

XVIII Seminarium

ZASTOSOWANIE KOMPUTERÓW W NAUCE I TECHNICE' 2008

Oddział Gdański PTETiS

Referat nr 35

ZASTOSOWANIE KOMPUTERA W PROCESIE OPTYMALNEJ
REGULACJI NAPIĘCIA W SIECI ROZDZIELCZEJ
ZAWIERAJĄCEJ LOKALNE ŹRÓDŁO MOCY

Wojciech WALAT¹, Artur GANCARZ²

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

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę wartości skutecznej napięcia w sieci elektroenergetycznej. Optymalizowano pracę układu regulacji napięcia przy obecności lokalnego źródła mocy, jakim była mała elektrownia wodna. Wykorzystano w tym celu techniczne możliwości zmiany nastaw przekładni transformatorów SN/nn oraz transformatora 110 kV/SN. Do obliczeń optymalizacyjnych wykorzystano dedykowany program komputerowy wykorzystujący algorytm genetyczny.

Słowa kluczowe: elektroenergetyczne sieci rozdzielcze, generacja rozproszona, regulacja napięcia.

1. WPROWADZENIE

W ostatnim czasie obserwowany jest znaczny wzrost zainteresowania problematyką Generacji Rozproszonej (GR). Znaczący wpływ na to ma wzrost finansowania projektów budowy odnawialnych źródeł energii. W dużym stopniu powodowane jest to przez aktualną obecnie tendencję pozyskiwania zielonej energii, „czystej ekologicznie”.

Jednym ze źródeł GR są Małe Elektrownie Wodne (MEW). Źródła te charakteryzują się względnie małą mocą osiągalną i są najczęściej przyłączane do obwodów SN i nn. Pomimo niewielkich mocy, nie pozostaje to bez wpływu na pracę sieci w ich najbliższym otoczeniu. Zmianie uleg mogą zarówno rozprawy mocy, jak również wielkości napięć w poszczególnych węzłach.

W artykule przedstawiony został problem regulacji napięcia w rozległej sieci SN z przyłączoną MEW.

2. GENERACJA ENERGII W GŁĘBI SIECI

2.1. Sieci rozdzielcze średnich napięć

Funkcją elektroenergetycznych sieci rozdzielczych (ESR) jest końcowy rozdział energii elektrycznej i zasilanie odbiorców. Obejmują one transformację na poziom średniego napięcia w Głównych Punktach Zasilania (GPZ), przesył liniami SN, transformację na niskie napięcie (nn) i zasilanie odbiorców końcowych.

2.2. Generacja rozproszona w sieciach rozdzielczych

Sieci rozdzielcze, do których przyłącza się źródła GR, projektowano do pracy w układzie jednostronnego zasilania (promieniowe). Pojawienie się źródeł w głębi sieci zmienia rozprawy prądów. Energia dopływająca dotychczas do odbiorców z GPZ, przy obecności GR, może płynąć w kierunku stacji 110 kV/SN. Powoduje to znaczące zmiany w całkowitym bilansie spadków i odchyleń napięcia w sieci, w porównaniu ze stanem bez GR, gdzie rozkład napięcia jest monotoniczny (im dalej od GPZ, tym niższa wartość napięcia). Duża zmienność mocy generowanej w takim źródle może być przyczyną wahań napięcia odczuwalnych przez odbiorców [1].

3. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

3.1. Opis obiektu

Przedmiotem obliczeń była rozległa terenowa sieć rozdzielcza 15 kV, współpracująca z MEW. Sieć zasilona jest z jednej sekcji rozdzielni SN w stacji GPZ i składa się z dwóch ciągów miejskich (kablowych) i dwóch rozległych obwodów terenowych. Łączne obciążenie sieci wynosi 7,2 MVA, z czego 4,3 MVA (ok. 60 %) przypada na obwody napowietrzne. Szczegółowe zestawienie informacji o poszczególnych obwodach zebrano w Tablicy 1.

Elektrownia o mocy osiągalnej 1 MW jest dołączona do obwodu nr 2, na 20. km magistrali. MEW charakteryzuje się bardzo stabilną pracą. Zmiana poziomu mocy generowanej w okresie roku występuje sporadycznie (kilkanaście razy), w przedziale do 1 MW, co 100 kW.

Tablica 1. Charakterystyka obwodów analizowanej sieci SN

Nr	Długość [km]		liczba stacji	moc [MVA]	
	magistrali	całkowita		zainstalowana	obciążenia szczytowego
1	6,8	7,3	14	3,8	1,67
2	45,8	98,8	83	11,2	2,95
3	3,4	3,4	7	2,3	1,26
4	11,2	52,5	52	4,4	1,34

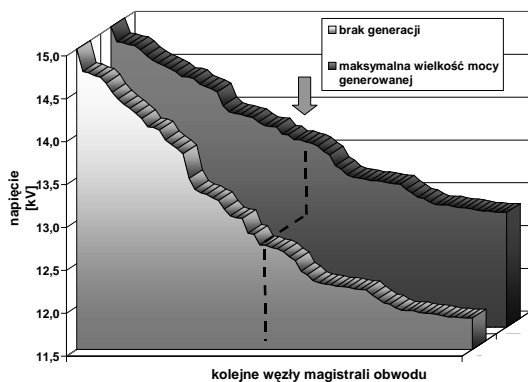
3.2. Postawienie problemu

Ze względu na rozległość i znaczne obciążenie przedmiotowej sieci występują w niej duże spadki napięć, co często skutkuje niedotrzymywaniem warunków napięciowych. Odchylenia napięcia, mierzone w odległych punktach poboru energii, przekraczają 20 %.

Rozwiązanie zadania regulacji możliwe jest poprzez zmianę struktury sieci lub budowę nowych ciągów i przełączenie części odbiorów. Metody te wymagają znacznych nakładów inwestycyjnych, a w opisywanym przypadku jest to dodatkowo utrudnione przez warunki naturalne (teren górski). Uzasadnione jest twierdzenie, że rozbudowa sieci lub budowa dodatkowego punktu zasilającego (GPZ) nie jest ekonomicznie opłacalna, gdyż nie przewiduje się na tym obszarze znacznego wzrostu zapotrzebowania na energię. Jakość dostarczanej energii (poziom napięcia) nie jest w tym przypadku czynnikiem wystarczającym do podjęcia działań inwestycyjnych.

Możliwość poprawy warunków napięciowych daje regulacja napięcia poprzez zmianę przekładni transformatorów. Prowadzić powinno się ją poprzez regulację na transformatorach SN/nn oraz zmianę napięcia zasilania w GPZ (przekładnia transformatora 110 kV/SN).

Współpracujące z analizowaną siecią źródło energii może znacząco wpływać na panujące w niej warunki napięciowe. Przyłączenie lokalnego źródła do magistrali obwodu, wraz ze zmianą generowanej mocy, może skutkować częstymi zmianami poziomu napięcia u odbiorców. Z drugiej strony umiejscowienie źródła w głębi sieci może pozwolić na wzrost poziomu napięcia na końcach obwodu. Na rysunku 1. pokazano wpływ poziomu mocy generowanej w źródle na rozkład wartości skutecznej napięcia wzdłuż magistrali obwodu. Strzałką oznaczono węzeł sieci, do którego przyłączona została elektrownia.



Rys. 1. Rozkład wartości skutecznej napięcia wzdłuż magistrali ciągu współpracującego z elektrownią wodną

Z uwagi na charakter pracy MEW, potwierdzony zarejestrowanymi przebiegami generowanej mocy, problem wahań napięcia nie występuje (małe i rzadkie zmiany poziomu generacji). Widoczne jest, że przy braku pracy elektrowni spadek napięcia wzdłuż magistrali przekracza 3 kV (20 % U_N), zatem niemożliwe jest spełnienie warunków napięciowych dla wszystkich odbiorców.

3.3. Klasyfikacja problemu

Celem badań było dokonanie optymalnej regulacji napięcia w analizowanej sieci SN, zapewniającej minimalizację sumarycznych odchyżeń napięcia u odbiorców. Konieczne było przy tym spełnienie normatywnych wymagań dla każdego z nich [2].

Budowa przełączników zaczepek w transformatorach SN/nn nie pozwala na częstą regulację napięcia, a dodatkowym utrudnieniem jest konieczność wykonywania operacji w stanie beznapięciowym. Dlatego doboru nastaw dokonuje się jednorazowo, przed montażem lub wymianą jednostki. Z kolei regulacja napięcia z wykorzystaniem możliwości zmiany przekładni transformatorów 110 kV/SN może odbywać się w sposób ciągły (pod obciążeniem) i z reguły wykonywana jest wielokrotnie w ciągu jednej doby. Oznacza to, iż w procesie optymalnej regulacji napięcia należy uwzględnić opisane powyżej możliwości techniczne i ograniczenia.

W wyniku procesu optymalizacji otrzymywane są wartości nastaw wszystkich transformatorów SN/nn (dobierane jednorazowo) oraz proponowany jest algorytm zmian przekładni transformatora zasilającego sieć (w funkcji zmienności obciążenia i generacji w sieci). Aby uzyskane wyniki były jak najbardziej wiarygodne i w pełni dawały się odnieść do rzeczywistego obiektu, w procesie obliczeniowym wykorzystano rzeczywiste, całoroczne dane pomiarowe. Obejmowały one dokonane z rozdzielczością godzinową zapisy sumarycznego obciążenia każdego z obwodów, skorelowane z odpowiadającą tej samej porze wartością mocy wytwarzanej w MEW.

4. METODA ROZWIĄZYWANIA ZADANIA

4.1. Rozmiar zadania optymalizacji

Każdy z rzeczywistych, zarejestrowanych stanów pracy sieci opisano dwoma parametrami:

$$w_j = \frac{S_j}{S_{szcz}} \quad (1)$$

$$g_j = \frac{P_j}{P_{gen.max}} \quad (2)$$

gdzie: S_j – moc obciążenia sieci w j -tym stanie pracy; S_{szcz} – moc obciążenia szczytowego sieci; P_j – moc generowana w MEW w j -tym stanie pracy; $P_{gen.max}$ – maksymalna wartość mocy generowanej w MEW

Ze względu na ograniczenia techniczne zadanie przyjmuje postać dyskretną (skokowa i ograniczona dla każdego transformatora ilość nastaw regulacyjnych). Dodatkowym utrudnieniem jest rozmiar zadania. Aby w tradycyjny sposób znaleźć rozwiązanie postawionego zadania, należałoby sprawdzić bardzo dużą liczbę możliwych stanów pracy obiektu. Dla każdego ze 156 transformatorów SN/nn dostępnych jest średnio po 5 nastaw regulacyjnych. Każdy z opisanych w ten sposób stanów obiektu może występować w skorelowaniu z kilkunastoma wartościami przekładni transformatora 110 kV/SN. Dla pełnej analizy należałoby każdy z tak otrzymanych stanów zweryfikować, poprzez sprawdzenie z każdą z 8 760 rzeczywistych par współczynników obciążenia i generacji. Weryfikacji należy dokonać zarówno pod kątem spełnienia ograniczeń zadania (odchylenia napięcia), jak i dla porównania jego jakości z innymi wynikami.

Z powyższego wynika, że rozwiązanie zadania metodami tradycyjnymi byłoby praktycznie niewykonalne. W analizie takich zagadnień pomocne są metody sztucznej inteligencji. W tym przypadku posłużono się specjalizowanym programem wykorzystującym algorytmy ewolucyjne [3] oraz zastosowano zasadę dekompozycji.

4.2. Dekompozycja zadania

Dekompozycja polega na podzieleniu zadania na dwie części, realizowane kolejno. W pierwszym etapie poszukiwany jest wektor zawierający nastawy przekładni transformatorów SN/nn. Przekładnia transformatora w GPZ na tym etapie nie jest doбираna dla każdego stanu pracy sieci, a jedynie dopasowywana osobno w obrębie każdej z czterech grup. Powstały one poprzez arbitralny podział zestawu par obciążenia i generacji, ze względu na stopień obciążenia sieci. Wynikiem tego etapu jest ostateczne ustalenie położenia zaczeptów transformatorów SN/nn oraz wstępny dobór reżimu pracy przełącznika zaczeptów na transformatorze zasilającym całą sieć. Ostateczne rozwiązanie otrzymuje się w wyniku obliczeń przeprowadzonych w drugim etapie, w którym algorytm regulacji napięcia w GPZ ustalany jest z uwzględnieniem nastaw w stacjach SN/nn z etapu pierwszego.

4.3. Algorytmy genetyczne

Algorytmy genetyczne swoje źródło biorą w regułach doboru naturalnego. Ich zasadę działania najprościej opisuje teza „przetrwają tylko najsilniejsi”. Podobnie jak w przyrodzie, algorytmy te nie operują na pojedynczych rozwiązaniach, lecz na całych ich grupach, nazywanych populacjami. Każda populacja składa się z określonej liczby osobników, które są dopuszczalnymi rozwiązaniami postawionego problemu. W analizowanym przypadku osobnik jest ciągiem liczbowym, w którym na kolejnych pozycjach podane są wartości nastaw regulacyjnych wszystkich transformatorów SN/nn ($x_1, x_2 \dots x_i$) oraz wartość napięcia zasilania sieci dla każdej z czterech stref regulacyjnych ($y_1 \dots y_d$).

Aby osobniki móc porównywać między sobą, konieczne jest wprowadzenie kryterium oceny, tzw. funkcji celu F . W analizowanym przypadku została ona zdefiniowana jako suma kwadratów procentowych odchyłeń napięcia mierzona za każdą i -tą stacją transformatorową, w każdym j -tym spośród analizowanych stanów pracy:

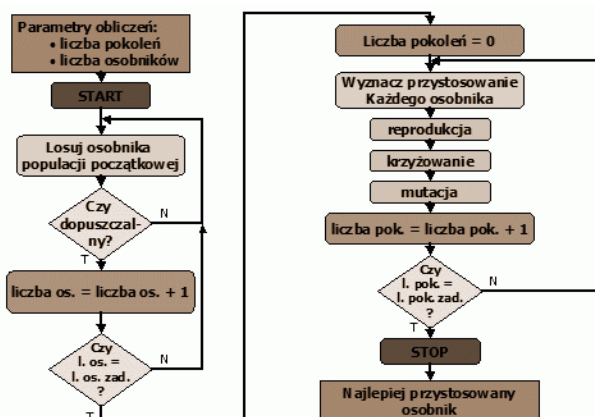
$$F = \sum_{j=1}^w \left(\sum_{i=1}^n \delta U_{nij}^2 \right) \quad (3)$$

gdzie: δU_{nij} – odchylenie napięcia za i -tą stacją SN/nn w j -tym stanie pracy sieci; n – całkowita liczba stacji (transformatorów) SN/nn; w – liczba analizowanych stanów pracy

Jako pierwsza tworzona jest w sposób losowy populacja początkowa. Wchodzące w jej skład osobniki mogą być dodatkowo weryfikowane pod kątem spełniania ograniczeń [2]. W procesie obliczeniowym zostaną one poddane dalszej ewolucji, co umożliwi znalezienie bardziej optymalnych rozwiązań. W ramach każdego etapu obliczeń wyróżnia się operacje [4]:

- reprodukcja – polega na wyznaczeniu wartości przystosowania wszystkich osobników w populacji i stworzeniu puli rodzicielskiej, będącej grupą wyjściową dla następnego pokolenia; prawdopodobieństwo użycia danego osobnika rośnie ze wzrostem wartości jego przystosowania,
- tworzenie pokolenia potomnego – odbywa się przy użyciu operatorów genetycznych (z określonym prawdopodobieństwem); *krzyżowanie* polega na wymianie fragmentów kodu par osobników w wylosowanym miejscu; *mutacja* to wymiana jednego genu dowolnego osobnika na inną wartość.

Otrzymane w ten sposób pokolenie potomne stanowi punkt wyjścia dla kolejnego etapu ewolucji. Wynikiem działania algorytmu jest to rozwiązanie, którego wartość przystosowania była największa (funkcja celu osiąga minimum). Schemat blokowy typowego algorytmu genetycznego zamieszczono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat blokowy algorytmu genetycznego

5. IMPLEMENTACJA METODY

W analizowanej sieci opisane wcześniej możliwości regulacyjne nie pozwalają na spełnienie normatywnych warunków napięciowych z uwagi na znaczną rozległość obwodów i ich duże obciążenie. W związku z powyższym, opisany we wcześniejszym rozdziale cykl obliczeń ewolucyjnych, nie może zostać uruchomiony ze względu na brak możliwości wylosowania populacji początkowej spełniającej ograniczenia zadania (dopuszczalne odchylenie napięcia między +6 %, a -10 %). Zdecydowano się na poszerzenie więzów zadania, tak aby wynikiem optymalizacji był „przepis” na regulację napięcia w sieci, który pomimo tego, iż nie spełnia warunków [2], to pozwala zbliżyć się do nich w największym stopniu. Dzięki dokonaniu serii próbnych uruchomień programu (przy zmianie parametrów) dobrano empirycznie najmniejszy przedział dopuszczalnych odchyłeń napięcia, przy którym możliwe jest spełnienie postawionych ograniczeń zadania.

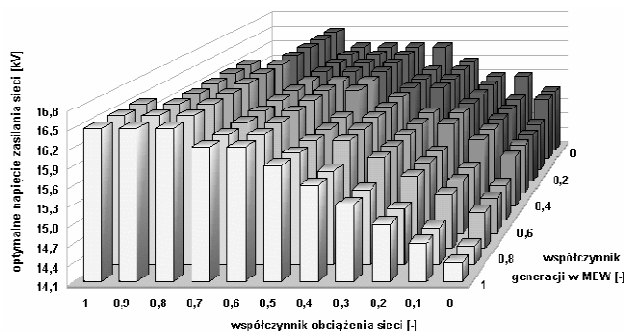
Dobrano następujące parametry algorytmu:

- liczebność populacji – 200 osobników;
- liczba pokoleń (długość cyklu ewolucyjnego) – 40 000;
- warunek rozpoczęcia procesu ewolucyjnego – 100 % populacji początkowej spełnia ograniczenia zadania;
- prawdopodobieństwo krzyżowania – 0,9;
- prawdopodobieństwo mutacji – 0,02;
- dopuszczalny przedział odchyłeń napięcia – od +6 % do -13,6 % napięcia znamionowego.

6. ANALIZA WYNIKÓW

W wyniku działania aplikacji opartej na algorytmach ewolucyjnych uzyskano wektor nastaw x_i transformatorów SN/nn. Dobrano także algorytm regulacji napięcia w stacji GPZ, w funkcji zmiany wymuszenia (obciążenia sieci oraz generacji w MEW). Dzięki temu możliwe było wyznaczenie cyklu pracy przełącznika zaczeptów na transformatorze 110 kV/SN dla każdego rzeczywistego przebiegu zarejestrowanego w analizowanym obiekcie, a także dla

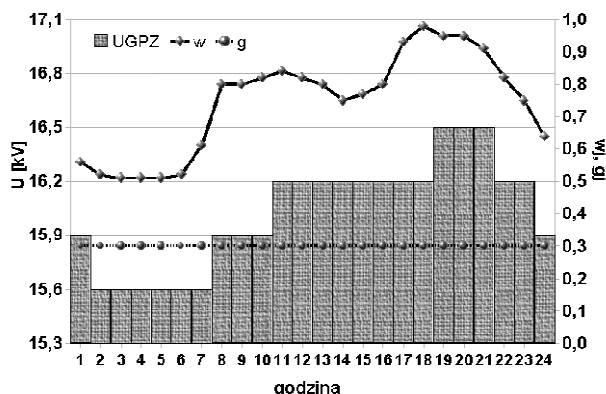
stanów występujących teoretycznie. Na rysunku 3 przedstawiono zakres zmienności optymalnego napięcia zasilania, w funkcji współczynników w_j oraz g_j .



Rys. 3. Wartość optymalnego napięcia zasilania sieci SN w funkcji zmienności obciążenia sieci i generacji w MEW.

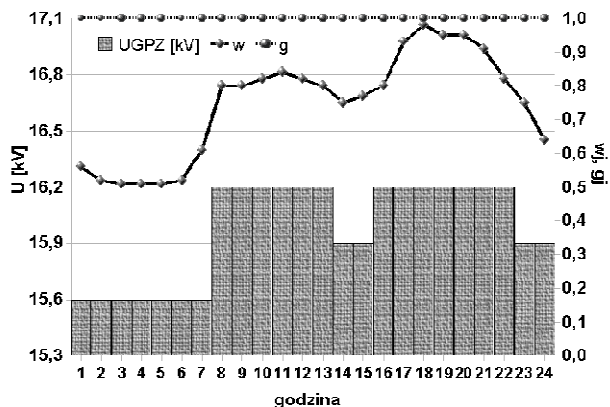
Prócz zmian napięcia zasilania przy wzroście obciążenia sieci, widoczny jest korzystny wpływ pracy MEW. Pozwala ona zmniejszyć napięcie w GPZ, przy jednoczesnej poprawie warunków napięciowych w głębi sieci.

Korzyści wynikające z pracy elektrowni najpełniej obrazują rysunki 4 i 5. Na rysunku 4 pokazano wybrany, rzeczywisty przebieg dobowy obciążenia sieci. Towarzyszy mu stały poziom mocy generowanej w MEW, na poziomie 300 kW. Na wykresie pokazano również wartość optymalnego napięcia zasilania sieci. Zmienia się ono w zakresie od 15,6 kV, do 16,5 kV.



Rys. 4. Przebieg dobowy optymalnego napięcia zasilania sieci, dla rzeczywistego obciążenia i generacji w MEW

Rysunek 5 przedstawia natomiast ten sam dobowy przebieg obciążenia sieci, jednakże przy założeniu, że elektrownia pracowałaby wtedy przy pełnej mocy osiągalnej (1 MW). W takim wypadku napięcie optymalne zmienia się jedynie w zakresie do 16,2 kV, przy ograniczeniu całkowitej dobowej liczby przełączeń (z 6 do 4).



Rys. 5. Przebieg dobowy optymalnego napięcia zasilania sieci, dla przy wymuszonym wzroście poziomu generacji

7. WNIOSKI

Zastosowanie opisanej metody pozwoliło na osiągnięcie założonego celu, tj. uzyskano minimalizację odchyleń napięcia w węzłach sieci elektroenergetycznej.

Dzięki wynikom obliczeń udało się osiągnąć ograniczenie liczby przełączeń przełącznika zaczepów na transformatorze 110 kV/SN zasilającym sieć rozdzielczą.

W toku obliczeń wskazano również stacje, w których modernizacja jest konieczna. Biorąc pod uwagę fakt, że przekładnie oraz możliwości regulacyjne transformatorów rozdzielczych nie zawsze są jednakowe, udało się uzyskać informacje, gdzie wskazana jest zamiana miejscami jednostek transformatorowych SN/nn. Możliwy jest wtedy dobór transformatorów o parametrach lepiej dostosowanych do warunków napięciowych.

8. BIBLIOGRAFIA

1. Kacejko P.: Generacja rozproszona w systemie elektroenergetycznym. Lublin, WPL, 2004, ISBN 83-89246-92-9.
2. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4.05.2007r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Dziennik Ustaw Nr 93, poz. 623.
3. Kot A.: Optymalna regulacja napięcia w sieciach średniego napięcia zawierających źródła generacji rozproszonej. Rozprawa doktorska, Akademia Górniczo – Hutnicza, 2005, str. 40-51.
4. Goldberg D. E.: Algorytmy genetyczne i ich zastosowanie. Warszawa, WNT, 2003, str. 26-31, ISBN 83-204-2843-2.

COMPUTER APPLICATION FOR OPTIMAL VOLTAGE REGULATION IN POWER DISTRIBUTION NETWORK WITH THE LOCAL SOURCE OF POWER

Keywords: power distribution network, dispersed generation, voltage regulation

In the article the analysis of the effective voltage value was introduced. It considered power distribution network collaborating with a local source of energy. Optimization of voltage regulation was performed using technical possibilities and changing ratio of transformers. The dedicated computer program using genetic algorithm was used in calculations.