

## WYBÓR OPTYMALNEJ STRATEGII EKSPLOATACJI STACJI TRANSFORMATOROWYCH W SIECIACH ROZDZIELCZYCH SN

Artur GANCARZ<sup>1</sup>, Wojciech BĄCHOREK<sup>2</sup>

1. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki,  
tel:012 617 37 60 fax: 012 634 57 21 e-mail: einstein@agh.edu.pl
2. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki,  
tel:012 617 32 47 fax: 012 634 57 21 e-mail: wojbach@agh.edu.pl

**Streszczenie:** W referacie zaproponowano rozwiązanie problemu optymalnej gospodarki majątkiem sieciowym na przykładzie wymiany transformatorów dla wybranego fragmentu sieci rozdzielczej jednej ze Spółek Dystrybucyjnych. Przedstawia się algorytm obliczeniowy, jego implementację komputerową oraz przykład obliczeniowy.

**Słowa kluczowe:** elektroenergetyczne sieci rozdzielcze, optymalizacja, algorytmy ewolucyjne.

### 1. WSTĘP

Projektowanie struktur elektroenergetycznych sieci rozdzielczych wiąże się zazwyczaj z przyjęciem szeregu założeń upraszczających, np. o jednakowym wzroście obciążenia wszystkich transformatorów SN/nn w rozpatrywanym horyzoncie czasowym [1][2]. W praktyce wzrost obciążeń odbiega od założonego. Nieprzewidziane zmiany obciążenia w rozpatrywanym okresie mogą skutkować koniecznością kilkukrotnej weryfikacji uprzednio dobranych mocy znamionowych transformatorów. W związku z tym konieczna jest realizacja układu sieciowego (w tym wymiana transformatorów) z uwzględnieniem etapowości jego rozwoju dla krótszych okresów prognozowania. Proces ten wymaga uwzględnienia ograniczonego zbioru transformatorów pozostających w dyspozycji (pracujących i rezerwowych) oraz potrzeby zakupu nowych jednostek.

W rzeczywistych przypadkach rozwoju sieci przyjmuje się kryterium doboru jednostek transformatorowych z uwzględnieniem wyłącznie obciążenia. Uwzględnienie kwestii strat mocy i energii powstających w transformatorach jest często pomijane, a może wpłynąć na zmianę obranej strategii doboru mocy znamionowych transformatorów. Problem w mniejszym stopniu znajduje również swoje odzwierciedlenie w pracy linii elektroenergetycznych, w którym to przypadku decydują także inne kryteria (spadki napięć, prądy zwarciowe, standaryzacja przekrojów), a problem zmian obciążeń może być zwykle rozwiązany przez zmianę konfiguracji sieci dla wybranego etapu jej eksploatacji.

Optymalna strategia zarządzania majątkiem sieciowym wskazuje na taki sposób gospodarowania, który zapewnia minimalizację sumarycznych kosztów związanych z

przemieszczeniem eksploatowanych transformatorów oraz ewentualnym zakupem nowych jednostek.

### 2. OPTYMALIZACJA PRACY SIECI

#### 2.1. Sformułowanie i klasyfikacja problemu

Specyfika energii elektrycznej powoduje, że pobór przez odbiorcę jest związany z koniecznością jej przesyłu od wytwórcy. Odbiorca zobowiązany jest do pokrycia kosztów samej energii oraz kosztów przesyłu (koszt funkcjonowania sieci zaangażowanych w dostawę energii do określonego przez odbiorcę punktu odbioru).

Sieci rozdzielcze w Polsce to ok. 280 tys. km linii, 227 tys. stacji transformatorowych o łącznej mocy prawie 40 GVA. Przez sieci rozdzielcze przepływa znaczna część energii dostarczonej do odbiorców.

Poza wytwórcami, odbiorcami oraz podmiotami zajmującymi się handlem energią elektryczną na rynku funkcjonuje operator sieci przesyłowej oraz operatorzy sieci rozdzielczych (dystrybucyjnych).

Operatorzy sieci wyłonieni zostają poprzez wymuszony ustawowo rozdział działalności obrotu i dystrybucji energii elektrycznej. Do ich działalności wlicza się następujące zadania:

- prowadzenie ruchu w sieci dystrybucyjnej z zachowaniem niezawodności i jakości dostarczanej energii elektrycznej;
- eksploatacja, konserwacja i remonty sieci dystrybucyjnej w sposób gwarantujący niezawodność funkcjonowania systemu dystrybucyjnego;
- planowanie i zapewnianie rozbudowy sieci dystrybucyjnej;
- współpraca z innymi operatorami, bilansowanie, zakup energii, itp.

#### 2.2. Funkcja celu

Jednym z kryteriów oceny jakości pracy sieci rozdzielczych jest sprawność procesu dostarczania energii elektrycznej do odbiorców. W tym celu w analizach techniczno-ekonomicznych zachodzi konieczność wykonania obliczeń m.in. strat mocy (wymagane dane: schemat sieci,

parametry elementów, obciążenia węzłów odbiorczych). Straty w sieci są elementem składowym ceny rynkowej energii elektrycznej (usługa przesyłu). O wielkości strat decyduje aktualna konfiguracja sieci, poziom obciążeń oraz typ i stan instalowanych urządzeń (np. nowe lub używane transformatory SN/nn). Zatem straty w sieci to również straty nie związane z jej konfiguracją, tj. straty w transformatorach SN/nn.

Wzrost obciążenia może powodować konieczność weryfikacji zainstalowanych transformatorów. W ogólnym przypadku wzrost obciążenia nie jest jednakowy we wszystkich obszarach sieci. Transformatory różnią się mocą oraz parametrami znamionowymi. Weryfikacja mocy zainstalowanych transformatorów wymaga uwzględnienia ograniczonego zbioru transformatorów pozostających w dyspozycji (pracujących i rezerwowych) oraz możliwości zakupu nowych jednostek. Do funkcji celu włączany jest więc koszt zakupu i transportu nowych jednostek.

Optymalna strategii zarządzania majątkiem sieciowym wskazuje na taki sposób gospodarowania, który zapewni minimalizację sumarycznych kosztów związanych z przemieszczeniem eksploatowanych transformatorów oraz ewentualnym zakupem nowych jednostek. Funkcja celu kosztów rocznych  $K_r(x)$  ma postać:

$$K_r(x) = K_i + K_l + K_{\Delta P} + K_{\Delta A} \quad (1)$$

gdzie:  $K_i$  – koszty inwestycyjne nowych transformatorów,  $K_l$  – koszty przeniesienia transformatorów,  $K_{\Delta P}$  – koszty strat mocy,  $K_{\Delta A}$  – koszty strat energii,  $x$  – wektor zmiennych lokalizacji transformatorów

### 2.3. Metoda rozwiązywania zadania optymalizacji

Postawione powyżej zadanie minimalizacji funkcji celu (1), z uwagi na ustalone miejsca lokalizacji transformatorów, typ transformatorów i typoszereg mocy znamionowych, jest zadaniem dyskretnym. Charakteryzuje się ono również dużą ilością zmiennych. Z uwagi na zawarte w funkcji celu wartości kosztów strat mocy i energii, zadanie jest nieliniowe. Oprócz powyższego, problem obejmuje bardzo dużą liczbę dopuszczalnych rozwiązań, z których znaczna część jest bliska rozwiązaniu optymalnemu.

Złożoność przedstawionego problemu utrudnia możliwość zastosowania klasycznych algorytmów optymalizacji nieliniowych zadań dyskretnych. Specyfika zadania wskazuje na możliwość zastosowania, do jego rozwiązania, algorytmu ewolucyjnego [3].

Algorytm ewolucyjny operuje na całych grupach rozwiązań zadania, nazywanych populacjami [4]. Poszukiwanie minimalnej wartości funkcji celu oparte jest na mechanizmach doboru naturalnego oraz dziedziczności łączących ewolucyjną zasadę przeżycia najlepiej przystosowanych osobników (najlepszych rozwiązań z populacji).

Populacją określa się zbiór rozwiązań danego zadania. Cechy charakteryzujące każdy osobnik, odróżniające go od innych osobników, zakodowane są w postaci tzw. chromosomu (ciągu kodowego).

Każdy osobnik populacji charakteryzuje się pewnym przystosowaniem określającym jego użyteczność na tle całej populacji. Tylko osobniki najsilniejsze mają szansę przetrwać jak najdłużej i przekazać swojemu liczniejszemu potomstwu więcej przydatnych w życiu cech. Zasada działania algorytmu polega na przekazywaniu kolejnym otrzymywanym rozwiązaniom elementów poprzednio

uzyskanych rozwiązań. Zapewnia to ukierunkowanie procesu obliczeniowego w stronę pożądanego wyniku.

W przypadku opisywanego zadania istotna jest minimalizacja funkcji określającej użyteczność tych rozwiązań – koszt związany z realizacją określonego przedsięwzięcia eksploatacyjnego. Wykorzystanie algorytmu rozwiązywania zadania opartego na zależnościach wzorowanych procesami zachodzącymi w świecie przyrody wiąże się z przekształceniem zadania minimalizacji w zadanie maksymalizacji przez zamianę funkcji kosztu  $K_r(x)$  w funkcję przystosowania  $P(x)$  osobnika według przepisu:

$$P(x) = \begin{cases} C_n - K_r(x), & \text{jeżeli } K_r(x) < C_n \\ 0, & \text{jeżeli } K_r(x) \geq C_n \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:  $C_n$  – odpowiednio dobrana stała zmieniająca zadanie maksymalizacji w zadanie minimalizacji.

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 problemu. Dalsze działanie algorytmu polega na cyklicznej realizacji mechanizmów ewolucji pokazanych na rysunku 1., którymi są:

- *reprodukcja, selekcja* – każdy z osobników populacji charakteryzuje się pewnym przystosowaniem lub inaczej pewną użytecznością w środowisku w którym występuje. Osobnik najlepiej przystosowany do warunków, w których funkcjonuje, powielony jest w największym stopniu. Wykorzystano metodę selekcji opartą na wyborze losowym wg reszt z powtórzeniami [4];
- *krzyżowanie* – osobniki łączą się w pary tworząc dwa nowe osobniki. Nowe osobniki 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 odbarwienie wybranych osobników nowymi cechami, nie występującymi u osobników, z połączenia których powstały. Proces jest realizowany przez zmianę losowo wybranego genu danego chromosomu.



Rys. 1. Schemat blokowy algorytmu genetycznego

## 3. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

### 3.1. Charakterystyka wybranej sieci

Sieć będąca przedmiotem analizy jest siecią rzeczywistą, zlokalizowaną na terenie eksploatacji jednego z Zakładów Energetycznych w Polsce południowej. Napięcie nominalne linii wynosi 15 kV.

Wybrany fragment rzeczywistej sieci składa się z 66 stacji transformatorowych SN/nn. Zainstalowane w nich transformatory to jednostki o mocach 30÷250 kVA. Obciążenie stacji transformatorowych waha się pomiędzy

11÷121,3 kVA (średnio 50,5 kVA). Stopień obciążenia transformatorów wynosi 20÷55 %. Zainstalowane transformatory były wyprodukowane w latach 60-tych (10 szt.), 70-tych (16 szt.), 80-tych (6 szt.) i 90-tych (34 szt.).

Do obliczeń przyjęto następujące jednostkowe składniki kosztów [2]:

- montażu i demontażu transformatora – 1465 PLN (bez względu na moc jednostki)
- energii – 0,26 PLN/kWh,
- mocy – 36,36 PLN/kW/rok,
- transportu – 3,00 PLN/km.

### 3.2. Założenia i ograniczenia zadania

Realizacja obliczeń wymagała zebrania danych dotyczących:

- lokalizacji stacji SN/nn,
- obciążeń szczytowych punktów odbiorczych (SN/nn),
- kosztów przeniesienia transformatora obejmujących demontaż, montaż i transport,
- nakładów inwestycyjnych nowych transformatorów,
- parametrów znamionowych transformatorów z podziałem na grupy wiekowe (uwzględniono następujący szereg mocy znamionowych transformatorów: 25, 40, 63, 100, 160, 250, 400, 630, 800 i 1000 kVA) obejmujące nowe i pierwotnie pracujące transformatory.

Lokalizację punktów odbiorczych SN/nn opisano w prostokątnym układzie współrzędnych umożliwiającym wyznaczenie odległości transportowej pomiędzy poszczególnymi stacjami. Poszczególnym stacjom przypisano transformatory o określonych mocach. Wymiana transformatora na nową jednostkę polega na odstawieniu z pracy transformatora lub przeniesienia go do innej stacji, a w jego miejsce zainstalowanie nowego transformatora dostarczonego ze składu przypisanego tej samej lokalizacji, co stacja zasilająca 110 kV/SN. W ogólnym przypadku lokalizacja stacji zasilającej i składu rezerwowych transformatorów nie musi się pokrywać.

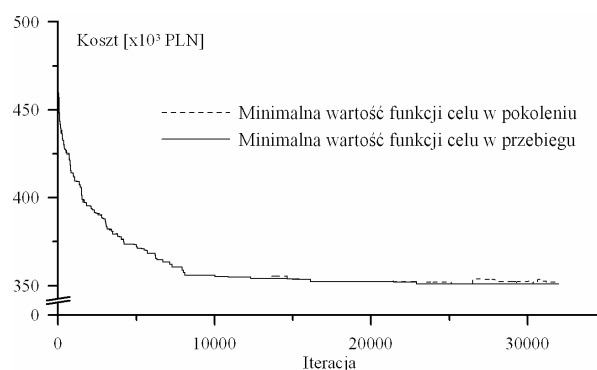
Przyjęto, że transformatory nie mogą pracować z przeciążeniem. Ze względu na różne moce znamionowe i obciążenia punktów odbiorczych nie jest możliwe dowolna dyslokacja transformatorów. Rozwiązania niedopuszczalnego przemieszczenia transformatorów były eliminowane przez funkcję naprawczą algorytmu. Rolą algorytmu naprawczego była modyfikacja niedopuszczalnego ciągu kodowego na ciąg charakteryzujący się właściwą konstrukcją (eliminacja powtórzeń w ciągu) oraz zapewniający spełnienie warunków technicznych (brak przeciążeń transformatorów). Podstawą wyznaczenia kosztów strat mocy i energii były wartości obciążenia szczytowego oraz parametry znamionowe transformatorów.

Horyzont czasowy analizy obejmował dwa przypadki obliczeń dla okresu 5-cio (przykład I) i 10-cio letniego (przykład II). W rozważanych okresach czasu przyjęto niezmienny poziom obciążeń poszczególnych transformatorów. Celem zróżnicowania analizowanych okresów było wykazanie wpływu poszczególnych składników w funkcji celu (kosztów zmiennych i stałych) na zakres wdrażanych inwestycji.

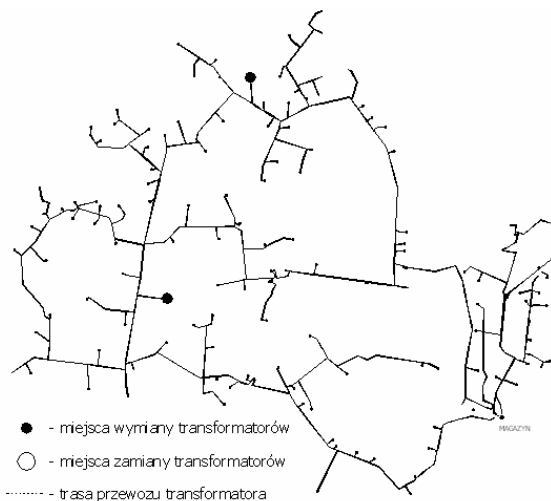
### 3.3. Wyniki i wnioski

#### Przykład I

Otrzymane wyniki wskazują na wymianę dwóch jednostek transformatorowych na nowe (stacja nr 40 – wymiana z 100 kVA na 40 kVA oraz stacja nr 47 – wymiana z 63 kVA na 25 kVA) z uwagi na ich małe obciążenie (10-15 %). Wartość funkcji celu wynosi w tym przypadku 350 067,41 PLN. Realizacja tego rozwiązania umożliwia zmniejszenie kosztów w rozpatrywanym okresie o 1 216,73 PLN (0,35 %). Na rysunku 3 przedstawiono miejsca wymiany transformatorów, a na rysunku 2 przebieg procesu obliczeniowego algorytmu (wykres zależności funkcji celu w kolejnych cyklach obliczeniowych). Linia ciągłą oznaczono najmniejszą globalnie wartość funkcji, linią przerywaną zobrazowano zmiany wartości w danym pokoleniu. Cechą charakterystyczną algorytmu ewolucyjnego jest to, że możliwe jest tymczasowe „pogorszenie” wyników w trakcie trwania procesu obliczeniowego, aby uzyskać poprawę rozwiązania.



Rys. 2. Wykres zależności funkcji celu w kolejnych cyklach obliczeniowych dla okresu 5-ciu lat

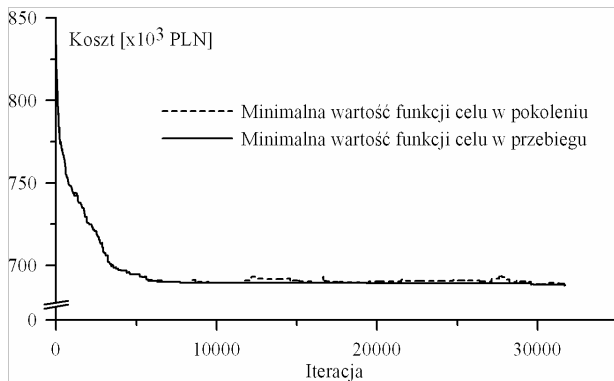


Rys. 3. Inwestycje w okresie 5-cio letnim - przykład I (oznaczono miejsca wymiany nowych transformatorów)

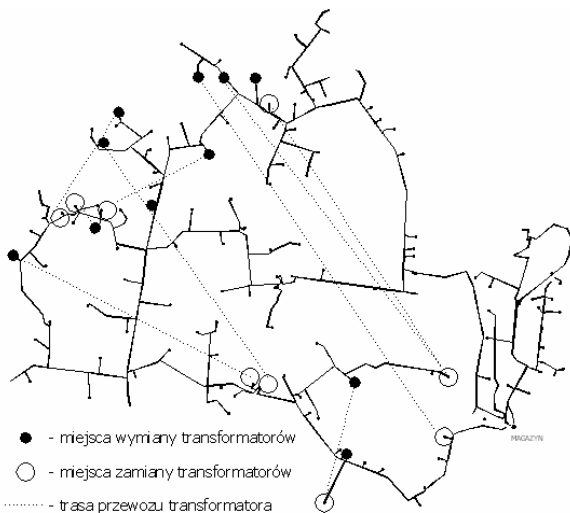
#### Przykład II

Wynik drugich obliczeń wskazuje na wymianę 10-ciu jednostek transformatorowych na nowe (staje nr 7, 10, 40, 47, 48, 56, 57, 59, 61 i 63). Powodem ich wymiany były dwa czynniki: transformatory były mało obciążone (10-20%) oraz znaczny wiek jednostek (m.in. w stacjach nr 7, 10 i 40). Wartość funkcji celu wynosi w tym przypadku 687 004,00 PLN. Realizacja rozwiązania umożliwia zmniejszenie kosztów w rozpatrywanym okresie o

14 161,94 PLN (ok. 2 %). Na rysunku 5 przedstawiono miejsca wymiany transformatorów i ich translokacje, a na rysunku 4 zobrazowano przebieg wartości funkcji celu w dłuższym, 10-cio letnim okresie inwestycyjnym.



Rys. 4. Wykres zależności funkcji celu w kolejnych cyklach obliczeniowych dla okresu 10-ciu lat



Rys. 5. Inwestycje w okresie 10-cio letnim - przykład II (oznaczono miejsca wymiany transformatorów)

Obliczenia obu przykładów wykonano dla następującego zestawu parametrów algorytmu:

- liczebność populacji - 36,
- liczba pokoleń - do 40 tys.,
- prawdopodobieństwo krzyżowania - 0.92,
- prawdopodobieństwo mutacji - 0.0012,

oraz zastosowano:

- metodę selekcji opartą na wyborze losowym wg metody reszt z powtórzeniami [4] ze skalowaniem wyników przystosowania 1.7;
- funkcję naprawy z zadanym poziomem prawdopodobieństwa 0.5,

- dodatkową funkcję mutacji „warunkowej” z zadanym poziomem prawdopodobieństwa 0.0011 (pozycja podlegająca mutacji wymuszała mutację na pozycji o innym numerze, co sprowadzało się do wymiany elementów pomiędzy sobą),
- strategię elitarystyczną, polegającą na okresowym (z prawdopodobieństwem 0.035) wprowadzaniu osobnika o aktualnie najlepszym przystosowaniu.

#### 4. PODSUMOWANIE

Dążenie do minimalizacji kosztów funkcjonowania sieci jest konieczne z punktu widzenia dystrybutorów i odbiorców energii. Celem badań była minimalizacja kosztów związanych z funkcjonowaniem i modernizacją sieci. Zmniejszanie kosztów (ich optymalizacja) było możliwe poprzez dyslokację transformatorów i zależało od obciążeń poszczególnych stacji. Dyslokacja transformatorów wraz z instalacją nowych jednostek częściowo wynikała z konieczności wycofania przestarzałych transformatorów (wielkość strat znamionowych).

Optymalne rozwiązanie uzależnione jest od przyjętego horyzontu czasowego. Wybór horyzontu czasowego powinien być uzależniony od prognozowanej dynamiki zmian obciążeń poszczególnych stacji SN/nn (np. na podstawie planów zagospodarowania przestrzennego).

Skutecznym narzędziem do rozwiązania problemu zarządzania majątkiem sieciowym jest opracowany algorytm ewolucyjny. Odpowiednio dobrane parametry procesu pozwalają na osiągnięcie zadowalających rozwiązań. Algorytm pozwala na wielokrotną analizę optymalnych rozwiązań dla różnych horyzontów czasowych.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Marzecki J.: Wybrane zagadnienia rozwoju miejskich sieci elektroenergetycznych w warunkach tworzonego rynku energii, Warszawa, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, 2002, str. 37
2. pod red. Kulczycki J.: Ograniczanie strat energii elektrycznej w elektroenergetycznych sieciach rozdzielczych, Poznań PTPiREE 2002, str. 125, 183, ISBN 83-903073-7-5
3. Michalewicz Z.: Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne, Warszawa WNT 2003, ISBN 83-204-2200-0
4. Goldberg D.E.: Algorytmy genetyczne i ich zastosowania, Warszawa WNT 1998, str. 23, 26, 136, ISBN 83-204-2272-8

### CHOOSING OPTIMAL STRATEGY FOR EXPLOITATION OF TRANSFORMER STATION IN MEDIUM VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORKS

**Keywords:** power distribution networks, optimization, evolutionary algorithm

The article concerns the problem of optimal management the property of Electrical Power Distribution Companies. The analysed task concerns the problem of exchange of MV/LV transformers for selected power distribution networks. Computational algorithm, computer implementation as well as computational example was introduced.