

XVI Seminarium
ZASTOSOWANIE KOMPUTERÓW W NAUCE I TECHNICE' 2006
Oddział Gdański PTETiS
Referat nr 6

**KOMPUTEROWE OBLICZANIE STRAT I ROZPŁYWÓW MOCY
W SIECIACH ELEKTROENERGETYCZNYCH**

Artur GANCARZ

Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, paw. B-1, pok. 108, 30-059 Kraków
tel: (12) 617 37 60 fax: (12) 634 57 21 e-mail: einstein@agh.edu.pl

Optymalizacja pracy sieci elektroenergetycznej dokonywana jest na wielu płaszczyznach. Jednym z celów jest minimalizacja kosztów jej funkcjonowania lub odpowiednie działania w kierunku spełnienia norm i przepisów prawa. Do realizacji tak postawionego zagadnienia służy obliczanie rozplywów mocy, strat mocy i strat energii w sieci elektroenergetycznej. Obliczenia służą również do kontroli poprawności doboru elementów sieci, informowania o przekroczeniach oraz określania strat w wybranej konfiguracji sieci. W referacie przedstawiono zależności pomiędzy elementami modelu sieci elektroenergetycznej oraz zamieszczono jedną z metod obliczania rozplywu mocy. Na bazie tych obliczeń uzyskuje się informacje o wielkości strat i przekroczeniach. Wyniki obliczeń służą do badań oraz nauczania zjawisk występujących przy pracy i eksploatacji sieci elektroenergetycznych oraz przy ich projektowaniu.

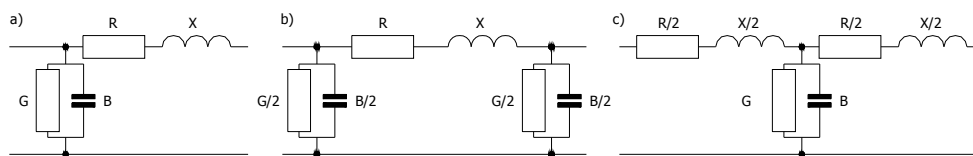
1. PODSTAWY TEORETYCZNE OBLICZEŃ

1.1. Założenia

Obliczeń dotyczących rozplywu mocy i energii w sieci elektroenergetycznej dokonuje się na modelu odwzorowującym rzeczywistość sieć. W skład tego modelu wchodzi poszczególne urządzenia (np. transformatory) i linie elektroenergetyczne. Obliczenia rozplywu prądów i obliczanie strat przeprowadza się **w stanie ustalonym** pracy sieci.

1.2. Modele poszczególnych elementów sieci

W zależności od wymaganej dokładności, poziomu napięcia nominalnego oraz dostępności innych danych modele poszczególnych elementów są bardziej lub mniej rozbudowane. Na Rys.1 przedstawiono typy czwórników, za pomocą których modelowane są poszczególne fragmenty sieci elektroenergetycznej. Zależnie od poziomu napięcia stosuje się uproszczenia przy modelowaniu elementów za pomocą tych czwórników: rezystancyjny, rezystancyjno-reaktancyjny, rezystancyjno-reaktancyjny z susceptancją oraz pełny czwórnik (opowiednio I, II, III lub IV rodzaj).



Rys. 1. Typy stosowanych czwórników do modelowania sieci: a) Γ („gamma”), b) Π („pi”), c) T [1]

W celu obliczenia wielkości elementów danego czwórnika wykorzystywane są parametry rzeczywistych urządzeń (lub odcinków linii), m.in. moc, napięcie, wielkość strat w uzwojeniach transformatorów, długość, przekrój itp. Dla przykładu wzorem (1) podano sposób obliczenia rezystancji czwórnika reprezentującego transformator:

$$R_T = \frac{\Delta P_{CuN} \cdot U_N^2}{S_N^2} \quad (1)$$

gdzie: R_T - rezystancja transformatora, ΔP_{CuN} - znamionowe straty w uzwojeniach transformatora, U_N - nominalne napięcie sieci elektroenergetycznej, S_N - znamionowa moc transformatora

Typ modelu wybiera się odpowiednio do danego elementu sieci. Dla przykładu można podać, że transformatory najczęściej modeluje się przy pomocy czwórnika typu Γ („gamma”). Ma to na celu uprościć obliczenia przy łączeniu czwórników.

W rozdzielczych sieciach elektroenergetycznych występuje wiele poziomów napięć (110 kV, 30 kV i/lub 15 kV; często również 6 kV). Sieci różnych napięć połączone są ze sobą przy pomocy transformatorów energetycznych. Sieć taka pracuje wtedy jako całość i powinna być zamodelowana w całości (w szczególnych przypadkach bierze się pod uwagę badany fragment, a pozostałą część modeluje się w uproszczony sposób). Do obliczeń stosowane są często tzw. *jednostki względne*, na które są przeliczane wszystkie parametry czwórników [1]. Przeliczenia te wykorzystuje się w dalszym etapie do obliczeń i analiz.

W odmienny sposób traktuje się odbiory w węzłach sieci elektroenergetycznej. Nie są one modelowane jako fizyczne elementy, lecz jako dostarczana/odbierana moc czynna i/lub bierna (częściej nawet w postaci prądu obliczonego z zależności (2)). Generatory często modelowane są jako źródła napięcia i mocy czynnej (rzadziej, zamiast napięcia, mocy biernej).

$$\underline{I}_i^* = \frac{P_i + jQ_i}{\underline{U}_i} \quad (2)$$

gdzie: \underline{I}_i^* - sprzężony zespolony prąd *i-tego* węzła, P_i - moc czynna *i-tego* węzła, Q_i - moc bierna *i-tego* węzła, \underline{U}_i - napięcie zespolone w *i-tym* węźle.

1.3. Modelowanie sieci elektroenergetycznej

Znajomość poszczególnych fragmentów sieci w postaci czwórników pozwala na utworzenie macierzy admitancyjnej węzłowej złożonej z:

- admitancji węzłowych własnych (na przekątnej głównej macierzy), które są sumą wszystkich admitancji włączonych do węzła,
- admitancji wzajemnych (poza przekątną macierzy), które są admitancjami łączącymi odpowiednie węzły o numerach pobranych z numeracji kolumn i wierszy macierzy.

Schemat połączeń czwórników tworzy model sieci, który jest jej grafem [2]. Model ten jest przedmiotem analiz jako odwzorowanie struktury połączeń elektrycznych. Z każdym węzłem grafu związane są cztery wielkości: P , Q , U oraz δ (kąt fazowy napięcia). Wielkości te nie są całkowicie niezależne od siebie (muszą spełniać podstawowe prawa elektrotechniki). Odpowiednio dwie z nich powinny być znane, a dwie pozostałe obliczane. Wynikają stąd z góry określone typy węzłów występujących w grafie reprezentującym sieć elektroenergetyczną: PQ (zadanymi wielkościami są moce), PU (omawiany wcześniej węzeł generatorowy z mocą czynną i napięciem) oraz specjalny typ węzła *bilansującego* z zadanym napięciem i kątem fazowym równym zero.

W obliczeniach rozptylowych bardzo często bazuje się na metodzie potencjałów węzłowych. Utworzona wcześniej macierz wraz z innymi danymi pozwala na zapisanie równań nieliniowych dla sieci elektroenergetycznej w formie admitancyjnej:

$$\underline{\mathbf{I}} = \underline{\mathbf{Y}} \cdot \underline{\mathbf{U}} \quad (3)$$

gdzie: I - wektor prądów węzłowych, Y - macierz admitancyjna, U - wektor napięć węzłowych.

Końcowym celem obliczeń jest wyznaczenie wektora stanu, który umożliwi obliczenie rozptywu prądów i mocy w sieci. Wektorem stanu dla w/w metody jest wektor zespolonych napięć węzłowych: $x = [U, \delta]^T$, w którego skład wchodzi moduły napięć w poszczególnych węzłach grafu oraz ich kąty fazowe liczone względem węzła bilansującego (węzła odniesienia).

2. OBLICZENIA ROZPTYWU MOCY

2.1. Szkic metody

Często wykorzystywaną, ze względu na dobrą zbieżność, jest metoda *Gaussa*. Rozwiązywanie nieliniowego układu równań (podanego ogólną zależnością (3)) w zapisie macierzowym można przedstawić następująco [1]:

$$f(x) = 0 \quad (4)$$

Kolejnym krokiem po zapisaniu równań w postaci (4) jest przekształcenie ich do postaci równoważnej, w której są te same rozwiązania (ten sam wektor stanu):

$$F(x) - x = 0 \quad \text{lub} \quad F(x) = x \quad (5)$$

Jak wynika z zależności (5) wektor stanu x jest obliczany za pomocą funkcji zawierającej w sobie ten sam wektor stanu x . Rozwiązywanie takiego układu równań polega na iteracyjnym przybliżaniu do rozwiązania x_l w kolejnych krokach, co zobrazowano graficznie na Rys.2. Zależność tą można zapisać następująco:

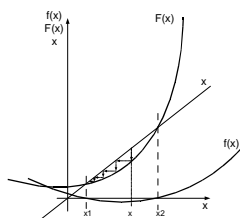
$$x^{(k+1)} = F(x^{(k)}) \quad (6)$$

gdzie: k - numer kolejnej iteracji.

Iteracje w tej metodzie wykonywane są do momentu, w którym różnica każdej z poszczególnych składowych wektora stanu x w dwóch kolejnych krokach różni się pomiędzy sobą wielkością mniejszą od założonej (osiągana jest założona dokładność):

$$\bigcap_{k=1}^n \left\| x^{(k+1)} \right\| - \left\| x^{(k)} \right\| \leq \varepsilon \quad (7)$$

gdzie: n - wymiar wektora stanu (ilość zmiennych stanu), $x_i^{(k)}$ - wielkość w i -tym wierszu z wektora stanu w kroku k -tym, ε - kryterium dokładności, po którym zatrzymywane są obliczenia



Rys.2 Graficzna interpretacja metody Gaussa [1]

2.2. Metoda Gaussa w zastosowaniu do rozplywu mocy

Korzystając z zapisu macierzowego (3) rozwija się go na poszczególne wiersze:

$$\underline{I}_i = \underline{Y}_{ii} \cdot \underline{U}_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^w (\underline{Y}_{ij} \cdot \underline{U}_j), \quad i = 1, 2, \dots, w \quad (8)$$

gdzie: w - ilość węzłów w metodzie potencjałów węzłowych, i - numer węzła w metodzie potencjałów węzłowych, dla którego wykonuje się operacje obliczeniowe

Aby móc skorzystać z metody potencjałów węzłowych i obliczać zespolone napięcia w poszczególnych węzłach przekształca się równanie (8) do postaci (9). Przy wykorzystaniu dodatkowo zależności (2) wyznaczającej prąd węzłowy. Po dalszych przekształceniach otrzymuje się zależność (10), która odpowiada zapisowi równania (6) dla metody Gaussa.

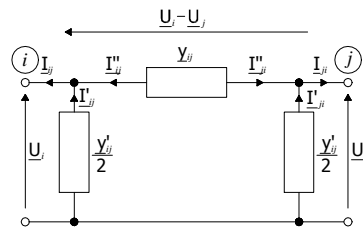
$$\underline{U}_i = \frac{1}{\underline{Y}_{ii}} \cdot \left(\underline{I}_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^w (\underline{Y}_{ij} \cdot \underline{U}_j) \right), \quad i = 1, 2, \dots, w \quad (9)$$

$$\underline{U}_i^{(k+1)} = \frac{1}{\underline{Y}_{ii}} \cdot \left(\frac{P_i - Q_i}{\underline{U}_i^{*(k)}} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^w (\underline{Y}_{ij} \cdot \underline{U}_j^{(k)}) \right), \quad i = 1, 2, \dots, w \quad (10)$$

Ostatnim krokiem przy obliczaniu sieci elektroenergetycznej jest wyznaczenie prądu gałęziowego. Dokonuje się tego na podstawie znajomości wcześniej obliczonych napięć w poszczególnych węzłach sieci oraz znajomości typu czwórnik w danej gałęzi pomiędzy węzłami i oraz j . Dla przykładu podano sposób obliczenia prądu (wzór (11)) i mocy (wzór (12)) dla gałęzi typu II. We wzorach zastosowano oznaczenia z rysunku Rys.3.

$$\underline{I}_{ij} = -(\underline{U}_i - \underline{U}_j) \cdot \underline{y}_{ij} - \underline{U}_i \cdot \frac{\underline{y}'_{ij}}{2} \quad (11)$$

$$P_{ij} + jQ_{ij} = \underline{U}_i \cdot \underline{I}_{ij}^* \quad (12)$$



Rys.3 Model czwornika typu Π wraz z zaznaczonymi prądami w poszczególnych jego elementach [1]

2.3. Przykład obliczeniowy

W oparciu o podaną wcześniej metodę *Gaussa* działa program komputerowy ESA, napisany z myślą o wykorzystaniu przy obliczeniach w sieciach rozdzielczych.

W przykładzie wykorzystano fragment rzeczywistej sieci SN 15kV składający się z 315 węzłów i 317 gałęzi, zasilany z czterech różnych transformatorów 110/15 kV. Model sieci uwzględnia wszystkie gałęzie wraz z miejscami zmiany przekrojów, odgałęzieniami i węzłami z umiejscowieniem sprzętu łączeniowego (łączniki, rozłączniki). Całkowita moc pobierana we wszystkich węzłach wynosi ok. $(6,2+j3)$. Moc odbierana jest przez 137 stacji SN/nn o łącznej mocy znamionowej transformatorów 21620 kVA (średnie obciążenie pojedynczej stacji wynosi 31,8 %).

W wyniku obliczeń otrzymano wektor modułów i kątów napięć węzłowych, wielkości mocy przepływających przez gałęzie oraz prądów. Przy wykorzystaniu zależności (13) program obliczył również straty mocy w każdej gałęzi sieci pomiędzy poszczególnymi węzłami i oraz j . Obliczone zostały straty sumaryczne dla całej modelowanej sieci, które w przykładzie wynoszą 65,5 kW. Program komputerowy wykonał prawie 30 tys. iteracji w celu osiągnięcia zadanej dokładności $\varepsilon = 10^{-10}$. Mniejsza dokładność powoduje powiększanie się mocy niezbilansowania sieci do poziomu, który nie pozwala na jednoznaczne określenie, przy którym z wariantów konfiguracji sieci są mniejsze straty (w rozpatrywanym przypadku bilans kształtuje się na poziomie jednego wata, a powiększenie ε o jeden rząd wielkości zwiększa niezbilansowanie sieci do poziomu ok. 67 W, co jest w wielu przypadkach niewystarczające przy dużym stopniu szczegółowości modelu).

$$\Delta P_{ij} = 3 \cdot |\underline{I}_{ij}|^2 \cdot R_{ij} \quad (13)$$

gdzie: R_{ij} - rezystancja wzdłużna gałęzi pomiędzy węzłami i -tym i j -tym, \underline{I}_{ij} - obliczony zespolony prąd gałęziowy, ΔP_{ij} - obliczone straty mocy dla wybranej gałęzi

Przytoczone obliczenia posłużyły jako podstawa do optymalizacji konfiguracji istniejącej sieci elektroenergetycznej z punktu widzenia strat mocy. Zmiana podziału sieci na fragmenty zasilane z osobnych źródeł (transformatorów 110/15 kV) może być dokonana na wiele sposobów. Rekonfigurację w omawianym przypadku zrealizowano jako szczególny przypadek w metodzie „cykli i kar” podanej w [2], tj. przy znanych możliwych drogach zasilania poszczególnych węzłów i z góry zadanych parametrach gałęzi sieci. Obliczeń

dokonywano na dwóch etapach: sieć bez rozcięć w celu odszukania punktów spływu mocy (znane drogi zasilania) oraz drugi etap, który polegał na poszukiwaniu optymalnego miejsca rozcięcia w pobliżu tych punktów spływu. Wyboru punktu rozcięcia dokonywano na podstawie obliczonej wielkości strat dla wszystkich możliwych wariantów rozcięć (przebieg zupełny rozcięć przy punktach spływu). W przykładzie obliczeniowym optymalnym okazało się przeniesienie miejsca rozcięcia na jednej z linii. Uzyskano z tego tytułu oszczędności strat mocy na poziomie 2,7 kW (zmniejszenie o ok. 4 %).

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Otrzymywane wyniki strat mocy mogą być wykorzystywane są m.in. do obliczeń ekonomicznych metodą zdyskontowanych rocznych kosztów funkcjonowania sieci (z wykorzystaniem obliczeń strat energii opisanych w [3]) i znakomicie nadają się do wspomaganie decyzji przy wariantowych rozwiązaniach ich budowy (w zależności od grafiku obciążeń, etapowości budowy itp.). Przy dodatkowym modelowaniu dla różnych obciążeń w czasie doby informacja o napięciach w poszczególnych węzłach sieci może być wykorzystywana m.in. do korygowania nastaw przekładni transformatorów SN/nn z uwzględnieniem sezonowości i okresowości (zmienności odpowiednio: w ciągu roku i w ciągu doby). Wyniki obliczeń napięć węzłowych można także wykorzystać do kontroli dopuszczalnych odchyłeń napięcia w sieci. W przykładzie pokazano, jak wyniki tego typu obliczeń mogą służyć do poszukiwania optymalnych rozwiązań przy projektowaniu nawet najmniejszych fragmentów sieci elektroenergetycznych (ze względu na możliwy stopień szczegółowości modelowania elementów). Znajomość rozpręgu prądów w sieci

Obliczenia w sieciach elektroenergetycznych wymagają zgromadzenia dużej ilości informacji o liniach, urządzeniach i obciążeniu. Ilości przeprowadzanych obliczeń (tysiące iteracji), wielkość rozpatrywanego problemu (rozległość sieci) wskazują na konieczność stosowania obliczeń komputerowych oraz, niejednokrotnie, dużych nakładów obliczeniowych.

4. BIBLIOGRAFIA

1. Kremens Z., Sobierajski M.: Analiza systemów elektroenergetycznych, Warszawa 1996, s.63-66, 85-87, ISBN 83-204-2060-1
2. Kulczycki J.: Optymalizacja struktur sieci elektroenergetycznych, WNT 1999, s. 24-27, 37-47, ISBN 83-204-1322-2
3. pod. red. Kulczycki J.: Ograniczanie strat energii elektrycznej w elektroenergetycznych sieciach rozdzielczych, Poznań 2002, s. 124-130, ISBN 83-903073-7-5

COMPUTATION POWER LOSS AND FLOW OF CURRENT IN POWER NETWORKS

Optimization of power network has multiple planes. One of target is a minimization costs of power losses or adhere to standards. To fruition of this target provide the computation power losses, energy losses and flow of current. The computation can serve to control correction of network configuration, too. In this paper is presented one of method of computation flow current and flow power. Based on this computation can receive information about quantity of power losses and overbalances in multiple configurations. Results of computation can be using to designing or minimization operating costs.