

PROBLEMATYKA DOBORU WSPÓLCZYNNIKA CZUŁOŚCI ALGORYTMU REKONFIGURACJI SIECI DYSTRYBUCYJNEJ SN

Radosław REKOWSKI

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
e-mail: radrekow@student.pg.gda.pl

Streszczenie: Dynamiczny rozwój inteligentnych sieci elektroenergetycznych umożliwia wykorzystanie sterowalnych łączników do zmiany konfiguracji sieci rozdzielczej SN. W artykule omówiono wpływ rekonfiguracji systemu dystrybucyjnego SN na wartość strat mocy czynnej z uwzględnieniem dobowej zmienności obciążenia. Bazując na zmodyfikowanym przez autora 33-węzłowym testowym systemie dystrybucyjnym IEEE przedstawiono problem doboru odpowiedniej czułości algorytmu oraz zaproponowano metodykę wyboru konfiguracji pracy sieci rozdzielczej SN w cyklu dobowym. Jako funkcję celu zastosowano kryterium minimalizacji strat mocy czynnej. Badania przeprowadzono w programie rozplwywym DIgSILENT Powerfactory dla dwóch wariantów krzywych obciążenia i dla różnych wartości współczynnika czułości. Wyniki obliczeń dowodzą, że zapewnienie odpowiedniej konfiguracji pracy sieci dystrybucyjnej SN umożliwia zmniejszenie strat mocy czynnej.

Słowa kluczowe: Sieci rozdzielcze, rekonfiguracja sieci, minimalizacja strat mocy.

1. WPROWADZENIE

Dobór konfiguracji pracy sieci dystrybucyjnych średnich napięć stanowi istotny element planowania ich pracy. Rozwój systemów zdalnego sterowania i komunikacji umożliwia efektywne wykorzystanie możliwości dynamicznego tworzenia konfiguracji z uwzględnieniem dobowej lub nawet godzinowej zmienności obciążenia oraz generacji rozproszonej. Optymalny dobór struktury sieci sprowadza się do zdalnego sterowania łącznikami elektroenergetycznymi w sposób zapewniający minimalizację wybranego kryterium. Z tego powodu powyższe zadanie stanowi jeden z bezinwestycyjnych sposobów na minimalizację m.in. strat mocy [1].

Zadanie rekonfiguracji sieci elektroenergetycznej można traktować jako optymalizację jedno lub wielokryterialną. W pierwszym przypadku funkcją celu jest zwykle minimalizacja strat mocy lub strat energii. W przypadku analizy wielokryterialnej zastosowanie mają z reguły metody ważonych celów lub coraz bardziej popularne algorytmy metaheurystyczne [2]. Należy również zwrócić uwagę, że rekonfiguracja sieci wymaga zachowania odpowiednich warunków ograniczających takich jak:

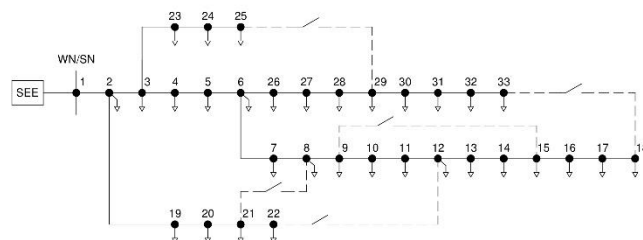
- konieczności zasilenia wszystkich odbiorów,
- utrzymanie promieniowej struktury sieci,
- brak przeciążeń linii elektroenergetycznych i transformatorów,
- utrzymanie wartości napięć w wymaganym zakresie.

W związku z powyższym, algorytm poszukujący optymalnej konfiguracji musi uwzględniać wspomniane ograniczenia, a z uwagi na ograniczoną zdolność łączeniową łączników elektroenergetycznych, liczba możliwych zmian powinna być limitowana.

Celem niniejszego artykułu jest określenie wpływu dynamicznej rekonfiguracji sieci dystrybucyjnej na poziom strat mocy czynnej oraz wskazanie roli czułości algorytmu na wynik rozważań.

2. SIEĆ TESTOWA

Do badań wykorzystano zmodyfikowany przez autora 33-węzłowy testowy system dystrybucyjny IEEE, bazujący na literaturze [3, 4]. Sieć testową dostosowano do napięcia znamionowego 15 kV, a parametry linii i odbiorów zmodyfikowano, celem uzyskania sieci kablowej o charakterze miejskim.



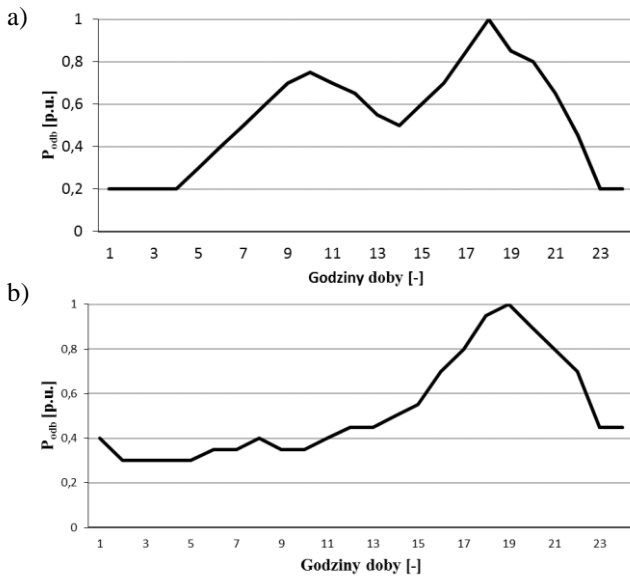
Rys. 1. Schemat badanego 33-węzłowego testowego systemu dystrybucyjnego IEEE

Tablica 1. Specyfikacja systemu testowego

Cecha	Wartość
Napięcie znamionowe	15 kV
Minimalny dopuszczalny poziom napięcia	0,9 p.u.
Poziom napięcia w stacji WN/SN	1,05 p.u.
Sumaryczna moc szczytowa odbiorów SN	9,03 MW
Liczba węzłów	33
Liczba łączników	73
Maksymalne obciążenie linii elektroenergetycznych	92% I_{dd}

Badania przeprowadzono dla dwóch wariantów dobowej zmienności obciążenia. Krzywe te zostały określone w sposób relatywny do mocy szczytowej odbiorów przyłączonych do badanej sieci dystrybucyjnej SN. Proponowane profile obciążenia reprezentują dwa

charakterystyczne przypadki poboru mocy dla odbiorcy przemysłowego i komunalnego. Obciążenie węzłów sieci testowej zmienia się zgodnie z charakterystyką obciążenia odbiorców.



Rys. 2. Profile zmienności dobowej odbiorów
a) profil 1 - odbiorca przemysłowy,
b) profil 2 - odbiorca komunalny

3. METODYKA BADAŃ

3.1. Funkcja celu

Badania przeprowadzono w programie rozptylowym DiGSILENT PowerFactory z wykorzystaniem dostępnych narzędzi do wykonywania rozcięć w sieciach dystrybucyjnych z wybranym kryterium minimalizacji strat mocy czynnej, stanowiącym funkcję celu w niniejszych rozważaniach:

$$\min \left\{ F(M) = \sum_{h=1}^H \sum_{g=1}^G P_{h,g}(M) \right\} \quad (1)$$

gdzie: M – macierz, reprezentująca stan kolejnych łączników w sieci elektroenergetycznej dla każdej godziny doby, zwana w dalszej części macierzą łączników, $P_{h,g}$ – straty mocy w kolejnych godzinach h w kolejnej gałęzi g .

Realizacja zadania optymalizacyjnego wymaga zachowania odpowiednich warunków:

$$\begin{cases} I_b \leq I_{dd} \\ U_{\min} \leq U_l \leq U_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

gdzie: I_b - natężenie prądu przepływającego przez linię elektroenergetyczną, I_{dd} – prąd dopuszczalny długotrwale dla linii elektroenergetycznej, U_l – wartość napięcia w danym węźle sieci, U_{\min} , U_{\max} – minimalna i maksymalna dopuszczalna wartość napięcia w sieci elektroenergetycznej.

Celem wykonania poniższych analiz założono niezmiennosc obciążenia w ciągu godziny i przyjęto, że suma strat mocy w ciągu doby równa jest dobowym stratom energii.

3.2. Etap I – analiza współczynnika czułości

Czułość algorytmu do optymalizacji konfiguracji sieci w programie DiGSILENT PowerFactory określona jest jako minimalna zmiana wartości strat mocy czynnej w linii elektroenergetycznej powodująca rozpoczęcie procedury optymalizacyjnej. Zmiana wartości strat mocy poniżej tej wartości będzie powodowała zatrzymanie algorytmu. Wpływ współczynnika określony został zgodnie z poniższą procedurą:

Dla danej wartości współczynnika czułości s wyznaczano co godzinę h stan n -tego łącznika elektroenergetycznego. Obiektem wyjściowym algorytmu jest macierz łączników M . Kolejne kolumny macierzy łączników M , reprezentują wektory łączników X_h dla kolejnych godzin h .

$$M(s_i) = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{2,1} & \dots & x_{h,1} \\ x_{1,2} & x_{2,2} & \dots & x_{h,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1,n} & x_{2,n} & \dots & x_{h,n} \end{bmatrix} \Rightarrow [X_1 \ X_2 \ \dots \ X_h] \quad (3)$$

gdzie: s_i - współczynnik czułości algorytmu, X_h – wektor łączników dla kolejnych godzin doby h , $x_{h,n}$ - stan n -tego łącznika elektroenergetycznego dla godziny h .

Każdej wyznaczonej macierzy łączników przyporządkowano dobowe straty energii E_{Msi} wraz z konieczną do wykonania ilością przełączeń c_{Msi} w ciągu doby. Obliczenia wykonano dla doby przy dwóch wariantach krzywych obciążenia.

$$\begin{bmatrix} M_{s1} & M_{s2} & \dots & M_{si} \\ E_{Msi} & E_{Msi} & \dots & E_{Msi} \\ c_{Msi} & c_{Msi} & \dots & c_{Msi} \end{bmatrix} \quad (4)$$

gdzie: E_{Msi} – dobowe straty energii dla macierzy M_{si} , c_{Msi} – liczba przełączeń w ciągu doby dla macierzy M_{si} .

Cechą charakterystyczną metodyki przedstawionej w niniejszym punkcie jest możliwość zmiany konfiguracji sieci co godzinę i rozpatrywanie najkorzystniejszego wariantu konfiguracji sieci z punktu widzenia każdej godziny doby.

3.3. Etap II – wybór konfiguracji pracy dla doby

Na podstawie rozważań przedstawionych w punkcie 3.2. określono współczynniki czułości zapewniające minimalną liczbę przełączeń. Na tej podstawie przeprowadzono kolejne badania mające na celu wybór jednej konfiguracji sieci dystrybucyjnej, która zapewni minimalną wartość strat energii w ciągu doby.

W związku z powyższym obliczono funkcję przystosowania każdego wektora łączników X_h do pracy w ciągu całej doby. Wykonano obliczenia rozptylowe przyporządkowując ostatecznie wektorowi łączników dobowe straty energii E_{Xh} oraz liczbę przełączeń c_{Xh} do wykonania.

$$P(X_h, h, s_i) = \begin{bmatrix} P_{X1,1} & P_{X2,1} & \dots & P_{Xh,1} \\ P_{X1,2} & P_{X2,2} & \dots & P_{Xh,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{X1,24} & P_{X2,24} & \dots & P_{Xh,24} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\Downarrow$$

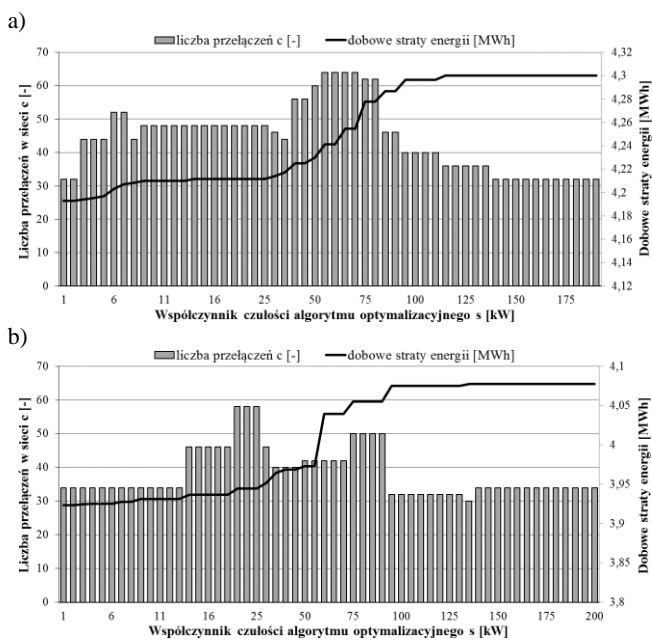
$$\begin{bmatrix} X_1 & X_2 & \dots & X_h \\ E_{X1} & E_{X2} & \dots & E_{Xh} \\ c_{X1} & c_{X2} & \dots & c_{Xh} \end{bmatrix} \quad (6)$$

gdzie: $P_{Xh,h}$ – straty mocy przy określonym wektorze łączników X_h w godzinie h , X_h – wektor łączników dla kolejnej godziny h , E_{Xh} – dobowe straty energii przy określonym wektorze łączników X_h , c_{Xh} – liczba przełączeń w ciągu doby.

4. WYNIKI BADAŃ

4.1. Etap I

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki analizy szczegółowo omówionej w punkcie 3.2. Analizując wykresy można stwierdzić, że wraz ze wzrostem współczynnika czułości straty mocy rosną, aż do ustalonej wartości zależnej od profilu obciążenia. Jest to efekt oczekiwany z uwagi na pomijanie zmian poniżej wartości progowej, określonej omawianym współczynnikiem. Liczba przełączeń w ciągu doby zmienia się natomiast w sposób ściśle zależny od profili obciążenia.

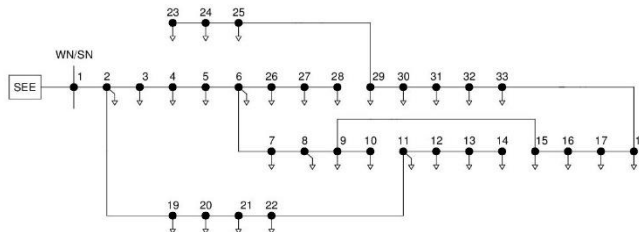


Rys. 3. Wpływ współczynnika czułości na liczbę przełączeń w sieci dystrybucyjnej i dobowe straty energii
a) profil 1, b) profil 2

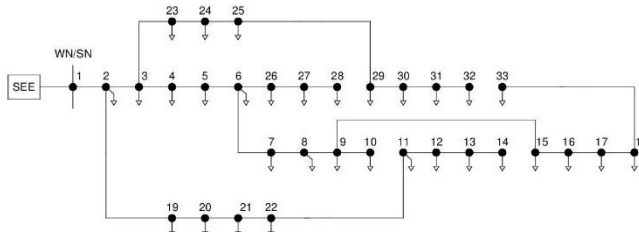
Rozwiązaniem pożądanym z punktu widzenia optymalizacji konfiguracji sieci elektroenergetycznej jest uzyskanie minimalnych strat mocy czynnej przy jednoczesnym określeniu liczby wymaganych do tego celu przełączeń. Uwzględniając powyższe rezultaty można dojść do wniosku, że rekonfiguracja sieci elektroenergetycznej jest problemem optymalizacji wielomodalnej, posiadającym kilka ekstermów lokalnych, mogących stanowić rozwiązanie problemu.

4.2. Etap II

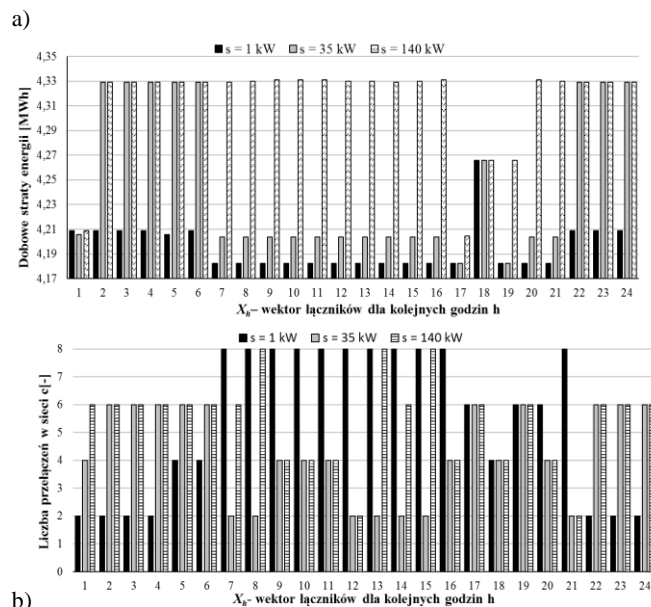
Na rysunku 4 oraz 5 przedstawiono wyniki analizy przeprowadzonej zgodnie z punktem 3.2. Określono całkowite straty mocy czynnej dla doby w zależności od wektora łączników dla profili obciążenia 1 oraz 2.



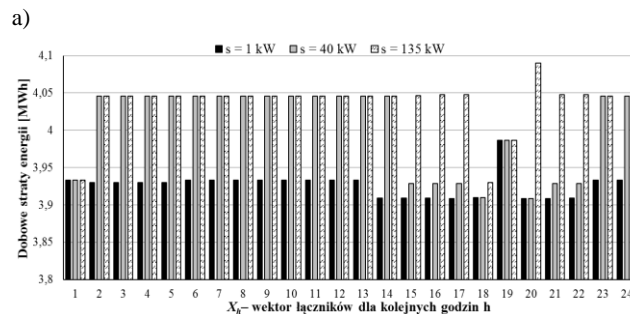
Rys. 4. Profil 1: Konfiguracja sieci dystrybucyjnej dla wektora łączników X_{17}

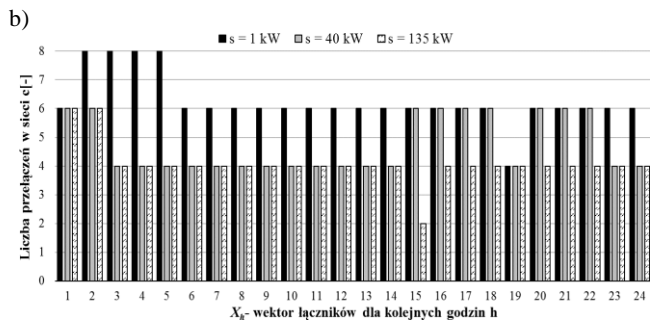


Rys. 5. Profil 2: Konfiguracja sieci dystrybucyjnej dla wektora łączników X_{18}



Rys. 6. Profil 1: Wpływ wektora łączników na:
a) dobowe straty energii,
b) liczbę przełączeń w ciągu doby





Rys. 7. Profil 2: Wpływ wektora łączników na:
a) dobowe straty energii,
b) liczbę przełączeń w ciągu doby

Przeprowadzone obliczenia dowodzą, że zastosowanie algorytmu poszukującego konfiguracji sieci elektroenergetycznej z kryterium minimalizacji strat mocy czynnej pozwala ograniczyć straty nawet do 24%. Jednocześnie uwidoczniła została zależność opisująca dążenie wektora łączników do optymalnej konfiguracji wraz ze wzrostem współczynnika czułości. Z drugiej strony, niska wartość ww. współczynnika powoduje dużą liczbę potencjalnych rozwiązań problemu optymalizacyjnego. W takim przypadku celowe może okazać się zastosowanie kolejnego kryterium do wyboru optymalnej konfiguracji.

Odpowiedni dobór współczynnika czułości umożliwi również stwierdzenie, że właściwy wektor łączników dla cyklu dobowego jest wektorem określonym dla sieci dystrybucyjnej w chwili 70-80 % obciążenia mocą szczytową.

Tablica 2. Zestawienie wyników obliczeń dla etapu II – profil 1

	Profil 1		
	s = 1kW	s = 35kW	s = 140kW
Straty dla konfiguracji bazowej [MWh]	5,518		
Straty po optymalizacji [MWh]	4,182	4,182	4,2
Redukcja strat [%]	24,2%	24,2%	23,9%
Liczba przełączeń	6	6	6
Wektor łączników	X_{17}, X_{19}, X_{20}	X_{17}, X_{19}	X_{17}

Tablica 3. Zestawienie wyników obliczeń dla etapu II – profil 2

	Profil 2		
	s = 1kW	s = 40kW	s = 135kW
Straty dla konfiguracji bazowej [MWh]	5,16		
Straty po optymalizacji [MWh]	3,91	3,91	3,93
Redukcja strat [%]	24,2%	24,2%	24,2%
Liczba przełączeń	6	6	4
Wektor łączników	$X_{14}-X_{18}, X_{20}-X_{22}$	X_{18}, X_{20}	X_{18}

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Wykorzystanie programu rozplywowego DIGSILENT PowerFactory do wykonania rekonfiguracji sieci elektroenergetycznej jest możliwe po odpowiednim dobraniu parametrów wejściowych. W rezultacie możliwe jest osiągnięcie redukcji strat mocy czynnej na poziomie 24% przy 4 lub 6 przełączeniach w sieci. Z kolei niewłaściwy dobór współczynnika czułości może doprowadzić do prawie dwukrotnego wzrostu cykli łączeniowych. Jednocześnie w literaturze zagranicznej proponuje się wykorzystanie algorytmów ewolucyjnych do rekonfiguracji systemu dystrybucyjnego przy dużym udziale generacji rozproszonej i mechanizmów zarządzania popytem.

6. BIBLIOGRAFIA

- Kot A., Kulczycki J., Szypra W.: Możliwości redukcji strat w sieciach dystrybucyjnych średniego napięcia poprzez optymalną lokalizację rozcięć, Acta Energ., pp. 43-59, 2009.
- Sultana B., Mustafa MW., Sultana U., Bhatti AR.: Review on reliability improvement and power loss reduction in distribution system via network reconfiguration. Renew Sustain Energy Rev, December 2016; 66:297-310.
- Arasteh H., Sepasian MS., Vahidinasab V.: An aggregated model for coordinated planning and reconfiguration of electric distribution networks, Energy. January 2016, 94:786-98.
- Helt P., Zduńczyk P.: Distribution MV and LV Network Optimal Reconfiguration, Acta Energ., pp. 79-85, 2014.
- Coroamă I., Chicco G., Gavrilas M., Russo A., Distribution system optimisation with intra-day network reconfiguration and demand reduction procurement. Electr Power Syst Res. maj 2013; 98:29-38.
- Lubośny Z., Klucznik J.: A Paradigm for HV, MV, LV Distribution Grid Development Planning. Acta Energ. 2012;(4):42-74

THE ISSUE OF SENSIVITY FACTOR SELECTION FOR RECONFIGURATION ALGORITHM OF THE MV DISTRIBUTION NETWORK

The dynamic development of smart grids allows the use of remote controllable switches to change the configuration of the MV distribution network. The article discusses the impact of distribution system reconfiguration on active power losses, taking into account the typical daily load profiles. Based on modified IEEE 33-bus test distribution system the article presents the method of selection the appropriate sensitivity coefficient and the configuration of the MV network. The objective function is to minimize active power losses. Studies were performed in DIGSILENT Powerfactory application for two variants of the daily load curve and for different values of sensitivity coefficient. The calculation results indicate, that ensuring adequate working configuration of MV distribution network, helps to reduce active power losses.

Keywords: distribution system, optimal reconfiguration, active power losses.