

ALGORYTMY GENETYCZNE W PROJEKTOWANIU UKŁADÓW ZASILANIA REZERWOWEGO ELEKTROENERGETYCZNYCH SIECI ROZDZIELCZYCH ŚREDNIEGO NAPIĘCIA

Wojciech BĄCHOREK¹, Artur GANCARZ²

1. Katedra Elektroenergetyki Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie
tel: (012) 617 32 47 fax: (012) 634 57 21 e-mail: wojbach@agh.edu.pl
2. Katedra Elektroenergetyki Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie
tel: (012) 617 37 60 fax: (012) 634 57 21 e-mail: einstein@agh.edu.pl

Streszczenie: W artykule przedstawia się zagadnienie projektowania układów zasilania rezerwowego elektroenergetycznych sieci rozdzielczych średniego napięcia (SN). Przyjęta funkcja celu uwzględnia nakłady inwestycyjne rozbudowy sieci obejmujące koszty transformatorów 110 kV/SN, linii kablowych SN oraz rozdzielnic SN. Optymalne układy zasilania otrzymano stosując dedykowany dla rozwiązywanego zadania algorytm genetyczny. Przeprowadzona analiza niezawodnościowa otrzymanych rozwiązań wykazuje na korzyść z zastosowania rozdzielnic SN z podwójnym systemem szyn zbiorczych. Oprócz poprawy pewności zasilania sieci SN rozdzielnice z podwójnym systemem szyn zbiorczych zapewniają, w pewnych przypadkach, zmniejszenie nakładów na rozbudowę sieci.

Słowa kluczowe: stacje transformatorowe 110 kV/SN, układy zasilania rezerwowego, algorytmy genetyczne.

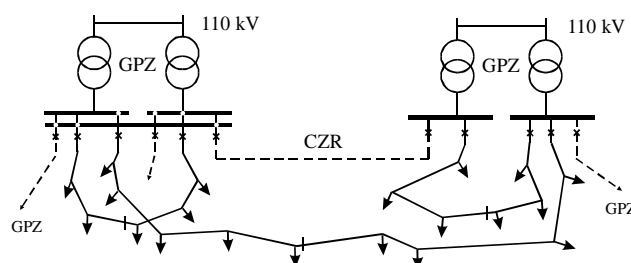
1. WSTĘP

1.1. Układy zasilania rezerwowego

Podstawowym zadaniem zasilania rezerwowego jest zabezpieczenie dostaw energii elektrycznej w stanach awaryjnych układów zasilania podstawowego.

Szczegółowo wymagania i standardy niezawodności dostaw precyzuje rozporządzenie Ministra Gospodarki [1]. Kwestia niezawodności zasilania, traktowana jako pewność pracy sieci, określana jest poprzez łączny czas awaryjnych przerw (nieplanowych) w dostawie energii w ciągu roku (łącznie do 48 h), dopuszczalny czas pojedynczej przerwy w dostawie energii (do 24 h) lub ustalana w umowach sprzedaży energii elektrycznej. W praktyce pewność pracy sieci elektroenergetycznych jest sprowadzana przez określenie jej zdolności do spełnienia tzw. kryterium n-1 lub n-2. Wyłączenie jednego lub dwóch spośród n elementów związanych z przesyłem energii elektrycznej nie powinno powodować przerw w zasilaniu odbiorców.

Kryterium to, pomimo odpowiedniego kształtowania struktur sieci rozdzielczych średniego napięcia (struktury zamknięte), może nie być zachowane ze względu na wzrost zapotrzebowania mocy odbiorców, które ogranicza możliwości ich rezerwowania



Rys. 1. Idea połączeń zasilania rezerwowego CZR

Najczęstszymi rozwiązaniami miejskich układów sieci średniego napięcia są tzw. układy pętlowe (rys.1). Takie sieci pracujące w konfiguracjach otwartych („rozcięcie” ciągu tworzące dwie półpętle zasilane z oddzielnych źródeł) dają możliwość rezerwowego zasilania odbiorców w konfiguracjach poawaryjnych (zmiana miejsca „rozcięcia”). Dokonanie przełączeń nie zawsze jednak gwarantuje zasilanie wszystkich odbiorców zwłaszcza w przypadkach awarii stacji zasilającej. Aby zapewnić pełne wzajemne rezerwowanie transformatorów pracujących w GPZ-ach niezbędne są wymiany transformatorów na jednostki o większych mocach lub budowa nowych stacji.

Istotnym problemem są również liczne i czasochłonne operacje łączeniowe w głębi sieci średniego napięcia (SN) wydłużające czas przerw awaryjnych.

Rozwiązaniem uzupełniającym dotychczasowe sposoby rozwoju sieci może być wprowadzenie specjalnych połączeń (ciągów zasilania rezerwowego – CZR, rys.1.) prowadzonych pomiędzy szynami rozdzielni SN różnych stacji transformatorowych WN/SN. Zadaniem takiego połączenia jest zasilanie wszystkich wyłączonych odbiorców SN w stanach awaryjnej pracy stacji transformatorowej bez względu na strukturę sieci SN. Najkorzystniejsze rozwiązania można uzyskać przy współpracy takiej sieci połączeń SN z rozdzielnicami średniego napięcia o podwójnym układzie szyn zbiorczych. W przypadku dużych sieci miejskich przedstawiane zadanie projektowania układów zasilania rezerwowego jest złożonym problemem kombinatorycznym.

1.2. Metody optymalizacji

W zadaniach projektowania sieci elektroenergetycznych zmienne decyzyjne przyjmują najczęściej wartości ze zbioru liczb całkowitych lub binarnych. Takie zadania tworzą grupę dyskretnych zagadnień decyzyjnych (liniowych i nieliniowych).

Wśród stosowanych metod wyróżnia się najczęściej metody bazujące na algorytmach heurystycznych. Algorytmy wykorzystują reguły postępowania ukierunkowane znajomością problemów występujących w rozwiązywanym zadaniu (gr. *heúresis* – odnalezienie). Stanowią one alternatywę dla algorytmów tradycyjnych, gdyż dla wielu występujących w elektroenergetyce problemów pozwalają w krótkim czasie uzyskać satysfakcjonujące rozwiązanie. Uzyskuje się to przez redukcję obszaru przeszukiwań, zazwyczaj jednak kosztem utraty pewności znalezienia rozwiązania najlepszego w pełnej dziedzinie rozwiązań dopuszczalnych. Dominującą grupę metod przeszukiwania heurystycznego stanowią tzw. algorytmy metaheurystyczne. Takie algorytmy obliczeniowe inspirowane są zazwyczaj mechanizmami fizycznymi lub biologicznymi. Ogólne zasady metaheurystyki tworzą szkielet metody, który obudowany szczegółowymi ograniczeniami może być wykorzystany do wielu zastosowań. Najpopularniejsze w ostatnich kilkudziesięciu latach stosowane techniki przeszukiwania to: symulowane wyżarzanie, przeszukiwanie z tabu, algorytmy genetyczne, strategie ewolucyjne, przeszukiwanie rozproszone, algorytmy mrówkowe. Inne techniki wykorzystujące metody sztucznej inteligencji to: sztuczne sieci neuronowe, systemy ekspertowe oraz różnego rodzaju metody mieszane będące połączeniem wymienionych technik.

2. ALGORYTM GENETYCZNY

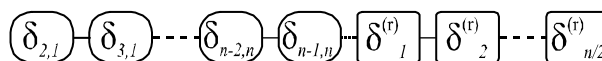
2.1. Idea algorytmu genetycznego

Sposób działania algorytmu genetycznego przypomina zjawiska ewolucji biologicznej [2]. Populacja (zbiór rozwiązań danego problemu) jest określoną grupą osobników funkcjonujących w danym środowisku i w określonej chwili czasu. Każdy osobnik populacji charakteryzuje się pewnym przystosowaniem (wartość funkcji celu danego rozwiązania) określającym jego użyteczność na tle całej populacji. Zasada działania algorytmu polega na przekazywaniu kolejnym otrzymywanym osobnikom cech (elementów) poprzednio uzyskanych rozwiązań. Pozwala to na ukierunkowanie procesu obliczeniowego w stronę pożądaných wyników.

2.2. Zapis algorytmu - kodowanie

Najważniejszym problemem w konstrukcji algorytmu genetycznego jest odpowiedni sposób zapisu rozwiązania. Niewłaściwa konstrukcja ciągu kodowego (chromosomu) może grozić ominięciem, podczas przeszukiwania, fragmentów przestrzeni rozwiązań. Poza ryzykiem pogorszenia jakości otrzymywanych wyników ma to wpływ na szybkość uzyskania satysfakcjonujących rozwiązań.

W rozwiązywanym zadaniu binarny ciąg kodowy obejmuje dwie z trzech grup zmiennych. Wynika stąd jego dwuczęściowa postać (rys. 2). Pierwsza część obejmuje zmienne opisujące połączenia SN (δ), druga rozdzielnice SN ($\delta^{(r)}$). Decyzja o wymianie transformatorów $\delta^{(T)}$ jest uzależniona od wartości zmiennej δ , $\delta^{(r)}$.



Rys. 2. Ciąg kodowy (chromosom).

2.3. Populacja początkowa

Pierwsza populacja, początkująca proces ewolucyjny, utworzona zostaje przez losowe określenie wartości genów każdego chromosomu populacji. Liczność przetwarzanego zbioru (populacji) należy do jednego z istotnych parametrów algorytmu. Rozwiązania tak utworzonego pierwszego zbioru rozwiązań, podobnie jak każdego następnego zbioru, są poddawane ocenie oraz selekcji. Kolejnym etapem jest ich ewolucja realizowana za pośrednictwem operatorów krzyżowania i mutacji.

2.4. Funkcja przystosowania

Funkcja przystosowania $P(\delta)$ jest pewną miarą jakości osobnika wyznaczoną na podstawie przyjętego modelu matematycznego opisującego rozwiązywane zadanie [3]. Przekształcenie zadania minimalizacji (funkcji celu) w zadanie maksymalizacji (przystosowania) realizowane jest według przepisu:

$$P(\delta) = c - K(\delta) \quad (1)$$

gdzie: c – odpowiednio dobrana stała, $K(\delta)$ – wartość funkcji celu

W rozwiązywanym zadaniu optymalizacyjnym uwzględniono koszty inwestycyjne transformatorów 110 kV/SN, linii kablowych SN, rozdzielnic SN. Nakłady inwestycyjne uznano jako dominujące w zadaniu projektowania układów zasilania rezerwowego. Funkcja celu może jednak być, w obliczeniach dokładniejszych, rozszerzona o dodatkowe składniki (niedostarczonej energii, strat mocy, itp)

$$K(\delta) = \left(\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n K_{kl}(\delta_{kl}) + \sum_{o=1}^{n/2} K_{ro}(\delta_o^{(r)}) + \sum_{j=1}^n K_{Tj}(\delta_j^{(T)}) \right) \quad (2)$$

gdzie: n – liczba węzłów, $K_{kl}(\delta_{kl})$, $K_{ro}(\delta_o^{(r)})$, $K_{Tj}(\delta_j^{(T)})$ – nakłady inwestycyjne linii SN, rozdzielnic SN, transformatorów 110 kV/SN.

2.5. Operatory ewolucyjne

Po wyznaczeniu wartości funkcji przystosowania następuje proces selekcji. Z populacji usuwane są, z największym prawdopodobieństwem, osobniki najmniej przystosowane. Ich miejsce w nowo tworzonej populacji zajmują powielone, pozostałe osobniki. Istnieje wiele opracowanych metod selekcji. Najpopularniejsza z nich to tzw. metoda koła ruletki [2].

Operator krzyżowania polega na wymianie fragmentów ciągów kodowych różnych osobników. Sposób krzyżowania uzależniony jest od specyfiki rozwiązywanego zadania i przyjętego sposobu kodowania. Operator mutacji, wprowadzając do ciągu kodowego losowe zmiany, powiększa różnorodność populacji. Krzyżowanie jednopunktowe i mutacja przebiegają z zadaniem prawdopodobieństwem.

Proces obliczeniowy obejmujący: wyznaczenie przystosowań, selekcję, krzyżowanie i mutację jest wielokrotnie powtarzany.

3. NIEZAWODŃCIOWA METODA ANALIZY STRUKTURALNEJ

3.1. Metoda przekrojów niesprawności

Analiza niezawodnościowa otrzymanych rozwiązań układów zasilania jest przeprowadzana z zastosowaniem tzw. metody przekrojów niesprawności (MPN) [4, 5]. Obliczenia niezawodnościowe układów zasilania z zastosowaniem metod analizy strukturalnej obejmują:

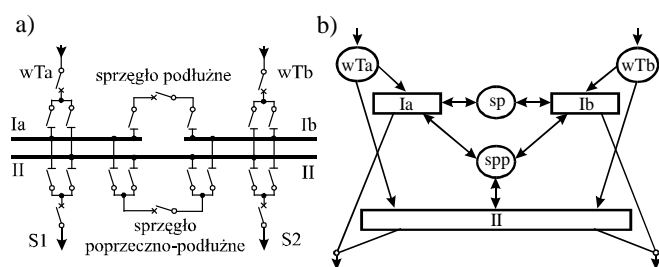
- odwzorowanie schematu niezawodnościowego badanego układu,
- określenie strukturalnej funkcji systemu,
- obliczenie wskaźników niezawodności.

Pierwszym etapem obliczeń w metodzie przekrojów niesprawności jest określenie wszystkich dróg zasilania (minimalnych ścieżek) badanego węzła. Ułatwieniem w tym zakresie jest przedstawienie badanego obszaru sieci w postaci grafu sieci.

Kolejnym etapem jest wyznaczenie przekrojów niesprawności. W obliczeniach praktycznych wystarczająca jest znajomość jedno-, dwu- i ewentualnie trójelementowych przekrojów niesprawności (zbiorów). Jednoelementowy przekrój niesprawności zawiera taki element układu zasilania którego awaria bądź wyłączenie powoduje pozabawienie zasilania badanego węzła. Jednoczesne wyłączenie dwóch lub trzech elementów przekroju odpowiednio dwu- lub trójelementowego powoduje taki sam skutek. Szczegółowy sposób wyznaczania przekrojów oraz zależności umożliwiające wyznaczenie wymaganych wskaźników (nie)zawodności przedstawiają pozycje [4, 5].

3.2. Analiza układów szynowych rozdzielni SN

Jednym z elementów dróg zasilania są układy szynowe rozdzielni. Wskaźniki niezawodności układów szynowych SN (węzłów SN) wyznaczono stosując niezależnie MPN.



Rys. 3. Układ szynowy dwusystemowy: a) schemat, b) model niezawodnościowy ([3, 5])

Zastosowanie metody przekrojów niesprawności (MPN) ułatwia budowa modeli niezawodnościowych rozważanych układów szynowych. Rysunek 3 przedstawia schemat rozdzielni z podwójnym systemem szyn zbiorczych i jej model niezawodnościowy uwzględniający wyłączniki pół zasilających i sprzęgłowych oraz sekcje szyn wraz z odłącznikami.

Dokonując analizy zawodności rozdzielni, z punktu widzenia zastępczego pola odpywowego (S1, S2 – rys. 3) uwzględnia się obciążenie maksymalne stacji transformatorowych oraz przepustowość transformatorów zasilających.

W pewnych sytuacjach awaryjnych (również rozdzielnic) wyłączenia dotyczą jednocześnie wielu elementów (najczęściej dwóch). Pomijając sytuacje związane z niewła-

ściwym zadziałaniem zabezpieczeń, polegającym na wyłączeniu nieuszkodzonego elementu, uwzględniono awarie układów szynowych rozdzielni dwusystemowych powodowanych przez wspólny czynnik zakłóceniaowy.

4. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

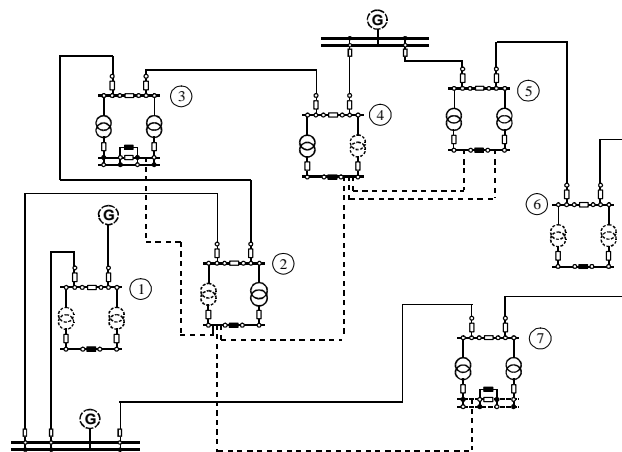
4.1. Testowa sieć elektroenergetyczna

Sieć elektroenergetyczna będąca przedmiotem analizy stanowi fragment sieci rozdzielczej 110 kV jednego z miast południowej części Polski.

Sieć rozdzielcza wysokiego napięcia (WN) zasilana siedem stacji transformatorowych WN/SN rozmieszczonych w niewielkich wzajemnych odległościach (rys. 4). Znanymi są moce znamionowe zainstalowanych transformatorów S_{nT} oraz ich obciążenia maksymalne S (tablica 1).

Problem pracy takiej sieci przedstawia się następująco: podczas pracy sieci w szczycie obciążenia i postoju jednego z transformatorów stacji, drugi pozostający w pracy transformator nie może przejąć jej pełnego obciążenia (przy współczynniku obciążenia transformatorów $\beta > 0,5$). Zakładając, że transformatory nie mogą być przeciążone ($\beta \leq 1$) taki układ zasilania sieci SN nie zapewnia zachowania kryterium n-1 (pomija się ograniczone możliwości rezerwowania w sieci rozdzielczej SN). Przyjęto ograniczenie wymiany transformatorów do mocy 40 MVA ze względu na ryzyko wzrostu mocy zwarcia w sieci rozdzielczej SN.

Należy dokonać przeprojektowania sieci tak aby przy najmniejszych nakładach inwestycyjnych zapewnić zachowanie kryterium n-1. W obliczeniach przyjęto średnie stawki nakładów inwestycyjnych z kilku ostatnich lat.



Rys. 4. Fragment miejskiej sieci rozdzielczej WN (linią przerywaną zaznaczono linie kablowe SN, wymienione transformatory 110 kV/SN oraz rozdzielnice SN)

Rysunek 4 przedstawia analizowaną sieć rozdzielczą z zaznaczonym rozwiązaniem optymalnym. Wprowadzone zmiany polegają na budowie 5 linii kablowych, wymianie 6 transformatorów (S_{nT2} – tabela 2) oraz modernizacji jednej rozdzielni SN (montaż rozdzielnic dwusystemowej – stacja nr 7). Otrzymane rozwiązanie uzyskano dla następujących parametrów algorytmu genetycznego: liczność populacji – 70, liczba pokoleń – 3000, prawdopodobieństwo krzyżowania – 0.8, prawdopodobieństwo mutacji – 0.025.

Tablica 1. Zestawienie danych i wyników przykładu

Stacja	S _{nrT} [MVA]	S [MVA]	S _{nrT2} [MVA]
1	10	10	8,5
2	10	10	6,7
3	25	25	16,2
4	16	16	9,7
5	16	16	9,6
6	16	16	11,2
7	31,5	31,5	22,2

Dla sieci istniejącej oraz projektowanej wyznaczono wskaźniki zawodności zasilania q na szynach rozdzielni SN (tablica 2). Dla określenia sytuacji prowadzących do przerwy w zasilaniu analizowanych węzłów sieci uwzględniono wyłączenia pojedynczych elementów oraz zdarzenia polegające na jednoczesnym wyłączeniu dwóch elementów dróg zasilania. W obliczeniach pominięto czynnik błędnego funkcjonowania automatyki zabezpieczeniowej. Obliczenia przeprowadzono dla obciążenia maksymalnego transformatorów przy uwzględnieniu ograniczeń przesyłowych w stanach awaryjnych. Wskaźniki awaryjności elementów przyjęto za [3, 4, 5].

Ostatnia kolumna w tablicy 2 wskazuje, które z rozważanych działań inwestycyjnych przyniosły zmniejszenie wskaźnika zawodności.

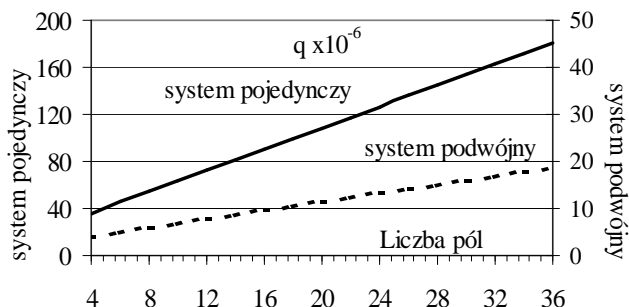
Zastosowanie rozdzielnic z podwójnym systemem szyn zbiorczych znacząco zwiększa niezawodność zasilania sieci rozdzielczej SN (wskaźniki q dla stacji 3 oraz 7).

Tablica 2. Wskaźniki zawodności zasilania na szynach rozdzielni SN

Stacja	Sekcja	$q \times 10^{-6}$		Przyczyna zmiany wskaźnika q
		Sieć istniejąca	Sieć projektowana	
1	a	302,7	126,7	Transformatory
	b	302,7	126,7	
2	a	302,7	153,9	Poł. kablowe
	b	302,7	126,6	
3	a	189,2	13,71	Połączenia kablowe
	b	189,2	14,14	
4	a	302,7	126,7	Transformator
	b	302,6	153,9	
5	a	302,6	135,8	Połączenia kablowe
	b	302,7	135,8	
6	a	302,7	126,7	Transformatory
	b	302,7	126,7	
7	a	302,7	13,76	Poł. kablowe i rozdzielnice dwusystemowe
	b	302,65	14,21	

Na rysunku 5 przedstawiono wskaźniki zawodności dla rozdzielnic SN z pojedynczym i podwójnym systemem szyn zbiorczych w funkcji liczby pól odpywowych

Obliczenia przeprowadzono z zastosowaniem metody przekrojów niesprawności uwzględniając współczynnik wspólnego czynnika zakłócającego systemów szynowych poszczególnych sekcji na poziomie 0.05.



Rys. 5. Wskaźniki zawodności zasilania układu szynowego pojedynczego i podwójnego

4. WNIOSKI KOŃCOWE

- Prezentowany sposób rezerwowania punktów zasilania elektroenergetycznych sieci rozdzielczych średniego napięcia może stanowić uzupełnienie dotychczasowych sposobów rozwoju sieci (dla zachowania kryterium n-1).
- Algorytm genetyczny wykazuje przydatność dla rozwiązywania zadania optymalnej konfiguracji połączeń zasilania rezerwowego SN.
- Zastosowanie rozdzielnic z podwójnym systemem szyn zbiorczych znacząco poprawia pewność zasilania sieci rozdzielczych SN.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 04.05.2007 w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Dz.U. 2007 nr 93, poz. 623.
2. Goldberg D. E.: Algorytmy genetyczne i ich zastosowania, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1998, ISBN 83-204-2272-8.
3. Bąchorek W.: Projektowanie dwunapięciowych układów zasilania stacji transformatorowych 110 kV/SN, Rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2007.
4. Paska J.: Niezawodność systemów elektroenergetycznych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005, ISBN 83-7207-552-2.
5. Sozański J.: Niezawodność i jakość pracy systemu elektroenergetycznego, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1990, ISBN 83-204-1057-6

DESIGNING OF REDUNDANT SUPPLY ARRANGEMENTS OF MV POWER DISTRIBUTION NETWORKS USING GENETIC ALGORITHM

Presented task lies in designing MV redundant feeding connections with minimum value of the objective function – investment cost of development the power network. The objective function accounts for the costs of construing the MV line, modernization of the MV busbar systems, exchange of HV/MV transformers. The paper describes an optimization method based on genetic algorithms technique and presents the example showing received solutions.