

OPTIMALNE PROJEKTOWANIE STRUKTUR PROMIENIOWYCH SIECI ELEKTROENERGETYCZNYCH Z KOMPENSACJĄ MOCY BIERNEJ

Sebastian KULIG¹, Janusz BROŻEK²

1. AGH Akademia Górniczo – Hutnicza, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, doktorant
tel: 12 617 3772 fax: 12 634 57 21 e-mail: skulig@agh.edu.pl
2. AGH Akademia Górniczo – Hutnicza, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
tel: 12 617 3772 fax: 12 634 57 21 e-mail: jbroz@agh.edu.pl

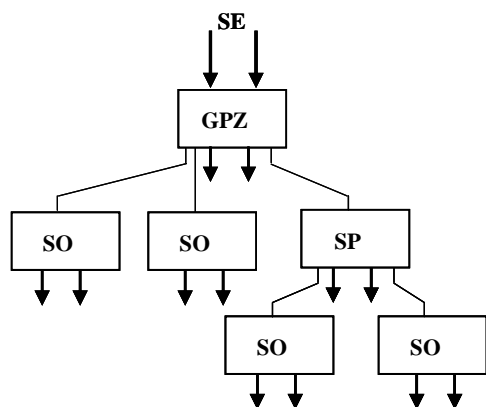
Streszczenie: Złożoność projektowania struktur przemysłowych sieci elektroenergetycznych warunkują ograniczenia techniczne i ekonomiczne. Wzrost efektywności działań projektantów (zautomatyzowanie i skrócenie czasu projektowania) oraz eksploatacji projektowanej sieci można uzyskać dzięki zastosowaniu dedykowanego oprogramowania. W referacie zostanie przedstawione wykorzystanie programów stosujących algorytmy heurystyczne oraz programowanie dynamiczne do suboptymalnego projektowania struktury elektroenergetycznej sieci promieniowej zakładu przemysłowego z kompensacją mocy biernej. Optymalizowaną funkcją celu jest koszt roczny K_R sieci rozumiany jako suma kosztów: stałego K_S i zmiennego K_Z elementów sieci:

$$K_R = K_S + K_Z \rightarrow \min \quad (1)$$

Słowa kluczowe: projektowanie sieci elektroenergetycznych, kompensacja mocy biernej, koszt roczny sieci.

1. PROJEKT SIECI DLA ZAKŁADU PRZEMYSŁOWEGO

Zasilanie zakładu przemysłowego jest realizowane najczęściej przez elektroenergetyczną promieniową sieć dwunapięciową (rys. 1). Energia elektryczna jest dostarczana



Rys. 1. Przykład rozdziału energii elektrycznej w dwunapięciowej sieci promieniowej zakładu przemysłowego

do zakładu z systemu elektroenergetycznego (SE) do głównego punktu zasilania (GPZ). Z GPZ są zasilane promieniście odbiorniki SN oraz stacje oddziałowe (SO), transformujące energię z SN na nn i ewentualnie stacje pośredniczące (SP).

Układ sieci (rozmieszczenie stacji oddziałowych i tras kablowych, dobór parametrów znamionowych) jest pochodną rozmieszczenia oraz rodzaju zasilanych odbiorników. Ponadto zazwyczaj projektant ma: ustaloną lokalizację GPZ na terenie zakładu oraz możliwość wyboru k z m ($k \leq m$) lokalizacji stacji transformatorowych SN/nn. Tak postrzegany problem jest zagadnieniem kombinatorycznym [1]. Zadaniem projektanta jest zaprojektowanie struktury sieci, w oparciu o znane założenia techniczne: lokalizacje, zapotrzebowanie mocy i czasy trwania obciążenia szczytowego zasilanych odbiorników, wartości jednostkowych kosztów strat mocy i energii, parametry i koszty elementów sieci, dyrektywny współczynnik mocy $tg\varphi_0$. Proces obliczeń projektowych można skrócić korzystając z dedykowanych programów do projektowania suboptymalnych struktur sieci.

1.1. Etapy optymalizacji procesu projektowania struktury sieci

„Optymalne” projektowanie zakładowej sieci rozdzielczej zaproponowano jako zadanie dwuetapowe (schemat na rysunku 2.).

W trakcie I etapu zadaniem projektanta jest stworzenie struktury złożonej z: 1) sieci średniego napięcia, łączącej GPZ z k spośród m możliwych lokalizacji SO, przy czym $1 \leq k \leq m$; 2) sieci niskiego napięcia, łączącej n odbiorów z k stacjami SO. Koszt roczny (1) otrzymanej struktury sieci powinien być najmniejszy. Do obliczeń w tym etapie wykorzystano programy komputerowe wykorzystujące metody algorytmów: ewolucyjnego [2] i „symulowanego wyżarzania” [3].

W II etapie procesu projektowania dla struktury sieci wybranej w I etapie przeprowadza się kompensację mocy biernej. Kompensacja jest wymagana gdy wartość współczynnika mocy zakładu $tg\varphi_Z$ jest większa od wartości dyrektywnej $tg\varphi_0$ ustalonej przez dostawcę energii. Współczynnik mocy zakładu $tg\varphi_Z$ jest rozumiany jako:

$$tg\varphi_Z = \frac{Q_Z}{P_Z} \quad (2)$$

gdzie: Q_Z , P_Z - sumaryczne zapotrzebowanie mocy bierniej i mocy czynnej w zakładzie

Definicja kosztu rocznego dla kompensowanej sieci ulega modyfikacji poprzez dodanie składnika K_K reprezentującego koszt wytwarzania mocy bierniej (koszt instalacji urządzeń kompensacyjnych):

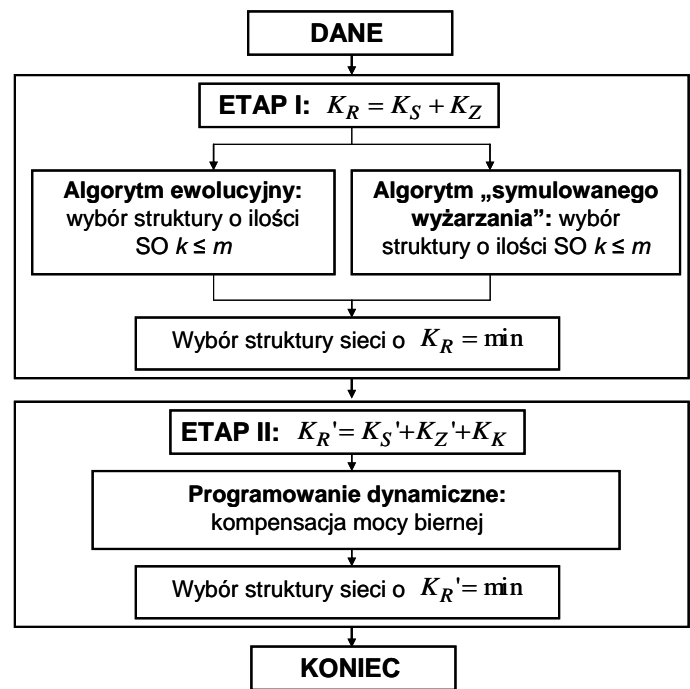
$$K_R' = K_S' + K_Z' + K_K \rightarrow \min \quad (3)$$

Koszt roczny K_R' struktury sieci po przeprowadzeniu kompensacji powinien być najmniejszy. Do obliczeń mocy i rozmieszczenia urządzeń kompensacyjnych wykorzystano programowanie dynamiczne.

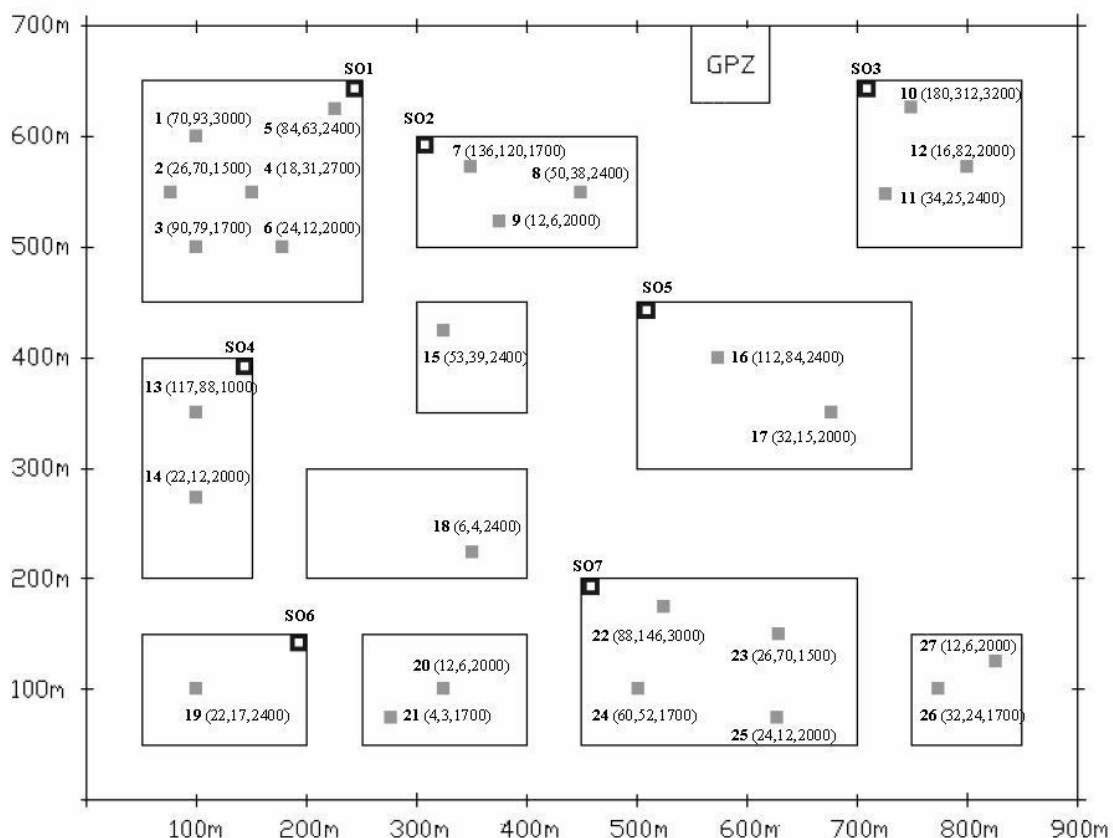
1.2. Dane i założenia techniczne

W rozpatrywanym zakładzie przemysłowym, należącym do branży elektromaszynowej, znajduje się $n=27$ grup odbiorników, w tym wiele typu indukcyjnego. Rysunek 3 przedstawia plan sytuacyjny zakładu z naniesioną lokalizacją: GPZ, poszczególnych oddziałów zakładu oraz grup odbiorników wraz z podanymi w nawiasach kolejno wartościami: zapotrzebowania mocy czynnej (w kW), bierniej (w kvar) i czasów użytkowania mocy szczytowej (w h). Zaznaczono także potencjalne lokalizacje stacji transformatorowych (SO). Możliwe jest wybudowanie maksymalnie $m=7$ SO. W tabelicy 1 przedstawiono wartości: parametrów i kosztów poszczególnych elementów sieci oraz jednostkowych kosztów strat mocy i energii.

Przyjęto, że kompensacja mocy bierniej (instalacja urządzeń kompensacyjnych) jest dopuszczalna w węzłach (stacjach transformatorowych lub odbiornikach), w których wartość zapotrzebowania na moc bierną wynosi min. 30 kvar. Współczynnik mocy zakładu przed kompensacją jest równy $tg\varphi_Z=1,088$. Po przeprowadzeniu kompensacji ma być mniejszy od wartości dyrektywnej $tg\varphi_0=0,4$.



Rys. 2. Schemat etapów projektowania zakładowej sieci rozdzielczej



Rys. 3. Plan sytuacyjny zakładu przemysłowego: SO1, ..., SO7 – potencjalne lokalizacje stacji transformatorowych; 1(70,93,3000), ..., 27(12,6,2000) – lokalizacje grup odbiorników wraz z wartościami mocy czynnej, bierniej i czasu użytkowania mocy szczytowej

Tablica 1. Wartości parametrów i kosztów poszczególnych elementów zakładowej sieci rozdzielczej

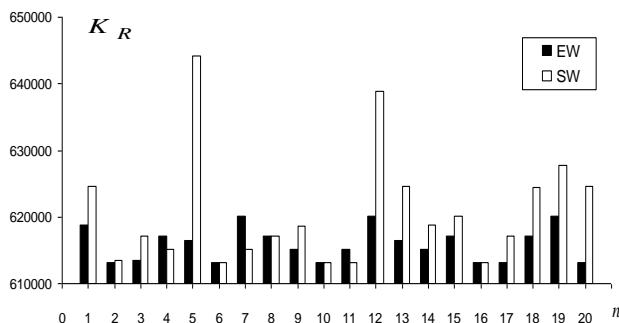
Dane znamionowe potencjalnych elementów struktury sieci					
Kable niskiego napięcia (typ YAKXS 0,6/1 kV)	przekrój [mm ²]	prąd dopuszcz. [A]	rezystancja jednost. [Ω / km]	reaktancja jednost. [Ω / km]	koszt inwest. [zł / km]
	70	195	0,443	0,177	41 463
	120	266	0,253	0,166	78 589
	240	401	0,125	0,156	141 015
Kable średniego napięcia (typ YHAKXS 12/20 kV)	przekrój [mm ²]	prąd dopuszcz. [A]	rezystancja jednost. [Ω / km]	reaktancja jednost. [Ω / km]	koszt inwest. [zł / km]
	70	235	0,571	0,195	133 829
	120	320	0,328	0,182	178 178
	240	455	0,165	0,170	253 602
Transformatory SN /nn (3-faz. typ TRIHAL)					
moc znamion. [kVA]	straty w rdzeniu [kW]	straty w uzwojeniu [kW]	napięcie zwarcia [%]	prąd biegu jał. [%]	koszt inwest. [zł]
160	0,65	2,7	6,0	2,3	73 200
250	0,88	3,8	6,0	2,0	81 130
400	1,20	5,5	6,0	1,5	92 232
630	1,65	7,8	6,0	1,3	115 290
Współczynniki i parametry stałe funkcji kosztów					
Współczynnik przeciążenia pojedynczego transformatora (wartość przyjęta)		1,07	Energetyczny równoważnik mocy biernej [kW/kVA]		0,15
Współczynnik kosztów stałych linii		0,15	Jednostkowy koszt roczny strat mocy [zł / kW]		80
Współczynnik kosztów stałych transformatorów		0,18	Jednostkowy koszt strat energii [zł / kWh]		0,2
Koszt rozdzielnic SO (typ Rotoblok SF)		117 000			

1.3. ETAP I – Zastosowanie algorytmów heurystycznych w projektowaniu promieniowej sieci przemysłowej

Projekt struktury zakładowej sieci rozdzielczej, spełniającej podane założenia techniczne zoptymalizowano przy wsparciu dwóch heurystycznych programów dedykowanych do projektowania struktury sieci promieniowej: 1) programu z zaimplementowanym algorytmem ewolucyjnym; 2) programu opartego na algorytmie „symulowanego wyzarczenia”.

Oba programy korzystają z tego samego zestawu danych: wartości parametrów odbiorników (podanych na rysunku 3) oraz wartości parametrów i kosztów poszczególnych elementów sieci (tablica 1).

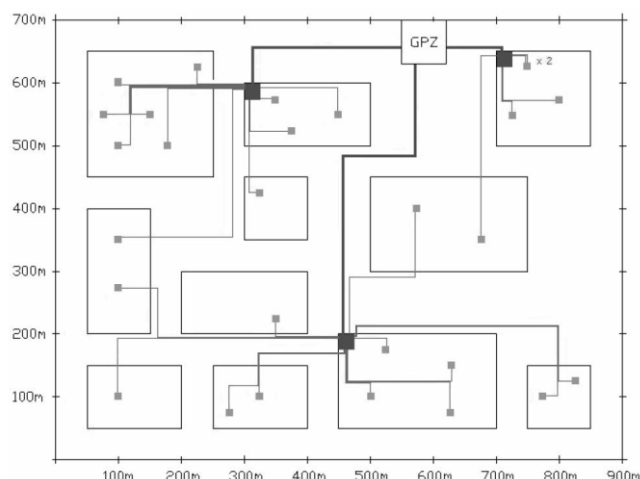
Dla wyboru struktury promieniowej sieci rozdzielczej i minimalizacji funkcji celu (1) przeprowadzono 20 powtórzeń obu programów. Wyniki obliczeń wartości K_R dla wariantów struktury sieci rozdzielczej uzyskanych w kolejnych n powtórzeniach programów przedstawia rysunek 4. Z analizy otrzymanych wykresów wynika,



Rys. 4. Wyniki obliczeń kosztu rocznego dla różnych wariantów algorytmów: ewolucyjnego (EW) i „symulowanego wyzarczenia” (SW); n – numer wariantu

że istnieje rozwiązanie identyczne dla obu programów (testy nr 6, 10 oraz 16). Jego całkowity koszt roczny $K_R=613\,088$ zł. Uznano je za rozwiązanie najlepsze spośród

struktur wygenerowanych w etapie I procesu optymalizacji projektowania. Schemat najlepszego wariantu zakładowej sieci rozdzielczej przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Schemat najlepszej struktury sieci zoptymalizowanej programami EW i SW (struktura wyjściowa do etapu II)

1.4. ETAP II – Zastosowanie metody programowania dynamicznego do kompensacji mocy biernej w promieniowej sieci przemysłowej

W najlepszej strukturze sieci rozdzielczej (wybranej w etapie I) rozmieszczono baterie kondensatorów do kompensacji mocy biernej. Do ustalenia lokalizacji i mocy użytych urządzeń kompensacyjnych wykorzystano opartą na programowaniu dynamicznym metodę optymalizacji rozmieszczenia źródeł mocy biernej [1]. Istota metody polega na wyznaczaniu charakterystyk zmiany kosztów ($\Delta K_i(q_j)$ – dla sieci SN, $\Delta K_j(q_j)$ – dla sieci nn) w zależności od ilości jednostek elementarnych q mocy biernej zainstalowanych w poszczególnych węzłach sieci. Obliczając powyższe charakterystyki wyznaczono węzły, w których instalacja źródeł mocy biernej zapewnia: a) zmniejszenie wartości

współczynnika mocy zakładu poniżej wartości $tg\varphi_0$;
 2) minimalizację kosztu rocznego K_R' kompensowanej sieci.

W tablicy 2. przedstawiono wyniki obliczeń doboru mocy i rozmieszczenia urządzeń kompensacyjnych. W węzłach sieci należy zainstalować łącznie 29 jednostek q . W efekcie przeprowadzenia kompensacji struktura zakładowej promieniowej sieci rozdzielczej uległa modyfikacji (liczba stacji transformatorowych nie uległa zmianie):
 1) zmalała moc znamionowa transformatora w SO3;
 2) zmniejszyły się przekroje przewodów zasilających 4 spośród 27 odbiorników (odbiorniki nr 2, 13, 23, 24);
 3) odbiornik nr 10 jest zasilany jednym przewodem. Koszt roczny struktury sieci po kompensacji mocy biernej wynosi $K_R' = 295\ 082$ zł.

Tablica 2. Rozmieszczenie źródeł mocy biernej w węzłach sieci

nr węzła	ilość q	moc bierna źródła [kvar]	nr węzła	ilość q	moc bierna źródła [kvar]
SO2	6	180	16	2	60
1	2	60	22	3	90
2	2	60	23	2	60
10	9	270	24	1	30
13	2	60			

2. WNIOSKI KOŃCOWE

Dedykowane narzędzia informatyczne wydatnie usprawniają proces optymalnego projektowania struktur sieci elektroenergetycznych. Zapewniają satysfakcjonującą dokładność wyników w czasie możliwym do przyjęcia.

Obliczenia przeprowadzone na modelu sieci wykazały zasadność wykorzystania algorytmów heurystycznych

(algorytm ewolucyjny oraz algorytm „symulowanego wyżarzania”) do rozwiązania problemu suboptymalnego projektowania sieci promieniowych ze względu na minimum wybranej funkcji celu (koszt roczny struktury sieci).

Metoda programowania dynamicznego zastosowana w etapie II umożliwiła optymalne rozłożenie baterii kondensatorów w analizowanej sieci. W wyniku kompensacji mocy biernej koszt roczny sieci K_R' zmalał o 55% w stosunku do kosztu wyjściowego K_R uzyskanego w etapie I.

3. BIBLIOGRAFIA

1. Kulczycki J.: Optymalizacja struktur sieci elektroenergetycznych. Wybrane metody obliczeń. Warszawa, WNT 1990, s. 136-160, ISBN 83-204-1322-2
2. Brożek J., Tylek W.: Zastosowanie algorytmów ewolucyjnych do optymalizacji promieniowych struktur sieci elektroenergetycznych. Przegląd Elektrotechniczny 9/2006, s. 60-62, ISSN 0033-2097
3. Brożek J.: Projektowanie optymalnych elektroenergetycznych sieci promieniowych przy użyciu symulowanego wyżarzania. Archiwum Energetyki, 15 (1996), n. 4-5, ISSN 0066-684X
4. Kulczycki J., Wasiluk W.: Elektroenergetyka przemysłowa. Poradnik Inżyniera Elektryka. Tom 3. Warszawa, WNT – wyd. 3. 2005, s. 370, 379, 389-398, ISBN 83-204-2939-0
5. Adamczyk A., Feliksiak K., Kulig S., Maurek G.: Projekt, Elektroenergetyka Zakładów Przemysłowych. Projekt układu zasilania wybranego zakładu przemysłowego. Kraków, AGH 2008 (praca niepublikowana)

OPTIMAL DESIGN OF RADIAL POWER NETWORKS WITH REACTIVE POWER COMPENSATION

Key-words: power networks designing, reactive power compensation, annual cost of network

Abstract: The complexity of the designing of structures of industrial power networks is determined by following constraints: technical and economical. Increased effectiveness of: 1) designers (through shortening the design time) and 2) the operation of the proposed network (through minimizing its annual cost) can be obtained by usage of dedicated software. The paper presented the usage of heuristic algorithms and dynamic programming in designing the suboptimal structure of industrial radial power network with reactive power compensation. Optimized objective function is the annual cost of network K_R understood as the sum of costs: fixed K_S and variable K_Z for all elements of the network: $K_R = K_S + K_Z \rightarrow \min$.