

ANALIZA WPLYWU PARAMETRÓW ALGORYTMU EWOLUCYJNEGO NA JAKOŚĆ ROZWIĄZAŃ REGULACJI NAPIĘCIA W ROZLEGŁEJ SIECI ROZDZIELCZEJ

Krzysztof GRUSZKA¹

1. Energoprojekt Kraków SA
ul. Mazowiecka 21, 30-019 Kraków
tel: 012 29 97 412 fax: 012 29 97 300 e-mail: gruszka@agh.edu.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono algorytm ewolucyjny jako metodę rozwiązania zadania optymalnej regulacji napięcia w rozległej sieci rozdzielczej. Dokonano szczegółowej analizy wpływu najważniejszych parametrów algorytmu na jakość uzyskiwanych rozwiązań. Przedstawione wyniki mogą być wykorzystane do optymalizacji regulacji napięcia w sieciach trudnych do wyregulowania.

Słowa kluczowe: elektroenergetyczne sieci rozdzielcze, regulacja napięcia, algorytm ewolucyjny.

1. INFORMACJE O ZADANIU

1.1. Wprowadzenie

Celem regulacji napięcia w elektroenergetycznych sieciach rozdzielczych jest zapewnienie odbiorcom energii elektrycznej o odpowiedniej jakości. Podstawowym parametrem określającym jakość energii jest wartość napięcia zasilającego. Odpowiednia regulacja napięcia jest niezbędna szczególnie w rozległych sieci rozdzielczych, w których odchylenia napięcia mogą znacznie przekraczać wartości dopuszczalne. Do rozwiązania zadania optymalnej regulacji napięcia w takich sieciach, wykorzystywane są powszechnie algorytmy ewolucyjne. Na wynik rozwiązania takiego zadania mają wpływ przede wszystkim wartości parametrów sterujących pracą algorytmu.

W artykule przedstawiono szczegółową analizę wyników symulacji komputerowych zadania optymalnej regulacji napięcia, przy zmieniających się parametrach algorytmu ewolucyjnego.

1.2. Regulacja napięcia w praktyce

Optymalna regulacja napięcia w sieciach rozdzielczych opiera się na ustaleniu takiej konfiguracji połączeń przełączników zacsepów transformatorów SN/nn, aby podczas ciągłej regulacji przełącznikiem transformatora 110kV/SN odchylenia napięcia u finalnych odbiorców energii elektrycznej mieściły się w dopuszczalnych granicach.

1.3. Struktura zadania

Przyjmuje się, że w zadaniu regulacji znane są: struktura i rozległość terytorialna sieci oraz parametry techniczne elementów w niej występujących. Na podstawie znajomości rocznego, szczytowego obciążenia transformatora w GPZ (Głównym Punkcie Zasilającym) oraz informacji o mocach odbieranych w poszczególnych węzłach sieci rozdzielczej określa się dla niej bilans odchylenia i spadków napięcia.

Rozwiązanie zadania optymalnej regulacji napięcia w danym okresie T (podzielonym na $j=1...r$ przedziałów ciągłej regulacji), polega na znalezieniu takiego zbioru X :

$$\{X\} = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\} \quad (1)$$

gdzie: n – ilość transformatorów SN/nn, x_i – położenie zacsep regulacyjnego i -tego transformatora

i zbioru Y :

$$\{Y\} = \{y_1, \dots, y_j, \dots, y_r\} \quad (2)$$

gdzie: r – ilość przedziałów czasu w okresie optymalizacyjnym, y_j – położenie zacsep regulacyjnego transformatora 110kV/SN w j -tym przedziale czasowym

aby zminimalizowały one funkcję celu F :

$$F([x, y]) = \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^n (\delta U_{mij})^2 \quad (3)$$

gdzie: δU_{mij} – odchylenie napięcia za i -tą stacją transformatorową w j -tym przedziale czasu

Liczbę elementów zbioru $\{Y_j\}$ ogranicza się, dokonując podziału r przedziałów czasu na $k=1, \dots, s$ ($s \ll r$) stref regulacji napięcia, w obrębie których nastawy przełącznika zacsepów transformatora 110kV/SN są jednakowe. Przyjmując takie założenie oraz definiując punkt regulacji

jako miejsce, w którym maksymalny spadek napięcia w linii niskiego napięcia osiąga połowę wartości, δU_{nlij} określa się wzorem:

$$\delta U_{nlij} = y_k - a_i \cdot w_j + \delta U_{\vartheta i} + x_i - b_i \cdot w_j - \frac{1}{2} \cdot w_j \cdot \Delta U_{nm \max} \quad (4)$$

gdzie: x_i, y_k – zmienne poszukiwane, w_j – stopień obciążenia transformatora 110kV/SN, a_i, b_i – stałe określające odpowiednio: względny spadek napięcia na drodze od GPZ-u do i -tej stacji transformatorowej i względny spadek napięcia na transformatorze SN/nn w szczycie obciążenia, δU_{ϑ} – stała (wartość odchylenia napięcia wynikająca z różnicy między stosunkami napięć znamionowych transformatora i sieci łączonych za jego pośrednictwem), $\Delta U_{nm \max}$ – założony, maksymalny spadek napięcia w sieci nn

Problem optymalnej regulacji napięcia jest typowym zadaniem z ograniczeniami, w którym:

- dziedziną funkcji celu jest ściśle określona, jako zbiór możliwych położen zaczeów transformatora 110kV/SN i transformatorów SN/nn,
- przepisy na dozwolone odchylenia napięcia u odbiorców determinują dopuszczalność uzyskanych rozwiązań.

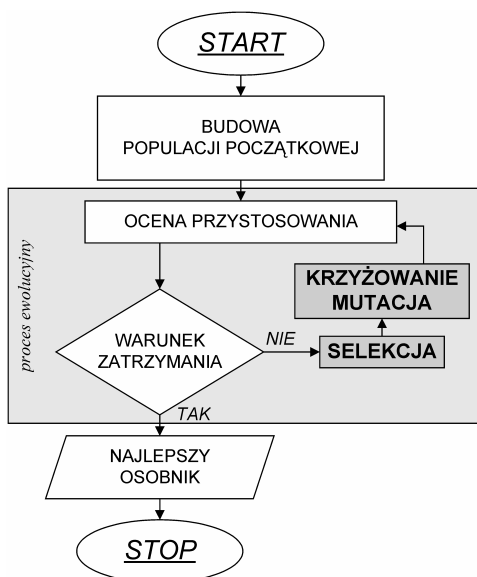
2. TECHNIKA ROZWIĄZANIA ZADANIA

2.1. Narzędzie optymalizacji

Zadanie zostało zrealizowane w oparciu o gotowe narzędzie optymalizacyjne w postaci programu komputerowego z zaimplementowanym algorytmem ewolucyjnym [2], [5]. Program ten wykorzystuje wysoce przetworzone odwzorowanie modelowanego obiektu w postaci zestawu współczynników spadków napięcia w liniach SN i na transformatorach SN/nn – a_i, b_i . Zadanie optymalnej regulacji napięcia rozwiązywane jest dla zadawanego przebiegu obciążenia wyrażonego przez stopień obciążenia sieci w_j .

2.2. Algorytm ewolucyjny

Idea konstrukcji zastosowanego w zadaniu algorytmu ewolucyjnego bazuje na elementarnym algorytmie genetycznym – EAG (rys.1), udoskonalonym o mechanizm skalowania funkcji przystosowania.



Rys. 1. Schemat blokowy EAG.

Do podstawowych parametrów opisujących w sposób ilościowy symulowaną ewolucję należą:

- liczebność populacji początkowej – N ,
- prawdopodobieństwo krzyżowania – p_c ,
- prawdopodobieństwo mutacji – p_m ,
- współczynnik zwielokrotnienia – Z .

Pravidłowy dobór tych parametrów ma decydujący wpływ na właściwe ukierunkowanie całego procesu ewolucyjnego, a w konsekwencji na znalezienie optymalnego rozwiązania w możliwie najkrótszym czasie.

Rozwiązanie zadania (tzw. chromosom) ma postać zakodowanego ciągu znaków o ustalonej długości:

$$c_i = [x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_s] \quad (5)$$

gdzie: n – liczba regulowanych stacji transformatorowych SN/nn, s – liczba stref czasowych, w obrębie których utrzymywane są jednakowe nastawy przełącznika zaczeów transformatora 110kV/SN.

Jako miarę jakości danego rozwiązania przyjmuje się tzw. wartość przystosowania P , określonego zależnością:

$$P = C_{\max} - F([x, y]) \quad (6)$$

gdzie: C_{\max} – stała.

W teorii algorytmów ewolucyjnych istnieje kilka możliwości zdefiniowania warunku zatrzymania pracy algorytmu. W prezentowanym przypadku zdecydowano się na ustalenie przed startem skończonej liczby pokoleń, po której algorytm ma zwrócić najlepsze rozwiązanie. Wielokrotne symulacje pozwoliły na ustalenie długości cyklu obliczeniowego na poziomie 40 tysięcy pokoleń. Wartość ta umożliwiła algorytmowi odnalezienie każdorazowo optymalnych rozwiązań, spełniających warunki ograniczające zadania. Pozwoliła także na szczegółową analizę procesu ewolucyjnego w celu identyfikacji optimum lokalnych i globalnych dziedziny rozwiązań.

3. OBIEKT BADAŃ I JEGO ROZWIĄZANIA

3.1. Identyfikacja i modelowanie obiektu

W celu realizacji rozwiązania zadania wykonano matematyczny model i obliczenia dla rzeczywistej sieci rozdzielczej, w skład której wchodzi:

- stacja 110kV/SN z dwoma transformatorami o mocy 25 MVA każdy; zakres regulacji napięcia pojedynczej jednostki to $\pm 16\%$ przy ± 12 stopniowej możliwości zmiany położenia zaczeu; w normalnym układzie pracy rozdzielnia średniego napięcia zasilana jest z jednego transformatora,
- terenowa sieć średniego napięcia o łącznej długości obwodów 253 km, zasilająca 242 stacje SN/nn.

Modelowanie sieci przeprowadzono w oparciu o rzeczywiste dane obciążen transformatora w GPZ, zarejestrowane w systemie dyspozytorskim w okresie jednego roku.

3.2. Rozwiązania

W wyniku ponad pięciuset uruchomień programu wytypowano dwa optymalne rozwiązania zadania – R_1 i R_2 , różne ze względu na sposób realizacji. Mają one bardzo zbliżone wartości funkcji przystosowania przy zupełnie odmiennych konfiguracjach nastaw przełączników zaczeów. W praktyce oznacza to możliwość realizacji optymalnej regulacji napięcia na dwa różne sposoby.

Przybliżoną postać optymalnych rozwiązań z wyróżnionymi genami y przedstawiono poniżej.

$$R_1 = [x_1, \dots, x_n; 9.31, 9.31, 7.98, 6.65] \quad (7)$$

$$R_2 = [x_1, \dots, x_n; 5.32, 3.99, 2.66, 1.33] \quad (8)$$

Odnalezienie optymalnych rozwiązań zadania regulacji napięcia umożliwiły wielokrotne eksperymenty, które równocześnie pozwoliły na zbadanie wpływu poszczególnych parametrów algorytmu na jakość rozwiązań w kolejnych symulacjach.

4. OCENA WPLYWU PARAMETRÓW ALGORYTMU NA JAKOŚĆ ROZWIĄZAŃ

4.1. Kryteria oceny

W celu dokonania analizy wpływu poszczególnych parametrów algorytmu na jego efektywność wprowadzono odpowiednie miary, badające:

1) poziom zbieżności uzyskiwanych rozwiązań w stosunku do rozwiązania optymalnego, zgodnie z zależnością:

$$x_e = \frac{1}{T_N} \sum_{t_N=1}^{T_N} P_{\%}^*(t_N) \quad (9)$$

gdzie: t_N – numer testu, T_N – ilość testów, $P_{\%}^*$ – procentowa wartość przystosowania najlepszego rozwiązania z danego testu, w stosunku do rozwiązania optymalnego,

2) tempo zbieżności procesu ewolucyjnego, zależne od średniej wartości numeru pokolenia G_N^* , w którym najlepszy osobnik osiągnął po raz pierwszy maksymalne przystosowanie:

$$x_g = \frac{1}{T_N} \sum_{t_N=1}^{T_N} G_N^*(t_N) \quad (10)$$

Dokonanie oceny poziomu zbieżności względem dwóch różnych rozwiązań było możliwe dzięki porównaniu genów y najlepszego osobnika z danego testu i rozwiązania optymalnego.

Wprowadzenie tych kryteriów umożliwiło doświadczalną analizę podatności optymalnie dostrojonego algorytmu na zmiany warunków początkowych symulacji. Wyniki eksperymentów zestawiono w tabelach ilustrujących, w jakim stopniu zmiana poszczególnych parametrów wpływa na skuteczność algorytmu w odnajdywaniu optymalnych rozwiązań.

4.2. Wyniki symulacji

Przedstawione tablice wynikowe zawierają średnie, statystyczne porównanie poziomów i tempa zbieżności najlepszych osobników z danego testu z jednym z rozwiązań optymalnych. Każdy eksperyment został wielokrotnie powtórzony.

Ocena wpływu poszczególnych parametrów została przeprowadzona dla przybliżonego, testowego modelu zadania. Z kolei pełny model zadania posłużył do celów sprawdzenia parametrów przy których algorytm wykazywał największą efektywność w poszukiwaniu optymalnych rozwiązań.

Tablica 1. Wpływ prawdopodobieństwa krzyżowania p_c .

Badana wartość	x_e [%]	x_g [G_N]
0,9	99,9922	–
0,8	99,9961	–
0,7	99,9984	–
0,6	99,9995	–
0,5	99,9939	–

Tablica 2. Wpływ prawdopodobieństwa mutacji p_m .

Badana wartość	x_e [%]	x_g [G_N]
0,030	99,7960	–
0,020	99,8810	–
0,010	100,0000	17731
0,005	100,0000	19579
0,001	99,8509	–

Tablica 3. Wpływ współczynnika zwielokrotnienia Z.

Badana wartość	x_e [%]	x_g [G_N]
2,0	98,8878	–
1,8	100,0000	14515
1,6	100,0000	23489
1,3	99,8339	–
1,0	nie zbieżny	–

Tablica 4. Wpływ liczebności populacji N.

Badana wartość	x_e [%]	x_g [G_N]	t [min'sek'']
200	100,0000	12269	7'10"
100	100,0000	21480	6'16"
50	100,0000	21908	3'12"
30	100,0000	17731	1'46"
20	99,9581	–	–

4.3. Interpretacja wyników

Jako główne kryterium oceny przyjęto wskaźnik zaproponowany przez De Jonga [1] tzw. efektywność off-line. Jest to średnia procentowa wartość funkcji przystosowania najlepszych osobników uzyskanych w toku kolejnych prób. Została ona odniesiona do wartości przystosowania rozwiązania optymalnego i oznaczona jako x_e . W sytuacjach, w których badane parametry wpływały na stuprocentową zbieżność rozwiązania z testu do rozwiązania optymalnego posługiwano się pomocniczym kryterium x_g . W związku z powyższym w przedstawionych tablicach wyróżniono te wartości, przy których algorytm za każdym razem znajdował optimum. Dodatkowo ciemniejszym odcieniem wskazano najlepsze wartości dla parametrów p_c , p_m , Z i N po uwzględnieniu tempa zbieżności. W przypadku oceny wpływu liczebności populacji wprowadzono dodatkowo kryterium czasu rzeczywistego, po którym algorytm odnajdował rozwiązanie optymalne. Mimo iż populacja 200-osobnikowa ewoluowała wcześniej do optimum to jednak relatywny czas jego uzyskania jest znacznie krótszy dla N=30.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

1) Regulacja napięcia w rozległych sieciach elektroenergetycznych jest niezbędna w celu zapewnienia wymagań odnośnie do jakości energii i zapewnienia właściwej pracy urządzeń elektrycznych.

2) Do optymalizacji regulacji napięcia mogą być stosowane algorytmy ewolucyjne.

3) Poprawne rozwiązanie zadania optymalizacyjnego tą metodą wymaga właściwego doboru parametrów algorytmu.

4) Optymalizacja doboru tych parametrów ma szczególnie duże znaczenie w analizie obiektów trudnych do wyregulowania, jakimi są np. sieci z rozproszonymi źródłami energii. Dziedzina możliwych rozwiązań dla takich obiektów jest bowiem ograniczona.

6. BIBLIOGRAFIA

1. De Jong K. A.: An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems, Doctoral Dissertation, University of Michigan, 1975.
2. Goldberg D. E.: Algorytmy genetyczne i ich zastosowania, Warszawa WNT 2003, ISBN: 83-204-2843-2.
3. Helt P., Parol M., Piotrowski P.: Metody sztucznej inteligencji w elektroenergetyce, Warszawa, 2000, ISBN: 83-7207-194-2.
4. Kot A.: Optymalna regulacja napięcia w sieciach średniego napięcia zawierających źródła generacji rozproszonej, Praca Doktorska, Akademia Górniczo – Hutnicza Kraków, 2005.
5. Michalewicz Z.: Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne, Warszawa WNT 2003, ISBN: 83-204-2881-5.

THE INFLUENCE OF EVOLUTIONARY ALGORITHM PARAMETERS ON THE SOLUTIONS FOR THE VOLTAGE CONTROL IN THE WIDE AREA DISTRIBUTION NETWORK

Keywords: power distribution networks, voltage control, evolutionary algorithm

The paper presents an evolutionary algorithm using to optimization of voltage control in large distribution network. The influences of algorithm basic parameters on the results were submitted to detailed discussion. The optimal values can be used for optimization difficult-to-control electrical networks.