

ZASTOSOWANIE KOMPUTERÓW DO WIELOETAPOWEJ OPTIMALIZACJI PRACY STACJI TRANSFORMATOROWYCH ŚREDNIEGO NAPIĘCIA

Artur GANCARZ¹, Wojciech BĄCHOREK²

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: Projektowanie struktur elektroenergetycznych sieci rozdzielczych wiąże się z przyjęciem ustalonego okresu optymalizacji oraz prognozy zmian obciążeń w tym okresie. Właściwe jest w takim przypadku rozłożenie wszelkich przewidywanych działań na różne momenty optymalizowanego okresu. W artykule przedstawia się metodę optymalizacji wieloetapowej zadania doboru transformatorów w sieci rozdzielczej średniego napięcia. Przewidywano algorytm obliczeniowy, jego implementację komputerową oraz przykład obliczeniowy dla fragmentu sieci rozdzielczej.

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

1. WSTĘP

Na przestrzeni wielu lat w sieciach rozdzielczych następuje zmiana wielkości obciążenia mocą czynną powodowana zwiększającą się konsumpcją energii elektrycznej. Zmiany te mogą następować poprzez systematyczne narastanie poboru energii elektrycznej oraz przyspieszone tempo wzrostu jej zużycia (nowe gospodarstwa lub zakłady, duży przyrost produkcji). Związana w powyższych kwestiach modernizacja struktur elektroenergetycznych sieci rozdzielczych wymaga uwzględnienia zróżnicowanego wzrostu obciążenia na przestrzeni lat. Zmianie podlega struktura sieci i następuje sukcesywne przekształcanie jej w sieć wielokrotnie zamkniętą. W szczególności modernizacji podlegają linie (wymiana przewodów) oraz stacje transformatorowe (wymiana jednostek).

Przystępując do realizacji zadania rozwoju sieci przyjmuje się najczęściej założenia upraszczające dotyczące jednakowego wzrostu obciążenia transformatorów SN/nn w okresie obejmującym cały rozpatrywany horyzont czasowy. Projekt powinien jednak uwzględniać indywidualne prognozy wzrostu obciążeń wszystkich punktów odbioru oraz poszczególnych obszarów sieci. Ponadto, z uwagi na możliwą dużą dynamikę zmian obciążeń, wskazany jest podział przyjmowanego horyzontu czasowego na kilka podokresów.

W pracy przedstawiono problem dotyczący dostosowania jednostek transformatorowych do aktualnych poziomów obciążeń w sieci rozdzielczej średniego napięcia i zaproponowano jego rozwiązanie. Przy realizacji procesu wymiany transformatorów przyjęto horyzont czasowy podzielony na podokresy, których liczba została ustalona na podstawie analizy dynamiki zmian obciążenia. Parametrem wskazującym kierunek podejmowanych działań eksploatacyjnych jest całkowity koszt obejmujący wszystkie podokresy, dla których ustalono niezależne działania modernizacyjne.

U podstaw problemu zamiany lokalizacji transformatorów leży zagadnienie strat mocy i energii powstających w transformatorach [1]. Kwestia ta nie powinna być pomijana, gdyż może wpłynąć na zmianę obranej strategii doboru transformatorów.

2. OPTIMALIZACJA PRACY SIECI

2.1. Sformułowanie zadania optymalizacji

Podstawowym kryterium oceny efektywności pracy sieci rozdzielczych jest sprawność procesu dostarczania energii elektrycznej. W analizach techniczno-ekonomicznych zadanie to polega na wykonaniu obliczeń m.in. strat mocy i energii. Do ich wykonania wymagane jest sporządzenie modelu sieci, tj. określenie schematu połączeń, parametrów jej elementów oraz ustalenie obciążeń węzłów odbiorczych.

Straty techniczne w sieci można podzielić na związane i niezwiązane z jej konfiguracją. Pierwsze z nich zależą od układu połączeń elementów sieci (lokalizacji i stanu łączników). Druga część strat związana jest z wielkością obciążeń w punktach odbioru i parametrami zainstalowanych urządzeń.

Zmiany obciążeń w punktach poboru energii elektrycznej mogą wymuszać potrzebę weryfikacji parametrów urządzeń, np. transformatorów. Zmiany te zwykle nie są jednakowe we wszystkich obszarach sieci. Transformatory rozdzielcze różnią się mocą oraz parametrami znamionowymi. Optymalna ich lokalizacja powinna uwzględniać zatem zróżnicowany poziom obciążeń węzłów odbiorczych [2].

Sprawdzenie prawidłowego dopasowania mocy zainstalowanych transformatorów wymaga uwzględnienia wielu elementów, które mają wpływ na wartość funkcji celu. Są nimi: lokalizacje stacji SN/nn, stopień obciążenia i dane znamionowe transformatorów, koszty jednostkowe mocy i energii, ilość dostarczonej energii w ciągu roku. Wymienione czynniki wchodzi w skład funkcji celu $K_r(x)$ opisującej koszty roczne:

$$K_r(x) = \sum_{i=1}^o (K_l + K_{\Delta P} + K_{\Delta A})_i \quad (1)$$

gdzie: K_l - koszty przeniesienia transformatorów, $K_{\Delta P}$ - koszty strat mocy, $K_{\Delta A}$ - koszty strat energii, x - wektor zmiennych lokalizacji transformatorów, o - liczba okresów optymalizacji.

W celu obliczenia kosztów przeniesienia transformatorów oraz strat mocy i energii w poszczególnych okresach optymalizacji zastosowano rachunek dyskonta [3]:

$$K_{r0} = K_m (1 + p)^{-n} \quad (2)$$

gdzie: K_{r0} - dzisiejsza wartość kosztu rozwiązania (rok zero), K_{rn} - wartość kosztu rozwiązania w roku n -tym, p - stopa dyskonta.

2.2. Metoda rozwiązywania zadania optymalizacji

Sformułowane zadanie optymalizacji jest zadaniem dyskretnym ze względu na ustalone miejsca lokalizacji transformatorów, typ transformatorów i typoszereg mocy znamionowych. Zadanie to jest również zadaniem nieliniowym ze względu na występujący w zależności (1) składnik strat mocy i energii.

Opis algorytmu opracowanego dla zadania optymalizacji jednoetapowej przedstawiono w [4]. W niniejszym opracowaniu przedstawia się problem optymalizacji wieloetapowej. Przyjęto założenie polegające na realizacji procesu zamian transformatorów w ustalonej z góry liczbie podokresów.

Do rozwiązania przedstawionego problemu zastosowano algorytm ewolucyjny [5]. Taki algorytm operuje na całych grupach rozwiązań zadania, nazywanych populacjami [6]. Populacja składa się z osobników (chromosomów). Każdy osobnik, opisujący potencjalne rozwiązanie zadania, wyróżnia się określoną wartością funkcji przystosowania. Im wartość funkcji jest wyższa tym lepsze rozwiązanie reprezentuje dany osobnik.

Wykorzystanie algorytmu rozwiązywania zadania opartego na wzorcach ze świata przyrody (ewolucja) wiąże się z przekształceniem zadania minimalizacji w zadanie maksymalizacji. Przekształca się funkcję kosztu $K_r(x)$ w funkcję przystosowania $P(x)$, przy użyciu odpowiednio dobranej stałej C , według przepisu:

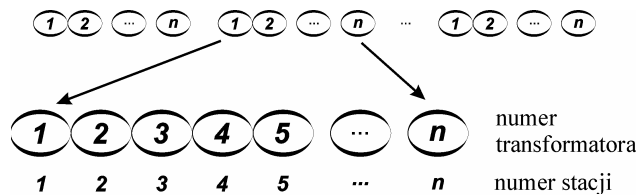
$$P(x) = C - K_r(x) \quad (3)$$

Zasada działania algorytmu polega na przekazywaniu nowym rozwiązaniom elementów poprzednio uzyskanych najlepszych rozwiązań, co zapewnia ukierunkowanie procesu obliczeniowego w stronę pożądanego wyniku. Schemat blokowy algorytmu ewolucyjnego przedstawiono na rysunku 1.

Cechy charakteryzujące każdy osobnik zakodowane są w postaci tzw. chromosomu (ciągu kodowego) o postaci przedstawionej na rysunku 2.



Rys. 1. Schemat blokowy algorytmu ewolucyjnego



Rys. 2. Chromosom z zaznaczeniem okresów optymalizacji (w powiększeniu jeden z podokresów z ustaloną lokalizacją transformatorów)

Pierwszym etapem procesu obliczeniowego jest utworzenie losowego zbioru rozwiązań, tzw. populacji początkowej. W następnej kolejności realizowane są cyklicznie mechanizmy procesu ewolucyjnego. W jego skład wchodzi:

- *selekcja i reprodukcja* - każdy z osobników populacji charakteryzuje się pewnym przystosowaniem, tj. użytecznością w środowisku, w którym występuje; najlepiej przystosowany osobnik powielony jest w największej liczbie egzemplarzy zgodnie z metodą selekcji losowej wg reszt z powtórzeniami [6];
- *inwersja* - dotyczy pojedynczego chromosomu; zmienia kolejność genów pomiędzy dwoma losowo wybranymi pozycjami w chromosomie; uzasadnieniem występowania w algorytmie operatora inwersji jest analogia do biologicznego procesu inwersji chromosomowej; stosowanie tego operatora sprzyja omijaniu ekstremów lokalnych oraz eliminacji zjawiska tzw. epistazy [6] (przy wysokiej współzależności genów);
- *krzyżowanie* - osobniki łączą się w pary i poprzez wymianę fragmentów kodu tworzą dwa nowe osobniki - w różnych proporcjach otrzymują cechy rodziców; takie połączenie cech daje szansę na powstanie osobników lepiej przystosowanych;
- *mutacja* - proces jest realizowany przez zmianę losowo wybranego genu danego chromosomu; wybrane osobniki obdarzane są nowymi cechami, przez co możliwe jest osiągnięcie rozwiązania innego, aniżeli przy pomocy w/w operatorów.

3. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

3.1. Charakterystyka wybranej sieci

Przykład obliczeniowy dotyczy sieci rozdzielczej 15 kV zlokalizowanej na terenie eksploatacji jednego z Zakładów Energetycznych w Polsce. Wybrany fragment sieci obejmuje 66 stacji transformatorowych 15/0,4 kV. Zainstalowane transformatory to jednostki o mocach 30÷250 kVA pracujące z obciążeniem w zakresie 10÷110,7 kVA (średnio: 33,3 kVA, tj. ok. 30% średniej mocy znamionowej). Zainstalowane transformatory były wyprodukowane na przestrzeni lat 1962-2002 (większość przed 1990r.). Analizowaną sieć podzielono

na trzy obszary o zróżnicowanych prognozach zmian obciążenia. W obszarze I (18 stacji) przyjęto wzrost o 1,5%/rok, w obszarze II (15 stacji) wzrost o 0,5%/rok. W pozostałym obszarze przyjęto wzrost obciążenia na poziomie 1%/rok. Powyższe zróżnicowanie prognozy wynika z planów zagospodarowania przestrzennego (obszar I - silnie zurbanizowany teren; obszar II - mała gęstość zaludnienia).

Do obliczeń przyjęto następujące jednostkowe składniki kosztów:

- montażu i demontażu transformatora – 1465 PLN (bez względu na moc jednostki),
- energii – 0,285 PLN/kWh,
- mocy – 87 PLN/kW/rok (z opłatą przejściową),
- transportu – 3,00 PLN/km.

Przyjęto prognozę wzrostu kosztów na poziomie 3%/rok i eskalacji cen na poziomie 5%/rok.

3.2. Założenia i ograniczenia zadania

Realizacja obliczeń wymagała zebrania danych dotyczących:

- lokalizacji stacji SN/nn,
- obciążeń szczytowych transformatorów 15/0,4 kV,
- kosztów przeniesienia transformatora obejmujących demontaż, montaż i transport,
- zainstalowanych w stacjach transformatorów i ich rzeczywistych parametrów znamionowych (w przypadku braku przyjmowano średnie wartości z okresu budowy transformatora).

Lokalizacje stacji SN/nn opisano przy pomocy współrzędnych umożliwiających wyznaczenie odległości transportowej pomiędzy poszczególnymi stacjami. Wymiana transformatora polegała na zastąpieniu transformatora jednostką z innej stacji (nie instalowano nowych transformatorów). Podstawą wyznaczenia kosztów strat mocy i energii w funkcji (1) były wartości obciążenia szczytowego oraz parametry transformatorów.

Przyjęto, że transformatory nie mogą pracować z obciążeniem przekraczającym moc znamionową. Z tego względu dowolna dyslokacja transformatorów nie jest możliwa. Ewentualne rozwiązania niedopuszczalne (m.in. przeciążenia) były przez program obliczeniowy, poprzez użycie operatorów ewolucyjnych i innych funkcji składowych, pomijane.

Horyzont czasowy analizy obejmował okres 15-stu lat. Podzielono go arbitralnie na 5 trzyletnich podokresów. W ustalonych podokresach czasu przyjęto, zgodnie z wcześniej podanymi informacjami, różnorodną zmianę poziomu obciążeń poszczególnych stacji. Zróżnicowanie prognoz oraz podział sieci na różne obszary umożliwiło wykazanie wpływu części składników funkcji celu na zakres wdrażanych inwestycji w kolejnych podokresach optymalizacji.

3.3. Wyniki i wnioski

Poniżej przedstawia się optymalną lokalizację transformatorów, otrzymaną w wyniku działania programu komputerowego. Na rysunku 3 przedstawiono przebieg procesu obliczeniowego algorytmu dla funkcji celu oraz dwóch jej najważniejszych składników.

Otrzymane wyniki wskazują na wymianę transformatorów w dwóch pierwszych podokresach (tablica 1). W pierwszym podokresie (lata 0-3) wymianie podlega 10 transformatorów. Przemieszczenia odbywały się w dwóch cyklach, tj. jednostki nie były zamieniane

parami, lecz przemieszczane kolejno z jednej stacji do drugiej aż do ustawienia we wskazanej konfiguracji. W drugim okresie (lata 4-6) wymianie podlega jedynie para transformatorów pracujących w stacjach nr 15 i 50.

Tablica 1. Wyszczególnienie zmian lokalizacji transformatorów

L.p.	Okres	Liczba zamian	Przemieszczenia transformatorów (podano nr stacji docelowych)
1	0-3 lat	5	16 → 36 → 43 → 66 → 46 → 16
2	0-3 lat	5	8 → 21 → 53 → 54 → 50 → 8
3	4-6 lat	2	15 ↔ 50

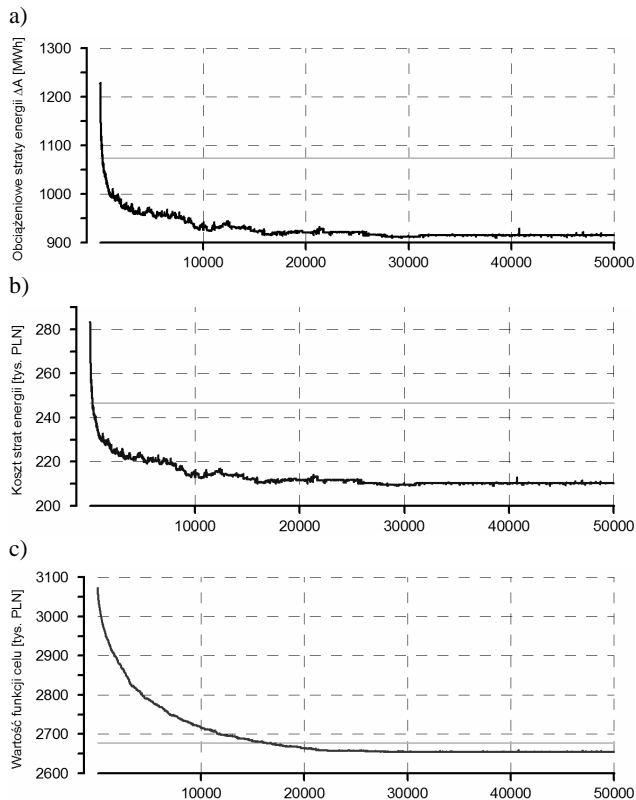
Tablica 2. Zestawienie zmiennych strat mocy ΔP i energii ΔE oraz wartości składników funkcji celu

	ΔP kW	ΔE MWh	$K_{\Delta P}$ tys. PLN	$K_{\Delta E}$ tys. PLN	$K_f(x)$ tys. PLN
Sieć istniejąca	22,48	1073,78	25,19	246,53	2 676,79
Sieć optymalna	19,16	915,12	21,48	210,24	2 654,07
Zysk	3,32	158,66	3,71	36,29	22,72
Różnica	14,8 %	14,8 %	14,7 %	14,7 %	0,85 %

Koszt rozwiązania pierwotnego wynosi 2 676 785,71 PLN. Realizacja wskazanego przez algorytm rozwiązania optymalnego umożliwia zmniejszenie kosztów w rozpatrywanym okresie o 22 713,88 PLN (0,85 %). Całkowicie odmiennie przedstawia się obraz porównania wartości poszczególnych składników funkcji celu, na które ma wpływ lokalizacja transformatorów. Znaczna część wartości funkcji celu (90,6 %) nie zależy od miejsca montażu transformatorów (straty biegu jałowego). Przedstawiono zatem po dalszej analizie wartości zmiennych kosztów strat mocy i energii. W tablicy 2 podano wartości kosztów przed i po optymalizacji oraz wielkość osiągniętego zysku. Zmiany lokalizacji transformatorów, poza kosztami demontażu, ponownego montażu i przewozu (17 281,72 PLN), pozwoliły na oszczędności związane z kosztami strat mocy i energii w wysokości blisko 40 tys. PLN. Na rysunku 4 przedstawiono prezentację graficzną udziału, zależnych od miejsca montażu transformatorów, składników funkcji celu.

W przeprowadzonych obliczeniach przyjęto:

- liczebność populacji - 36,
- liczba pokoleń - do 50 000,
- prawdopodobieństwo krzyżowania – 0,95,
- prawdopodobieństwo mutacji – 0,001,
- metodę selekcji z malejącym w trakcie obliczeń skalowaniem wartości przystosowania z 4,0 do 1,8;
- funkcję mutacji „warunkowej” (mutowana pozycja wymuszała także mutację na pozycji o innym numerze - wymiana elementów pomiędzy sobą) z zadaniem poziomem prawdopodobieństwa 0,001;
- funkcję inwersji eliminującą zjawisko epistazy, która uruchamiana była po każdym 50 cyklach pod warunkiem braku poprawy wyniku (inwersja co najwyżej 30 kolejnych genów);
- strategię elitarystyczną, polegającą na okresowym (z prawdopodobieństwem 0,02) wprowadzaniu osobnika o aktualnie najlepszym przystosowaniu.



Rys. 3. Wykresy zależności w kolejnych cyklach obliczeniowych: a) całkowitych strat energii, b) kosztów strat energii, c) wartości funkcji celu; linią poziomą pokazano w/w wielkości dla stanu istniejącego

4. PODSUMOWANIE

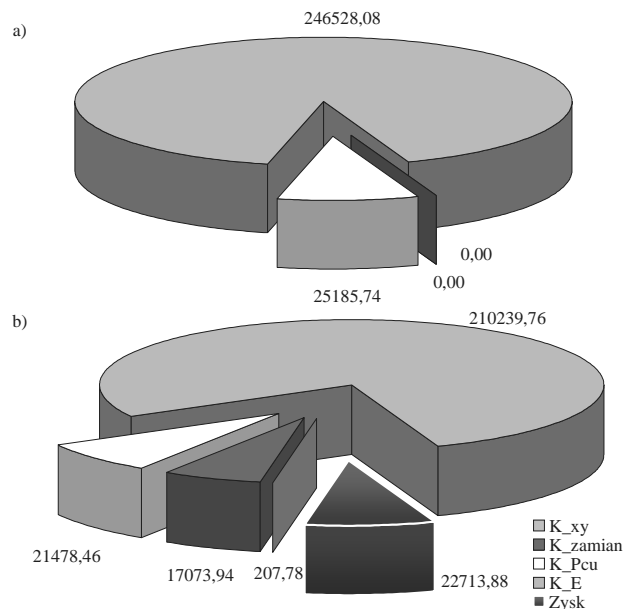
Minimalizacja kosztów funkcjonowania sieci jest konieczna z punktu widzenia dystrybutorów i odbiorców energii. Jednym z jej sposobów jest zmiana lokalizacji zainstalowanych w sieci transformatorów SN/nn. W niniejszym artykule przedstawiono algorytm i przykład obliczeniowy prezentujący opłacalność podjętych tego typu działań bezinwestycyjnych. Na podstawie przeprowadzonej analizy sformułowano ogólne wnioski:

- zmiana lokalizacji transformatorów (dopasowanie mocy) jest istotnym elementem ograniczania strat w sieciach rozdzielczych,
- optymalne rozwiązanie uzależnione jest od przyjętego horyzontu czasowego, ilości etapów optymalizacji oraz prognozowanej dynamiki zmian obciążeń stacji SN/nn,
- algorytm ewolucyjny jest odpowiednim narzędziem do rozwiązania przedstawionego w artykule problemu.

APPLICATION OF COMPUTERS IN MULTISTAGE OPTIMIZATION OF MIDDLE VOLTAGE TRANSFORMER STATION UTILIZATION

Key-words: power distribution networks, multistage optimization, evolutionary algorithm

The analysed task concerns the problem of exchange of MV/LV transformers for selected power distribution networks. The article concerns the problem of multistage optimization. Computational algorithm, computer implementation as well as computational example was introduced.



Rys. 4. Koszty zmienne [PLN]: a) sieć istniejąca, b) sieć zoptymalizowana; K_{xy} – koszty przewozu, K_{zamian} – koszty demontażu i montażu, K_{Pcu} – koszt strat mocy czynnej, K_E – koszt strat energii czynnej

5. BIBLIOGRAFIA

1. Marzecki J.: Modernizacja stacji transformatorowo-rozdzielczych SN/nn i 110 kV/SN – Część I. Metoda analizy i podstawowe założenia, Wiadomości Elektrotechniczne 8/2008, Warszawa Sigma-Not, str. 32-35, ISSN 0043-5112
2. Szpyra W.: Optymalna moc transformatorów instalowanych w sieciach rozdzielczych przy uwzględnieniu wzrostu obciążenia w okresie ich eksploatacji, Przegląd Elektrotechniczny 9/2006, Warszawa Sigma-Not, str. 75 – 77, ISSN 033-2097
3. Laudyn D.: Rachunek ekonomiczny w elektroenergetyce, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 1999, str. 46-63, ISBN 83-7207-100-4
4. Gancarz A., Bąchorek W.: Wybór optymalnej strategii eksploatacji stacji transformatorowych w sieciach rozdzielczych SN, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej 25/2008, str. 41-44, ISSN 1425-5766
5. Michalewicz Z.: Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne, Warszawa WNT 2003, ISBN 83-204-2200-0
6. Goldberg D.E.: Algorytmy genetyczne i ich zastosowania, Warszawa WNT 1998, str. 23, 26, 136, 178-194, ISBN 83-204-2272-8