POZNAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ACADEMIC JOURNALS
No 70 Electrical Engineering 2012

Wojciech BĄCHOREK*
Janusz BROŻEK*

ZASTOSOWANIE ALGORYTMU EWOLUCYJNEGO DO OPTYMALNEJ LOKALIZACJI ŁĄCZNIKÓW W SIECI ROZDZIELCZEJ ŚREDNIEGO NAPIĘCIA

Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze średniego napięcia (SN) mają struktury otwarte lub zamknięte przy czym zawsze pracują w konfiguracjach otwartych. W torach głównych sieci SN instalowane są zazwyczaj łączniki umożliwiające, w przypadku awarii, separację uszkodzonego odcinka sieci. W artykule przedstawia się sposób określenia najlepszych lokalizacji łączników w sieci rozdzielczej. Przyjętym kryterium wyboru miejsca lokalizacji jest zdefiniowany współczynnik rezerwowania sieci. Do rozwiązania zadania optymalizacyjnego zastosowano algorytm ewolucyjny. W artykule przedstawiono algorytm oraz przykład obliczeniowy ilustrujący, na wycinku rzeczywistej sieci elektroenergetycznej średniego napięcia, zastosowanie opracowanego programu komputerowego.

1. WSTĘP

W analizie ekonomicznej pracy sieci elektroenergetycznych ważnym składnikiem są koszty nieciągłości zasilania (zawodności). Dla przedsiębiorstw świadczących usługi przesyłania energii elektrycznej i/lub jej dystrybucji koszty zawodności obejmują [2]:

- kary płacone odbiorcom za niedotrzymanie standardów jakościowych obsługi odbiorców,
- utracone przychody z opłat przesyłowych.

W praktyce, jeżeli czas przerw w zasilaniu nie przekracza wartości dopuszczalnych określonych w [5], koszt niedostarczonej energii odpowiada iloczynowi składnika zmiennego stawki sieciowej i całkowitej ilości energii niedostarczonej A_n do odbiorcy w ciągu roku którą można wyznaczyć z zależności:

$$A_n = q\, l\, A \tag{1}$$

gdzie: q – wskaźnik jednostkowy zawodności linii, l – długość linii, A – ilość energii dostarczanej do odbiorców w ciągu roku.

Wzór (1) dotyczy linii elektroenergetycznej wyposażonej w jeden wyłącznik zainstalowany na jej początku (w polu liniowym rozdzielni). Zakłócenie w pracy linii (np. zwarcie) powoduje pobudzenie odpowiedniego zabezpieczenia i

* AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.

wyłączenie z pracy całej takiej linii. Celem ograniczenia skutków zakłócenia, (wyłączenia odbiorców), linia może być wyposażona w większą liczbę łączników - łączników sekcjonujących. Liczba łączników n powinna być tak ustalona aby ich łączny koszt w okresie eksploatacji $K_Ł$ nie przekroczył zysku związanego ze zmniejszeniem kosztu zawodności zasilania ΔK_a:

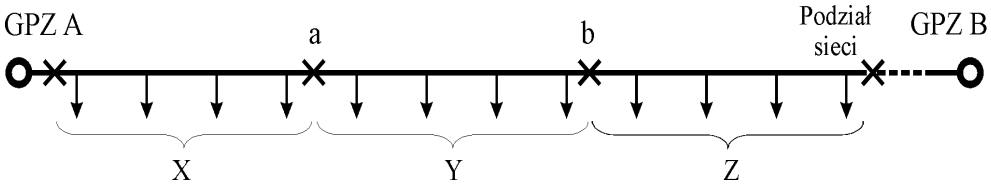
$$n \cdot K_Ł < \Delta K_a(n) \tag{2}$$

Wyznaczenie, z powyższej zależności, optymalnej liczby łączników (zapewniającej maksymalizację wartości: $\Delta K_a(n) - n \cdot K_Ł$) jest zadaniem złożonym. Zmiana kosztu zawodności po wprowadzeniu łączników sekcjonujących uzależniona jest bowiem od miejsc ich zainstalowania. W sytuacji gdy zależność (2) nie jest spełniona, łączniki mogą być zainstalowane w celu poprawy parametrów ciągłości zasilania odbiorców oraz warunków eksploatacji sieci.

2. ZADANIE OPTYMALIZACYJNE

2.1. Sformułowanie problemu

Na rysunku 1 przedstawiono model sieci dystrybucyjnej z zainstalowanymi łącznikami sekcjonującymi a i b dzielącymi obwód na sekcje X, Y oraz Z. Odpowiednio rozmieszczone łączniki pozwalają na ograniczenie liczby wyłączonych odbiorców (energii niedostarczonej). W przypadku zakłócenia w sekcji Y, łączniki a i b pozwalają na niezawodną prace sekcji X i Z. Sekcja Y zostaje wyłączona, sekcje X i Z zasilane odpowiednio ze stacji A i B (po przełączeniu w punkcie podziału sieci). Liczba wyłączonych odbiorców (sekcji) uzależniona jest zatem od możliwości rezerwowania linii. W sieci o strukturze otwartej, inne sekcje położone dalej od źródła zasilania, również zostaną pozbawione zasilania. W przypadku zasilania obwodu wyłącznie ze stacji A, wyłączone zostaną sekcje Y i Z. Struktura sieci może mieć zatem wpływ na wybór miejsc zainstalowania łączników sekcjonujących. W rozwiązywanym zadaniu poszukuje się optymalnych lokalizacji łączników sekcjonujących dla których wartość funkcji celu (rozdział 2.2) przyjmuje wartości największe.



Rys. 1. Model sieci dystrybucyjnej z zainstalowanymi łącznikami sekcjonującymi

2.2. Funkcja celu

W celu porównania warunków pewności pracy linii wyposażonych w różną liczbę, rozmieszczonych w wielu miejscach łączników, wprowadza się współczynnik rezerwowania linii w_{r}. Współczynnik rezerwowania linii, stanowiący funkcję celu zadania optymalizacyjnego, określa się następująco [4]:

$$\max \rightarrow \quad \mathrm{w_r} = \frac{S - S_{\mathrm{r}}}{S} \tag{3}$$

przy czym:

$$S_{\mathrm{r}} = \frac{\sum_{i=1}^{\mathrm{s}} S_i \left(q_{\mathrm{ln}} \sum_{j=1}^{\mathrm{m}_i} l_{\mathrm{ln}\,ij} + q_{\mathrm{lk}} \sum_{j=1}^{\mathrm{n}_i} l_{\mathrm{lk}\,ij} \right)}{\sum_{i=1}^{\mathrm{s}} \left(q_{\mathrm{ln}} \sum_{j=1}^{\mathrm{m}_i} l_{\mathrm{ln}\,ij} + q_{\mathrm{lk}} \sum_{j=1}^{\mathrm{n}_i} l_{\mathrm{lk}\,ij} \right)} \tag{4}$$

gdzie: s – liczba sekcji, S – całkowite obciążenie sieci, S_i – całkowite obciążenie i-tej sekcji oraz innych sekcji jeśli uszkodzenie w i-tej sekcji powoduje pozbawienie ich zasilana, q_{ln}, q_{lk} – jednostkowe współczynniki zawodności linii napowietrznej i kablowej, $l_{\mathrm{ln}ij}$, $l_{\mathrm{lk}ij}$ – długości j-ych odcinków linii napowietrznej i kablowej w i-tej sekcji.

Jeżeli sieć nie jest wyposażona w łączniki sekcjonujące, współczynnik rezerwowania (3) przyjmuje wartość 0. Jeżeli sieć jest magistralą bez odgałęzień z możliwością rezerwowania (zasilanie dwustronne) oraz w każdym odcinku magistrali, na jej początku i końcu zainstalowany jest łącznik, współczynnik rezerwowania wynosi 1. W takim przypadku dowolne uszkodzenie linii nie spowoduje wyłączenia żadnego z odbiorców (pomijając wyłączenia potrzebne na dokonanie przełączeń). Rzeczywiste układy sieci są zazwyczaj bardziej rozbudowane i niekiedy pozbawione możliwości zasilania z innej stacji transformatorowej (np. jak na rysunku 1 stacja B). Określone miejsca zainstalowania ustalonej liczby łączników w danej sieci będą optymalne jeżeli współczynnik rezerwowania linii w_{r} przyjmie wartość maksymalną.

Energię niedostarczoną do odbiorców w ciągu roku, dla sieci wyposażonej w łączniki sekcjonujące, można wyznaczyć z zależności (5).

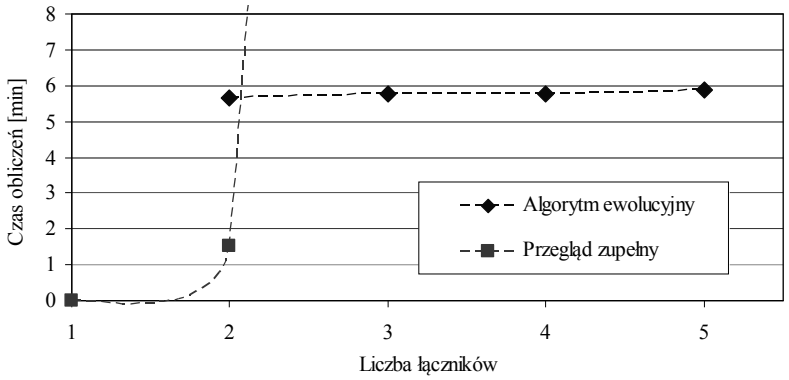
$$A_{n\,Ł} = \left(1 - w_r\right) A_n = \left(1 - w_r\right) q\, l\, A \tag{5}$$

Po zainstalowaniu łączników sekcjonujących energia niedostarczona ulegnie zmniejszeniu o wartość:

$$\Delta A_n = w_r\, q\, l\, A \tag{6}$$

2.3 Metoda rozwiązywania zadania

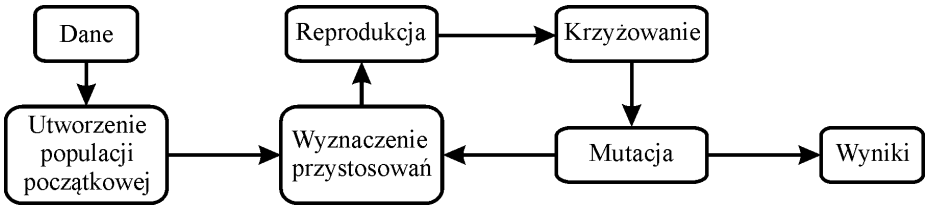
Opisany problem optymalizacyjny, ze względu na konieczność wyboru miejsc lokalizacji łączników z obszernego zbioru możliwych wariantów, jest zadaniem dyskretnym. Dla niewielkich sieci elektroenergetycznych oraz sieci, dla których, ze względów praktycznych, ogranicza się zbiór możliwych lokalizacji zadanie można rozwiązać stosując techniki przeglądu zupełnego. Wprowadzone ograniczenie może jednak spowodować pominięcie najkorzystniejszej lokalizacji łącznika sekcjonującego. W przypadku analizy pełnej, obejmującej wszystkie odcinki sieci, metoda przeglądu zupełnego natrafia na jej główne ograniczenie jakim jest długi czas obliczeń. Dotyczy to, w zależności od wielkości sieci, zadania lokalizacji już co najmniej trzech łączników. Dla takiego rozmiaru zadania mogą z powodzeniem być zastosowane inne metody optymalizacyjne. Przykładem takich metod są algorytmy tzw. sztucznej inteligencji jak np. algorytm ewolucyjny czy genetyczny [1], [3]. Na rysunku 2 porównano czasy obliczeń dla zadania lokalizacji 1÷5 łączników w dopuszczalnych 176 punktach sieci dystrybucyjnej z zastosowaniem metody przeglądu zupełnego i algorytmu ewolucyjnego (populacja 20 osobników, 1000 iteracji). Przegląd zupełny dla lokalizacji trzech łączników realizowany jest w czasie ok. 90 minut.



Rys. 2. Czas generacji rozwiązania dla metody przeglądu zupełnego i algorytmu ewolucyjnego (PC 2,5 GHz)

Algorytm ewolucyjny operuje na całych grupach rozwiązań zadania, nazywanych populacjami [1], [3]. Poszukiwanie maksymalnej wartości funkcji celu oparte jest na mechanizmach doboru naturalnego oraz dziedziczności, łączących ewolucyjną zasadę przeżycia najlepiej przystosowanych osobników (najlepszych rozwiązań z populacji). Zasada działania algorytmu polega na przekazywaniu kolejnym, otrzymywanym w cyklu iteracyjnym, rozwiązaniom elementów (cech) poprzednio uzyskanych rozwiązań (osobników). Tylko osobniki

najlepiej przystosowane mają szansę przetrwać jak najdłużej i przekazać swojemu liczniejszemu potomstwu swoich cech. Zapewnia to ukierunkowanie procesu obliczeniowego w stronę pożądanych wyników. Schemat blokowy algorytmu ewolucyjnego przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat blokowy algorytmu ewolucyjnego

Algorytm ewolucyjny rozpoczyna swoje działanie od utworzenia tzw. populacji początkowej. Ta populacja składa się z losowo utworzonych osobników reprezentujących różne, na ogół nieoptymalne, rozwiązania postawionego zadania. Dalsze działanie algorytmu polega na cyklicznej realizacji mechanizmów ewolucji, którymi są:

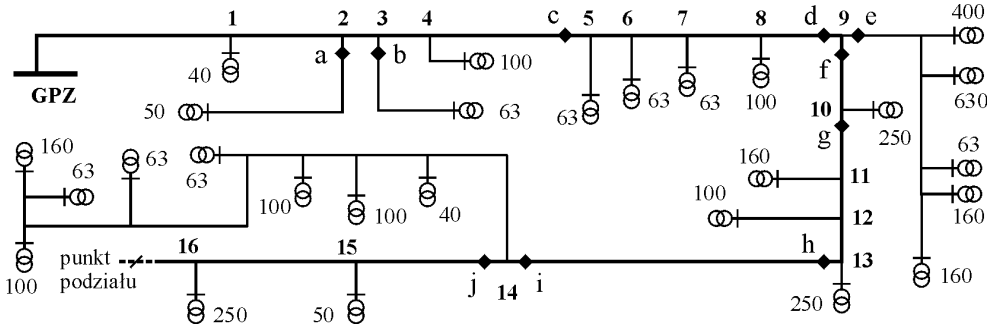
- *reprodukcja (selekcja)* – z populacji bieżącej osobników wybiera się rozwiązania najlepsze i powiela się je w stopniu zależnym od obliczonej wartości przystosowania. W rozwiązywanym zadaniu zastosowano metodę selekcji opartą na wyborze losowym wg reszt z powtórzeniami [1];
- *krzyżowanie* – osobniki łączone są losowo w pary tworząc dwa nowe osobniki. Nowe osobniki populacji otrzymują, w różnych proporcjach, cechy obu rodziców. Takie połączenie cech daje szansę na powstanie osobników jeszcze lepiej przystosowanych, mogących na długo zdominować całą populację;
- *mutacja* – polega na zaburzeniu dotychczasowego procesu reprodukcji i krzyżowania poprzez obdarzenie wybranych osobników nowymi cechami, nie występującymi u osobników, z połączenia których powstały. Proces jest realizowany przez zmianę losowo wybranego elementu ciągu kodowego.

Przystosowanie osobników określane jest na podstawie ich cech charakterystycznych. W algorytmie te cechy są zapisane w postaci ciągu kodowego nazywanego również chromosomem. W prezentowanym zadaniu optymalizacyjnym ciąg kodowy obejmuje szereg wartości liczbowych. Liczba pozycji ciągu odpowiada liczbie łączników sekcjonujących. Wartość elementu każdej pozycji identyfikuje jedną z dopuszczalnych lokalizacji łącznika w sieci. Taka konstrukcja ciągu kodowego we właściwy sposób odwzorowuje rozwiązania przedstawionego problemu. Każdy, opisany w ten sposób, osobnik populacji charakteryzuje się pewnym przystosowaniem wyznaczającym jego użyteczność na tle całej populacji. W rozwiązywanym zadaniu przystosowanie wyznaczane jest na podstawie zależności (3).

3. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

3.1. Charakterystyka sieci elektroenergetycznej

Wybrany fragment rzeczywistej sieci dystrybucyjnej jest siecią o strukturze zamkniętej lecz pracującą konfiguracji otwartej. Sieć zasilana jest z jednego głównego punktu zasilania (GPZ). Możliwe jest zasilanie alternatywne (rezerwowe) całego obwodu z innej stacji transformatorowej poprzez przełączenie w punkcie podziału sieci. Uproszczony schemat sieci przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat fragmentu sieci dystrybucyjnej

Analizowany obwód obejmuje 27 stacji transformatorowych SN/nn. Zainstalowane w nich transformatory to jednostki o mocach 40÷630 kVA (moce znamionowe transformatorów podano na rysunku 4). W obliczeniach przyjęto stały poziom obciążenia stacji transformatorowych wynoszący 42,9 %. Opisywana sieć SN obejmuje wyłącznie linie napowietrzne, których łączna długość wynosi 21,73 km, w tym długość odgałęzień 10,89 km.

3.2. Wyniki obliczeń

Obliczenia przeprowadzono dla dwóch wariantów pracy sieci: sieć zasilana jednostronnie oraz sieć zasilana jednostronnie z możliwością rezerwowania drugostronnego (poprzez przełączenie dokonane w punkcie podziału i zasilanie z innego obwodu sieci SN). W obu wariantach odbiorcy, w normalnym układzie pracy sieci, zasilani są z jednego punktu zasilania. W sieci planuje się zainstalowanie od 1 do 5 łączników sekcjonujących. W celu wyznaczenia najkorzystniejszych lokalizacji łączników zastosowano program komputerowy realizujący obliczenia według algorytmu ewolucyjnego. W obliczeniach przyjęto: populację 20 osobników, 3000 iteracji (pokoleń), prawdopodobieństwo krzyżowania 0,85, prawdopodobieństwo mutacji 0,04. Obliczenia dla lokalizacji

pojedynczego łącznika wykonano metodą przeglądu zupełnego. Metoda przeglądu zupełnego została zastosowana również dla weryfikacji wyników lokalizacji 2 i 3 łączników – otrzymano zgodność wyników obu metod.
W tabeli 1 przedstawiono wyniki obliczeń optymalizacyjnych. Podano optymalne lokalizacje łączników (oznaczenia według rysunku 4) oraz wartości wyznaczonych współczynników rezerwowania sieci w_r.
Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, że niezwykle korzystna jest budowa sieci dystrybucyjnych zapewniających możliwość wielostronnego zasilania. Pewność zasilania odbiorców zwiększa się dodatkowo z liczbą zainstalowanych łączników sekcjonujących. Duża liczba łączników zalecana jest w szczególności dla sieci jednostronnie zasilanych. W sieciach dwustronnie zasilanych liczba łączników może być mniejsza przy porównywalnej wartości współczynnika w_r.

Tabela 1. Wyniki obliczeń lokalizacji łączników sekcjonujących

Liczba łączników sekcjonujących	Sieć zasilana jednostronnie		Sieć z możliwością zasilania dwustronnego	
	Lokalizacje łączników	Współczynnik rezerwowania w_r	Lokalizacje łączników	Współczynnik rezerwowania w_r
1	g	0,31979	g	0,50709
2	f, h	0,38213	d, h	0,71223
3	e, f, h	0,42979	d, g, i	0,78419
4	a, e, f, h	0,46822	d, g, i, j	0,82093
5	a, b, e, f, h	0,50572	c, d, g, i, j	0,84840

4. PODSUMOWANIE

Przyczyną zakłóceń w pracy sieci elektroenergetycznych są najczęściej zwarcia wynikające z uszkodzeń mechanicznych linii (głównie linii napowietrznych). Istotnym sposobem poprawy pewności zasilania jest taka rozbudowa sieci, która zapewnia odbiorcom alternatywną drogę zasilania (struktury zamknięte). Sieci rozdzielcze SN powinny być wyposażane w dużą liczbę łączników sekcjonujących. Ich zadaniem, w połączeniu z możliwością zasilania wielostronnego sieci, jest eliminacja uszkodzonych odcinków linii bez szkody dla ciągłości zasilania pozostałych odbiorców. Największą korzyść przynoszą łączniki samoczynne tzw. reklozery, które mają możliwość automatycznego wyodrębnienia dotkniętych awarią sekcji. Niniejszy artykuł przedstawia metodę wyboru najkorzystniejszych miejsc instalacji takich łączników. Optymalne rozmieszczenie łączników w sieci zapewnia zmniejszenie energii niedostarczonej do odbiorców. Analiza pewności

pracy sieci może być przeprowadzona dla różnej liczby łączników. Ich wybór uzależniony może być zmiany kosztu zawodności zasilania lub, przeznaczonych na inwestycje w danym roku, środków finansowych przez operatora sieci.

LITERATURA

[1] Goldberg D.E., Algorytmy genetyczne i ich zastosowania, Warszawa WNT 1998.
[2] Kulczycki J. (red.), Straty energii w sieciach dystrybucyjnych, Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej, Poznań, 2009.
[3] Michalewicz Z., Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne, Warszawa WNT 2003.
[4] Niczyporowicz L. W., Pruss W. L., Ilościowa ocena jakości struktury linii napowietrznej średniego napięcia, Energetyka, nr 5, 1980.
[5] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego.

THE APPLICATION OF AN EVOLUTIONARY ALGORITHM FOR THE OPTIMAL LOCALIZATION OF SECTIONALIZING SWITCHES IN A MEDIUM VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORK

Medium voltage distribution networks have open or closed structures, but they always work in open configurations. In the distribution feeders there are installed sectionalizing switches which enable, in case of a breakdown, to separate the damaged fragment of the network. In the paper, a method for determining the optimal locations of switches in a distribution network is presented. The assumed criterion of localization is the reserve coefficient of the network. The optimization task is solved through the utilization of an evolutionary algorithm. In the paper, an executable algorithm as well as an example of an existing medium voltage distribution network are provided to illustrate the application of the developed computer program.