

doi:10.15199/48.2019.10.24

Zastosowanie optymalizacji konfiguracji sieci do redukcji kosztów strat energii elektrycznej

Streszczenie. Aspekt ekonomiczny w branży elektroenergetycznej stanowi jedno z ważniejszych zagadnień. Zauważalne jest ciągłe dążenie do redukcji i optymalizacji kosztów związanych z wytwarzaniem, przesyłem oraz dystrybucją energii elektrycznej. W artykule przedstawiono jeden z możliwych sposobów redukcji kosztów dystrybucji energii elektrycznej, polegający na zastosowaniu optymalizacji konfiguracji sieci dystrybucyjnej. Badania przeprowadzono na zmodyfikowanym fragmencie rzeczywistej sieci dystrybucyjnej współpracującej z odnawialnymi źródłami energii.

Abstract. The economic aspect in the power industry is one of the most important issues. It is noticeable that there is a constant desire to reduce and optimize the costs associated with the generation, transmission and distribution of electricity. The article presents one of the possible ways of reducing the costs of electricity distribution, consisting in the optimization of the distribution network configuration. The research was carried out on a modified part of the actual distribution network cooperating with renewable energy sources. (**Application of network configuration optimization to reduce costs of electricity loss**).

Słowa kluczowe: optymalizacja, rekonfiguracja sieci, redukcja kosztów dystrybucji energii, minimalizacja strat mocy.

Keywords: optimization, network reconfiguration, reduction of energy distribution costs, minimization of power losses.

Wprowadzenie

W branży elektroenergetycznej aspekt ekonomiczny jest kluczowym zagadnieniem, które obecnie jest przedmiotem wnikliwych analiz i prac badawczych. Wraz ze wzrostem zapotrzebowania na energię elektryczną koszty związane z jej dystrybucją zwiększają się. Zauważalne jest dążenie do redukcji tych kosztów nie tylko ze względów ekonomicznych, ale również ekologicznych i formalno-prawnych. W ciągu ostatniej dekady nastąpiło znaczne zmniejszenie strat energii elektrycznej poprzez wdrażanie przez operatorów sieci programów ograniczania strat energii elektrycznej. Zastosowanie nowoczesnych rozwiązań konstrukcyjnych do budowy przewodów elektroenergetycznych również znacząco się przyczyniło do ograniczenia strat związanych z przesyłem energii. Redukcję kosztów dystrybucji energii elektrycznej można realizować na różne sposoby. Jednym z nich jest redukcja strat mocy czynnej w sieci dystrybucyjnej średniego napięcia, która stanowi temat tego artykułu.

Optymalizacja sieci dystrybucyjnej

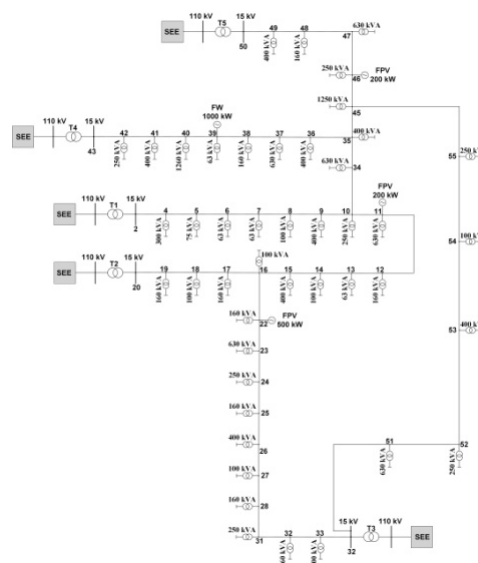
W dziedzinie elektroenergetyki optymalizacji podlegają różne grupy zagadnień m.in. rozptyły mocy i energii elektrycznej. W artykule przedstawiono możliwości redukcji kosztów dystrybucji energii elektrycznej z wykorzystaniem optymalizacji konfiguracji sieci dystrybucyjnej średniego napięcia.

Badania optymalizacyjne przeprowadzono na zmodyfikowanym fragmencie rzeczywistej sieci dystrybucyjnej średniego napięcia, stanowiącej część rejonu energetycznego składającego się z 5 stacji GPZ 110/15 kV. Model sieci został odwzorowany w programie rozptylowym PowerWorld Simulator. W sieci zainstalowano transformatory o mocy 16 MVA każdy. Sieć zbudowana jest z 45 węzłów, 50 odcinków linii SN oraz 50 odbiorów o łącznej mocy równej 45,6 MW. W sieci występują głównie linie napowietrzne a magistrala główna wykonana jest przewodami AFL 6-70 o łącznej długości ponad 100 km. W omawianym modelu sieci występują także odnawialne źródła energii, należą do nich trzy farmy fotowoltaiczne o następujących mocach: 0,5 MW, 0,6 MW, 0,2 MW oraz farma wiatrowa o mocy 1 MW. Model sieci wykorzystanej do badań został przedstawiony na rysunku 1.

Optymalizacja sieci dystrybucyjnej została przeprowadzona w celu redukcji kosztów dystrybucji energii

elektrycznej poprzez zmianę konfiguracji sieci [1]. Problem optymalizacyjny sprowadzał się do ograniczenia strat mocy czynnej w sieci dystrybucyjnej średniego napięcia współpracującej z odnawialnymi źródłami energii. Funkcja celu polegała na minimalizacji strat mocy w sieci, jej postać ogólną opisano zależnością:

$$(1) \quad F_c = \Delta P \rightarrow \min$$



Rys. 1. Model sieci przyjętej do badań

Optymalizacja konfiguracji sieci została przeprowadzona z wykorzystaniem algorytmu przeszukiwania kukułczego (ang. CuckooSearch) [2]. Przeszukiwanie kukułcze jest nowoczesnym algorytmem meta heurystycznym, który zyskał dużą popularność w rozwiązywaniu złożonych problemów. Wybór algorytmu CuckooSearch podyktowany był dużą jego skutecznością w rozwiązywaniu problemów z dziedziny elektroenergetyki oraz stosunkowo łatwą w implementacją. Algorytm CuckooSearch naśladuje zachowania pewnych gatunków kukułek pasożytniczych, które podrzucają swoje jaja do gniazd innych ptaków. Idealizacja zachowań kukułek pasożytniczych była inspiracją do stworzenia algorytmu optymalizacyjnego, który

obecnie jest powszechnie wykorzystywany do rozwiązywania różnych złożonych problemów [3].

Algorytm CucckoSearch opiera się na 4 zasadach:

- 1) każda kukulka składa jedno jajo w danym czasie w losowo wybranym przez siebie gnieździe,
- 2) najlepsze gniazda (rozwiązania) przenoszone są do kolejnego etapu,
- 3) liczba gniazd jest stała,
- 4) podrzucone jajo może zostać wykryte z prawdopodobieństwem $p_{\alpha}=[0,1]$.

Schemat ogólny algorytmu CucckoSearch został zaprezentowany poniżej [4].

begin

Wylosuj początkową populację n gniazd

while ($x < \text{MaxLiczbaPokoleń}$)

Wybierz losowo kukulkę przez lot Levy'ego i oceń $f(x)$

Wybierz losową kukulkę spośród n kukulek (f_j)

if ($f_i > f_j$) **then**

Podstaw za j -tą nową wartość

end

Część p_{α} słabych gniazd opuszczono w celu, zbudowania nowego

Zapamiętaj najlepsze gniazdo

Utwórz ranking osobników z populacji

end

end

W przedstawionym schemacie rozwiązanie jest reprezentowane za pomocą kukulki. Liczba kukulek nie jest istotna więc przyjmuje się, że jest równa liczbie gniazd, natomiast gniazdach przechowywany jest stan algorytmu.

Badania optymalizacyjne zrealizowano z wykorzystaniem środowiska do obliczeń numerycznych MATLAB, w którym został napisany skrypt realizujący proces optymalizacji rozcięć sieci dystrybucyjnej z wykorzystaniem algorytmu CucckoSearch. W obliczeniach uwzględniono losowy charakter obciążenia i generacji rozproszonej z wykorzystaniem funkcji random wbudowanej w środowisko MATLAB [5]. Przyjęto, że obciążenie sieci będzie się zmieniało w zakresie od 0 do P_{max} natomiast moc generowana z odnawialnych źródeł energii w zakresie od 10% do 100% P_{max} .

Ponadto, do badań optymalizacyjnych przyjęto następujące założenia:

- zróżnicowany poziom obciążenia wszystkich odbiorów,
- zróżnicowany poziom mocy generowanych z odnawialnych źródeł energii,
- podział sieci realizowany we wszystkich odcinkach,
- generacja i odbiory podlegają rozkładowi normalnemu.

Badania przeprowadzono dla 5 różnych wariantów pracy sieci. Wykonano 1000 obliczeń optymalizacyjnych dla każdego z wariantów. Na podstawie otrzymanych wyników optymalizacji wyznaczono lokalizację miejsc podziału sieci, w których straty mocy czynnej były najmniejsze oraz przedstawiono straty mocy czynnej przed i po optymalizacji.

Tabela 1. Zestawienie wariantów pracy sieci

Opcja	W1	W2	W3	W4	W5
A	X	X	X	X	X
B		X		X	X
C			X		
D				X	
E					X

Oznaczenia:

W_n – wariant pracy sieci,

A – model podstawowy,

B – źródło fotowoltaiczne o mocy 0,2MW,

C – źródło fotowoltaiczne o mocy 0,6MW,

D – źródło fotowoltaiczne o mocy 0,5MW,

E – farma wiatrowa o mocy 1MW.

W analizowanym modelu testowym znajduje się 5 punktów podziału sieci są one niezmiennie i występują pomiędzy następującymi węzłami: 10-11, 17-18, 27-28, 34-35, 45-46.

Wyniki optymalizacji

W tabeli 2 przedstawiono optymalne miejsca podziału sieci w zależności od wariantu pracy sieci. Z analizy otrzymanych wyników można stwierdzić, że optymalne miejsca rozcięć sieci zmieniają się dynamicznie i są różne od pierwotnie zakładanych. Wynika z tego, że zróżnicowanie obciążenia w sieci i losowy charakter generacji rozproszonej znacząco wpływają na rozprzyszczenie mocy w sieci a tym samym na optymalną lokalizację punktów podziału sieci.

Tabela 2. Zestawienie optymalnych punktów podziału sieci

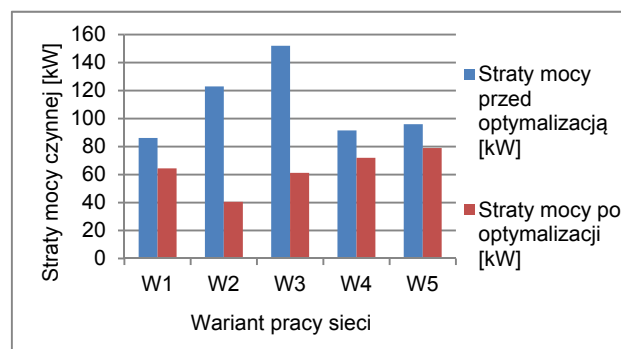
Wariant pracy sieci	L1	L2	L3	L4	L5
W1	7-8	20-21	30-31	36-37	48-49
W2	6-7	20-21	30-31	36-37	47-48
W3	7-8	21-22	29-30	36-37	48-49
W4	9-10	20-21	30-31	35-36	48-49
W5	8-9	20-21	30-31	36-37	49-50

Czynniki te również powodują zmiany strat mocy w sieci, zestawienie wspomnianych strat mocy przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Zestawienie strat mocy czynnej przed i po optymalizacji

Wariant pracy sieci	Straty mocy przed optymalizacją [kW]	Straty mocy po optymalizacji [kW]
W1	86,1	64,4
W2	123,0	40,5
W3	152	61,2
W4	91,5	72
W5	96	79

Na rysunku 2 przedstawiono straty mocy czynnej dla poszczególnych wariantów pracy sieci w sposób graficzny.



Rysunek 2. Straty mocy dla poszczególnych wariantów pracy sieci

Badania pokazują, że zarówno nieprzewidywalność odnawialnych źródeł energii jak i zmienność mocy odbieranej zawsze wpływa na rozprzyszczenie mocy i poziom strat mocy czynnej. W każdym analizowanym przypadku optymalizacja punktu rozcięcia sieci umożliwiła redukcję strat mocy. W zależności od wariantu pracy sieci ponowna rekonfiguracja zrealizowana poprzez optymalizację spowodowała ograniczenie strat związanych z dystrybucją energii. W każdym przypadku lokalizacja optymalnych miejsc podziału sieci zmieniała się, co sugeruje, aby dynamicznie przeprowadzać rekonfigurację sieci w celu zachowania jej optymalnej pracy [6]. Nie stanowi to obecnie problemu w dobie rozwoju systemów zdalnego sterowania i komunikacji umożliwiających dynamiczną zmianę konfiguracji sieci.

Przeprowadzone badania po raz kolejny potwierdzają, że zarówno zmienność obciążenia jak i losowy charakter odnawialnych źródeł energii wpływają na rozpyły mocy w sieci a tym samym na lokalizację optymalnego punktu podziału i poziom strat mocy czynnej. Zastosowanie optymalizacji rekonfiguracji sieci umożliwia ograniczenie strat mocy czynnej w sieci a tym samym powoduje korzyści ekonomiczne.

Analiza redukcji kosztów strat energii elektrycznej dla wybranego stanu pracy sieci

W przemyśle elektroenergetycznym zawsze występują straty energii elektrycznej i są one nieodłącznie związane z wytwarzaniem, przesyłem i dystrybucją energii. Straty te są zależne od wielu różnych czynników m.in. czynników technicznych, ekonomicznych oraz geograficznych. Prawidłowe wyznaczanie strat jest złożonym zagadnieniem wymagającym uwzględnienia wielu czynników [7]. Straty w systemach elektroenergetycznych można podzielić na:

- straty bilansowe,
- straty techniczne,
- straty handlowe.

Straty bilansowe są różnicą między energią wprowadzaną do sieci a energią zaewidencjonowaną, jako sprzedana odbiorcom. Straty bilansowe ΔE_b można wyrazić następującą zależnością:

$$(2) \quad \Delta E_b = E_w - (E_o + E_p)$$

gdzie: E_w – energia wprowadzona do sieci, E_o – energia elektryczna sprzedana odbiorcom, E_p – energia elektryczna przekazana innym rejonom energetycznym.

Straty bilansowe zawierają w sobie straty techniczne oraz handlowe, wobec tego prawidłowa jest również zależność:

$$(3) \quad \Delta E_b = \Delta E_t + \Delta E_h$$

gdzie: ΔE_t – straty techniczne, ΔE_h – straty handlowe.

Straty handlowe są różnicą pomiędzy stratami wynikającymi z bilansu energii elektrycznej dostarczonej i oddanej z sieci a stratami technicznymi.

Straty techniczne są to straty powstające w elementach systemu elektroenergetycznego i są one bezpośrednio związane z procesem wytwarzania, przesyłu i dystrybucji energii elektrycznej [8].

Badania optymalizacyjne wykazały możliwości ograniczenia strat mocy czynnej w sieci, pełne zestawienie wyników badań przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Porównanie strat mocy przed i po optymalizacji dla każdego wariantu pracy sieci

Wariant pracy sieci	Straty mocy przed optymalizacją [kW]	Straty mocy po optymalizacji [kW]	ΔP [kW]	ΔP [%]
W1	86,1	64,4	21,7	25,0
W2	123,0	40,5	82,5	67,0
W3	152,0	61,2	90,8	59,7
W4	91,5	72,0	19,5	21,3
W5	96,0	79,0	17,0	17,7

W tabeli 4 przedstawiono straty mocy czynnej przed optymalizacją i po a także różnicę tych strat dla każdego analizowanego wariantu pracy sieci. W każdym wariantcie pracy sieci zastosowanie optymalizacji umożliwiło ograniczenie strat mocy. Największa różnica w stratach mocy przypadła na drugi wariant pracy sieci i wynosiła 67%.

Wyniki tych symulacji należy potraktować orientacyjnie, gdyż w badaniach ze względu na złożoność problemu zostały wprowadzone pewne ograniczenia. Jednakże, podobne badania opisywane w literaturze potwierdzają, że w wyniku takiej rekonfiguracji sieci można ograniczyć straty mocy w sieci od kilkunastu do kilkudziesięciu procent.

Różnicę strat mocy przed optymalizacją i po można rozpatrywać w aspekcie ekonomicznym. Analiza kosztów dystrybucji energii elektrycznej jest zagadnieniem złożonym i wymaga uwzględnienia wielu czynników. Czyniąc pewne uproszczenia można oszacować korzyści finansowe wynikające z zastosowania rekonfiguracji sieci. W celu określenia korzyści finansowych wynikających z zastosowania automatycznej rekonfiguracji sieci przyjęto cenę energii na pokrycie strat energii na poziomie 241,81 zł/MWh. Jest to średnia cena sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym wyliczona przed Urząd Regulacji Energetyki za pierwszy kwartał w roku 2019. Obliczenia średniej ceny sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym obejmują sprzedaż energii realizowaną przez wytwórców i spółki obrotu w konkurencyjnych segmentach hurtowego rynku energii elektrycznej.

W tabeli 5 zestawiono średnie ceny sprzedaży energii na rynku konkurencyjnym w latach 2016-2019. Średnie ceny energii na rynku konkurencyjnym w latach 2016-2019 mają tendencję wzrostową. W związku z tym koszty związane ze stratami energii będą się zwiększały jest to sygnał do tego, aby rozważyć zastosowanie dynamicznej rekonfiguracji sieci w celu ograniczenia kosztów energii.

Tabela 5. Średnia cena sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym [9]

Rok	Średnia roczna cena [zł/MWh]	Średnia kwartalna cena energii [zł/MWh]			
		I kwartał	II kwartał	III kwartał	IV kwartał
2019	241,81	241,81	-	-	-
2018	194,30	174,95	186,21	208,83	205,50
2017	163,70	160,60	162,50	176,86	164,05
2016	169,70	167,45	171,14	171,52	168,88

Analizę korzyści finansowych związanych z zastosowaniem rekonfiguracji sieci przeprowadzono dla każdego z wariantów pracy sieci w określonym stanie pracy sieci. Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Godzinowe koszty strat mocy dla poszczególnych wariantów pracy sieci w określonym stanie pracy

Wariant pracy sieci	Koszty strat przed optymalizacją [zł/h]	Koszty strat po optymalizacji [zł/h]	Różnica kosztów [zł/h]
W1	20,75	15,52	5,22
W2	29,64	9,64	19,88
W3	36,63	14,74	21,88
W4	22,05	17,35	4,69
W5	23,123	19,03	4,09

W tabeli 6 przedstawiono zestawienie kosztów związanych ze stratami mocy dla poszczególnych wariantów pracy sieci. Przedstawione koszty dotyczą takiej konfiguracji sieci, w której obciążenia wszystkich stacji transformatorowych wynoszą $0,5 P_{max}$ a moc generowana z odnawialnych źródeł energii wynosi $0,5 P_{max}$ i stan pracy sieci utrzymuje się przez jedną godzinę. W normalnych warunkach zarówno obciążenia jak i moc generowana z odnawialnych źródeł energii zmieniając się dynamicznie będzie powodowała zmiany rozpyłów mocy i w związku z tym strat energii oraz kosztów z nimi związanych. Dla każdego przypadku oszczędności związane ze stratami mocy będą inne w zależności od warunków sieciowych. Są to oczywiście sytuacje hipotetyczne, gdyż w tej analizie

zastosowano pewne uproszczenia, a warunki sieciowe zmieniają się dynamicznie. Niemniej jednak potwierdza to, że zastosowanie rekonfiguracji sieci mającej na celu obniżenie strat mocy w sieci przynosi korzyści finansowe.

Wnioski

W artykule przedstawiono możliwości redukcji kosztów strat energii elektrycznej poprzez zastosowanie optymalizacji konfiguracji sieci. Badania optymalizacyjne przeprowadzono na zmodyfikowanym fragmencie rzeczywistej sieci dystrybucyjnej średniego napięcia pracującej w różnej konfiguracji z odnawialnymi źródłami energii. Dokonano optymalizacji rozcięć sieci dla każdego z wariantów pracy sieci i na tej podstawie wyliczono różnicę strat mocy przed i po optymalizacji. Analiza redukcji kosztów strat energii została przeprowadzona dla wybranego stanu pracy sieci. W badaniach uwzględniono problematykę OZE, która dotychczas nie była kompleksowo uwzględniana przy opracowaniu taryf dla usług dystrybucji energii elektrycznej. W wyniku analizy dla każdego z wariantów pracy sieci określone zostały godzinowe koszty strat mocy. Przeprowadzone badania są wstępną analizą możliwości redukcji kosztów strat energii elektrycznej poprzez zastosowanie optymalizacji konfiguracji sieci. Jednakże, ta wstępna analiza wykazała, że zmiana konfiguracji sieci powoduje zmniejszenie strat energii elektrycznej i obniżenie kosztów z nimi związanych.

Dla określenia rzeczywistych kosztów strat energii elektrycznej konieczna będzie rozbudowa proponowanego algorytmu w celu wprowadzenia możliwości symulacji pracy źródeł odnawialnych (wiatrowych i słonecznych) oraz zaproponowanie różnych profili zużycia energii elektrycznej u odbiorców. Takie podejście umożliwi określenie dobowych, miesięcznych lub rocznych kosztów strat energii i możliwości ich redukcji. Obniżenie strat energii spowoduje

w konsekwencji możliwość obniżenia składników zmiennej stawki sieciowej i spowoduje obniżenie opłat za usługi dystrybucji obliczone dla danego odbiorcy.

Autorzy: mgr inż. Karol Sidor, E-mail: karolsidor11@wp.pl; dr hab. inż. Piotr Miller prof. PL, E-mail: p.miller@pollub.pl; dr hab. inż. Paweł Pijarski, E-mail: p.pijarski@pollub.pl, Politechnika Lubelska, Katedra Elektroenergetyki, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin

LITERATURA

- [1] Stadnicki J., Teoria i praktyka rozwiązywania zadań optymalizacji. WNT(2006)
- [2] Michalewicz Z., Fogel D. B., Jak to rozwiązać, czyli nowoczesna heurystyka. WNT(2006)
- [3] Pijarski P., Miller P., Sidor K., Optimization of the selection of partition points in the MV network, Proc. SPIE(2018)
- [4] Pijarski, P., Optymalizacja heurystyczna w ocenie warunków pracy i planowaniu rozwoju systemu elektroenergetycznego. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej(2019)
- [5] Yang, X.S., Nature inspired metaheuristic algorithms. United Kingdom(2010)
- [6] Zhu, J., Optimization of power system operation. Wiley-IEEE Press(2015)
- [7] Niewiedział E., Niewiedział R., Analiza statystyczna strat energii elektrycznej w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym w XXI wieku, PTPIREE(2018)
- [8] Knych T., Mamala A., Nowak W., Szpyra W., Tarko R., Ograniczanie strat energii w elektroenergetycznych liniach przesyłowych w wyniku zastosowania nowych nisko stratnych przewodów. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej nr. 53(2017)
- [9] URE, Średnia cena sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym (roczna i kwartalna),[Dostęp: 10.05.2019] <https://www.ure.gov.pl/pl/energia-elektryczna/ceny-wskazniki/7852,Srednia-cena-sprzedazy-energii-elektrycznej-na-rynku-konkurencyjnym-roczna-i-kwa.html>