

POLITECHNIKA ŁÓDZKA

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, ELEKTRONIKI,

INFORMATYKI I AUTOMATYKI

INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI

Streszczenie rozprawy doktorskiej

**Redukcja strat mocy w sieciach elektroenergetycznych
przy zastosowaniu algorytmów selektywnej
optymalizacji rojowej**

Tamer Mohamed Khalil Selim

Opiekun:

dr hab. Irena Wasiak, prof. PŁ

Opiekun pomocniczy:

dr Alexander Gorpinich

Łódź, Polska

2015

Spis treści

1. Wstęp	3
1.1. Uzasadnienie tematu	3
1.2. Cel i teza rozprawy	4
2. Metoda Optymalizacji Rojowej (PSO)	6
2.1. Podstawowa wersja metody PSO	6
2.2. Binarna metoda PSO (BPSO)	7
2.3. Selektywna Optymalizacja Rojowa (SPSO)	7
3. Implementacja metody SPSO do rozwiązania problemu optymalizacji strat mocy w sieciach dystrybucyjnych	9
3.1. Obliczenia rozplywów mocy i strat mocy w sieciach dystrybucyjnych	9
3.2. Sformułowanie problemu	
4. Testowanie algorytmu SPSO na modelach sieci	14
5. Zastosowanie algorytmu SPSO do optymalizacji strat w sieci rzeczywistej....	15
5.1. Opis sieci dystrybucyjnej	15
5.2. Implementacja algorytmu	18
5.3. Wyniki obliczeń	23
6. Wnioski	31
Literatura	33

1. Wstęp

1.1. Uzasadnienie tematu

Straty mocy w sieciach dystrybucyjnych zmniejszają efektywność procesu dostawy energii elektrycznej i są źródłem strat ekonomicznych dla przedsiębiorstw dystrybucyjnych. Zmniejszenie strat mocy i poprawa profilu napięciowego jest dla zakładów energetycznych zadaniem o wysokim priorytecie. W tym celu można wykorzystać jedną lub kilka dostępnych technik redukcji strat. Do najczęściej stosowanych technik należą: tj. instalowanie baterii kondensatorów do zmiany rozptyłu mocy biernej, zmiana konfiguracji sieci oraz zmiana przekroju przewodów. Wyboru najkorzystniejszej w danym przypadku techniki dokonuje się przez porównanie poniesionych kosztów oraz uzyskanych zysków.

Zastosowanie wymienionych technik redukcji strat w rzeczywistych sieciach dystrybucyjnych jest problemem wielozadaniowego mieszanego programowania nieliniowego z ograniczeniami równościowymi i nierównościowymi. Nieliniowość problemu wynika z obliczeń rozptyłów mocy i nieliniowej relacji stosunku kosztów do mocy baterii kondensatorów. Istotnymi elementami zagadnienia, które należy uwzględnić w sformułowaniu funkcji celu są: czasowa zmienność obciążenia sieci i możliwość zniekształcenia napięcia zasilającego. Ograniczenia dotyczą wartości napięć w węzłach sieci oraz obciążalności przewodów linii. Rozwiązaniem problemu są wartości dyskretne poszukiwanych wielkości.

Opracowano wiele algorytmów obliczeniowych do rozwiązania problemu redukcji strat, przy wykorzystaniu tradycyjnych (gradientowych) i nowoczesnych metod optymalizacji. Metody tradycyjne są intuicyjne i łatwe do zrozumienia, lecz mało efektywne w zastosowaniu do dużych sieci elektroenergetycznych, szczególnie w przypadkach, w których przestrzeń poszukiwania obejmuje zmienne dyskretne. Większość metod tradycyjnych ma tendencję do utykania w minimach lokalnych, co prowadzi do rozwiązań suboptymalnych w przypadku problemów, które mają wiele lokalnych wartości optymalnych. Nowoczesne metody optymalizacji oparte są na heurystyce i sztucznej inteligencji. W porównaniu z metodami tradycyjnymi, są elastycznym i efektywnym narzędziem w rozwiązywaniu skomplikowanych problemów optymalizacji.

W ostatnim czasie przedmiotem dużego zainteresowania stała się metoda optymalizacji rojem cząstek (*Particle Swarm Optimization - PSO*), mająca potencjał metody optymalizacji globalnej. W rozprawie zastosowano metodę PSO do rozwiązania opisanego problemu optymalizacji strat mocy w elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej przy wykorzystaniu następujących technik redukcji: zmiana rozpywu mocy biernej za pomocą baterii kondensatorów, zmiana konfiguracji przewodów oraz przekroju przewodów. Wybór metody podyktowany został następującymi względami: 1) łatwość opisu i realizacji algorytmu, 2) duża szybkość działania, 3) elastyczność w zastosowaniu do rozwiązywania różnych zagadnień przez dostosowanie parametrów i topologii populacji, 4) skuteczność, przy zachowaniu różnorodności potencjalnych rozwiązań.

Podstawowy algorytm PSO przeznaczony był jedynie do rozwiązywania problemów optymalizacji ciągłej nieliniowej. Rozwój metody doprowadził do opracowania algorytmu binarnego PSO, co zwiększyło możliwości metody w znajdowaniu rozwiązań dla szerokiej klasy złożonych zagadnień optymalizacji inżynierskiej i naukowej. Zastosowanie metody PSO do optymalizacji strat mocy w sieciach dystrybucyjnych wymaga modyfikacji binarnego algorytmu PSO i opracowania algorytmu umożliwiającego poszukiwanie w przestrzeni decyzyjnej rozwiązań dyskretnych.

1.2. Cel i teza rozprawy

Głównym celem rozprawy jest opracowanie prostego algorytmu poszukiwania optymalnego rozwiązania w wybranej przestrzeni rozwiązań przy wykorzystaniu metody PSO i implementacja opracowanego algorytmu do rozwiązania problemu optymalizacji strat mocy w rzeczywistej sieci dystrybucyjnej przy zastosowaniu trzech wybranych technik redukcji, tj. instalowania baterii kondensatorów, rekonfiguracji sieci i zmiany przekroju przewodów.

Sformułowano następującą tezę rozprawy:

Zastosowanie binarnej metody PSO z modyfikacją polegającą na transformacji współrzędnych cząstek roju do wybranej przestrzeni rozwiązań, umożliwia efektywne rozwiązywanie problemów minimalizacji strat mocy czynnej w sieciach dystrybucyjnych za pomocą następujących technik: instalowanie baterii kondensatorów, rekonfiguracja sieci i zmiana przekroju przewodów.

Dla realizacji postawionych celów i udowodnienia tezy rozprawy wykonano następujące badania szczegółowe:

- Kompleksowa analiza skuteczności stosowania różnych technik redukcji strat mocy w sieciach dystrybucyjnych.
- Przegląd metod optymalizacyjnych stosowanych do rozwiązania problemu minimalizacji strat mocy czynnej w sieciach dystrybucyjnych przy zastosowaniu różnych technik redukcji
- Analiza wpływu wyższych harmoniczných i asymetrii napięcia na rozwiązanie problemu lokalizacji baterii kondensatorów zapewniającej minimalizację strat mocy w sieci dystrybucyjnej.
- Przeprowadzenie badań testujących opracowanego algorytmu selektywnej optymalizacji rojowej (SPSO) dla przykładowych sieci testowych prezentowanych w literaturze, w celu wykazania jego poprawności oraz efektywności.
- Ilościowa ocena korzyści ekonomicznych uzyskanych przy wykorzystaniu opracowanego algorytmu w celu optymalizacji strat mocy w sieci rzeczywistej.

Poprawność opracowanego algorytmu oceniono poprzez porównanie otrzymanych za jego pomocą rozwiązań, z rozwiązaniami uzyskanymi za pomocą innych metod dla tych samych sieci testowych prezentowanych w literaturze. Następnie wykazano skuteczność i efektywność algorytmu w rozwiązaniu problemu optymalizacji strat mocy w rzeczywistej sieci dystrybucyjnej miasta Mariupol na Ukrainie. Przy wykorzystaniu opracowanego algorytmu określono lokalizację i moc baterii kondensatorów, dobór przekroju przewodów oraz konfigurację sieci, zapewniające minimalne straty mocy oraz poprawę profilu napięciowego, przy zachowaniu wymagań dotyczących jakości napięcia zasilającego. Oceniono efekty ekonomiczne jakie może uzyskać przedsiębiorstwo energetyczne zajmujące się eksploatacją sieci na skutek minimalizacji strat.

2. Metoda optymalizacji rojowej (Particle Swarm Optimization - PSO)

2.1. Podstawowa wersja metody PSO

Algorytm optymalizacji rojem cząstek PSO został opracowany przez Kennedy'ego i Eberharta w 1995 [1]. W algorytmie każde indywidualne możliwe rozwiązanie może być zamodelowane jako cząstka przemieszczająca się przez hiperprzestrzeń problemu. Zbiór cząstek tworzy rój. Każda cząstka śledzi własne położenie i prędkość w przestrzeni problemu. Początkowa pozycja i prędkość cząstki generowane są losowo. W kolejnych iteracjach wyznaczane są: bieżąca pozycja cząstki X_i , bieżąca prędkość cząstki Vel_i , najlepsze położenie cząstki osiągnięte dotychczas, zwane położeniem o najlepszym dopasowaniu (*particle best - PB*) oraz położenie o najlepszym dopasowaniu odkryte przez cały rój (*global best - GB*).

Założmy, że przestrzeń poszukiwania S jest D -wymiarowa, wówczas:

- Każda cząstka w roju (cząstka i), traktowana jako punkt w D -wymiarowej przestrzeni, jest opisana wektorem $\mathbf{X}_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$.
- Zbiór n cząstek w roju nazywany jest populacją i opisywany jako: $\text{pop} = [\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n]$
- Najlepsze znalezione przez cząstkę położenie opisywane wektorem: $\text{PB}_i = [pb_{i1}, pb_{i2}, \dots, pb_{iD}]$
- Najlepsze położenie znalezione przez wszystkie cząstki zwane jest globalnie najlepszym i opisywane wektorem $\text{GB} = [gb_1, gb_2, \dots, gb_D]$.
- Stopień zmiany położenia każdej cząstki nazywany jest prędkością cząstki i opisywany jako: $\text{Vel}_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}]$
- W k -tej iteracji prędkość i -tej cząstki we współrzędnej d jest aktualizowana zgodnie z zależnością:

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1 r_1 (pb_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (gb_d^k - x_{id}^k) \quad (1)$$

gdzie c_1 and c_2 są stałymi przyspieszenia, r_1 i r_2 wartościami losowymi z przedziału $[0,1]$, a w współczynnik inercji

- W k -tej iteracji położenie i -tej cząstki jest wyznaczane zgodnie z zależnością

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (2)$$

2.2. Binarna metoda PSO

Wersja binarna metody PSO [2] polega na modyfikacji metody podstawowej, polegającej na odwzorowaniu przestrzeni liczb rzeczywistych przestrzenią binarną d -wymiarową B^d (tzn. ciągami bitów o długości d). W modelu binarnym PSO położenia cząstek muszą oczywiście należeć do przestrzeni B^d . Uzyskuje się to przez zastosowanie transformacji sigmoidalnej do składnika prędkości cząstek, jak w równaniu (3). Przekształcenie to sprowadza prędkości do zakresu $[0, 1]$ i wymusza wartości 0 lub 1 dla pozycji cząstek. Równanie aktualizacji pozycji (2) zostaje zastąpione równaniem (4).

$$\text{sigmoid}(v_{id}^k) = \frac{1}{1 + e^{-v_{id}^k}} \quad (3)$$

$$x_{id}^k = \begin{cases} 1, & \text{if } \text{rand} < \text{sigmoid}(v_{id}^k) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

2.3. Selektowna Optymalizacja Rojowa (Selective Particle Swarm Optimization - SPSO)

Zagadnienia optymalizacji o charakterze dyskretnym pojawiają się często w praktyce inżynierskiej. W takich przypadkach obliczone wartości zmiennych muszą być skorygowane do ich wartości standaryzowanych. Przykładem tego typu zagadnień jest optymalny dobór baterii kondensatorów do kompensacji mocy biernej lub optymalny dobór przekrojów przewodów w sieciach dystrybucyjnych. W niniejszej pracy zaproponowano modyfikację algorytmu binarnej metody PSO, którego celem jest wybór optymalnego rozwiązania z wybranej przestrzeni rozwiązań. Przestrzeń ta może być określona zbiorem wartości standaryzowanych baterii kondensatorów lub wartości przekrojów przewodów. Proponowany algorytm określono mianem selektywnego PSO (SPSO).

W podstawowym algorytmie PSO przeszukiwana przestrzeń jest przestrzenią wartości rzeczywistych. W modelu binarnym PSO przestrzeń tę tworzy zbiór wartości zero-jedynkowych. Natomiast w modelu SPSO przeszukiwana przestrzeń jest zbiorem wartości wybranych, które mogą być różne dla każdej współrzędnej (każdego wymiaru). Na przykład dla wymiaru d przeszukiwana przestrzeń (S_d) jest zbiorem dn wartości ($S_d = [s_{d1}, s_{d2} \dots s_{dn}]$). Podobnie do PSO i binarnej PSO, należy zdefiniować funkcję F

i wymiary przestrzeni poszukiwań. Różnica polega na tym, dla każdego wymiaru d znajduje się rozwiązanie spośród dn wartości, które reprezentują selektywną przestrzeń S_d . Mówiąc inaczej, położenie każdej cząstki zmienia się z punktu w przestrzeni wartości rzeczywistych lub binarnych na punkt w przestrzeni selektywnej. Zmiana taka wymaga zastosowania transformacji sigmoidalnej opisanej równaniem (5), a i -te położenie cząstki w wymiarze d wyznaczane jest zgodnie z równaniami (6)

$$\text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) = dn \frac{1}{1 + e^{-v_{id}^{k+1}}} \quad (5)$$

$$x_{id}^{k+1} = \begin{cases} sd1 & \text{if } \text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) < 1 \\ sd2 & \text{if } \text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) < 2 \\ sd3 & \text{if } \text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) < 3 \\ \cdot & \cdot \cdot \\ \cdot & \cdot \cdot \\ \cdot & \cdot \cdot \\ sdn & \text{if } \text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) \leq dn \end{cases} \quad (6)$$

gdzie, $sd1, sd2, sd3, \dots, sdn$ są wybranymi wartościami dla wymiaru d .

Wartości prędkości są ograniczone do pewnych minimalnych i maksymalnych wartości [Vel_{\min}, Vel_{\max}] za pomocą równania (7)

$$v_{id}^{k+1} = \begin{cases} Vel_{\max} & \text{if } v_{id}^{k+1} > Vel_{\max} \\ v_{id}^{k+1} & \text{if } |v_{id}^{k+1}| \leq Vel_{\max} \\ Vel_{\min} & \text{if } v_{id}^{k+1} < Vel_{\min} \end{cases} \quad (7)$$

W celu uniknięcia niezmienności wartości prędkości cząstki i w wymiarze d przy wartości maksymalnej lub minimalnej oraz uniknięcia oscylacji wartości prędkości cząstki i pomiędzy wartością maksymalną i minimalną, należy wymusić przejście każdej cząstki poprzez przestrzeń poszukiwań, stosując równanie (8).

$$v_{id}^{k+1} = \begin{cases} rand * v_{id}^{k+1} & \text{if } |v_{id}^{k+1}| = |v_{id}^k| \\ v_{id}^{k+1} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

Podsumowując, zastosowanie proponowanej metody SPSO do rozwiązania określonego problemu optymalizacji wymaga kolejno:

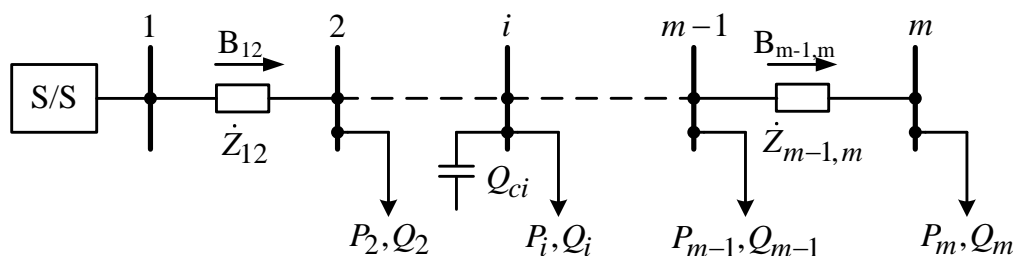
- Określenia liczby wymiarów przestrzeni poszukiwań,
- Znalezienia zbioru rozwiązań dla każdego wymiaru,
- Zastosowania algorytmu SPSO do znalezienia rozwiązania w każdym wymiarze przestrzeni poszukiwań za pomocą równań (1), (7), (8), (5) oraz (6).

3. Implementacja metody SPSO do rozwiązania problemu optymalizacji strat mocy w sieciach dystrybucyjnych

W prezentowanej rozprawie algorytm SPSO został zastosowany do rozwiązania problemu optymalizacji strat mocy w sieci dystrybucyjnej, przy zastosowaniu różnych technik redukcji strat, różnym sformułowaniu problemu i różnych założeniach. W celu zbadania efektywności algorytmu, uzyskane wyniki porównano z wynikami otrzymanymi za pomocą innych metod optymalizacji dla tych samych sieci testowych, podanymi w literaturze. Zależności, według których dokonywane było wyznaczenie rozptyłów prądów i strat mocy w sieciach opisano poniżej.

3.1. Analiza rozptyłów i strat mocy w sieciach dystrybucyjnych

Analizę rozptyłów mocy przeprowadzono dla symetrycznej sieci m-węzłowej o konfiguracji magistralnej, przedstawionej na rys. 1. Do węzłów sieci przyłączone są odbiory, a ponadto w węźle i sieci przyłączona jest bateria kondensatorów.



Rys. 1. Schemat sieci dystrybucyjnej m-węzłowej

Analizę rozplywu mocy dla harmonicznej podstawowej i wyższych harmonicznych przeprowadzono według podanego poniżej schematu [3], [4].

- Obliczenie amplitud i kątów fazowych napięć węzłowych dla częstotliwości podstawowej według [5],
- Obliczenie strat mocy dla częstotliwości podstawowej za pomocą równań (9) i (10),
- Obliczenie prądów podstawowej i h -tej harmonicznej, obliczenie admitancji odbiorów, kondensatorów oraz linii dla h -tej harmonicznej, odpowiednio za pomocą równań (11)-(15),
- Obliczenie harmonicznych napięcia według równania (16),
- Obliczenie wartości skutecznej i współczynnika całkowitego zniekształcenia napięcia odpowiednio według wzorów (18) i (19).

$$P_{loss(i,i+1)} = R_{i,i+1} [|V_{i+1} - V_i| |y_{i,i+1}|]^2 \quad (9)$$

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^m P_{loss(i,i+1)} \quad (10)$$

$$I_i^1 = (P_i - jQ_i) / (V_i^1)^* \quad (11)$$

$$I_i^h = w_i I_i^1 / h \quad (12)$$

$$y_{li}^h = (1 - w_i) \left(\frac{P_i}{|V_i^1|^2} - j \frac{Q_i}{h |V_i^1|^2} \right) \quad (13)$$

$$y_{ci}^h = h y_{ci}^1 \quad (14)$$

$$y_{i,i+1}^h = (R_{i,i+1} + jhX_{i,i+1})^{-1} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} Y_{11}^h & Y_{12}^h & 0 & & 0 \\ Y_{21}^h & Y_{22}^h & \cdot & & \\ 0 & \cdot & \cdot & & \\ \cdot & & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & & \cdot & Y_{m-1,m-1}^h & Y_{m-1,m}^h \\ 0 & & 0 & Y_{m,m-1}^h & Y_{m,m}^h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^h \\ V_2^h \\ \cdot \\ \cdot \\ V_{m-1}^h \\ V_m^h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1^h \\ I_2^h \\ \cdot \\ \cdot \\ I_{m-1}^h \\ I_m^h \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$Y_{ij}^h = \begin{cases} -y_{ij}^h & \text{if } j \neq i \\ y_{i-1,i}^h + y_{i+1,i}^h + y_{li}^h + y_{ci}^h & \text{if } j = i \in S_c \end{cases} \quad (17)$$

$$|V_i| = \sqrt{\sum_{h=1}^H |V_i^h|^2} \quad (18)$$

$$THD_i(\%) = \frac{100}{|V_i^1|} \sqrt{\sum_{h \neq 1}^H |V_i^h|^2} \quad (19)$$

Wielkości występujące w powyższych wzorach oznaczają:

m	liczba węzłów
$R_{i,i+1}, y_{i,i+1}$	odpowiednio rezystancja i admitancja gałęzi pomiędzy węzłami i oraz $i+1$,
w_i	nieliniowa część obciążenia w węźle i
$(V_i^1)^*$	wartość zespolona sprzężona napięcia o częstotliwości podstawowej w węźle i
P_i, Q_i	moc czynna i bierna odbioru w węźle i
S_c	zbiór węzłów kandydujących do lokalizacji baterii kondensatorów
H	maksymalny rząd harmonicznej uwzględnianej w rozważaniach
V_i^h	h -ta harmoniczna napięcia w węźle i

Po obliczeniu napięć i admitancji dla poszczególnych harmonicznych, wyznacza się straty mocy czynnej według zależności (20) and (21):

$$P_{loss(i,i+1)}^h = R_{i,i+1} [|V_{i+1}^h - V_i^h| |y_{i,i+1}^h|]^2 \quad (20)$$

$$P_{loss} = \sum_{h=1}^H \left(\sum_{i=1}^{m-1} P_{loss(i,i+1)}^h \right) \quad (21)$$

3.2. Sformułowanie problemu

Zastosowanie modelu SPSO do dowolnego zagadnienia wymaga określenia wymiaru przestrzeni poszukiwań oraz znalezienie zbioru rozwiązań dla każdego wymiaru.

W zagadnieniu redukcji strat za pomocą instalowania baterii kondensatorów, rekonfiguracji sieci i zmiany przekroju przewodów występuje wiele zmiennych, takich jak: typ kondensatora (o stałej lub zmiennej mocy) i wielkość kondensatora, jego lokalizacja w sieci, rodzaj gałęzi (z łącznikiem sekcyjnym lub łącznikiem podziału sieci), rodzaj przewodu, itp.

W zagadnieniu redukcji strat przy zastosowaniu baterii kondensatorów do kompensacji mocy biernej, liczba wymiarów przestrzeni poszukiwań równa się liczbie węzłów przewidzianych do lokalizacji baterii. Dla każdego wymiaru określona jest podprzestrzeń poszukiwań, której elementami są określone wartości mocy baterii kondensatorów.

Przy zastosowaniu rekonfiguracji sieci, liczba wymiarów przestrzeni równa się liczbie oczek sieci, utworzonych po zamknięciu wszystkich łączników podziału sieci. Elementy każdego wymiaru tworzy zbiór łączników, które należą do każdego oczka sieci.

Przy zastosowaniu zmiany przekroju przewodów, liczba wymiarów przestrzeni równa się liczbie kandydujących gałęzi. Podprzestrzenie poszukiwań w każdym wymiarze tworzą zbiory standardowych przekrojów przewodów.

Przy jednoczesnym uwzględnieniu wszystkich rozpatrywanych metod redukcji, liczba wymiarów przestrzeni poszukiwań jest sumowana. Zakładając, że sieć dystrybucyjna zawiera m węzłów i n gałęzi, a liczba potencjalnych oczek wynosi p , liczba wymiarów przestrzeni poszukiwań równa się $d=m+n+p$. Z kolei, wymiar wektora rozwiązań w każdym wymiarze m -wymiarowej podprzestrzeni poszukiwań jest równy liczbie dostępnych wielkości baterii kondensatorów g , a wymiar wektora rozwiązań w każdym wymiarze n -wymiarowej podprzestrzeni poszukiwań jest równy liczbie dostępnych przekrojów przewodów b . Wymiary wektora rozwiązań dla podprzestrzeni poszukiwań p różnią się zależnie od liczby łączników przynależnych do każdego oczka sieci.

Funkcja celu, zdefiniowana dla rozwiązania problemu optymalizacji strat mocy w sieci przy zastosowaniu rozważanych technik redukcji, ma następującą postać:

$$\text{Minimize } F = K^p P_{loss,l} + \sum_{l=1}^L K^e E_{loss,l} + \sum_{b=1}^{Br} K_b^{con} L_b + K^c \quad (22)$$

gdzie:

$P_{loss,l}$ - straty mocy czynnej, obliczane przy maksymalnym poziomie obciążenia za pomocą równania (23) poniżej, przy założeniu $l=1$,

K^p - ekwiwalentny roczny koszt jednostkowych strat mocy,

$E_{loss,l}$ - roczne straty energii, obliczone dla różnych poziomów obciążenia l za pomocą równań (23) i (24) poniżej,

K^e - ekwiwalentny roczny koszt jednostkowych strat energii,

L - liczba poziomów obciążenia,

K_b^{con} - roczny koszt przewodów/km,

L_b - długość przewodów w km,

Br - liczba gałęzi przewidzianych do zmiany przekroju przewodów,

K^c - koszt kondensatorów obliczony za pomocą równania (25) poniżej.

$$P_{loss,l} = \sum_{h=1}^H \left(\sum_{b=1}^B P_{loss,l(b)}^h \right) \quad (23)$$

W równaniu (23) wielkość $P_{loss,l(b)}^h$ oznacza straty mocy dla h -tej harmonicznej prądu na poziomie l -tego obciążenia w gałęzi b , B oznacza liczbę gałęzi, a H jest górną wartością graniczną rozważanego rzędu harmonicznej.

$$E_{loss,l} = T_l P_{loss,l} \quad (24)$$

gdzie T_l oznacza czas trwania obciążenia na poziomie l .

$$K^c = \sum_{i \in S_c} (k_f^c u_{fi}^l + k_s^c u_{si}^l) \quad (25)$$

gdzie u_{fi}^l i u_{si}^l oznaczają wielkości, odpowiednio baterii kondensatorów stałych i przełączanych, umieszczonych na l -tym poziomie obciążenia i w i -tym węźle. k_f^c i k_s^c oznaczają standardowe koszty tych baterii.

Dla każdego poziomu obciążenia powinny być spełnione następujące ograniczenia:

$$1. B_b \leq B_{b \max} \quad (26)$$

gdzie B_b oznacza prąd w gałęzi b , a $B_{b \max}$ dopuszczalną wartość tego prądu.

$$2. U_{imin} \leq U_i \leq U_{imax} \quad (27)$$

gdzie U_i oznacza wartość skuteczną napięcia w węźle i , a U_{imin} i U_{imax} są odpowiednio minimalną i maksymalną wartością dopuszczalną tego napięcia.

$$3. THD_{il} \leq THD_{max} \quad (28)$$

gdzie THD_{il} jest współczynnikiem całkowitego odkształcenia napięcia w węźle i przy obciążeniu na poziomie l , a THD_{max} jest maksymalną wartością dopuszczalną całkowitego odkształcenia.

$$4. \sum_{i=1}^M Q_i^c \leq Q_t \quad (29)$$

gdzie Q_i^c jest mocą baterii kondensatorów przyłączonych do węzła i , M oznacza zbiór węzłów do lokalizacji baterii kondensatorów, Q_t jest całkowitym zapotrzebowaniem na moc bierną.

5. Konfiguracja sieci jest otwarta. Dla każdego węzła istnieje tylko jedna droga połączenia ze stacją zasilającą.

4. Testowanie algorytmu SPSO na modelach sieci

Opracowany model SPSO został zastosowany do rozwiązania problemu redukcji strat za pomocą różnych technik redukcji, przy różnym sformułowaniu problemu i przy różnych założeniach. Uzyskane wyniki porównano z wynikami otrzymanymi za pomocą innych metod optymalizacji dla tych samych sieci testowych, a mianowicie heurystycznego algorytmu numerycznego, algorytmu *exhaustive search*, algorytmu genetycznego, algorytmu symulowanego rekrytalizowania (*simulated annealing*) i kolonii mrówek (*ant colony*).

Rodzaje przeprowadzonych testów podsumowano poniżej.

1. Optymalny dobór i lokalizację baterii kondensatorów z uwzględnieniem wpływu harmoniczných napięcia.

2. Optymalna lokalizacja baterii kondensatorów w obecności harmonicznych napięcia przy zmiennym obciążeniu sieci.
3. Optymalna lokalizacja baterii kondensatorów przy uwzględnieniu: sprzężeń pomiędzy fazami, niesymetrii obciążenia oraz harmonicznych napięcia zasilającego
4. Optymalna rekonfiguracja sieci
5. Jednoczesna rekonfiguracja sieci oraz instalowanie baterii kondensatorów
6. Jednoczesna zmiana przekroju przewodów oraz lokalizacja baterii kondensatorów.

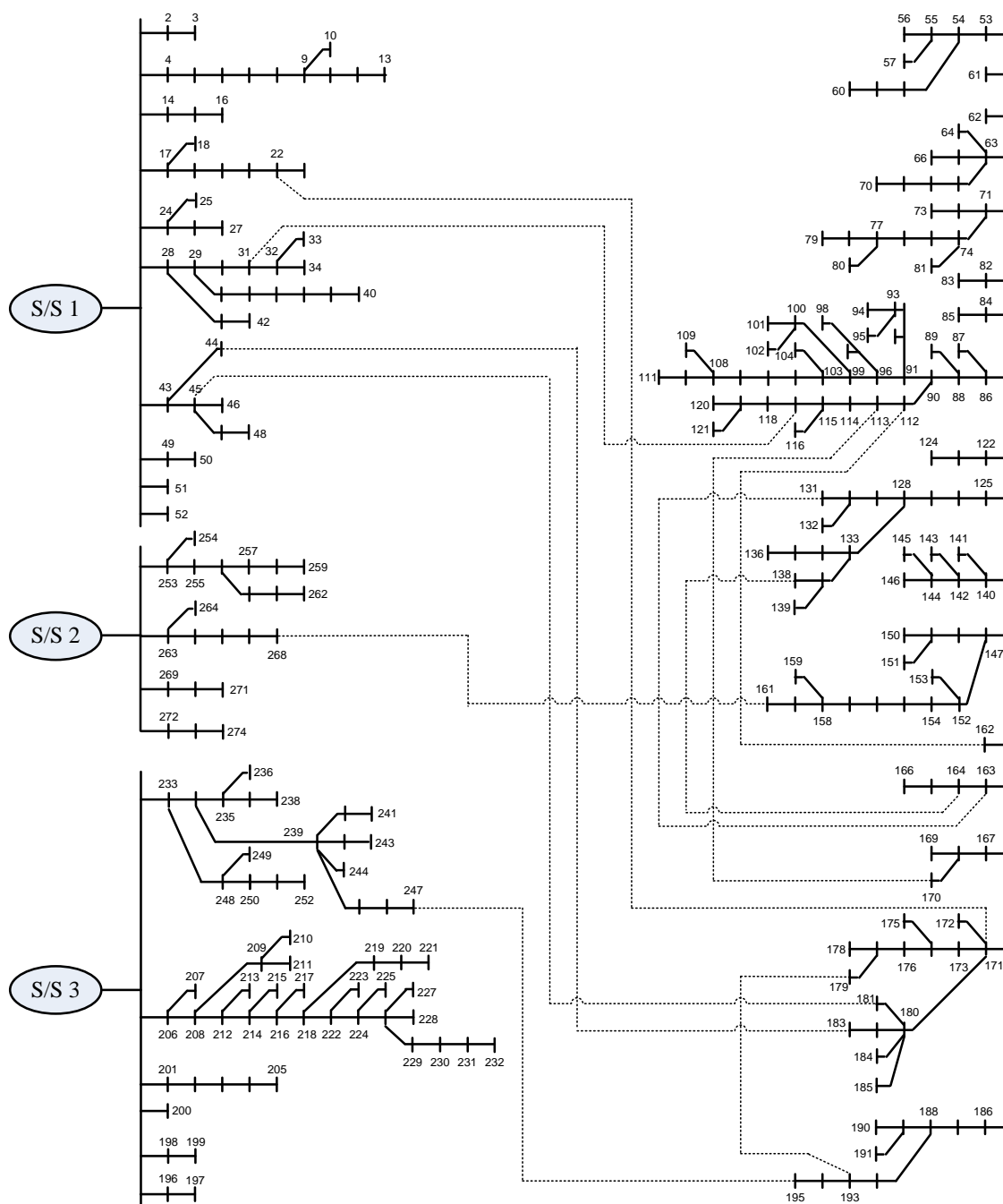
Na podstawie przeprowadzonych testów można sformułować następujące wnioski:

- Proponowany model SPSO jest niezawodny, łatwy do implementacji i może być korzystną alternatywą dla innych metod w ogólnej optymalizacji redukcji strat mocy w sieciach dystrybucyjnych.
- Instalowanie baterii kondensatorów do kompensacji mocy biernej, rekonfiguracja sieci dystrybucyjnej i zmiana przekroju przewodów stanowią efektywne metody redukcji strat mocy i polepszenia profilu napięciowego.
- Istnieją znaczące różnice w rozwiązaniu tego samego zagadnienia, w zależności od tego jakie założenia lub ograniczenia zostaną uwzględnione.
- Jednoczesne uwzględnienie więcej niż jednej metody redukcji strat mocy jest bardziej efektywne niż oddzielne stosowanie tych metod.

5. Zastosowanie algorytmu SPSO do optymalizacji strat w sieci rzeczywistej

5.1. Opis sieci dystrybucyjnej

Proponowana metoda SPSO została zastosowana do optymalizacji strat mocy w rzeczywistej 3-fazowej sieci dystrybucyjnej o napięciu znamionowym 6 kV, znajdującej się we wschodniej części miasta Mariupol na Ukrainie (rys. 2). Sieć składa się z 37 linii zasilanych z trzech podstacji, 274 węzłów i 284 gałęzi, z których 273 jest normalnie zamkniętych (włączniki sekcyjne) i 11 normalnie otwartych (łączniki podziału sieci).



Rys. 2. Uproszczony schemat sieci 6 kV zasilającej wschodnią część miasta Mariupol na Ukrainie

Na podstawie analizy sieci i przeprowadzonych pomiarów określono następujące dane i założenia do obliczeń:

- Obciążenie sieci jest symetryczne.
- Napięcie w stacjach zasilających wynosi 6.35 kV (about 1.06 p.u.).

- Obciążenie sieci odwzorowano za pomocą wykresu schodkowego o trzech poziomach wartości: niskim, średnim i wysokim, stanowiących odpowiednio 26%, 49% i 91% obciążenia znamionowego transformatora zasilającego. Czasy trwania poszczególnych wartości obciążenia wynoszą odpowiednio: 1752, 5256 i 1752 godzin w roku.
- Współczynnik mocy obciążenia wynosi 0.85.
- Napięcie zasilające zawiera harmoniczne rzędów 3, 5 i 7, o wartościach odpowiednio 1.5%, 3.5% i 1.5% harmonicznej podstawowej. Współczynnik THD napięcia wynosi 3.9%.
- W schemacie sieci znajduje się 8 gałęzi o niezidentyfikowanych danych. Dla gałęzi tych przyjęto wartości: rezystancji - 0.125 Ω /km, reaktancji - 0.071 Ω /km i długości -1 km.
- Do zmiany przekroju przewodów przeznaczonych jest 258 spośród 284 gałęzi sieci.
- Wszystkie gałęzie danej pętli są gałęziami kandydującymi do rekonfiguracji
- Minimalna moc baterii kondensatorów do kompensacji mocy biernej wynosi $Q_{c0}=50$ kVar, natomiast maksymalna $Q_{cmax}= 800$ kVar. Stopień zmiany mocy baterii wynosi 50 kVar.
- Koszt baterii kondensatorów podany jest w tabeli 1. Dane oraz koszty przewodów linii podane są w tabelach 2 i 3. Ceny określono przy założeniu, że czas życia baterii i przewodów wynosi 10 lat.
- Jednostkowe koszty strat mocy i energii wynoszą odpowiednio $K^p = 168$ \$/kW i $K^e = 0.035$ \$/kWh.

Tabela 1. Koszty jednostkowe baterii kondensatorów uwzględnionych w obliczeniach

Rozmiar (kVar)	50	100	150	200	250	300	350	400
Koszt (\$/kVar)	2.25	1.78	1.93	1.44	1.60	1.33	1.46	1.24
Rozmiar (kVar)	450	500	550	600	650	700	750	800
Koszt (\$/kVar)	1.35	1.19	1.28	1.13	1.22	1.22	1.29	1.09

Tabela 2. Dane kabli

	Rozmiar przewodu	R (Ohm/km)	X (Ohm/km)	Cena 1z 10 lat (\$/km)	Maksymalny prąd dopuszczalny I_{\max} (A)
1	3x70	0.443	0.08	1000	180
2	3x95	0.32	0.078	1237.5	213
3	3x120	0.253	0.076	1412.5	243
4	3x150	0.206	0.074	1637.5	275
5	3x185	0.164	0.073	1900	307
6	3x240	0.125	0.071	2350	351

Tabela 3. Dane linii napowietrznych

	Rozmiar przewodu	R (Ohm/km)	X (Ohm/km)	Cena 1z 10 lat (\$/km)	Maksymalny prąd dopuszczalny I_{\max} (A)
1	ACK-35	0.9	0.4	187.5	175
2	ACK-50	0.65	0.39	250	210
3	ACK-70	0.46	0.38	350	265
4	ACK-95	0.33	0.37	487.5	330
5	ACK-120	0.27	0.36	725	390
6	ACK-150	0.21	0.35	825	450

5.2. Implementacja algorytmu SPSO

Algorytm SPSO zastosowano do rozwiązania zagadnienia minimalizacji strat w rozpatrywanej sieci przy wykorzystaniu wszystkich rozpatrywanych technik. Sformułowano następujące cele obliczeń:

1. Weryfikacja efektywności proponowanej metody.
2. Wykazanie efektywności różnych technik stosowanych w celu zmniejszenia strat mocy w sieci i poprawy profilu napięciowego.
3. Porównanie uzyskanych wyników przez połączenie wszystkich metod w jednym problemie, z wynikami uzyskanymi przez oddzielne stosowanie tych metod.
4. Wykazanie wpływu uwzględnienia zniekształcenia napięcia wynik optymalizacji.
5. Ilościowa ocena korzyści ekonomicznych uzyskanych z zastosowania różnych metod do redukcji strat w rozpatrywanej sieci.

Łączny wymiar przestrzeni poszukiwań jest sumą wymiarów określonych dla zagadnień cząstkowych i jest równy, jak opisano poniżej.

Redukcja strat za pomocą zmiany rozplywów mocy biernej

W tym przypadku wymiar przestrzeni równa się liczbie węzłów, w których przewidywane jest instalowanie kondensatorów. Wyboru węzłów dokonano za pomocą systemu ekspertowego “fuzzy expert” (FES), zgodnie z [6] i [7]. Dla rozpatrywanej sieci określono 60 węzłów kandydujących, zatem liczba współrzędnych dla zagadnienia instalowania baterii kondensatorów (d_{cp}) wynosi $d_{cp}=60$. Podprzestrzeń poszukiwań dla każdej współrzędnej (każdego wymiaru) określona jest zbiorem standaryzowanych wartości mocy baterii kondensatorów. Zgodnie z tabelą 5.3, wymiar każdej podprzestrzeni równa się 16.

Redukcja strat za pomocą rekonfiguracji sieci

Wymiar przestrzeni poszukiwań (d_{rf}) równa się liczbie oczek sieci i w rozważanym przypadku wynosi $d_{rf} = 11$. Wszystkie łączniki podziału sieci i łączniki sekcyjne, które należą do dowolnego oczka, uważa się za łączniki kandydujące dla rekonfiguracji. Podprzestrzeń poszukiwań dla każdego oczka tworzy zbiór numerów gałęzi z łącznikami kandydującymi. Dla 11 pętli pokazanych na rys. 3, zbiory te zdefiniowano poniżej.

$$S_{drf1}=[85\ 87\ 89\ 111\ 274\ 161];$$

$$S_{drf2}=[112\ 275\ 169\ 167\ 166\ 274\ 161];$$

$$S_{drf3}=[113\ 114\ 116\ 276\ 30\ 29\ 28\ 27];$$

$$S_{drf4}=[16\ 18\ 19\ 20\ 21\ 277\ 170];$$

$$S_{drf5}=[180\ 278\ 44\ 43\ 279\ 182\ 181];$$

$$S_{drf6}=[179\ 42\ 170\ 43\ 279\ 182\ 181];$$

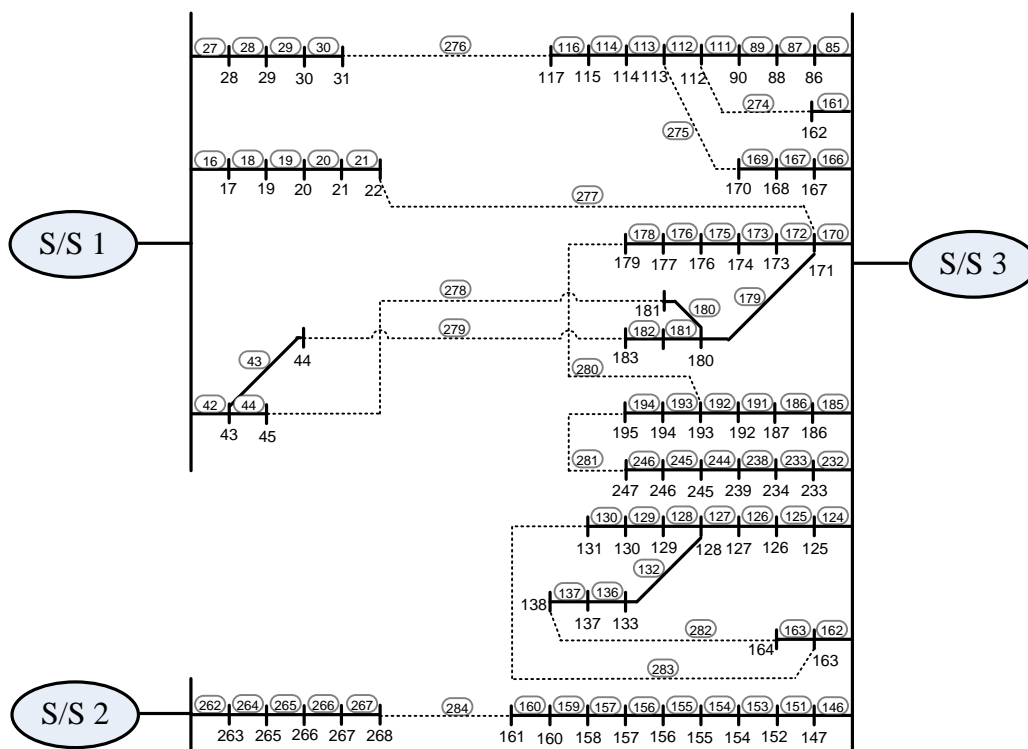
$$S_{drf7}=[172\ 173\ 175\ 176\ 178\ 280\ 185\ 186\ 191\ 192];$$

$$S_{drf8}=[193\ 194\ 281\ 246\ 245\ 244\ 238\ 233\ 232\ 185\ 186\ 191\ 192];$$

$$S_{drf9}=[124\ 125\ 126\ 127\ 162\ 132\ 136\ 137\ 282\ 161];$$

$$S_{drf10}=[128\ 129\ 131\ 283\ 132\ 136\ 137\ 282\ 161];$$

$$S_{drf11}=[146\ 151\ 153\ 154\ 155\ 156\ 157\ 159\ 160\ 284\ 267\ 266\ 265\ 264\ 262];$$



Rys. 3. Identyfikacja pętli rozpatrywanej sieci

Redukcja strat za pomocą zmiany przekroju przewodów

Wymiar przestrzeni poszukiwań jest równy liczbie gałęzi sieci kandydujących do zmiany przekroju, jest to 169 odcinków linii kablowych i 89 linii napowietrznych. Zbiór rozwiązań dla każdego wymiaru linii kablowych zawiera 6 wartości przekroju ($d_{rcc}=6$), zamieszczonych w tabeli 2. Zbiór rozwiązań dla każdego wymiaru linii napowietrznych zawiera 6 wartości przekroju ($d_{rco}=6$), zamieszczonych w tabeli 3.

Przy założeniu, że wszystkie rozpatrywane techniki redukcji strat stosowane są jednocześnie, wymiar przestrzeni poszukiwań $d=d_{rf}+d_{cp}+d_{rcc}+d_{rco}$ wynosi 329.

Po określeniu wymiaru przestrzeni i zbiorów rozwiązań dla każdego wymiaru, zastosowano algorytm SPSO do znalezienia optymalnych rozwiązań dla każdej współrzędnej przestrzeni poszukiwań, przy wykorzystaniu wzorów (1), (7), (8), (5) oraz (6). Na rys. 4 pokazano schemat blokowy algorytmu.

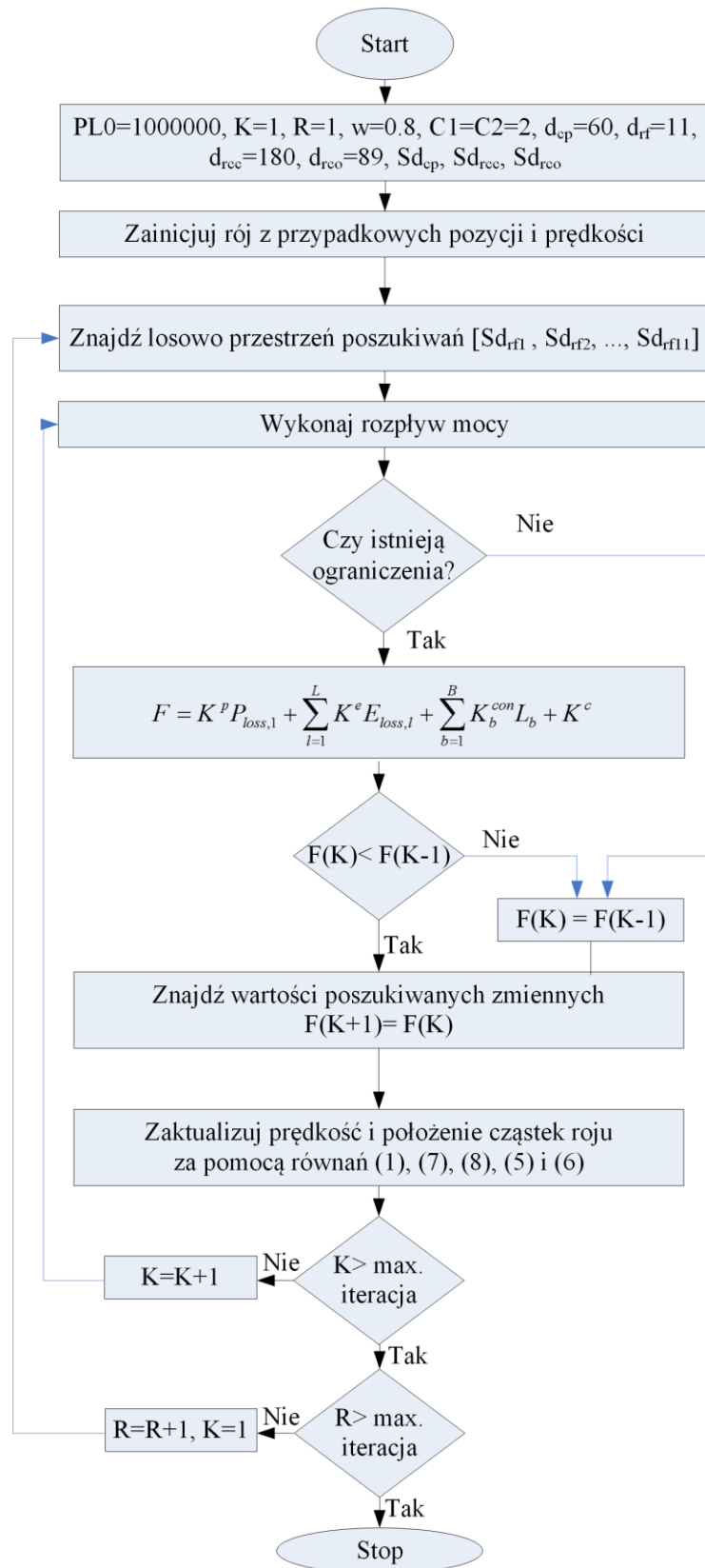


Fig. 4. Schemat blokowy algorytmu SPSO

Obliczenia przeprowadzono za pomocą pakietu “MATLAB R2010a”. Najlepsze wyniki uzyskano dla wartości współczynników $c_1 = c_2 = 2.0$, $w = 0.8$, $Vel_{max} = 4$ oraz $Vel_{min} = -4$ oraz rozmiaru roju wynoszącego 500 cząstek.

Wykonano obliczenia dla kilku przypadków, różniących się rodzajem techniki zastosowanej do redukcji strat, a mianowicie:

- A. Uwzględnienie tylko optymalnej instalacji baterii kondensatorów
- B. Uwzględnienie tylko zmiany przekroju przewodów
- C. Uwzględnienie tylko rekonfiguracji
- D. Uwzględnienie wszystkich technik (instalowania baterii kondensatorów, zmiany przekroju przewodów i rekonfiguracji) bez ograniczenia THD
- E. Uwzględnienie wszystkich technik (instalowania baterii kondensatorów, zmiany przekroju przewodów i rekonfiguracji) z ograniczeniem THD.

Funkcje celu i ograniczenia sformułowane dla każdego przypadku podano w tabeli 4, przy czym numery ograniczeń dotyczą:

1. Ograniczenie prądów gałęziowych, równanie (26)
2. Ograniczenie napięć węzłowych, równanie (27).
3. Ograniczenie poziomu harmonicznnych, równanie (28).
4. Ograniczenie mocy baterii kondensatorów, równanie (29).
5. Istnieje tylko jedna droga łącząca każdy węzeł odbiorczy ze stacją zasilającą.
6. Struktura sieci jest radialna.

Tabela 4: Funkcje celu i ograniczenia dla różnych przypadków

Przypadek	Funkcja celu	Numer ograniczenia					
		1	2	3	4	5	6
A	$F = K^p P_{loss,1} + \sum_{l=1}^L K^e E_{loss,l} + K^c$	N	Y	N	Y	N	N
B	$F = K^p P_{loss,1} + \sum_{l=1}^L K^e E_{loss,l} + \sum_{b=1}^{Br} K_b^{con} L_b$	Y	N	N	N	N	N
C	$F = K^p P_{loss,1} + \sum_{l=1}^L K^e E_{loss,l}$	Y	N	N	N	Y	Y
D	$F = K^p P_{loss,1} + \sum_{l=1}^L K^e E_{loss,l} + \sum_{b=1}^{Br} K_b^{con} L_b + K^c$	Y	Y	N	Y	Y	Y
E	$F = K^p P_{loss,1} + \sum_{l=1}^L K^e E_{loss,l} + \sum_{b=1}^{Br} K_b^{con} L_b + K^c$	Y	Y	Y	Y	Y	Y

Y oznacza, że ten rodzaj ograniczenia został uwzględniony

N oznacza, że ten rodzaj ograniczenia nie został uwzględniony.

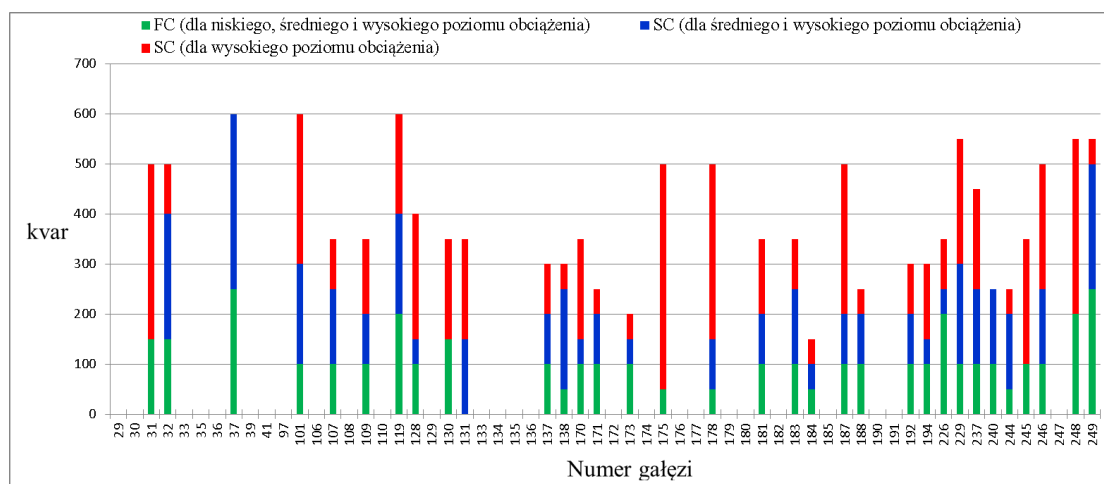
5.3. Wyniki obliczeń

Moc maksymalną oraz całkowite straty mocy i energii przy różnym obciążeniu sieci, dla stanu przed optymalizacją pokazano w tabeli 5. Maksymalne zapotrzebowanie na moc w rozpatrywanej sieci wynosi 62924.23 kW, a straty mocy w przewodach stanowią 7.4% zapotrzebowania. Energia roczna przesyłana przez sieć wynosi 15853463.9 kWh, a 5% tej energii jest tracona w przewodach.

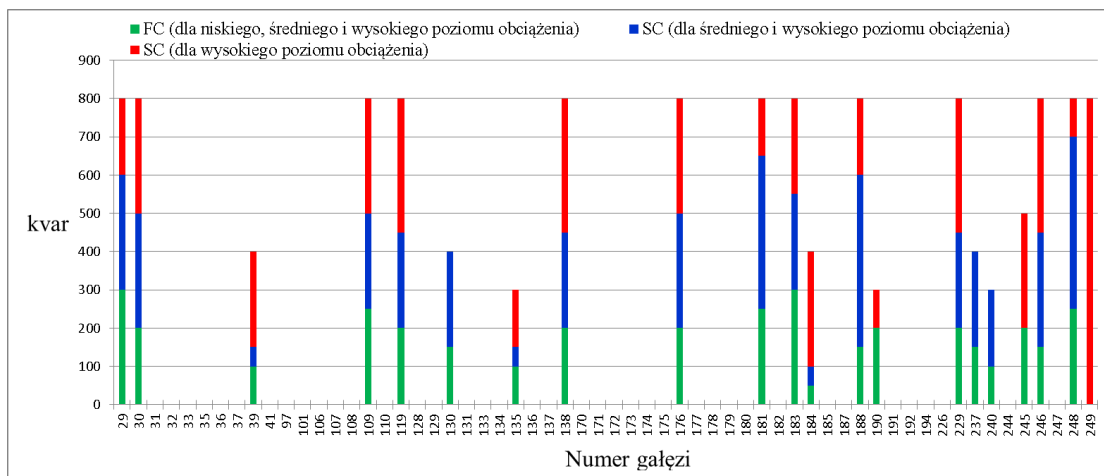
Tabela 5. Stan sieci przed optymalizacją

Poziom obciążenia	Niski	Średni	Wysoki
Procent obciążenia transformatora (w odniesieniu do mocy znamionowej)	0.26%	0.49%	0.91%
Współczynnik mocy	0.85		
Moc całkowita (kW)	17978.35	33882.28	62924.23
Czas trwania obciążenia (godz/rok)	1752	5256	1752
Energia całkowita (kWh)	31498069.2	178085237	110243242.2
Roczna energia całkowita (kWh)	319826548.4		
Straty mocy (kW)	378.52	1344.43	4636.98 (7.4%)
Straty energii (kWh)	663159.9	7066315.8	8123988.2
Roczne całkowite straty energii (kWh)	15853463.9 (5%)		

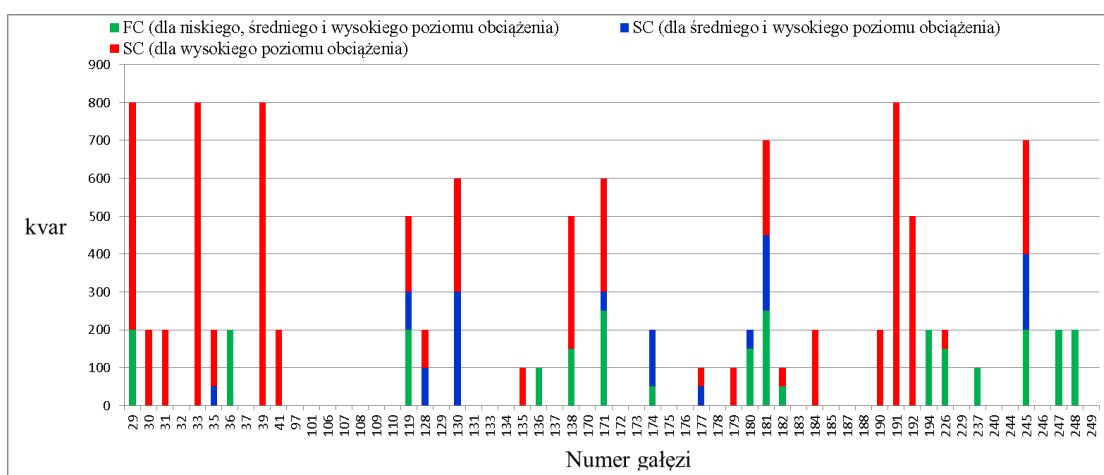
Na rysunkach 5, 6 oraz 7 pokazano optymalną lokalizację kondensatorów dla przypadków A, D oraz E. W tabelach 6 i 7 zestawiono optymalne przekroje przewodów, odpowiednio dla kabli i linii napowietrznych. W tabeli 8 przedstawiono optymalną konfigurację sieci dla różnych przypadków.



Rys. 5. Wielkość i lokalizacja baterii kondensatorów dla przypadku A. FC – bateria kondensatorów o stałej mocy, SC – bateria kondensatorów o zmiennej mocy



Rys. 6. Wielkość i lokalizacja baterii kondensatorów dla przypadku D. FC – bateria kondensatorów o stałej mocy, SC – bateria kondensatorów o zmiennej mocy



Rys. 7. Wielkość i lokalizacja baterii kondensatorów dla przypadku E. FC – bateria kondensatorów o stałej mocy, SC – bateria kondensatorów o zmiennej mocy

Tabela 6. Optymalne przekroje kabli

Rozmiar kabla	Przypadek bazowy	Przypadek B	Przypadek D	Przypadek E
1	36, 52, 54, 57, 64, 65, 68, 71, 72, 80, 113, 133, 152, 173, 204, 235, 239, 241	41, 47, 50, 51, 65, 80, 84, 121, 122, 123, 131, 145, 161, 171, 180, 182, 183, 189, 195, 197, 235, 236, 237, 243, 253, 261, 263, 267	41, 47, 50, 51, 63, 65, 80, 84, 121, 122, 123, 130, 131, 138, 145, 156, 171, 180, 182, 183, 189, 195, 197, 199, 235, 236, 237, 243, 253, 261, 263	47, 50, 51, 63, 65, 80, 84, 91, 108, 121, 122, 123, 131, 135, 136, 138, 145, 156, 171, 173, 180, 183, 184, 195, 197, 199, 235, 237, 240, 243, 244, 246, 248, 251, 253, 261, 263
2	28, 30, 33, 58, 66, 67, 69, 73, 74, 75, 76, 117, 118, 123, 134, 135, 136, 153, 154, 156, 157, 159, 160, 164, 167, 172, 182, 184, 188, 189, 192, 193, 194, 234, 236, 237, 240, 245, 246, 250, 251, 254, 255, 256, 257, 259, 260, 261, 266, 267	9, 12, 17, 26, 43, 58, 59, 68, 69, 78, 82, 91, 108, 130, 135, 137, 152, 165, 184, 190, 194, 240, 246, 248, 251	9, 12, 17, 26, 55, 58, 59, 68, 69, 78, 79, 82, 91, 108, 135, 136, 152, 158, 165, 168, 184, 190, 240, 246, 248, 251	9, 12, 17, 26, 32, 33, 55, 58, 59, 68, 69, 78, 79, 82, 130, 134, 137, 152, 158, 165, 168, 172, 181, 182, 189, 190, 236, 239, 241, 245, 250
3	2, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 15, 18, 20, 22, 26, 32, 43, 44, 45, 46, 47, 49, 78, 84, 91, 121, 122, 129, 130, 131, 137, 145, 147, 148, 165, 166, 171, 179, 180, 181, 183, 190, 201, 202, 243, 244, 248, 249, 264, 272	2, 14, 15, 24, 25, 32, 33, 45, 46, 57, 61, 64, 72, 118, 129, 133, 134, 136, 181, 202, 204, 234, 239, 241, 250, 260, 265, 266	2, 14, 15, 22, 24, 25, 32, 33, 45, 46, 57, 61, 64, 72, 118, 129, 133, 134, 181, 194, 202, 204, 234, 239, 241, 250, 260	2, 14, 15, 22, 24, 25, 41, 45, 46, 57, 61, 64, 72, 116, 117, 118, 133, 193, 194, 202, 204, 234, 249, 260
4	4, 5, 19, 25, 61, 82, 161, 271	1, 11, 20, 22, 36, 49, 67, 71, 75, 76, 117, 147, 148, 159, 160, 164, 166, 167, 173, 188, 192, 193, 201, 245, 257, 259, 264, 272	1, 11, 35, 36, 49, 67, 71, 75, 76, 77, 117, 137, 147, 148, 154, 159, 164, 166, 167, 172, 173, 179, 188, 192, 193, 201, 245, 257, 259, 272	1, 11, 36, 49, 67, 71, 75, 76, 77, 129, 147, 148, 154, 159, 164, 166, 167, 187, 188, 201, 257, 259, 272
5	10, 17, 24, 41, 48, 62, 70, 108, 139, 186, 232, 233, 238, 247, 252, 253, 262, 263, 265	10, 18, 19, 30, 44, 54, 66, 74, 113, 139, 172, 256, 244, 249, 262, 271	10, 30, 43, 54, 66, 74, 113, 116, 124, 139, 160, 187, 200, 244, 249, 256, 271	10, 30, 35, 43, 54, 66, 74, 113, 124, 139, 160, 200, 238, 256, 271
6	1, 3, 16, 23, 50, 51, 59, 195, 197	3, 4, 5, 6, 8, 16, 23, 28, 48, 52, 62, 70, 73, 153, 154, 156, 157, 179, 186, 232, 233, 238, 247, 252, 254, 255	3, 4, 5, 6, 8, 16, 18, 19, 20, 21, 23, 28, 42, 44, 48, 52, 62, 70, 73, 85, 146, 153, 157, 161, 162, 186, 232, 233, 238, 247, 252, 254, 255, 262, 264, 265, 266, 267	3, 4, 5, 6, 8, 16, 18, 19, 20, 21, 23, 28, 42, 44, 48, 52, 62, 70, 73, 85, 146, 153, 157, 161, 162, 179, 186, 192, 232, 233, 247, 252, 254, 255, 262, 264, 265, 266, 267

Tabela 7. Optymalne przekroje linii napowietrznych

Rozmiar OHL	Przypadek bazowy	Przypadek B	Przypadek D	Przypadek E
1	29, 34, 38, 39, 120,127, 128, 132, 174,175, 176, 177, 178, 229, 230, 231, 258, 273	94, 96, 140, 142, 149, 150, 177, 210, 226	94, 96, 127, 140, 142, 149, 150, 177, 210, 226	88, 93, 94, 96, 97, 100, 101, 103, 110, 115, 120, 140, 142, 149, 150, 176, 177, 178, 206, 214, 224, 226, 227, 231, 242
2	13, 37, 86, 88, 90, 92, 93, 94, 95, 96, 98, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 109, 110, 115, 119, 140, 142, 144, 149, 150, 206, 219, 220, 222, 226, 228	56, 83, 88, 93, 97, 100, 101, 103, 110, 115, 120, 169, 174, 178, 206, 209, 212, 214, 216, 220, 222, 224, 227, 231, 242, 258	56, 83, 88, 93, 97, 100, 101, 103, 110, 115, 120, 169, 174, 178, 206, 209, 212, 214, 216, 220, 222, 224, 227, 231, 242,258	56, 83, 86, 92, 109, 119, 127, 128, 169, 174, 175, 209, 210, 212, 216, 222, 230, 258
3	40, 56, 87, 89, 97, 111, 112, 114, 125, 141, 143, 169, 170, 208, 209, 210, 212, 213, 214, 216, 221,242	39, 40, 92, 109, 119, 143, 144, 273	39, 40, 92, 109, 119, 143, 144, 273	39, 40, 132, 143, 144, 219, 220, 229, 273
4	27, 81, 83,185, 207, 211, 215, 217, 218, 224	37, 38, 86, 106, 107, 141, 175, 176, 208, 218, 219, 229, 230	37, 38, 86, 106, 107, 126, 141, 175, 176, 208, 218, 219, 229, 230	37, 38, 126, 141, 208, 218, 228
5	227	104, 105, 128, 228	104, 105, 128,228	.-----
6	223, 225	13, 27, 29, 34, 81, 87, 89, 90, 95, 98, 102, 111, 112, 114, 125, 126, 127, 132, 170, 185, 191, 207, 211, 213, 215, 217, 221, 223, 225	13, 27, 29, 34, 81, 87, 89, 90, 95, 98, 102, 111, 112, 114, 125, 132, 170, 185, 191, 207, 211, 213, 215, 217, 221, 223, 225	13, 27, 29, 34, 81, 87, 89, 90, 95, 98, 102, 104, 105, 106, 107, 111, 112, 114, 125, 170, 185, 191, 207, 211, 213, 215, 217, 221, 223, 225

Tabela 8. Wyniki rekonfiguracji dla różnych przypadków

Numery gałęzie otwarte	
Przypadek bazowy	274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284
Przypadek C	111, 275, 276, 170, 278, 181, 178, 281, 132, 129, 157
Przypadek D	111, 275, 276, 170,181, 179, 178, 245, 132, 129, 157
Przypadek E	111, 275, 276, 170,181, 179, 178, 245, 132, 129, 157

Pozostałe wyniki symulacji zestawiono w tabeli 9.

Tabela 9: Wyniki optymalizacji

	Numer przypadku					
	Przypadek bazowy	A	B	C	D	E
Całkowita moc kondensatorów [kvar]	0	13000	0	0	13400	10700
Min. napięcie [pu]	0.79	0.9	0.893	0.878	0.977	0.96
Max. napięcie [pu]	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06
Max. THD [%]	3.9	9	3.9	3.9	8.5	4.99
Straty mocy [kW]	4637.0	3804.6	2691.2	3902.2	2095.9	2211.0
Roczne straty energii [kWh]	15853464	13016471	9200991.4	13341410	7166639	7600738
Straty mocy [%]	7.4	6	4.3	6.2	3.3	3.5
Straty energii [%]	5	4	2.9	4.2	2.24	2.38

Na podstawie otrzymanych wyników można zaobserwować, co następuje:

Początkowa lokalizacja baterii kondensatorów, określona na podstawie logiki rozmytej, została ograniczona do węzłów o numerach 33, 21 i 31 dla przypadków odpowiednio A, D i E. Po optymalizacji profil napięciowy w sieci uległ poprawie, przy czym najlepsze wyniki uzyskano w przypadkach D i E.

Przed optymalizacją maksymalna wartość współczynnika THD utrzymywała się poniżej dopuszczalnego poziomu. W przypadkach B i C wartość THD nie uległa zmianie, natomiast w przypadkach A, D i E, z bateriami kondensatorów, wystąpiły zmiany wartości THD w zależności od lokalizacji i wielkości baterii. Przy braku ograniczenia (przypadek A i D), maksymalna wartość THD wzrosła powyżej dopuszczalnego limitu (5%). Wprowadzenie ograniczenia w przypadku E, spowodowało obniżenie wartości THD w węzłach sieci poniżej dopuszczalnego poziomu przy różnych poziomach obciążenia.

Największa redukcja strat wystąpiła w przypadku B, w porównaniu z przypadkami A i C. Przy jednoczesnym zastosowaniu wszystkich technik redukcji najlepsze wyniki otrzymano dla przypadków D i E, przy czym korzystniejszym wyborem pozostaje przypadek E, ponieważ jest w nim zachowana właściwą jakością dostarczonej energii.

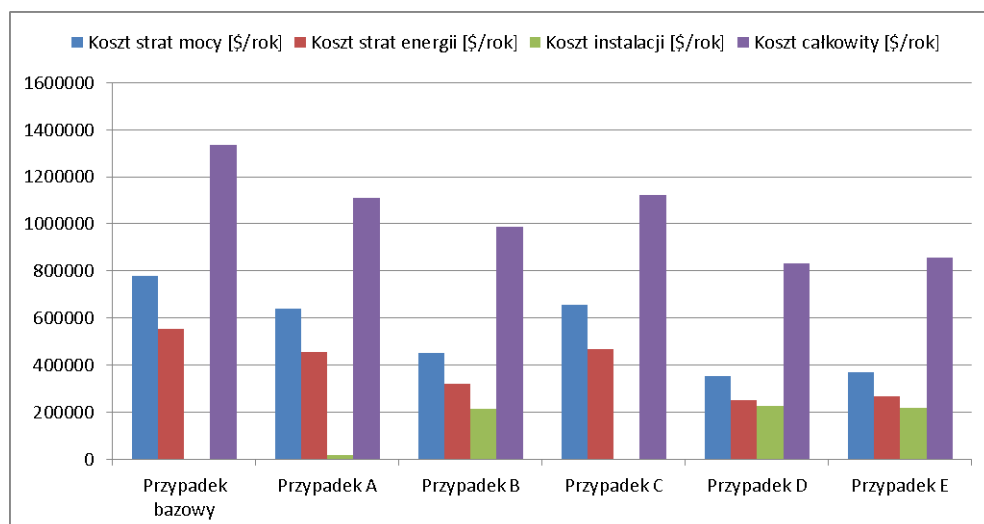
Ocena ekonomiczna

Korzyści ekonomiczne redukcji strat mocy w sieci odpowiadają kosztom unikniętym, uzyskanym przez odroczenie inwestycji w rozbudowę sieci. Mówiąc inaczej, zmniejszenie strat mocy oznacza zmniejszenie kosztu inwestycyjnego sieci. Z kolei, zmniejszenie strat energii przy różnych poziomach obciążenia oznacza zmniejszenie kosztów eksploatacji sieci.

W tabeli 10 i na rys. 8 przedstawiono koszty strat mocy, strat energii oraz koszty zainstalowanych kondensatorów i zainstalowanych przewodów dla różnych przypadków. W tabeli 11 pokazano roczne oszczędności wynikające z redukcji strat mocy i energii, uzyskane dla różnych przypadków. Najmniejsze koszty roczne uzyskano dla przypadków D i E, w których zastosowano jednocześnie wszystkie trzy rozpatrywane techniki redukcji strat. Porównując wyniki uzyskane dla przypadków A, B i C można stwierdzić że, najmniejsze oszczędności uzyskuje się przy rekonfiguracji sieci (przypadek C), pomimo braku kosztów inwestycyjnych w tym przypadku. Największy efekt redukcji strat uzyskuje się za pomocą zmiany przekroju przewodów (przypadek B). Dla przyjętych danych K^p i K^e , koszt strat mocy stanowi około 1,4-krotny koszt strat energii dla jednego roku.

Tabela 10. Koszty strat mocy, strat energii, zainstalowanych baterii kondensatorów oraz przewodów dla różnych przypadków

	Numer przypadku					
	Przypadek bazowy	A	B	C	D	E
Koszt strat mocy [\$/rok]	779012.57	639170.44	452122.46	655577.8	352113	371453
Koszt strat energii [\$/rok]	554871.24	455576.5	322034.7	466949.3	250832	266026
Koszt kondensatorów [\$/rok]	0	17213.3	0	0	17521.5	13421.3
Koszt przewodów [\$/rok]	0	0	213736	0	210827	206432



Rys. 8. Koszty roczne dla różnych rozpatrywanych przypadków redukcji strat

Tabela 11. Korzyści ekonomiczne dla różnych rozpatrywanych przypadków redukcji strat

	Numer przypadku					
	Przypadek bazowy	A	B	C	D	E
Koszt całkowity [\$]/rok	1333883.8	1111960.2	987893.5	1122527	831294	857332
Zyski [\$]/rok	0	221923.6	345990.4	211356.6	502590	476552
Zyski [%]	0	16.6	25.9	15.8	37.7	35.7

Okres zwrotu inwestycji

W tabeli 12 zestawiono wyniki obliczeń ekonomicznych dla różnych przypadków. Przy założeniu, że okres eksploatacji baterii kondensatorów i przewodów wynosi 10 lat, obliczono czas zwrotu nakładów inwestycyjnych poniesionych przy zastosowaniu różnych technik redukcji strat. Najdłuższy czas zwrotu - 3,82 lat, uzyskano dla przypadku B, jednak po okresie zwrotu w tym przypadku uzyskuje się największe roczne oszczędności ekonomiczne z tytułu redukcji strat (tabela 13).

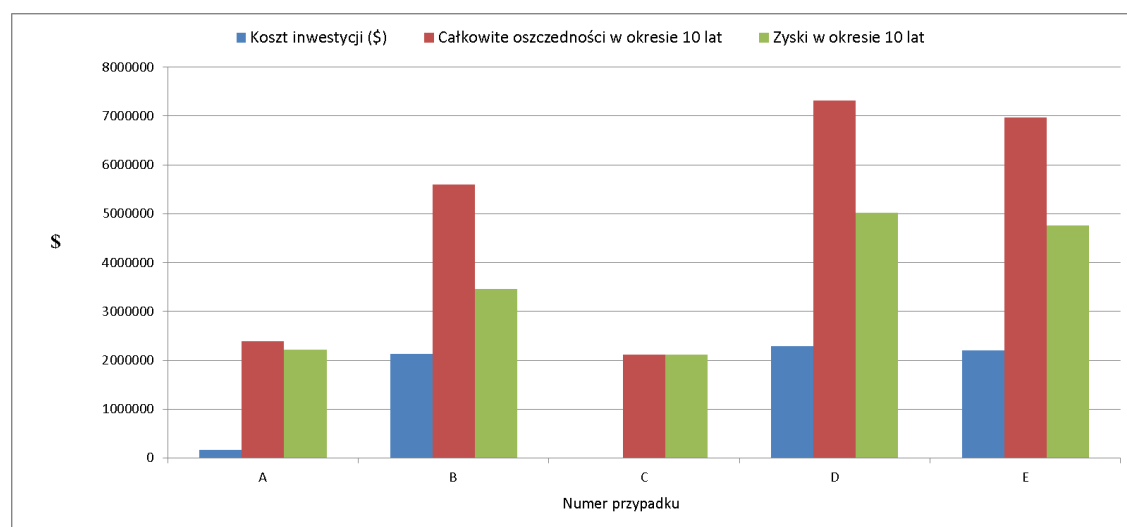
Maksymalne korzyści ekonomiczne uzyskane w okresie 10 lat dotyczą przypadku D i wynoszą około 50 milionów dolarów, jak pokazano na rysunku 9. Jednakże, z uwagi na zapewnienie wymaganej jakości energii elektrycznej rekomendowanym do praktycznego zastosowania jest przypadek E, w którym całkowite oszczędności w okresie 10 lat wynoszą 47 milionów dolarów.

Tabela 12. Okres zwrotu nakładów inwestycyjnych dla różnych przypadków

	Numer przypadku				
	A	B	C	D	E
Koszt kondensatorów [\$]	172132.5	0	0	175215	134212.5
Koszt przewodów [\$]	0	2137363	0	2108270	2064316.4
Koszt inwestycji (okres 10 lat) [\$]	172132.5	2137363	0	2283485	2198528.9
Roczne oszczędności mocy	832.39	1945.77	734.73	2541.07	2425.95
Roczne oszczędności energii	2836992.88	6652472.56	2512054.27	8686825.28	8252726.35
Roczne oszczędności mocy w dolarach [\$]	139842.131	326890.11	123434.72	426899.51	407559.226
Roczne oszczędności energii w dolarach [\$]	99294.75	232836.54	87921.90	304038.88	288845.42
Roczne oszczędności (\$/rok)	239136.88	559726.65	211356.62	730938.40	696404.65
Okres zwrotu (rok)	0.72	3.82	0.00	3.12	3.16

Tabela 13. Całkowite oszczędności w pozostałym okresie eksploatacji

	Numer przypadku				
	A	B	C	D	E
Okres pozostały (rok)	9.28	6.18	10.00	6.88	6.84
Całkowite oszczędności w okresie pozostałym (\$)	2219236.31	3459903.5	2113566.2	5025898.7	4765517.61



Rys. 9. Całkowite korzyści ekonomiczne w okresie 10 lat

6. Wnioski

Jak pokazano w pracy, zagadnienie redukcji strat w sieciach dystrybucyjnych obejmuje dwa wątki: techniki redukcji strat mocy z ograniczeniami technicznymi i operacyjnymi, oraz metody efektywnej optymalizacji. Optymalne rozwiązanie problemu instalowania baterii kondensatorów do kompensacji mocy biernej, zmiany przekroju przewodów linii i rekonfiguracji sieci daje zakładom energetycznym możliwość zmniejszenia ponoszonych kosztów, jak również uwolnienia istniejących zdolności przesyłowych sieci. Korzyści ekonomiczne zależą od rodzaju zastosowanej techniki. Procedura optymalizacyjna musi uwzględniać rozmaite ograniczenia techniczne, wynikające z charakterystyki sieci, wymagań operacyjnych oraz wymaganych parametrów napięcia zasilającego.

W pracy dokonano przeglądu metod optymalizacji stosowanych w elektroenergetyce. Wybrano metodę PSO do rozwiązania zagadnienia minimalizacji strat mocy w sieci dystrybucyjnej. Opracowano i zaprezentowano algorytm selektywnej optymalizacji rojem cząstek (SPSO), jako modyfikację binarnej optymalizacji rojowej, do znajdowania rozwiązania w określonej przestrzeni decyzyjnej.

Wykazano, że opracowany algorytm SPSO może być używany jako algorytm optymalizacji w praktyce inżynierskiej i nadaje się do poszukiwania rozwiązania przy połączeniu różnych technik redukcji strat, tj. przy jednoczesnym zastosowaniu baterii kondensatorów do zmiany rozplywu mocy biernej, rekonfiguracji sieci i zmiany przekroju przewodów. Proponowany algorytm można łatwo zrealizować, zaledwie w kilkudziesięciu liniach, przy pomocy dowolnego języka programowania wyższego poziomu przy krótkim czasie obliczeń. Niewielka złożoność algorytmiczna sprzyja jego zastosowaniu w rozwiązywaniu zagadnień praktycznych. Algorytm SPSO zastosowano dla optymalizacji strat mocy w różnych układach testowych przedstawionych w literaturze. Porównano otrzymane wyniki z wynikami uzyskanymi za pomocą innych metod optymalizacji stwierdzając, iż proponowany algorytm jest prawidłowy i efektywny i stanowi korzystną alternatywę dla innych stosowanych metod we wszechstronnej optymalizacji redukcji strat mocy w sieciach dystrybucyjnych.

Algorytm SPSO zastosowano zagadnienia optymalizacji strat w rzeczywistej sieci dystrybucyjnej 6 kV z 274 węzłami i 284 gałęziami, zasilającej wschodnią część miasta Mariupol na Ukrainie. Założono jednoczesne wykorzystanie trzech technik redukcji strat,

w celu zademonstrowania maksymalnych korzyści technicznych i ekonomicznych, które można osiągnąć. Ponadto, przedstawiono wpływ każdej z trzech techniki na stopień redukcji strat, jak również oszacowano ich wpływ na efekt finansowy przedsiębiorstwa energetycznego. Główne dane i założenia przyjęte do obliczeń zostały określone na podstawie pomiarów wykonanych w czterech liniach zasilających z największymi stratami mocy i spadkiem napięcia, przy pomocy analizatora jakości mocy Fluke 435. Optymalizę strat w sieci za pomocą instalowania baterii kondensatorów przeprowadzono stosując procedurę dwustopniową, łączącą system fuzzy expert i SPSO.

Efektywność zastosowanego algorytmu SPSO i skuteczność wybranych technik redukcji strat ilustruje pozytywny wynik ekonomiczny, jaki otrzymano w wyniku rozwiązania problemu minimalizacji strat w sieci rzeczywistej, przy jednoczesnej poprawie profilu napięciowego oraz spełnieniu wymagań dotyczących wartości współczynnika THD w zadanych granicach. Dla rozpatrywanej sieci uzyskano okres zwrotu nakładów inwestycyjnych równy 3,16 lat, a całkowite oszczędności równe 4 765 517,61 \$, przy koszcie inwestycji 2 198 528,9 \$ i kwocie oszczędności rocznych 696 404,65 \$.

W ten sposób udowodniono tezę rozprawy: “zastosowania zmodyfikowanej metody binarnej PSO, która obejmuje przekształcenie współrzędnych cząstek w wybraną przestrzeń rozwiązania, aby umożliwić efektywne rozwiązanie problemu zminimalizowania strat mocy czynnej w sieciach dystrybucyjnych przy pomocy następujących metod: instalowania baterii kondensatorów, rekonfiguracji sieci i zmiany przekroju przewodów.”

Najważniejsze cele osiągnięte w rozprawie są następujące:

1. Porównanie metod optymalizacji używanych w elektroenergetyce do rozwiązania problemu redukcji strat w sieciach dystrybucyjnych.
2. Opracowanie algorytmu SPSO.
3. Weryfikacja poprawności opracowanego algorytmu i zademonstrowanie jego dokładności i efektywności w porównaniu z innymi stosowanymi metodami na modelach testowych.
4. Zastosowanie modelu SPSO do rozwiązania zagadnienia optymalnej redukcji strat w rzeczywistej sieci dystrybucyjnej.
5. Określenie wpływu zastosowanej techniki na poziom redukcji strat mocy i energii w sieci oraz na efekt finansowy dla przedsiębiorstwa energetycznego..

References

1. J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks, vol. IV, Perth, Australia, 1995, pp. 1942–1948.
2. J. Kennedy and R. C. Eberhart, "A Discrete Binary Version of the Particle Swarm Algorithm," Proc. of the conference on Systems, Man, and Cybernetics SMC97, pp.4104-4109, 1997.
3. Y.Baghzouz and S.Ertem, "Shunt Capacitor Sizing For Radial Distribution Feeders With Distorted Substation Voltages," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 5, pp. 650-657, Apr. 1990.
4. J. Teng and C. Chang., "Backward/Forward sweep-based harmonic analysis method for distribution systems," IEEE Trans. on Power Delivery, vol.22, no.3, pp.1665-1672, 2007.
5. Jen-Hao Teng, "A Direct Approach for Distribution System Load Flow Solutions," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 18, no. 3, pp. 882–887, July. 2003.
6. H. N. Ng, M. M. A. Salama, and A.Y.Chikhani, "Capacitor allocation by approximate reasoning: fuzzy capacitor placement," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 15, pp. 393-398, Jan. 2000.
7. M. A. S. Masoum, A. Jafarian, M. Ladjevardi, E. F. Funchs, and W.M. Grady, "Fuzzy Approach for Optimal Placement and Sizing of Capacitor Banks in the Presence of Harmonics," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 19, pp. 822-829, Apr. 2004.