

OPTYMALIZACJA PRACY SYSTEMU DYSTRYBUCYJNEGO POPRZEZ ODPOWIEDNIĄ ALOKACJĘ ORAZ STEROWANIE

OPTIMIZATION OF DISTRIBUTION ENERGY SYSTEM BY PROPER ALLOCATION AND OPERATION OF RES

Mateusz Andrychowicz

Politechnika Łódzka
Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki
Instytut Elektroenergetyki
ul. Bohdana Stefanowskiego 18/22
90-924 Łódź
e-mail: andrychowicz.mateusz@gmail.com

Abstract: The paper is dedicated to prove that it is possible to maximize energy production from Renewable Energy Sources (RES) by their allocation taking into consideration their volatile character of work. Annual energy maximization is the objective function in the analysis. It calculates as a product of installed capacity and capacity factor. Power flows are also calculated in the optimization process. The process uses real generation and demand profiles and is made as Mixed Integer-Linear Programming (MIPL) using software FICO® XPRESS. This method can be used by Distribution System Operators to estimate the potential of each distribution system.

Keywords: distribution system, Renewable Energy Sources, allocation.

Wprowadzenie

Pośród wielu technologii zaliczanych do OZE, które rozwijały się na przestrzeni ostatnich kilku lat najczęściej stosowane są turbiny wiatrowe (WT), instalacje fotowoltaiczne (PV) oraz elektrownie wodne [7]. Większość z instalacji WT, PV oraz biogazowni (BG) są małych mocy dlatego też są one przyłączane do sieci dystrybucyjnej. Jednakże systemy te budowane były dwadzieścia, a nawet więcej lat temu i były przeznaczone tylko do dostarczania energii do odbiorców. W związku z szybkim rozwojem OZE istnieje potrzeba modyfikacji sieci co wiąże się z dodatkowymi kosztami. Koszty te mogą być zredukowane poprzez odpowiednią alokację oraz dobór mocy instalacji OZE [2]. Obecnie wiele wysiłku jest wkładane w poszukiwanie optymalnej pracy sieci dystrybucyjnej. Najpopularniejszym kryterium, które stosowane jest w procesie optymalizacji jest minimalizacja strat mocy [3, 4, 5, 6] oraz poprawa warunków napięciowych [8, 11]. Niektóre prace skupiają się na korzyściach społecznych oraz maksymalizacji ogólnego dobrobytu [1].

Alokacja OZE może być rozwiązywana wieloma metodami optymalizacyjnymi takimi jak: programowanie mieszane całkowitoliczbowe nieliniowe (*ang. Mixed Integer Non-Linear Programming (MINLP)*) [5], programowanie nieliniowe (*ang. Non-linear Programming*

(*NLP*)) [9], podejście heurystyczne [4], optymalizacja rojem cząstek (*ang. Particle Swarm Optimization (PSO)*) [3]. Jednakże żadne z przytoczonych badań nie skupia się na maksymalizacji produkcji energii z OZE uwzględniając aspekty techniczne pracy sieci.

Ten artykuł prezentuje nową metodę dla alokacji OZE w systemie dystrybucyjnym. Metoda ta pozwala na maksymalizację produkcji energii z tych źródeł bez konieczności rozbudowy istniejącej infrastruktury sieciowej oraz przy przestrzeganiu ograniczeń technicznych funkcjonowania systemu. Opis systemu testowego, użytych odbiorów oraz ich rozmieszczenie, profile generacyjne oraz opis założeń przedstawiony został w rozdziale drugim. W rozdziale trzecim przedstawione są scenariusze, które zostały użyte w procesie optymalizacji oraz wyniki do każdego z nich. W rozdziale czwartym przedstawiono wnioski oraz dyskusję otrzymanych wyników.

Opis zagadnienia

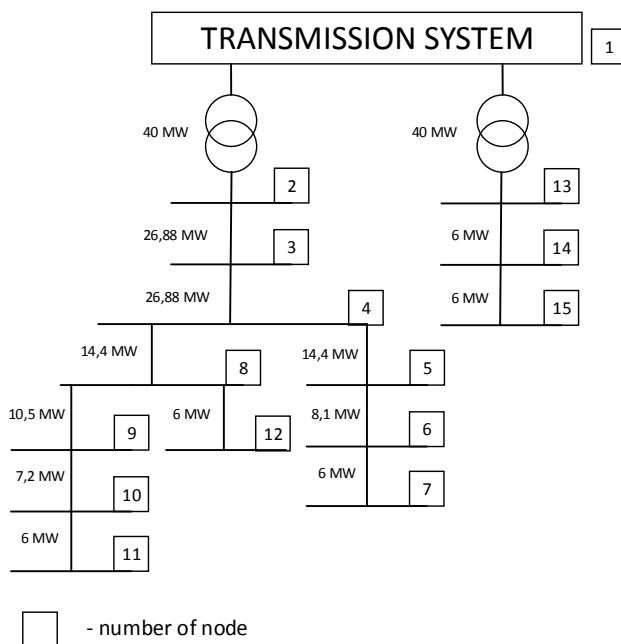
Celem tego artykułu jest maksymalizacja produkcji energii z OZE w zdefiniowanym systemie dystrybucyjnym poprzez odpowiednią alokację tych źródeł w systemie. Generacja oraz zapotrzebowanie reprezentowane są profilami generacji/zapotrzebowania. Rozpływy mocy w sieci pozwalają na pokazanie, które

linie są najmniej obciążone i w rezultacie gdzie można dołączyć dodatkowe źródła wytwórcze. W celu potwierdzenia wyżej postawionej tezy zostały przeprowadzone symulacje przy różnych scenariuszach.

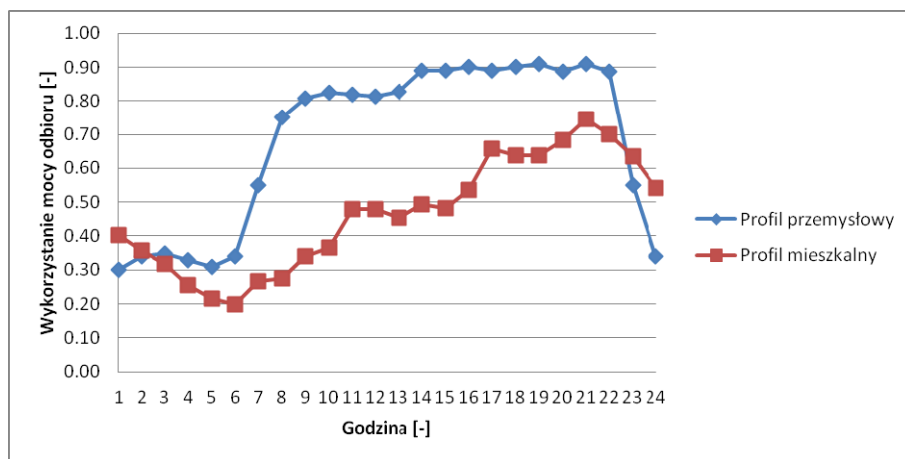
Symulacje były przeprowadzone dla sieci testowej złożonej z piętnastu węzłów (rys. 1), która została stworzona na podstawie sieci testowej CIGRE MV [10]. Wartości mocy pokazane na rysunku odpowiadają przepustowości linii. Co więcej sieć jest połączona z systemem przesyłowym za pomocą dwóch transfor-

matorów o mocy 40 MW każdy. Przepustowości linii wahają się od 6 MW do 26,88 MW. Dla każdej linii została ponadto wyliczona rezystancja oraz reaktancja na podstawie ich wartości jednostkowych oraz długości linii.

Dwa rodzaje odbiorów zostały użyte do badań: mieszkalny oraz przemysłowy. Oba profile są profilami rzeczywistymi uzyskanymi na podstawie własnej analizy. Profile odbiorów są pokazane na rys. 2.



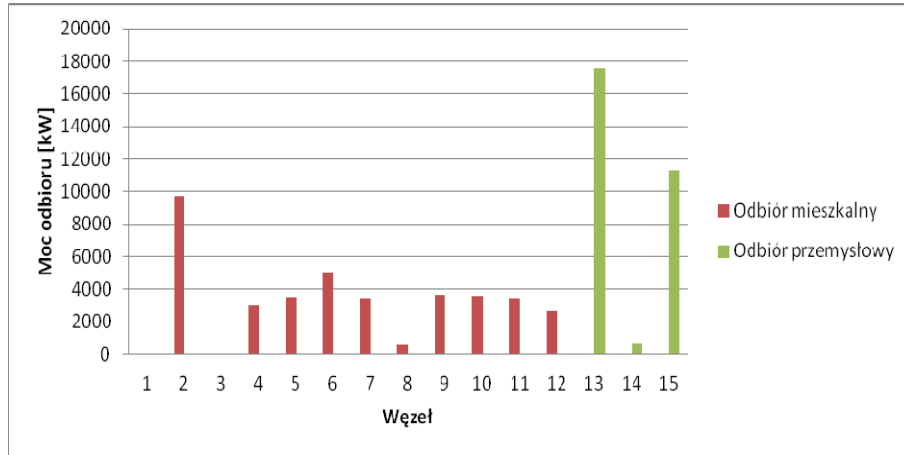
Rys. 1. Sieć testowa średniego napięcia [10].



Rys. 2. Profile odbiorów mieszkalnych oraz przemysłowych.

Odbiory mieszkalne zostały umieszczone w węzłach od 2 do 12 i są połączone z systemem przesyłowym za pomocą transformatora 1. Odbiory przemysłowe są natomiast umieszczone w węzłach od 13 do 15 i zasila je

transformator 2. Takie umiejscowienie odbiorów pozwala na wydzielenie strefy mieszkalnej oraz przemysłowej w badanym modelu. Moce odbiorów pokazano na rys. 3.

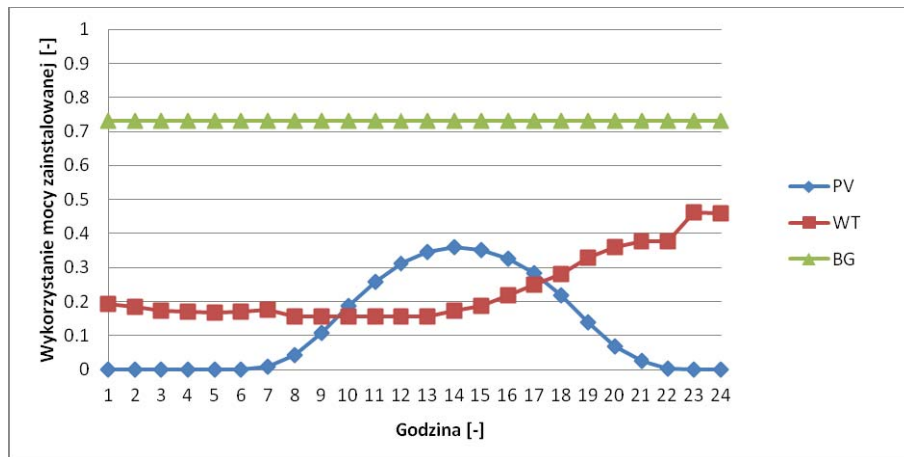


Rys. 3. Moc odbiorów mieszkalnych oraz przemysłowych w badanym systemie.

Odnawialne Źródła Energii modelowane są poprzez codzienne profile generacji, podobnie jak odbiory. Rozważane są trzy typy OZE: turbiny wiatrowe, panele fotowoltaiczne oraz biogazownie. Dienne profile generacji zostały wyznaczone na podstawie własnych badań. Profile użyte w procesie optymalizacji pokazane są na rys. 4.

Z powodu zależności mocy generowanej z WT oraz PV od pogody trudno jest określić ile energii będzie wytworzone przez dane źródło. Jednakże ilość

produkowanej energii powtarza się w cyklach rocznych. Współczynnik, który odnosi się do ilości energii produkowanej z danego źródła w ciągu roku to czas wykorzystania mocy zainstalowanej (*ang. Capacity Factor (CF)*) wyrażony w procentach, odniesiony do wartości 8760 godzin. CF dla WT, PV oraz BG zostały przyjęte na odpowiednio poziomie: 24%, 12,5% oraz 73% co odpowiada 1100, 2100 oraz 6400 godzin w ciągu roku.



Rys. 4. Profile źródeł wytwórczych.

Maksymalizacja energii z OZE jest funkcją celu procesu optymalizacji. Funkcja celu (1) jest wyrażona jako iloczyn mocy zainstalowanej, CF dla danego typu źródła wytwórczego oraz ilości godzin w ciągu roku:

$$\max \sum_{n=1}^N \left(\sum_{d=1}^D (P_{DG}(n, d) \cdot CF_{annual}(d) \cdot 8760) \right) \quad (1)$$

gdzie:

$CF_{annual}(d)$ – czas wykorzystania mocy zainstalowanej,

$P_{DG}(n, d)$ – moc zainstalowana w danej technologii w węźle,

n – numer węzła, d – typ technologii OZE,

8760 – liczba godzin w ciągu roku.

Roczna produkcja energii jest maksymalizowana przez zwiększanie mocy zainstalowanej w OZE, które jest zmienną w procesie optymalizacji. Trzy typy instalacji OZE: PV, WT oraz BG mogą być instalowane w węźle. Optymalizacja jest przeprowadzana przy przestrzeganiu aspektów technicznych takich jak rozpięty mocy oraz

wartości napięcia w węźle. Rozpływ mocy między węzłami zależny jest od różnicy generacji oraz zapotrzebowania w węzłach:

$$\forall_{t \in T}, \forall_{n \in N} p_{dem}(n,t) - p_{gen}(n,t) = \sum_{i=1}^I PF(n,i,t) \quad (2)$$

gdzie:

- $p_{dem}(n,t)$ – zapotrzebowanie w węźle w każdej chwili czasowej,
- $p_{gen}(n,t)$ - generacja w węźle w każdej chwili czasowej,
- $PF(t,n,i)$ – przepływ mocy z węzła n do i w chwili $t, n,$
- i – numer węzła,
- t – chwila czasowa.

Generacja w węźle jest to suma generacji z każdego źródła zainstalowanego w węźle. Jest ona liczona jako iloczyn moc znamionowej źródła oraz wartość wykorzystania tej mocy zależny od czasu oraz profili generacji źródła:

$$\forall_{t \in T}, \forall_{n \in N} p_{gen}(n,t) = \sum_{d=1}^D (P_{DG}(n,d) \cdot profile_G(d,t)) \quad (3)$$

gdzie:

- $P_{DG}(n,d)$ – moc zainstalowana w danej technologii w węźle,
- $profile_G(d,t)$ – wykorzystanie mocy znamionowej zależna od typu źródła oraz czasu $t,$
- n – numer węzła,
- d – typ technologii OZE,
- t – chwila czasowa.

Zapotrzebowanie w węźle w chwili t jest liczona jako suma zapotrzebowania przez wszystkie odbiory w węźle. Jest ono liczone jako iloczyn moc znamionowej odbioru oraz wykorzystania tej mocy zgodnie z profilem zapotrzebowania dla odbioru:

$$\forall_{t \in T}, \forall_{n \in N} p_{dem}(n,t) = \sum_{l=1}^L (P_{Load}(n,l) \cdot profile_D(l,t)) \quad (4)$$

gdzie:

- $P_{Load}(n,l)$ – moc znamionowa odbioru w węźle $n,$
- $profile_D(l,t)$ – profil wykorzystania mocy znamionowej odbioru,
- n – numer węzła,

l – rodzaj odbioru.

Przepływ mocy w każdej linii jest ograniczony przez jej przepustowość. Napięcie w węźle musi natomiast mieć wartość między 90% a 110% napięcia znamionowego:

$$\forall_{t \in T}, \forall_{n,i \in N} PF(n,i,t) \leq PL_{cap}(n,i) \quad (5)$$

gdzie:

- $PF(t,n,i)$ – przepływ mocy z węzła n do i w chwili $t,$
- $PL_{cap}(n,i)$ – dopuszczalne obciążenie linii,
- n,i – numer węzła,
- t – chwila czasowa.

$$\forall_{t \in T}, \forall_{n \in N} V(n,t) \geq V_N(1-0,1) \quad (6)$$

$$\forall_{t \in T}, \forall_{n \in N} V(n,t) \leq V_N(1+0,1) \quad (7)$$

gdzie:

- $V(n,t)$ – wartość napięcia w węźle n w chwili $t,$
- V_N – nominalna wartość napięcia węzła,
- n – numer węzła,
- t – chwila czasowa.

Wyniki

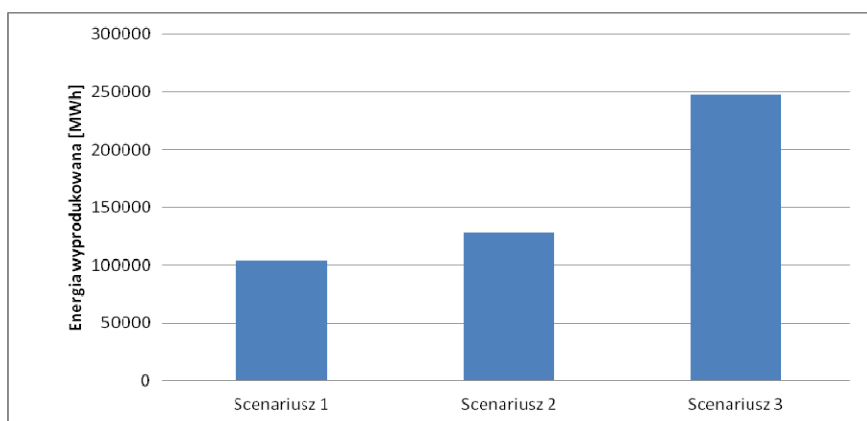
W celu wykazania zalet zaproponowanej metody trzy scenariusze symulacyjne były przeanalizowane. Każdy z nich przedstawia inne podejście do problemu alokacji.

- Scenariusz 1 – w scenariuszu tym profil generacji nie został uwzględniony, a obliczenia energii wygenerowanej przeprowadzane są dla 100% wykorzystania mocy znamionowej źródła.

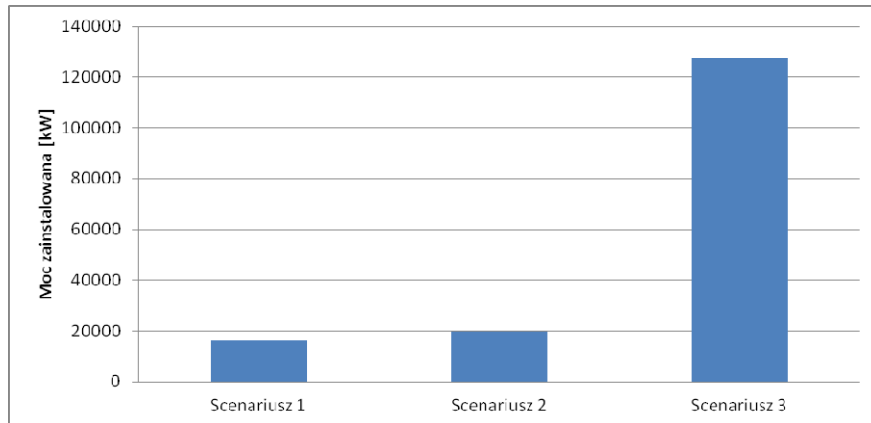
- Scenariusz 2 - scenariuszu tym profil generacji został uwzględniony, ale moc zainstalowana w węźle została ograniczona do wartości 20 000 kW.

- Scenariusz 3 - scenariuszu tym profil generacji został uwzględniony oraz moc zainstalowana w węźle nie została ograniczona.

Rys. 5 oraz rys. 6 przedstawiają sumaryczne wyniki dla trzech przebadanych scenariuszy. Zawierają one sumaryczną energię wyprodukowaną oraz moce zainstalowane w całym systemie.



Rys. 5. Sumaryczna energia wyprodukowana w każdym z badanych scenariuszy.



Rys. 6. Sumaryczna moc zainstalowana w każdym z badanych scenariuszy.

Podsumowanie

Zaprezentowana w artykule metoda alokacji OZE w systemie dystrybucyjnym pozwala na maksymalizację generacji energii z tych źródeł bez konieczności rozbudowy sieci. Wyniki pokazują, iż zastosowanie rzeczywistych profili generacji OZE zamiast operowaniu na ich mocy zainstalowanej oraz na zdjęciu ograniczeń, co do ilości mocy zainstalowanej OZE w systemie pozwala na uzyskanie większej energii. Ponadto dzięki zastosowaniu tej metody można wykazać, w których miejscach sieci instalacja odnawialnych źródeł energii jest najkorzystniejsza.

Energia wyprodukowana przy założeniach scenariusza 3 była o 94% wyższa niż energia przy założeniach scenariusza 2 oraz o 138% wyższa niż w scenariuszu 1. Można również zauważyć, że przy założeniach dla scenariusza trzeciego w systemie można zainstalować 539% więcej mocy niż przy założeniach dla scenariusza 2 oraz o 681% więcej mocy niż przy założeniach dla scenariusza 3.

W dalszych pracach badawczych autor zamierza przebadać wpływ sterowania źródłami wytwarzającymi oraz instalację zasobników energii na końcową wartość wyprodukowanej energii.

Literatura

1. Aman, M.M., Jasmon, G.B., Bakar, A.H.A., and Mokhlis, H., A new approach for optimum DG placement and sizing based on voltage stability maximization and minimization of power losses, *Energy Convers. Manag.*, 2013, vol. 70, pp. 202–210.
2. Doagou-Mojarrad, H., Gharehpetian, G.B., Rastegar, H., Olamaei, J., Optimal placement and sizing of DG (distributed generation) units in distribution networks by novel hybrid evolutionary algorithm, *Energy*, 2013, vol. 54, pp. 129–138.
3. Esmaili, M., Placement of minimum distributed generation units observing power losses and voltage stability with network constraints, *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2013, vol. 7, No. 8, pp. 813–821.
4. Gautam, D., Mithulananthan, N., Optimal DG placement in deregulated electricity market, *Electr. Power Syst. Res.*, 2007, vol. 77, No. 12, pp. 1627–1636.
5. Gil Mena, A.J., Martín García, J.A., An efficient approach for the siting and sizing problem of distributed generation, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2015, vol. 69, pp. 167–172.
6. Hung, D.Q., Mithulananthan, N., Lee, K.Y., Optimal placement of dispatchable and nondispatchable renewable DG units in distribution networks for minimizing energy loss, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 55, pp. 179–186.
7. International Energy Agency, Energy and climate change, *Preserv. Glob. Environ. Chall. Shar. Leadersh.*, 2015.
8. Mohandas, N., Balamurugan, R., and Lakshminarasimman, L., Optimal location and sizing of real power DG units to improve the voltage stability in the distribution system using ABC algorithm united with chaos, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2015, vol. 66, pp. 41–52.
9. Rossetti, G.J.S., de Oliveira, E.J., de Oliveira, L.W., Silva, I.C., Peres, W., Optimal allocation of distributed generation with reconfiguration in electric distribution systems, *Electr. Power Syst. Res.*, 2013, vol. 103, pp. 178–183.
10. Rudion, K., Orths, A., Styczynski, Z.A., Strunz, K., Design of benchmark of medium voltage distribution network for investigation of DG integration. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2006, p. 6.
11. Singh, A.K., Parida, S.K., Novel sensitivity factors for DG placement based on loss reduction and voltage improvement, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2016, vol. 74, pp. 453–456.