

MOŻLIWOŚCI REDUKCJI STRAT W SIECIACH DYSTRYBUCYJNYCH ŚREDNIEGO NAPIĘCIA POPRZEZ OPTYMALNĄ LOKALIZACJĘ ROZCIĘĆ

dr inż. Aleksander Kot / Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
prof. dr hab. inż. Jerzy Kulczycki / Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
dr inż. Waldemar L. Szpyra / Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

1. ZŁOŻONOŚĆ SIECI I STRUKTURA ODBIORCÓW

Elektroenergetyczne sieci dystrybucyjne spełniają bardzo istotną rolę w systemie elektroenergetycznym – rozdzielają energię i dostarczają ją do odbiorców końcowych. W związku z pełnioną funkcją charakteryzują się bardzo dużą złożonością, a ich zasięg obejmuje praktycznie cały obszar kraju. Do sieci tych zaliczamy sieci 110 kV, umożliwiające dosył energii ze stacji węzłowych i wstępny jej rozdział, oraz sieci SN i nn, na których spoczywa główny ciężar rozprowadzenia energii do wielkiej liczby odbiorców. W tabeli 1 zestawiono na podstawie [1] długości sieci dystrybucyjnej w podziale na poszczególne poziomy napięcia. Poza wymienionymi liczbami należy jeszcze brać pod uwagę niezaliczone tu do sieci nn przyłącza o całkowitej długości ok. 145 tys. km.

Tab. 1. Długość linii elektroenergetycznych wg danych za 2007 rok [1]

| Poziom napięcia | Długość [km] |
|-------------------------|--------------|
| Sieć 110 kV | 32 600 |
| Sieć średniego napięcia | 299 700 |
| Sieć niskiego napięcia | 417 000 |

W tabeli 2 pokazano liczbę odbiorców energii elektrycznej w Polsce w podziale na poszczególne poziomy napięcia oraz ilości energii dostarczanej tym odbiorcom. Zwraca uwagę olbrzymia dysproporcja liczba małych i dużych odbiorców przy łącznej ich liczbie przekraczającej 16 mln.

Tab. 2. Liczba odbiorców i ilość energii w podziale na poziom napięcia zasilania wg danych za 2007 rok [1]

| Poziom napięcia | Liczba odbiorców | | Energia | |
|-----------------|------------------|-------|---------|-----|
| | [szt.] | [%] | [GWh] | [%] |
| Odbiorcy na WN | 287 | 0,0 | 27 064 | 23 |
| Odbiorcy na SN | 28 988 | 0,2 | 39 881 | 34 |
| Odbiorcy na nn | 16 005 000 | 99,8 | 50 705 | 43 |
| RAZEM | 16 034 275 | 100,0 | 117 650 | 100 |

Na rys. 1 i 2 pokazano odpowiednio: udział odbiorców na poszczególnych poziomach napięcia w ogólnej liczbie odbiorców energii oraz podział dostarczanej energii pomiędzy odbiorców przyłączonych na różnych napięciach.

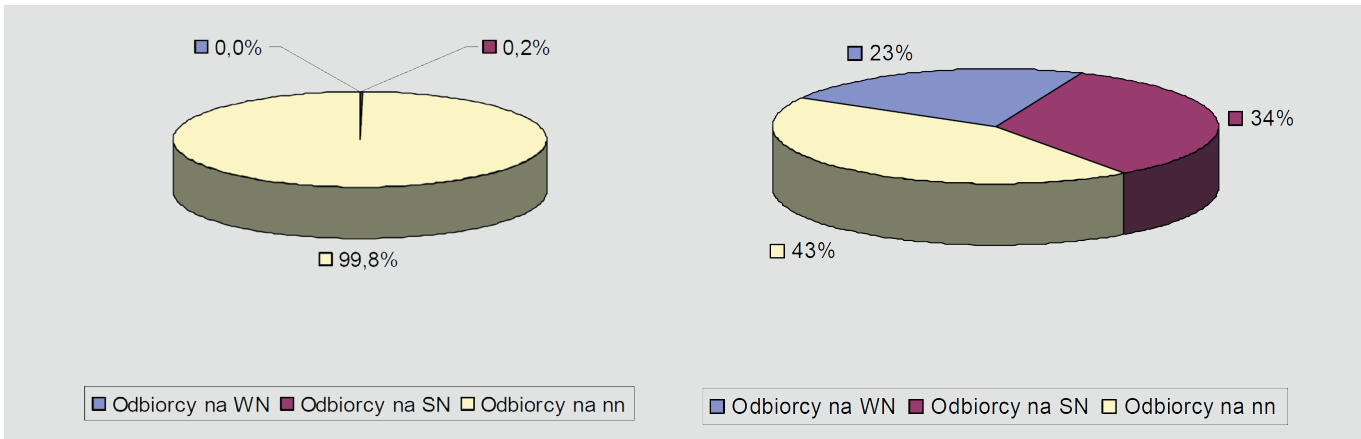
Streszczenie

W niniejszym artykule przeanalizowano możliwości zmniejszania strat mocy i energii w sieciach rozdzielczych SN przy użyciu najpopularniejszej metody bezinwestycyjnej, którą jest optymalna konfiguracja sieci, zwana także optymalizacją rozcięć.

Na wstępie scharakteryzowano sieci rozdzielcze, strukturę odbiorców energii elektrycznej oraz sklasyfikowano straty występujące w sieciach dystrybucyjnych. W dalszej kolejności przeanalizowano straty w rzeczywistych, rozległych sieciach

SN. Następnie przedstawiono problem optymalizacji rozcięć w sieci, dokonano przeglądu metod optymalizacji rozcięć oraz niektórych krajowych narzędzi umożliwiających wykonywanie takich obliczeń. Ponadto porównano wyniki działania omawianych narzędzi na przykładzie rzeczywistej, rozległej sieci SN. Artykuł zamknięto spostrzeżeniami dotyczącymi praktycznych aspektów obliczeń optymalizacji rozcięć w dużych sieciach, ze szczególnym uwzględnieniem różnorodnych ograniczeń lokalizacji punktów rozcięć.

Z rysunków tych wynika, iż proporcje ilości pobieranej energii przez poszczególne grupy odbiorców są zupełnie inne niż ich rozkład ilościowy, tzn. bardzo niewielka liczba wielkich i dużych odbiorców napięcia 110 kV i SN konsumuje znaczną ilość energii w porównaniu ze zużyciem energii ogromnej liczby odbiorców niskiego napięcia.



Rys. 1. Udział odbiorców na poszczególnych poziomach napięcia w ogólnej liczbie odbiorców energii elektrycznej

Rys. 2. Energia dostarczona do odbiorców końcowych na poszczególnych poziomach napięcia

2. ALOKACJA STRAT W SYSTEMIE DYSTRYBUCYJNYM

Przepływowi energii przez sieci elektroenergetyczne nieodłącznie towarzyszą straty. Są one związane z przepływem prądu przez poszczególne jej elementy. W tabeli 3 na podstawie [2] zestawiono podział ogółu strat technicznych w sieci dystrybucyjnej na poszczególne ich rodzaje oraz elementy sieci. Przytoczone zestawienie pozwala na orientację w obszarach alokacji strat w systemie dystrybucyjnym.

Tab. 3. Przeciętne straty techniczne w elementach sieci rozdzielczych w [%] ich udziału w stratach technicznych całkowitych [2]

| Lp. | Rodzaj strat | Udział w stratach całkowitych [%] |
|-----|--|-----------------------------------|
| 1. | Obciążeniowe w sieci 110 kV | 36 |
| 2. | Obciążeniowe w sieci SN | 22 |
| 3. | Obciążeniowe w sieci nn | 16 |
| 4. | Jałowe w transformatorach SN/nn | 9 |
| 5. | Obciążeniowe w transformatorach SN/nn | 5 |
| 6. | Jałowe w transformatorach 110/SN | 4 |
| | Razem 1 ÷ 6 | 92 |
| 7. | W licznikach nn | 2,8 |
| 8. | Obciążeniowe w transformatorach 110/SN | 1,6 |
| 9. | W.l.z. nn | 1,3 |
| 10. | Uptywnościowe w sieci SN | 0,9 |
| 11. | Uptywnościowe w sieci 110 kV | 0,6 |
| 12. | W kondensatorach 110 kV | 0,5 |
| 13. | Jałowe w transformatorach SN/SN | 0,3 |
| 14. | W kondensatorach SN | 0,1 |
| 15. | W kondensatorach nn | <0,1 |
| 16. | Obciążeniowe w transformatorach SN/SN | <0,1 |
| 17. | Uptywnościowe w sieci nn | <0,1 |
| | Razem 7 ÷ 17 | 8 |
| | RAZEM 1 ÷ 17 | 100,0 |

Pierwszych 6 pozycji tabeli obejmuje 92% technicznych strat energii, podczas gdy pozostałe 11 pozycji dotyczy 8% strat. Na pierwszych trzech pozycjach występują obciążeniowe straty w sieci 110 kV, SN i nn. Taką kolejność można tłumaczyć ilością energii przepływającej przez sieci poszczególnych poziomów napięcia. Transformacja na niższy poziom napięcia dotyczy coraz mniejszej ilości energii, ze względu na istniejące zapotrzebowanie odbiorców danego poziomu napięcia (tab. 2 i rys. 2).

3. STRATY MOCY W ROZLEGŁYCH SIECIACH SN

Poniżej zaprezentowano niektóre wyniki analiz wykonanych na dużych sieciach rozdzielczych SN. Obiektami były sieci ośmiu rejonów energetycznych, położonych w południowej części Polski. W tabeli 4 zestawiono parametry analizowanych sieci, ich obciążenie szczytowe oraz obciążeniowe straty mocy w liniach SN. Obliczeń strat dokonano, posługując się programami do obliczeń rozptyłu mocy z wykorzystaniem dokładnych modeli sieci oraz estymacji obciążeń poszczególnych stacji transformatorowych SN/nn.

Rejony A – D posiadają sieci pracujące na napięciu 20 kV, które jest mniej powszechne w polskich warunkach. Straty mocy przy obciążeniu szczytowym w badanych sieciach kształtują się na poziomie poniżej 1%. Bardziej szczegółową analizę sieci rejonów A – D zamieszczono w dalszej części artykułu, poświęconej praktycznym aspektom optymalizacji rozcięć w sieciach rozległych.

Tab. 4. Zestawienie parametrów rozległych sieci SN oraz strat mocy występujących przy obciążeniu szczytowym

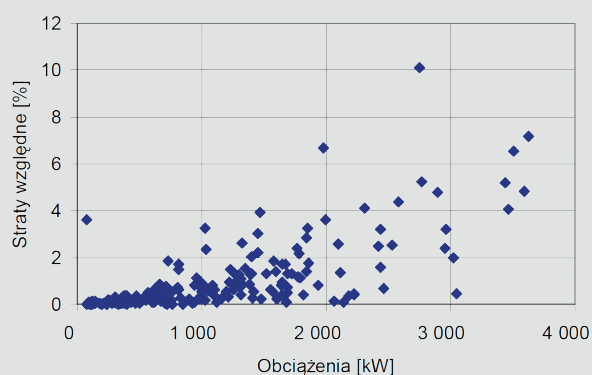
| Nazwa rejonu | Napięcie znamionowe sieci | Liczba GPZ | Liczba stacji SN/nn | Całkowita długość sieci SN | Obciążenie w szczycie | Straty mocy | Straty względne |
|--------------|---------------------------|------------|---------------------|----------------------------|-----------------------|-------------|-----------------|
| | [kV] | | | | | | |
| Rejon A | 20 | 6 | 889 | 969 | 64,69 | 578,6 | 0,89 |
| Rejon B | 20 | 7 | 542 | 520 | 55,41 | 239,8 | 0,43 |
| Rejon C | 20 | 7 | 991 | 1048 | 60,19 | 349,4 | 0,58 |
| Rejon D | 20 | 7 | 1157 | 1277 | 61,04 | 497,7 | 0,82 |
| Rejon E | 15 | 5 | 582 | 511 | 44,98 | 948,3 | 2,11 |
| Rejon F | 15 | 7 | 1124 | 1079 | 72,79 | 1182,6 | 1,62 |
| Rejon G | 15 | 5 | 885 | 862 | 62,37 | 1046 | 1,68 |
| Rejon H | 15 | 6 | 1028 | 938 | 45,34 | 902 | 1,99 |

Rejony E – H pracują na najbardziej typowym w Polsce napięciu znamionowym sieci SN, tj. 15 kV. Podany dla nich w tabeli 5 poziom strat mocy kształtuje się od ok. 1,6% do 2,1%. Przytoczony wskaźnik strat nie pozwala uzyskać informacji na temat strat w poszczególnych obwodach sieci.

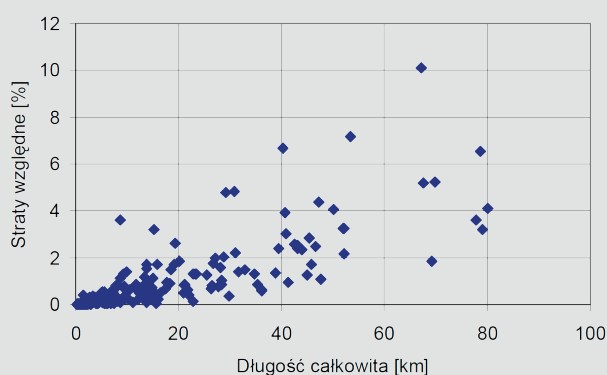
Dla zobrazowania rozkładu strat i ich zróżnicowania w poszczególnych obwodach dokonano analizy, której wyniki przedstawiono na rys. 3–5. Sieci rejonów E – H zawierają łącznie 202 obwody o bardzo zróżnicowanych parametrach, tj.: długość całkowita, przekrój przewodów, liczba zasilanych stacji i obciążenie szczytowe. Można wśród nich znaleźć krótkie ciągi kablowe sieci miejskich, zasilające po kilka stacji transformatorowych SN/nn, jak również bardzo rozległe obwody sieci terenowej o długości kilkudziesięciu kilometrów, zasilające bardzo dużą liczbę stacji. Na kolejnych rysunkach zamieszczono:

- rys. 3 – względne straty mocy w ciągach w zależności od ich obciążenia szczytowego
- rys. 4 – względne straty mocy w ciągach w zależności od ich długości całkowitej
- rys. 5 – względne straty mocy w ciągach w zależności od liczby zasilanych stacji SN/nn.

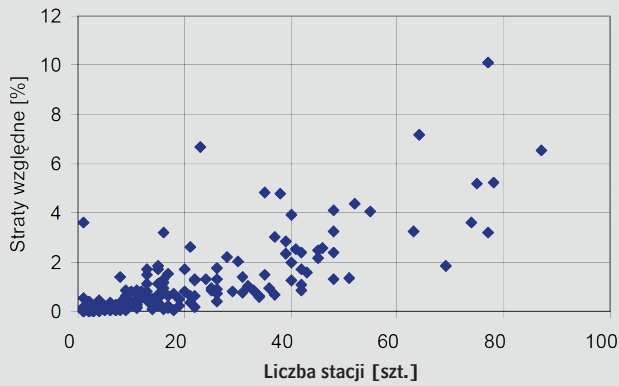
Przedstawione rysunki pozwalają zorientować się w rozkładzie strat i znacznym ich zróżnicowaniu w poszczególnych obwodach sieci.



Rys. 3. Względne straty mocy w 202 obwodach SN (Rejony E – H) w funkcji ich obciążenia szczytowego



Rys. 4. Względne straty mocy w 202 obwodach SN (Rejony E – H) w funkcji ich długości całkowitej



Rys. 5. Względne straty mocy w 202 obwodach SN (Rejony E – H) w funkcji liczby zasilanych stacji SN/nn

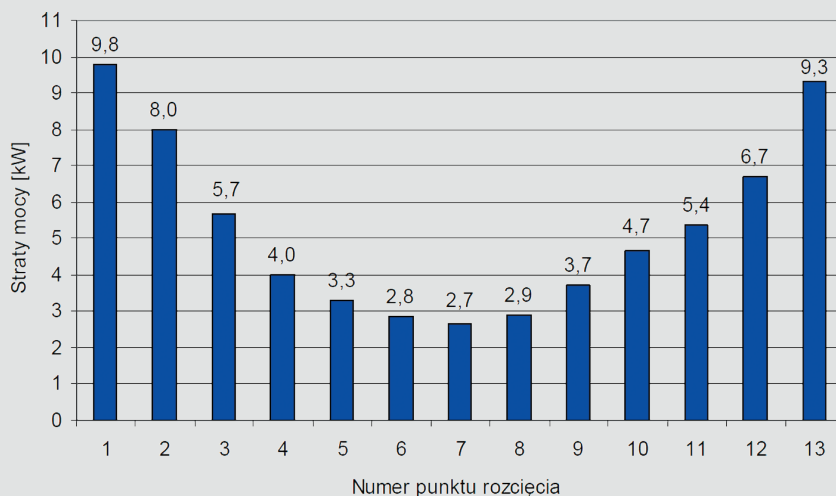
4. OPTIMALIZACJA ROZCIĘĆ – PRZEDSTAWIENIE PROBLEMU

Jednym z podstawowych działań o charakterze bezinwestycyjnym, prowadzącym do zmniejszenia strat w sieci dystrybucyjnej, jest optymalizacja rozcięć. Rozdzielcze sieci elektroenergetyczne średnich napięć budowane są jako struktury zamknięte, ale pracują w konfiguracji otwartej. Punkty podziału ustanawiające jednoznacznie przynależność poszczególnych stacji SN/nn do konkretnych obwodów nazywane są rozcięciami.

Zadanie optymalizacji punktów rozcięć polega na dobraniu takiego ustawienia punktów podziału sieci, aby otrzymać układ charakteryzujący się najmniejszymi całkowitymi stratami obciążeniowymi. Rozwiązanie takiego zadania dla sieci rzeczywistej, np. jednego rejonu dystrybucji, sprowadza się do rozwiązania zadania minimalizacji funkcji wielu zmiennych, najczęściej z ograniczeniami. Wymaga to z reguły zastosowania odpowiednich narzędzi i algorytmów ze względu na rozmiar zadania (liczbę zmiennych) oraz strukturę układu (znaczną liczbę wzajemnych powiązań obwodów).

W rozległej sieci terenowej średniego napięcia, zawierającej od kilkudziesięciu do kilkuset węzłów (stacji), jak już wspomniano, znalezienie optymalnych – ze względu na minimum strat mocy – punktów rozcięć eksploatacyjnych jest rzeczą trudną.

Rys. 6 przedstawia przykład strat mocy w torze sieci elektroenergetycznej, dwustronnie zasilanym, w zależności od punktu rozcięcia. Straty mocy są najmniejsze dla rozcięcia w okolicy punktu splotu.



Rys. 6. Straty mocy w torze dwustronnie zasilanym sieci elektroenergetycznej w zależności od miejsca rozcięcia eksploatacyjnego toru

Uzyskanie efektu w postaci zmniejszenia strat przez zmianę rozcięcia wymaga wykonania określonych czynności technicznych i organizacyjnych. Wykonanie tych czynności wiąże się z poniesieniem określonych kosztów.

Jeżeli zmiana rozcięcia toru wymaga zakupu i montażu nowych łączników, to koszty można obliczyć z zależności:

$$K_{ro} = n_o K_o + \sum_{i=1}^{n_o} K_{mi} \quad (1)$$

gdzie: K_{ro} – całkowity koszt zakupu i montażu łączników; K_o – koszt inwestycyjny jednego łącznika; K_{mi} – koszt montażu pojedynczego i -tego łącznika; n_o – liczba instalowanych łączników.

Koszt montażu pojedynczego łącznika uwzględnia koszty robocizny i koszty transportu:

$$K_{mi} = k_g t_{BR} l_{BR} + k_{km} l_{km} \quad (2)$$

gdzie: k_g – koszt pracy jednej godziny pracownika; t_{BR} – czas pracy pracownika przy montażu pojedynczego łącznika; l_{BR} – liczba pracowników; k_{km} – koszt jednego kilometra transportu; l_{km} – długość trasy transportu.

Jeśli zmiany rozcięć dokonywane są w sieci wyposażonej w łączniki w każdym punkcie możliwym do rozcięcia toru, to koszty sprowadzają się do kosztów związanych z wykonaniem przełączeń w sieci:

$$K_{rp} = \sum_{i=1}^{n_p} K_{pi} \quad (3)$$

gdzie: K_{rp} – całkowite koszty przełączeń; n_p – liczba wykonywanych przełączeń.

Efektom wykonanych przełączeń będzie zmniejszenie strat mocy o $\Delta\Delta P$ i energii o $\Delta\Delta E$. Zysk Z_p , wynikający ze zmniejszenia strat mocy i energii, obliczamy z zależności:

$$Z_p = S_S (\Delta P_{st} - \Delta P_{no}) + k_{\Delta E} (\Delta E_{st} - \Delta E_{no}) = \Delta\Delta P (S_S + k_{\Delta E} \tau) \quad (4)$$

gdzie: ΔP_{st} , ΔE_{st} – straty mocy i straty energii w analizowanej sieci przed dokonaniem przełączeń; ΔP_{no} , ΔE_{no} – straty mocy i straty energii w analizowanej sieci po przełączeniach; $\Delta\Delta P$ – zmniejszenie strat mocy; τ – czas trwania strat maksymalnych; S_S – składnik stały stawki sieciowej (koszt mocy); $k_{\Delta E}$ – jednostkowy koszt energii w sieci (cena energii + składnik zmienny stawki sieciowej).

Oceny efektywności przeprowadzonych działań można dokonać przez wyliczenie prostego okresu zwrotu SPP nakładów:

$$SPP = \frac{K}{Z_p} \quad (5)$$

gdzie: K – koszt zakupu i montażu (K_{ro}) lub przełączeń (K_{rp}).

Przykład 1

Rozważa się problem rozcięć eksploatacyjnych w modelowej, elektroenergetycznej sieci pętlowej SN, zasilającej 120 stacji transformatorowych w 10 pętlach sieciowych o następujących parametrach pojedynczej pętli (toru):

- suma mocy stacji transformatorowych zainstalowanych w jednym torze $S_{tc} = 5\,800$ kVA
- maksymalny prąd wpływający do pętli: $I_{max} = 120$ A
- energia wprowadzona do sieci $E = 28\,059$ kWh
- długość pojedynczego toru $l_t = 2\,600$ m
- przekrój żył kabli: $s = 120$ mm² AL.



Obliczenia wykonano dla następujących dodatkowych danych:

- jednostkowy koszt strat energii (łącznie ze składnikiem zmiennym stawki sieciowej) $k_{\Delta E} = 0,20$ zł/kWh
- jednostkowy koszt strat mocy (składnik stały stawki sieciowej) $k_{\Delta P} = 80$ zł/kW/rok
- liczba pracowników $I_{BR} = 2$ osoby
- koszt godziny pracy jednego pracownika $k_g = 37$ zł/godz.
- czas pracy jednego pracownika $t_{BR} = 4$ godz.
- długość trasy przejazdu $t_{km} = 10$ km
- koszt jednostkowy transportu $k_{km} = 3,0$ zł/km
- liczba przełączeń $n_p = 8$
- czas trwania strat maksymalnych $\tau = 2\ 100$ [h/a].

Dodatkowo założono, że obciążenie stacji transformatorowych jest proporcjonalne do mocy znamionowych transformatorów oraz przyjęto, że sieć pętlowa posiada łączniki umożliwiające wykonanie podziału w każdym odcinku.

W układzie sieci pętlowej rozcięcia eksploatacyjne mogą znajdować się w różnych odcinkach toru. Na potrzeby obliczeń przyjęto, że wszystkie pętle są identyczne, ale rozcięcia znajdują się w różnych miejscach. W tabeli 5 zestawiono wyniki obliczeń strat mocy w poszczególnych pętlach dla pewnego, przyjętego układu rozcięć, który został wyspecyfikowany w wierszu drugim. Ponadto podano minimalne straty możliwe do osiągnięcia w analizowanym zbiorze pętli na skutek zmiany lokalizacji wszystkich rozcięć do położenia optymalnego.

Tab. 5. Straty mocy w pętlach

| Nr pętli | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Nr rozcięcia (wg rys. 6) | 8 | 3 | 5 | 9 | 7 | 4 | 2 | 7 | 8 | 1 |
| Straty mocy w pętlach (wg rys. 6) [kW] | 2,9 | 5,7 | 3,3 | 3,7 | 2,7 | 4,0 | 8,0 | 2,7 | 2,9 | 9,8 |
| Straty całkowite w pętlach – stan istniejący | [kW] | 45,7 | | | | | | | | |
| Straty minimalne w pętlach (wg rys. 6) | [kW] | 27,0 | | | | | | | | |
| Zmniejszenie strat mocy $\Delta\Delta P$ | [kW] | 18,7 | | | | | | | | |

Jeżeli nie ma ograniczeń technicznych, to zmiana ośmiu punktów rozcięcia w analizowanej sieci może przynieść zmniejszenie strat o $\Delta\Delta P = 18,7$ kW.

Dla przyjętych danych obliczono prosty okres zwrotu (*SPP*) (wzór 5) kosztów poniesionych na zmianę przełączeń rozcięć w sieci:

- koszt przełączeń sieci:

$$K_{rp} = n_p \times (k_g \times t_R \times I_{RB} + k_{km} \times I_{km}) = 8 \times (37 \times 2 \times 4 + 10 \times 3) = 2\ 608 \text{ zł}$$

- zysk wynikający ze zmniejszenia strat mocy i energii:

$$Z_p = \Delta\Delta P \times (S_s + k_{\Delta E} \times \tau) = 18,7 \times (80 + 0,2 \times 2\ 100) = 9\ 350 \text{ zł}$$

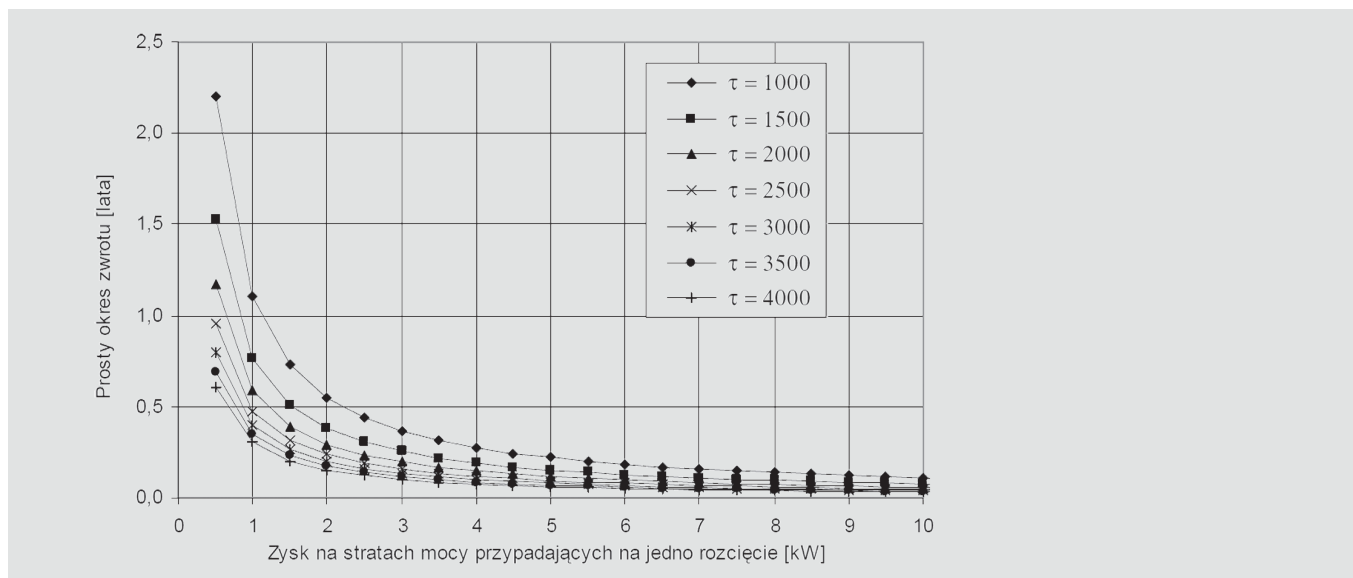
- prosty okres zwrotu *SPP*:

$$SPP = K_{rp} / Z_p = 2\ 608 / 9\ 350 = 0,28 \text{ lat (3 miesiące i 11 dni).}$$

Dzieląc wielkość zmniejszenia strat przez liczbę przełączeń potrzebnych do uzyskania tego zjawiska, otrzymuje się średnią wartość zmniejszenia strat przypadającą na jedno przełączenie: $\delta\Delta P = \Delta\Delta P / n_p$. Na rys. 7 przedstawiono zależność prostego okresu zwrotu kosztów od zmniejszenia strat mocy na skutek dokonania jednego przełączenia w sieci, obliczoną dla różnych wartości czasu trwania strat maksymalnych.

Zwrot nakładów związanych ze zmianą rozcięć w analizowanym przykładzie zależy od czasu trwania strat maksymalnych oraz jednostkowego zmniejszenia strat mocy przypadającego na jedno rozcięcie $\delta\Delta P$.

Z rys. 7 wynika, że dla sieci przystosowanych technicznie do wykonywania rozcięć eksploatacyjnych w dowolnej stacji transformatorowej i dla wartości zmniejszenia strat przypadających na jedno rozcięcie $\delta\Delta P \geq 1$ kW/rozciecie, koszty związane ze zmianą rozcięcia sieci zwracają się po upływie ok. 1 roku.



Rys. 7. Prosty okres zwrotu kosztów przełączeń w sieci, w zależności od średniej wartości zmniejszenia strat $\Delta\Delta P$, przypadających na jedno rozcięcie dla różnych czasów trwania strat maksymalnych

Dla sieci pętlowych lub typu wrzeciono oraz sieci, które da się sprowadzić do tych struktur, obliczenia strat mocy i energii można wykonać przy użyciu arkusza kalkulacyjnego, bez konieczności stosowania specjalistycznego oprogramowania. Użycie arkusza kalkulacyjnego umożliwi obliczenie strat dla istniejącego układu pracy oraz wybór układu rozcięć eksploatacyjnych odpowiadającego minimum strat.

5. PRZEGLĄD METOD I NARZĘDZI DO OPTIMALIZACJI ROZCIĘĆ

Opracowano wiele metod służących do ograniczania strat mocy i energii przez odpowiedni wybór rozcięć w sieci rozdzielczej. Praktyczne zastosowanie znalazły metody heurystyczne, które pozwalają analizować sieci o dużej liczbie węzłów. Przykładami takich rozwiązań są programy SIEĆ, DRZEWO i STROP.

W metodach programów SIEĆ, DRZEWO, STROP do obliczania strat mocy stosowana jest formuła $3I^2R$. W każdej z metod w różnej formie wykorzystuje się następujące dane:

- dane o analizowanej sieci
 - informacje o układzie połączeń sieci
 - liczba odcinków sieci
 - długości poszczególnych odcinków linii napowietrznych i kablowych
 - przekroje przewodów kabli i przewodów napowietrznych;
- dane o węzłach sieci
 - liczba węzłów
 - obciążenia mocą szczytową czynną i bierną każdego z węzłów
 - czas trwania strat maksymalnych lub przebieg krzywej obciążenia (krzywa schodkowa) do obliczeń strat energii;
- dane katalogowe (umożliwiające dobór parametrów elementów sieci)
 - katalogi linii napowietrznych
 - katalogi linii kablowych
 - katalogi transformatorów.

Program SIEĆ

Problem optymalnego podziału sieci rozdzielczej SN w programie SIEĆ rozwiązywany jest w dwóch etapach [3], [4]:



Etap I

W etapie pierwszym uzyskuje się rozwiązanie początkowe. W węzłach występują tylko moce czynne dla obciążenia szczytowego, a gałęzie sieci są odwzorowane tylko rezystancjami. W punktach zasilania przyjmuje się jednakowe napięcia. Podstawą do wyznaczenia rozcięć w tym etapie są wyniki uzyskane z wykonania wielokrotnych (iteracyjnych) obliczeń rozptyłów mocy czynnej wg uproszczonej metody Newtona. Minimalizowaną funkcją celu są sumaryczne straty mocy.

Etap II

Przeprowadza się korektę otrzymanego w etapie I podziału sieci. Gałęzie w tym modelu obliczeniowym odwzorowane są przewodnościami podłużnymi i poprzecznymi. Przebieg obciążenia węzłów (mocą czynną i bierną) jest odwzorowany za pomocą krzywej schodkowej. Punktem startowym w etapie drugim jest układ promieniowy uzyskany w etapie pierwszym. Wielokrotne iteracyjne obliczenia rozptyłów mocy w sieci pozwalają na stopniową modyfikację wstępnego układu sieci, aż do uzyskania układu optymalnego. Minimalizowaną funkcją celu w etapie drugim jest suma strat energii.

W skład systemu programów SIEĆ wchodzi program BAZA i podsystemy ROZA i REGA. Program BAZA służy do tworzenia zbiorów danych. Podsystem ROZA służy do przetwarzania danych pierwotnych, obliczania rozptyłów mocy i mocy zwarciovych oraz do wyznaczania optymalnych punktów rozcięć w sieci z uwzględnieniem optymalnego przyporządkowania ciągów linii do szyn w stacjach dwusystemowych. Podsystem REGA, korzystając ze zbiorów danych węzłowych i gałęziowych dla poszczególnych GPZ, określa parametry regulatorów napięcia transformatorów w GPZ i położenia przełączników zaczepek transformatorów SN/SN i SN/nn. Za pomocą podsystemu REGA można również tworzyć schematy sieci promieniowej wraz z wynikami obliczeń (rozptyłów, zwarc i optymalizacji poziomów napięć).

Program SIEĆ umożliwia prowadzenie obliczeń dla sieci o praktycznie dowolnej liczbie węzłów i gałęzi. Zbiory danych węzłowych i gałęziowych mogą zawierać dowolną liczbę elementów (np. modelowanie sieci o 10 000 węzłów wymaga ok. 4 MB pamięci typu RAM).

Dodatkowe informacje o programie SIEĆ można znaleźć w literaturze [3], [4].

Program STROP

Program STROP [5] optymalizuje układ rozcięć według skorygowanego algorytmu Rosenbrocka [6]. Optymalne położenie punktów rozcięć w sieci ustalane jest ze względu na minimum strat mocy czynnej. Odgałęzienia zostają zredukowane do obciążeń skupionych, przyłączonych we właściwych węzłach torów magistralnych i nie podlegają procesowi optymalizacji rozcięć.

Metoda Rosenbrocka [6] należy do grupy bezgradientowych metod poszukiwań prostych. W metodzie tej bada się zachowanie funkcji celu (minimum strat mocy) tylko w jednym lub dwóch punktach leżących na kierunku poszukiwań (spełniających wymagania techniczne). Sposób wyboru tych punktów jest ustalany na początku każdej iteracji.

Istota modyfikacji metody Rosenbrocka w programie STROP sprowadza się do kontrolowania długości i zwrotu kroku (rozumianego jako wektor) oraz do nakładania na funkcję celu kary na rozwiązanie wykraczające poza kierunek poszukiwań. Każda iteracja w metodzie Rosenbrocka polega na wykonywaniu kroków próbnych we wszystkich możliwych kierunkach poszukiwań. Jeżeli w wyniku wykonania kroku próbnego otrzymuje się zmniejszenie wartości funkcji celu (zmniejszenie strat mocy), to długość kroku zostaje zwiększona. W przeciwnym wypadku następuje skrócenie długości kroku oraz zmiana jego zwrotu.

Zadania realizowane w ramach programu STROP z zakresu obliczeń sieci SN zgodnie z [5] to:

- obliczanie strat mocy w analizowanej sieci
- lokalizacja baterii kondensatorów o zadanej mocy w linii ze względu na minimum strat mocy
- optymalizacja mocy baterii kondensatorów oraz jej położenia w linii ze względu na minimum strat mocy
- analiza napięć zasilania w punktach zasilania sieci SN
- obliczanie poziomów i spadków napięć oraz wyznaczanie stref regulacji transformatorów SN, nn w ruchu normalnym
- obliczenia zwarciovych w ruchu normalnym sieci

- obliczenia poziomów i spadków napięć w ruchu rezerwowym
- obliczenia zwarciove w ruchu rezerwowym sieci
- optymalizacja rozcięć w sieci (minimum strat mocy czynnej)
- wyznaczenie wariantów zasilania w przypadku awarii w linii (jeżeli istnieją możliwości techniczne takiego zasilania).

W programie STROP maksymalny wymiar sieci, rozumiany jako pojedynczy zbiór do obliczeń, może zawierać: 90 głównych punktów zasilania – GPZ (zasilacze), 1 000 linii, 5 000 węzłów, 5 000 odcinków linii (w torach głównych – magistralach – sieci nie więcej niż 3 500 odcinków linii).

Dodatkowe informacje o programie STROP można znaleźć w [5].

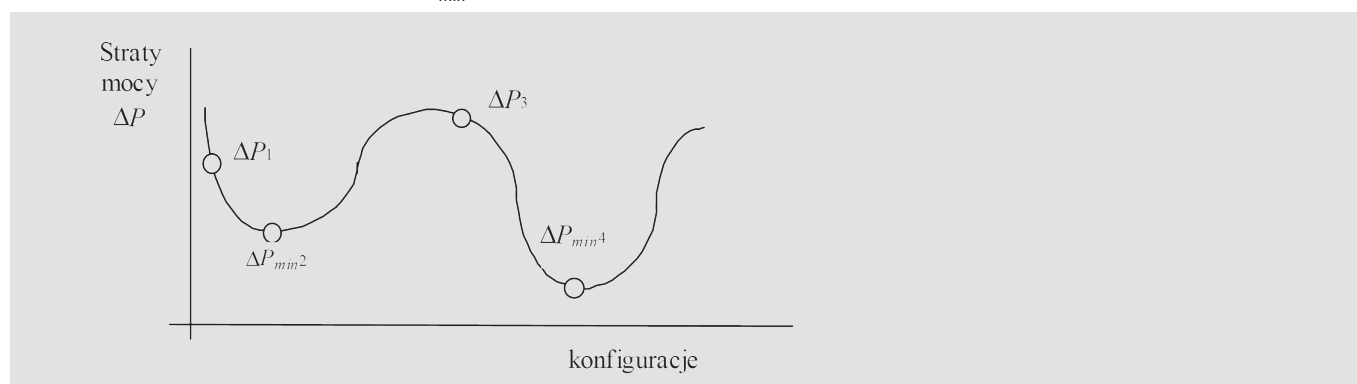
Program DRZEWO

Do optymalizacji rozcięć w programie DRZEWO zastosowano metodę symulowanego wyżarzania (SW) (ang. *Simulated Annealing* – SA) [7], [8], [9]. Jako kryterium ekonomiczne wyboru wariantu optymalnego przyjęto minimalizację strat mocy w sieci.

Przyjmijmy, że znane jest rozwiązanie początkowe (np. konfiguracja eksploatacyjna stosowana przez służby danego rejonu) o stratach mocy ΔP_1 (rys. 8). Poprawę rozwiązania można uzyskać, stosując np. algorytm gradientowy:

- w każdej iteracji znajduje się losowo nowe rozwiązanie (układ sieci) w otoczeniu rozwiązania bieżącego
- akceptuje się tylko rozwiązania o stratach mniejszych niż w rozwiązaniu poprzednim.

Wadą takiego algorytmu jest możliwość utknięcia w optimum lokalnym. Dla przykładu z rys. 8, startując z punktu (układu sieci) o stratach ΔP_1 , stosując metodę gradientową, obliczenia zostaną zakończone w optimum lokalnym (układ sieci o stratach ΔP_{min^2}).



Rys. 8. Zbiór możliwych konfiguracji sieci o różnych strach mocy

W algorytmie „symulowanego wyżarzania” SW dopuszcza się możliwość akceptacji rozwiązań o wyższych stratach niż dotychczas uzyskane. Postępowanie według algorytmu SW sprowadza się do następujących reguł:

- w każdym kroku iteracji wylicza się zmianę strat $\Delta\Delta P$ jako różnicę rozwiązania bieżącego i ostatnio zaakceptowanego
- jeżeli straty ulegają zmniejszeniu ($\Delta\Delta P < 0$), to rozwiązanie jest akceptowane
- zwiększenie strat ($\Delta\Delta P > 0$) nie powoduje bezpośredniego odrzucenia obliczonej konfiguracji sieci; dopuszcza się jej akceptację, gdy spełniony jest warunek:

$$r < \exp(-\delta\Delta P / T) \quad (6)$$

gdzie: T – oznacza parametr symulujący temperaturę wyrażoną w jednostkach strat; r – liczbę losową rozkładu równomiernego z przedziału (0,1).

Tak skonstruowany algorytm obliczeń stwarza możliwość zaakceptowania rozwiązania o stratach ΔP_3 (rys. 8), mimo iż $\Delta P_3 > \Delta P_1$. W efekcie możliwe jest uzyskanie rozwiązania charakteryzującego się stratami mocy ΔP_{min^4} , które dla prezentowanego zbioru rozwiązań jest minimum globalnym. Jeżeli parametr T , który w rzeczywistych układach fizycznych reprezentuje temperaturę, będzie się zmniejszał, poczynając od przyjętej wartości

maksymalnej według określonej reguły, to opisany proces jest analogią do wyżarzania (wychładzania, odpuszczenia) metali w procesie krystalizacji [8].

W programie DRZEWO elementem zmieniającym układ sieci jest wyłączenie linii zasilającej losowo wybrany węzeł sieci. Powoduje to powstanie fragmentu sieci izolowanej. Następnie realizuje się zasilenie odłączonego węzła ze wszystkich znajdujących się pod napięciem węzłów. Dla każdej nowej konfiguracji (ze zmienionymi miejscami rozcięć) oblicza się wartość funkcji celu. Jeżeli nowa konfiguracja ma mniejsze straty, jest akceptowana. W przeciwnym wypadku do dalszych rozważań zostaje przyjęte rozwiązanie według zmodyfikowanej reguły (6).

Program DRZEWO jest przeznaczony do optymalizacji rozwoju sieci rozdzielczej SN o strukturze drzewa. Obliczanie optymalnych rozcięć w sieci jest dodatkową opcją. Program umożliwia prowadzenie obliczeń sieci rozdzielczych o strukturze drzewa praktycznie dla dowolnej liczby węzłów i gałęzi.

Nie powstała wersja komercyjna programu.

6. OBLICZENIA PORÓWNAWCZE OPTIMALIZACJI ROZCIĘĆ W RZECZYWISTEJ SIECI Z UŻYCIEM RÓŻNYCH NARZĘDZI

Przykład 2

Do optymalizacji rozcięć w sieci rozdzielczej SN wybrano rzeczywistą sieć jednego z rejonów energetycznych. Jest to sieć terenowo-miejska, w której większość obwodów ma możliwość drugostronnego zasilania.

Liczba węzłów odbiorczych w sieci wynosi 970, zaś liczba węzłów rozdzielczych – 648. W sieci znajdują się 1 793 odcinki, przy czym 73% z tej liczby przypada na odcinki napowietrzne, zaś 27% na odcinki kablowe.

Wykonano obliczenia strat mocy oraz strat energii w układzie sieci przed i po optymalizacji rozcięć oraz zysku z tytułu zmniejszenia strat mocy i energii. Obliczenia wykonano dla następujących danych:

- napięcie robocze sieci $U_r = 15,75$ [kV]
- czas trwania strat maksymalnych $\tau = 3\,106$ [h/a]
- jednostkowe koszty strat mocy $S_s = 36,36$ [zł/kW/a]
- jednostkowe koszty strat energii $k_{\Delta E} = 0,25$ [zł/kWh/a].

Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 6.

Na podstawie otrzymanych wyników wykonano obliczenia efektywności zmiany rozcięć w sieci. Z zależności (1)÷(5) obliczono koszty zainstalowania łączników (przyjęty koszt łącznika $k_o = 4\,000$ zł, pozostałe dane do obliczeń, jak w przykładzie 1) oraz obliczono prosty okres zwrotu kosztów. Wyniki obliczeń podano w tabeli 7.

Tab. 6. Porównanie wyników obliczeń rocznych strat mocy i energii dla sieci rejonu

| Nazwa programu | Straty mocy [kW] | | | Straty energii [MWh] | | | Zysk [tys. zł] |
|----------------|---------------------|------------------|---------|----------------------|------------------|---------|----------------|
| | przed optymalizacją | po optymalizacji | różnica | przed optymalizacją | po optymalizacji | różnica | |
| DRZEWO | 571,1 | 504,1 | 67,0 | 1773,8 | 1565,7 | 208,1 | 54,44 |
| SIEĆ | 612,1 | 515,6 | 96,5 | 1901,2 | 1601,4 | 299,8 | 78,64 |
| STROP | 582,1 | 461,1 | 121,0 | 1808,0 | 1432,2 | 375,8 | 98,14 |

Tab. 7. Prosty okres zwrotu kosztów zainstalowania odłączników w sieci

| Program | Liczba rozcięć w sieci w stanie istniejącym [szt.] | Liczba proponowanych zmian miejsc rozcięcia sieci [szt.] | Liczba nowych łączników [szt.] | Koszt inwestycyjny łączników [tys. zł] | Prosty okres zwrotu kosztów [lata] |
|---------|--|--|--------------------------------|--|------------------------------------|
| DRZEWO | 99 | 62 | 62 | 248 | 4,7 |
| SIEĆ | 99 | 77 | 77 | 308 | 4,1 |
| STROP | 99 | 71 | 71 | 284 | 3,0 |

W literaturze można znaleźć opisy innych metod optymalizacji rozcięć: cykli i kar [10] oraz opartych na algorytmach ewolucyjnych [11]. W pracy [11] zamieszczono porównanie wyników obliczeń wykonanych za pomo-

czą metody cykli i kar oraz algorytmu ewolucyjnego dla przykładowych sieci elektroenergetycznych, składających się z niewielkiej liczby węzłów i linii.

Na podstawie wykonanych analiz można sformułować następujące wnioski ogólne:

1. Obliczanie optymalnych rozcięć ze względu na minimum strat mocy i energii w dużych sieciach o strukturze wielokrotnie zamkniętej wymaga stosowania specjalistycznego oprogramowania.
2. Każdy z programów DRZEWO, SIEĆ, STROP może być stosowany do optymalizacji rozcięć ze względu na minimum strat mocy w dużych sieciach rozdzielczych SN.
3. Wygenerowane przez te programy wyniki obliczeń strat mocy różnią się między sobą. Różnice te są spowodowane:
 - zastosowaniem odmiennych metod poszukiwania optymalnych rozcięć w sieci
 - sposobem obliczania obciążeń poszczególnych stacji transformatorowych.
4. W sieciach o regularnej strukturze (wrzeciono, pęta) oraz sieciach, które da się sprowadzić do tych struktur, optymalizacji rozcięć ze względu na minimum strat mocy można dokonać przy użyciu arkusza kalkulacyjnego.

7. PRAKTYCZNE ASPEKTY OBLICZEŃ OPTIMALIZACYJNYCH W SIECIACH ROZLEGŁYCH

Poniżej zaprezentowano wyniki obliczeń oraz doświadczenia zebrane podczas wykonywania optymalizacji rozcięć w sieciach średniego napięcia kilku rejonów dystrybucji.

Do wykonania obliczeń optymalizacji rozcięć użyto programu STROP, który powstał na Politechnice Częstochowskiej [5]. Program umożliwia między innymi dokonywanie obliczeń rozptywu mocy w elektroenergetycznych sieciach rozdzielczych, optymalizowanie położenia rozcięć i obliczenia napięciowe.

Podstawą analizy strat oraz ich optymalizacji jest zbudowanie odpowiedniego modelu rozważanej sieci elektroenergetycznej. Dokonano tego w kilku wymienionych niżej etapach:

- budowa dokładnego modelu struktury sieci – model ten składa się ze wszystkich istniejących odcinków linii średniego napięcia z wyszczególnieniem sposobu ich wzajemnego połączenia oraz parametrów schematu zastępczego (rezystancja, reaktancja, susceptancja); model zawiera także informacje o wszystkich punktach podziału sieci występujących w istniejącym układzie pracy
- estymacja obciążeń stacji transformatorowych SN/nn – wyznaczenie mocy czynnej i biernej zapotrzebowanej przez poszczególne stacje transformatorowe w szczycie obciążenia na podstawie dostępnych informacji pomiarowych pochodzących głównie z odejść linowych w GPZ oraz wiedzy o poziomach obciążeń występujących w stacjach
- wyposażenie modelu struktury w obciążenia węzłowe – przypisanie obciążeń poszczególnych stacji transformatorowych odpowiednim węzłom w modelu sieci.

Tak przygotowany model obiektu stanowi punkt wyjścia do wykonania obliczeń stanu pracy sieci w układzie istniejącym, a następnie optymalizacji lokalizacji punktów podziału.

Obliczeń dokonano dla czterech sieci rozdzielczych średniego napięcia. Każda z sieci obejmowała swym zasięgiem obszar jednego rejonu dystrybucji (rejonu energetycznego).

Zestawienie danych charakteryzujących poszczególne sieci ujęto w tabeli 8.

Tab. 8. Zestawienie charakterystycznych parametrów analizowanych sieci rozdzielczych

| Nazwa rejonu | Napięcie znamionowe sieci | Liczba GPZ | Liczba stacji SN/nn | Całkowita długość sieci SN | Średni przekrój sieci | Liczba rozcięć |
|--------------|---------------------------|------------|---------------------|----------------------------|-----------------------|----------------|
| | [kV] | [szt.] | [szt.] | [km] | [mm ²] | [szt.] |
| Rejon A | 20 | 6 | 889 | 969 | 80 | 101 |
| Rejon B | 20 | 7 | 542 | 520 | 93 | 58 |
| Rejon C | 20 | 7 | 991 | 1 048 | 72 | 135 |
| Rejon D | 20 | 7 | 1 157 | 1 277 | 69 | 107 |



W tabeli zestawiono parametry charakterystyczne dla sieci, tj.: napięcie znamionowe, liczba stacji zasilających 110 kV/SN, liczba stacji SN/nn, całkowita długość sieci SN, średni przekrój sieci oraz liczba występujących rozcięć.

Dysponując modelami sieci wraz z odwzorowaniem obciążeń wszystkich stacji SN/nn, wykonano obliczenia rozptyłu prądów oraz strat mocy w istniejącym układzie pracy. Wyniki tych obliczeń zestawiono w tabeli 9, podając wielkości strat mocy w kW oraz wartość względną strat odniesioną do mocy zapotrzebowanej.

Analizując wielkości strat mocy występujące w sieciach średnich napięć rozważanych rejonów energetycznych, można stwierdzić, że już w istniejącym układzie pracy utrzymują się one na bardzo niskim poziomie. Świadczy o tym wskaźnik strat względnych odniesiony do mocy zapotrzebowanej, zawierający się w granicach od 0,43% do 0,89%. Tak niska wartość strat wynika z kilku czynników, do których zaliczyć należy:

- wysoką wartość napięcia znamionowego sieci rozdzielczych
- wysoki przekrój sieci, którego miarą jest podany w tabeli 9 średni ważony przekrój linii
- korzystną strukturę sieci przejawiającą się niewielką liczbą obwodów o znacznych długościach
- niewielkie obciążenie w stosunku do zdolności przesyłowych.

Następnie przystąpiono do wykonania pierwszych obliczeń optymalizacyjnych związanych ze zmianą układu pracy sieci, tzw. optymalizacji globalnej. Optymalizacja globalna to wyznaczenie układu pracy sieci o minimalnych stratach mocy, który nie podlega żadnym ograniczeniom związanym z położeniem punktów podziału. Oznacza to, iż każde rozcięcie może swobodnie zmieniać swoje położenie, a jego docelowa lokalizacja obejmuje dowolnie wybrany odcinek sieci. Trzeba w tym miejscu zaznaczyć, że takie rozwiązanie konfiguracji pracy sieci jest możliwe tylko teoretycznie. W praktyce istnieje wiele czynników ograniczających zarówno możliwość przemieszczania niektórych rozcięć, jak i limitujących potencjalne nowe lokalizacje. Bardziej szczegółowo omówiono te zagadnienia w punkcie dotyczącym ograniczeń lokalizacji rozcięć.

Obliczenia optymalizacji globalnej pozwalają na określenie potencjalnych, maksymalnych możliwości zmniejszenia strat, jakie można by uzyskać poprzez rekonfigurację sieci. To oznacza, że obliczenia te wyznaczają górne ograniczenie efektywności takich działań.

Wyniki obliczeń strat mocy w układach sieci skonfigurowanych optymalnie (bez żadnych ograniczeń) dla poszczególnych rejonów dystrybucji zestawiono w tabeli 9. Podano wartości strat w kW oraz procentowy poziom strat po optymalizacji globalnej w stosunku do strat w stanie istniejącym.

Tab. 9. Zestawienie wyników obliczeń strat mocy w układzie istniejącym oraz po dokonaniu optymalizacji globalnej

| Nazwa rejonu | Obciążenie szczytowe mocą czynną | Straty mocy w stanie istniejącym | | Straty mocy po optymalizacji globalnej | Poziom strat w odniesieniu do stanu istniejącego |
|--------------|----------------------------------|----------------------------------|--------|--|--|
| | [MW] | [kW] | [%] * | [kW] | [%] ** |
| Rejon A | 64,69 | 578,6 | 0,89 | 310 | 54 |
| Rejon B | 55,41 | 239,8 | 0,43 | 199,9 | 83 |
| Rejon C | 60,19 | 349,4 | 0,58 | 282,5 | 81 |
| Rejon D | 61,04 | 497,7 | 0,82 | 380,4 | 76 |

* wskaźnik obliczono w odniesieniu do obciążenia szczytowego mocą czynną

** wskaźnik obliczono, odnosząc straty w układzie zoptymalizowanym bez ograniczeń do strat mocy w układzie istniejącym

Podany w ostatniej kolumnie tabeli 9 wskaźnik procentowy jest najniższy dla rejonu A i wynosi 54%. Oznacza to, że w tym rejonie działania rekonfiguracyjne mogą potencjalnie przynieść największy efekt. W pozostałych obszarach (wskaźnik od 76% do 83%) istniejące układy pracy sieci są znacznie bliższe globalnemu optimum.

Jednakże o rzeczywistych możliwościach redukcji strat na skutek rekonfiguracji zdecyduje dopiero szczegółowa analiza występujących ograniczeń lokalizacji punktów podziału.

Analiza konfiguracji, w jakich pracują rzeczywiste, rozległe sieci rozdzielcze, oraz uwarunkowań determinujących układy pracy sieci wskazuje, iż w praktyce istnieje wiele czynników uniemożliwiających dowolne lokalizowanie punktów podziału sieci.

Ograniczenia lokalizacji rozcięć można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

- determinujące – ograniczenia wynikające z konieczności utrzymania podziałów w ściśle określonych punktach sieci – powodują one, że pewna część punktów podziału sieci posiada z góry określone położenie i nie może podlegać przemieszczeniom



- limitujące – ograniczenia związane z brakiem możliwości umiejscowienia podziału w dowolnym odcinku sieci – powodują one zawężenie możliwości zmian położenia dla rozcięć, których położenie może ulegać przemieszczeniom.

Istnienie ograniczeń determinujących spowodowane jest czynnikami o charakterze prawnym lub technicznym, do których należy zaliczyć:

- obowiązywanie umów o dostawę i sprzedaż energii elektrycznej z odbiorcami posiadającymi własne stacje transformatorowe, płacącymi za dwa zasilania
- zachowanie podstawowych układów zasilania rozdzielni sieciowych
- prawidłową pracę automatyki SZR w sieci średniego i niskiego napięcia
- zróżnicowane sposoby pracy punktów gwiazdowych transformatorów 110 kV/SN
- granice eksploatacji obszarów sieci i punkty rozliczeniowego pomiaru energii elektrycznej
- inne względy związane np. z wydzieleniem układów w celu prawidłowej współpracy źródeł z siecią rozdzielczą SN.

Istnienie ograniczeń limitujących spowodowane jest czynnikami o charakterze technicznym i eksploatacyjnym, do których należy zaliczyć:

- brak łączników w niektórych odcinkach sieci
- ograniczenia zdolności łączeniowej istniejących łączników
- trudny dostęp do określonego punktu sieci
- brak dostępu do stacji o każdej porze doby
- inne względy, np. organizacyjne, związane ze zróżnicowaniem własnościowym elementów sieci dystrybucyjnej.

Obecność ograniczeń determinujących sprawia, że położenie części rozcięć nie może ulegać zmianom. Powoduje to zmniejszenie liczby zmiennych w ramach zadania optymalizacji układu pracy danej sieci rozdzielczej.

Z kolei obecność ograniczeń limitujących powoduje, iż nie wszystkie wskazania przemieszczenia punktów podziału, uzyskane w wyniku procedury optymalizacyjnej, mogą być dokładnie zrealizowane. Realizuje się je w takich przypadkach w odcinku najbliższym względem odcinka optymalnego, gdzie dokonanie podziału jest możliwe.

Zarówno pozostawienie pewnej grupy rozcięć poza procedurą optymalizacji, jak i niedokładne przemieszczenia części rozcięć ruchomych skutkują zwiększonymi stratami mocy w układzie z ograniczeniami w stosunku do układu zoptymalizowanego globalnie.

Biorąc pod uwagę omówione powyżej ograniczenia dotyczące lokalizacji rozcięć, dokonano wiele obliczeń optymalizacyjnych dla sieci poszczególnych rejonów od A do D. Obliczenia takie pozwalają na:

- wskazanie możliwych do realizacji zmian w konfiguracji sieci
- ewentualne stwierdzenie optymalnego położenia niektórych punktów podziału
- wskazanie potrzeb zabudowy nowych łączników.

Wybrane wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 10. Zawiera ona informacje dotyczące liczby występujących ograniczeń, liczby rozcięć zlokalizowanych optymalnie, wartości strat mocy w układach zoptymalizowanych z uwzględnieniem wszystkich ograniczeń oraz zmian strat mocy w stosunku do strat mocy w stanie istniejącym.

Tab. 10. Zestawienie wyników obliczeń strat mocy po dokonaniu optymalizacji konfiguracji sieci z uwzględnieniem ograniczeń

| Nazwa rejonu | Całkowita liczba ograniczeń | Liczba rozcięć zlokalizowanych optymalnie | Straty mocy w układzie zoptymalizowanym z ograniczeniami | Zmniejszenie strat w stosunku do stanu istniejącego |
|--------------|-----------------------------|---|--|---|
| | [%] ^{*)} | [%] ^{*)} | [kW] | [%] |
| Rejon A | 59 | 29 | 543,1 | 6,1 |
| Rejon B | 71 | 21 | 237,9 | 0,8 |
| Rejon C | 53 | 36 | 341,7 | 2,2 |
| Rejon D | 51 | 32 | 466,8 | 6,2 |

^{*)} wartości względne obliczone w odniesieniu do całkowitej liczby rozcięć w danym rejonie dystrybucji

Analizując wyniki przedstawione w tabeli 10, można sformułować następujące spostrzeżenia:

- w praktycznych obliczeniach optymalizacji konfiguracji sieci rozdzielczych należy liczyć się z występowaniem znacznej liczby ograniczeń lokalizacji punktów podziału; w przypadku omawianych obiektów ograniczenia dotyczyły od 50% do nawet 70% ogólnej liczby rozcięć
- uwagę zwraca znaczna liczba rozcięć zlokalizowanych optymalnie (od 21% do 36%) wśród zmiennych, których położenie może ulegać zmianie; może to świadczyć o dobrym rozeznaniu obciążeń przez służby eksploatacyjne oraz dbałości o utrzymanie prawidłowego układu pracy sieci
- w wyniku rekonfiguracji uzyskano efekt zmniejszenia strat od 0,8% do 6,2%; efekt ten, przeliczony na oszczędności z tytułu mniejszych strat energii w skali roku, szacuje się na ok. 18 tys. do 21 tys. zł dla rejonów D i A
- istniejąca konfiguracja pracy sieci rozdzielczej jest w dużym stopniu zdeterminowana czynnikami o charakterze prawnym i technicznym.

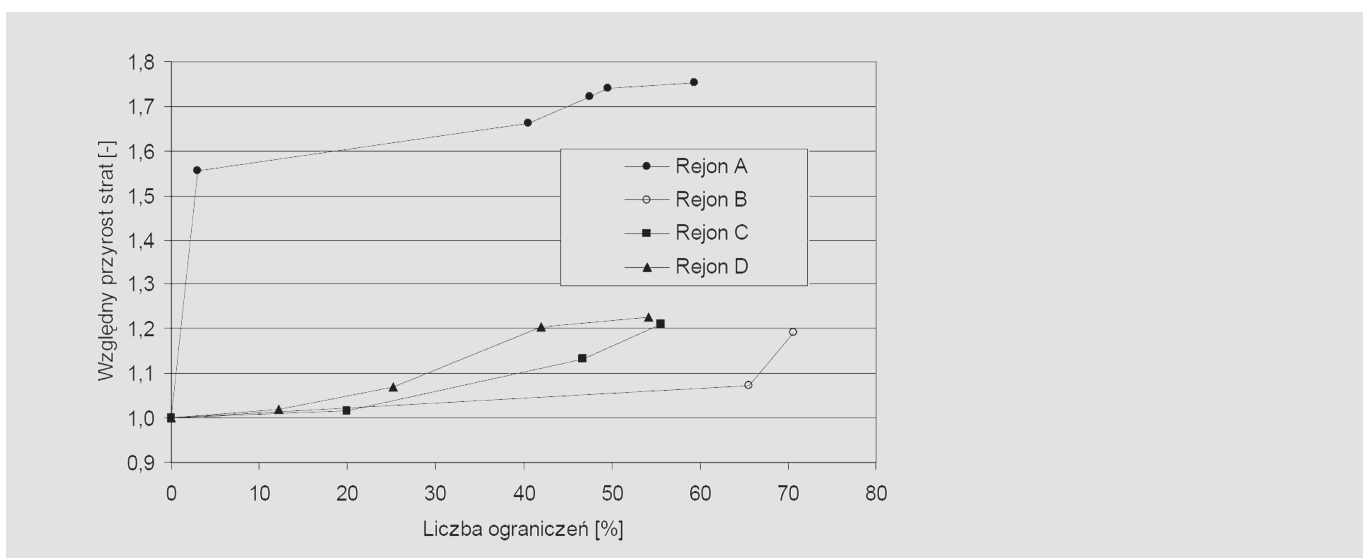
Efektywność redukcji strat, uzyskana w wyniku optymalizacji rozcięć, niewątpliwie zależy od indywidualnych cech i właściwości sieci rozdzielczej poddanej analizie. Lepszych efektów można spodziewać się w sieciach o niższych napięciach znamionowych (np. 6 kV), długich obwodach i znacznym obciążeniu.

Wyniki prac Edwarda Siwego z Politechniki Śląskiej [12] nad optymalizacją konfiguracji sieci rozdzielczych SN pokazują, iż efektywność takich działań może być wysoka. W tabeli 11 przedstawiono efekty optymalizacji rozcięć w 3 sieciach rozdzielczych.

Dodatkowo, dysponując wynikami obliczeń strat mocy dla różnej liczby ograniczeń w lokalizacji punktów podziału analizowanych rejonów A, B, C i D, sporządzono wykres ilustrujący zależność między stratami mocy a liczbą występujących ograniczeń. Wykres przedstawiono na rys. 9. Liczbę ograniczeń wyrażono w [%] w stosunku do ogólnej liczby punktów podziału. Straty mocy wyrażono w jednostkach względnych w odniesieniu do strat występujących w układzie niepodlegającym żadnym ograniczeniom konfiguracyjnym.

Tab. 11. Możliwości ograniczenia strat energii po optymalizacji punktów rozcięć w miejskich sieciach SN na wybranych obszarach (wg [12])

| Liczba stacji SN/nn [szt.] | Długość linii SN [km] | Zmniejszenie strat [%] | Szacunkowe oszczędności [tys. zł/rok] |
|----------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------------------|
| 600 | 500 | 16 | 130 |
| 780 | 550 | 4 | 80 |
| 430 | 430 | 11 | 50 |



Rys. 9. Zależność przyrostu strat mocy w funkcji liczby ograniczeń lokalizacji punktów podziału sieci

Wykres pokazuje, że w każdym przypadku wzrost liczby wymuszonych lokalizacji punktów podziału skutkuje przyrostem strat mocy w układzie sieci. Przebieg tej zależności ma charakter indywidualny dla każdego obszaru sieciowego.



Zmiana strat mocy przypadająca na jedno rozcięcie, wynikająca z konieczności zachowania jego położenia lub niemożności dowolnego przemieszczenia, może być, jak widać na rysunku, bardzo zróżnicowana. Wyznaczenie tych wartości wymaga każdorazowych obliczeń z użyciem modelu sieci.

Interesujące może okazać się przybliżenie okoliczności powodujących znaczny przyrost strat na skutek utrzymania niewielkiej liczby punktów podziału w ich pierwotnych lokalizacjach.

Z siecią rejonu A współpracuje przyłączona w głębi ciągów SN jednostka wytwórcza znacznej mocy. Ze względu na ciągłe zmiany warunków napięciowych w sieci, spowodowane zmianami stanu pracy tej jednostki, musi być utrzymywany wyodrębniony ciąg sieciowy łączący generator z rozdzielnią w GPZ. Powoduje to, iż generowana moc nie jest użytkowana przez najbliższe odbiory, lecz przesyłana do GPZ.

Innym przypadkiem napotkanym w praktyce może być układ o znacznych stratach mocy, którego konfiguracja wymuszona jest niejednorodną strukturą własnościową sieci. Zmniejszenie strat mocy w tym wypadku wymagałoby zasilania części odbiorców za pośrednictwem rozdzielni, która nie jest własnością rejonu dystrybucji. Koszty potencjalnego tranzytu nie zostałyby pokryte przez zysk wynikający ze zmniejszenia strat.

Przedstawione powyżej rozważania dotyczyły szczególnych przypadków wymuszonego położenia rozcięć, których zmiana w znaczny sposób zredukowałaby straty w układzie. W pozostałych sytuacjach zmiana strat mocy przypadająca na jedno rozcięcie z ograniczeniami była znacznie mniejsza.

Omawiane zagadnienia dotyczyły ograniczeń o charakterze determinującym. Warto wspomnieć o ograniczeniach z drugiej grupy (tzw. limitujących), dotyczących niemożności dowolnego lokalizowania ruchomych punktów podziału. W sytuacji, kiedy wskazania procedury optymalizacyjnej dotyczyły odcinka, w którym z różnych względów podział nie mógł zostać wykonany, proponowano podział w najbliższym możliwym miejscu, obliczając wynikającą z tej zmiany różnicę strat. Różnice te były najczęściej niewielkie bądź symboliczne. W szczególności w żadnym przypadku nie odnotowano zmiany strat, która mogłaby uzasadniać zabudowanie nowego łącznika w sieci.

Optymalizacja konfiguracji sieci rozdzielczej jest jednym z najczęściej wskazywanych działań bezinwestycyjnego zmniejszania strat mocy. Rozwiązanie takiego zadania dla dużej sieci rzeczywistej wymaga zastosowania odpowiednich narzędzi obliczeniowych oraz zbudowania modelu sieci.

Jednym z istotnych problemów jest właściwe oszacowanie obciążeń poszczególnych stacji transformatorowych SN/nn. Wynika to z faktu braku opomiarowania w głębi sieci rozdzielczej. Pomocne w tym przypadku okazały się dane o przebiegach obciążenia poszczególnych ciągów liniowych, wyniki okresowych pomiarów w stacjach SN/nn oraz ekspercka wiedza służb eksploatacyjnych dystrybutora.

Analizie poddano cztery rejony dystrybucji o typowej wielkości, spotykanej rozległości sieci i przeciętnym zapotrzebowaniu mocy. Występujące w tych sieciach niewielkie straty mocy w istniejącym układzie pracy można uzasadnić wysoką wartością napięcia znamionowego, znacznym przekrojem średnim oraz zwartą strukturą sieci.

Obliczenia optymalizacji układu wykonane bez uwzględniania ograniczeń pozwalają na wstępne rozeznanie maksymalnych efektów, jakie może przynieść rekonfiguracja sieci. Jednakże do czasu dokonania szczegółowej analizy występujących w danym układzie ograniczeń, jakim podlegają poszczególne punkty podziału, nie sposób ocenić możliwości redukcji strat, jakie może przynieść możliwa do realizacji w praktyce zmiana układu pracy sieci.

Ograniczenia lokalizacji punktów podziału sieci mogą mieć dwojaki charakter: determinujący lub limitujący. W pierwszym przypadku prowadzą się do konieczności utrzymania rozcięć w ściśle określonych miejscach sieci, a w drugim nie pozwalają całkowicie swobodnie lokować tych punktów podziału, których położenie może ulegać zmianie. Przyczyną powstawania ograniczeń są względy formalnoprawne lub techniczno-eksploatacyjne.

Obecność ograniczeń lokalizacji rozcięć należących do więzów zadania optymalizacji, wpływa na jakość uzyskiwanego rozwiązania. Układ z ograniczeniami zawsze charakteryzuje się większymi stratami mocy niż układ bez ograniczeń.

Prezentowane przykłady wskazują na znaczną liczbę ograniczeń w praktycznych zadaniach rekonfiguracji rozległych sieci rozdzielczych – ograniczenia dotyczą więcej niż połowy istniejących punktów podziału.

Uwagę zwraca znaczna liczba punktów podziału zlokalizowana w układzie wyjściowym w sposób optymalny (od 21% do 36%).

W wyniku analizy i możliwych do realizacji zmian konfiguracji sieci uzyskano efekt w postaci redukcji strat do ok. 6% w szczyt obciążenia. Efekt ten przejawia się w oszczędnościach z tytułu mniejszych strat energii, które w skali roku sięgają 18–21 tys. zł. Zatem nawet w sieci o niewielkich stratach przed rekonfiguracją oraz znacznej liczbie ograniczeń lokalizacji punktów podziału można, dokonując optymalizacji rozcięć, uzyskać istotne



oszczędności strat energii. Jak pokazuje tabela 11, w innych sieciach rozdzielczych oszczędności te mogą osiągać dużo większe wartości.

Przypadający na pojedyncze rozcięcie objęte ograniczeniami potencjał redukcji strat jest bardzo zróżnicowany i wymaga indywidualnych obliczeń z użyciem modelu sieci. Przyczyny utrzymania niekorzystnej lokalizacji punktów podziału o dużym potencjale redukcji strat mogą być złożone i istotne dla pracy sieci.

8. WNIOSKI

Optymalizacja rozcięć jest jednym z podstawowych środków bezinwestycyjnego ograniczania strat i przedmiotem licznych publikacji, w tym zagranicznych, poświęconych redukcji strat w systemach dystrybucyjnych.

Istotą zadania optymalizacji jest znalezienie takiej konfiguracji sieci SN, zdeterminowanej określoną lokalizacją punktów podziału sieci, aby otrzymać układ charakteryzujący się najmniejszymi stratami mocy.

Dla prostych struktur sieci, takich jak pętla czy wrzeciono, obliczeń optymalizacyjnych można dokonać niezależnie dla każdej zmiennej (każdego rozcięcia), np. przy użyciu arkusza kalkulacyjnego. Układy o większym stopniu złożoności (więcej połączeń, silniej skratowane) wymagają użycia odpowiednich technik obliczeniowych i specjalistycznego oprogramowania.

Każdy z programów, tj. SIEĆ, STROP i DRZEWO, może być stosowany do optymalizacji rozcięć ze względu na minimum strat mocy w dużych sieciach SN. Różnice pomiędzy uzyskanymi rozwiązaniami dla tej samej analizowanej sieci przy użyciu różnych narzędzi wynikają ze stosowania odmiennych algorytmów poszukiwania rozwiązania optymalnego oraz sposobu obliczania obciążeń poszczególnych stacji transformatorowych SN/nn.

Praktyczna realizacja optymalizacji układu pracy sieci musi uwzględniać różnorakie ograniczenia związane z niemożnością przemieszczenia niektórych punktów podziału oraz niepełnym zbiorem możliwych alokacji zdeterminowanym istnieniem łączników tylko w wybranych odcinkach oraz względami ruchowymi (np. dostęp do punktów podziału).

Dla lokalizacji rozcięć wymuszonych względami prawnymi (odbiorca płaci za dwa zasilania), powinno się określić rzeczywiste koszty utrzymania podziału w danym punkcie sieci i przenieść je w składniku stałym opłaty za moc na zainteresowanego odbiorcę.

Efektywność działań rekonfiguracyjnych, jaką można osiągnąć w rzeczywistym układzie sieciowym, niewątpliwie zależy od indywidualnych cech i właściwości sieci rozdzielczej poddanej analizie. Lepszych efektów można się spodziewać w sieciach o niższych napięciach znamionowych (np. 6 kV), długich obwodach i znacznym obciążeniu.

Postępujący rozwój rynku energii oraz wiążąca się z tym kontrola i poprawa efektywności działania przedsiębiorstw energetycznych, będą prawdopodobnie stymulowały zainteresowanie dystrybutorów działaniami w kierunku bezinwestycyjnego zmniejszania strat w sieciach rozdzielczych.

Istotną pomocą dla prowadzenia analiz optymalnej konfiguracji pracy sieci rozdzielczej będą z pewnością wdrażane w energetyce nowoczesne systemy informatyczne zarządzania majątkiem sieciowym oraz zaawansowane systemy pomiarowo-rozliczeniowe. Takie systemy informatyczne i pomiarowe umożliwią w przyszłości realizację optymalizacji konfiguracji sieci ze względu na minimum strat energii w danym przedziale czasu, co obecnie jest trudne bądź niemożliwe do zrealizowania.



BIBLIOGRAFIA

1. Folder statystyka elektroenergetyki 1997–2007, Ministerstwo Gospodarki RP, www.mg.gov.pl.
2. Kulczycki J. (red.), Ograniczenie strat energii elektrycznej w elektroenergetycznych sieciach rozdzielczych, PTPiREE, Poznań 2002.
3. Harasimowicz L., Optymalizacja pracy sieci rozdzielczych średnich napięć, Materiały konferencji naukowo-technicznej – Straty Energii Elektrycznej w Spółkach Dystrybucyjnych, Poznań 17–18.05.1999, s. 289–295.
4. Harasimowicz L., Suboptymalny podział dużych sieci rozdzielczych dla potrzeb eksploatacji, rozprawa doktorska, Instytut Energoelektroniki Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1992.
5. Czepiel S., Obliczenia optymalizacyjne i inżynierskie dla sieci średniego napięcia. Instrukcja obsługi programu STROP, Instytut Elektroenergetyki Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1999.
6. Kręglewski T., Rogowski T., Ruszczyński A., Szymanowski J., Metody optymalizacji w języku FORTRAN, PWN, Warszawa 1984.
7. Brożek J., Kot A., Kulczycki J., Szpyra W., Bezinwestycyjne metody zmniejszania strat energii w sieciach rozdzielczych w pracach badawczych Zakładu Elektroenergetyki AGH, Materiały konferencji naukowo-technicznej – Straty Energii Elektrycznej w Spółkach Dystrybucyjnych, Poznań 17–18.05. 1999, s. 264–277.
8. Chiang H.D., Jean-Jumean R.M., Optimal Network Reconfiguration in Distribution Systems, IEEE Transactions on Power Delivery, 5, nr 4, November 1990.
9. Mazur P., Ograniczanie strat mocy i energii w sieciach zamkniętych SN. Praca dyplomowa Wydz. EAIiE AGH, 2001.
10. Kujarczyk Sz., Nowoczesne metody obliczeń elektroenergetycznych sieci rozdzielczych, WNT, Warszawa 1984.
11. Helt P., Parol M., Piotrowski P., Metody sztucznej inteligencji w elektroenergetyce, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
12. Siwy E., Żmuda K., Intensyfikacja wykorzystania sieci w spółce dystrybucyjnej, Przegląd Elektrotechniczny nr 3/2009, s. 243–246.