wytwarzania źródeł. W dolinach obciążenia może wystąpić konieczność sprzedawania energii wytworzonej w klastrze do sieci dystrybucyjnej. Zaproponowany model przedstawia jedynie wpływ źródeł wiatrowych na wystarczalność w sieci. Dla każdego przypadku indywidualnie należałoby rozważyć wpływ klastra na niezawodność systemu. Obecnie zakłada się, że klastry zwiększą bezpieczeństwo energetyczne, jednak każdy przypadek wyma-

ga odrębnej analizy z wykorzystaniem wskaźników wystarczalności i niezawodności, aby określić rzeczywiste warunki pracy klastra.

## LITERATURA

- [1] Cepeda M., Saguan M., Finon D., Pignon V., Generation adequacy and transmission interconnection in regional electricity markets, *Energy Policy* 37 (2009) 5612-5622.
- [2] DIgSILENT PowerFactory 2017 User Manual, DIgSILENT GmbH, Germany, marzec 2017.
- [3] <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/114-enercon-e-58-10.58#datasheet> [dostęp 25.01.2018 r. godz. 13:02].
- [4] Jąderko A., Kowalewski M. K., Wyznaczanie parametrów wiatru w energetyce odnawialnej, *Przegląd Elektrotechniczny* R. 91, nr 1, 148-151.
- [5] Koncepcja funkcjonowania klastrów energii w Polsce, opracowanie na zlecenie Skarbu Państwa – Ministra Energii, 2017.
- [6] Mid-Term Adequacy Forecast, Raport ENTSO-E, 2016.
- [7] Paska J., Niezawodność systemów elektroenergetycznych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [8] Porównanie efektywności elektrowni wiatrowych w Polsce i Niemczech, Raport Polskiej Izby Gospodarczej Energii Odnawialnej i Rozproszonej, 2016.
- [9] Standardowe profile zużycia energii na rok 2017. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej, Enea Operator Sp. z o.o.
- [10] Surma T., Paska J., Modele niezawodnościowe elektrowni wiatrowych, *Elektroenergetyka*, nr 4(10)/2011, 34-61.
- [11] van Casteren J.F.L., Bollen M.H.J., Schmiege M.E., Reliability assessment in electrical power systems: the Weibull-Markov stochastic model.

## GENERATION ADEQUACY IN LOCAL DISTRIBUTION SYSTEMS

Because of higher integration of distributed generation in electrical networks, there is a need to consider generation adequacy at a given area. The issue is very important due to the rising number of energy clusters in Poland. This article formulates the problem of generation adequacy using reliability indices, such as LOLP and EENS. These indices describe the probability of loss of load in the network and the expected amount of energy not supplied to customers. In order to analyse generation adequacy, an exemplary local power system including distributed generation has been created with the DIgSILENT PowerFactory software. Generation adequacy indices have been calculated using Monte Carlo simulation method. The article describes the impact of distributed generation on the system's reliability, depending on the availability of the distributed sources of energy.

*(Received: 31.01.2018, revised: 09.03.2018)*