

Ćwiczenie 1

OBLICZANIE ROZPŁYWU MOCY W UKŁADZIE ELEKTROENERGETYCZNYM

1.1. WPROWADZENIE

Wyznaczanie rozplywów mocy w elektroenergetycznych sieciach przesyłowych można uznać za podstawowe obliczenia wykonywane w praktyce zarówno na etapie projektowania, jak i w fazie eksploatacji SEE. Kontrola rozplywów należy do istotnych problemów kierowania pracą systemu elektroenergetycznego przez dyspozytorów. Sterowanie rozplywami mocy ma na celu:

- niedopuszczenie do przeciążeń elementów układów przesyłowych,
- zapewnienie niezawodnego zasilania odbiorców,
- minimalizację strat sieciowych,
- regulację napięć.

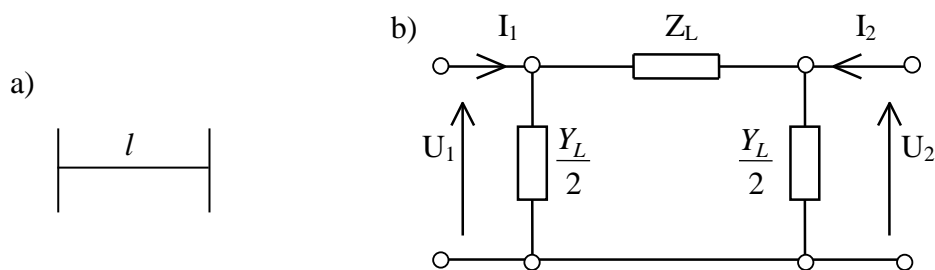
Wyznaczenie rozplywów mocy polega na rozwiązaniu układu równań opisujących dany układ sieciowy. Zwykle rozpatruje się stan symetryczny układu trójfazowego, a więc tylko impedancję elementów dla składowej zgodnej, i tylko składowe zgodne prądów i napięć.

1.1.1. Schematy zastępcze elementów sieci

Przystępując do obliczeń sieci należy dysponować schematami zastępczymi, które wynikają z parametrów elementów i ich powiązań między sobą. Zakładając liniowość można elementy rozłożone R czy X zastąpić elementami skupionymi, a przy założeniu stanu ustalonego i symetrii fazowej rozpatrywać schemat tylko jednej fazy.

Schemat zastępczy linii elektroenergetycznej

Dla linii trójfazowej obciążonej symetrycznie (rys.1.1) operuje się najczęściej schematem zastępczym typu II dla jednej fazy (można również stosować schemat typu Γ).



Rys. 1.1. Odcinek linii elektroenergetycznej: a) symbol ogólny, b) schemat zastępczy

Jeśli mamy linię o długości l i parametrach jednostkowych R' , X' , B' to impedancję możemy obliczyć z zależności:

$$\underline{Z}_l = (R' + jX')l = R + jX \quad (1.1)$$

a admitancję gałęzi poprzecznej dla podanego schematu z następującego wzoru:

$$\underline{Y}_l = jB'l = jB \quad (1.2)$$

Zgodnie ze schematem na rys. 1.1b, jeśli znamy napięcie na początku linii oraz poszczególne parametry to możemy obliczyć napięcie lub prąd w dowolnym punkcie linii.

Równania Kirchhoffa dla węzłów 1 i 2 mają postać:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \frac{\underline{Y}_L}{2} \underline{U}_1 + \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_2}{\underline{Z}_L} \\ \underline{I}_2 &= \frac{\underline{Y}_L}{2} \underline{U}_2 + \frac{\underline{U}_2 - \underline{U}_1}{\underline{Z}_L} \end{aligned} \quad (1.3)$$

Na podstawie układu równań budujemy macierz admitancyjną węzłową dla linii:

$$[Y] = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

Na głównej przekątnej są admitancje własne danego węzła tzn. suma admitancji wszystkich gałęzi wychodzących z danego węzła:

$$y_{11} = \frac{\underline{Y}_L}{2} + \frac{1}{\underline{Z}_L}, \quad y_{22} = \frac{\underline{Y}_L}{2} + \frac{1}{\underline{Z}_L} \quad (1.5)$$

Elementy poza główną przekątną są równe admitancji gałęzi łączącej dwa węzły i są to admitancje wzajemne między danymi węzłami – ze znakiem minus:

$$y_{12} = -\frac{1}{\underline{Z}_L}, \quad y_{21} = -\frac{1}{\underline{Z}_L} \quad (1.6)$$

Macierz admitancji obwodu złożonego z elementów pasywnych jest symetryczna, co oznacza, że $y_{12} = y_{21}$.

Na podstawie powyższych wzorów macierz admitancyjna dla naszego schematu linii przyjmuje postać:

$$[\underline{Y}_L] = \begin{bmatrix} \frac{\underline{Y}_L}{2} + \frac{1}{\underline{Z}_L}; & -\frac{1}{\underline{Z}_L} \\ -\frac{1}{\underline{Z}_L}; & \frac{\underline{Y}_L}{2} + \frac{1}{\underline{Z}_L} \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

a całość układu równań można zapisać w postaci:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = [\underline{Y}_L] \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

Schemat zastępczy transformatora

W przypadku transformatorów bierzemy pod uwagę wszystkie ich parametry, tzn. rezystancje R , reaktancje X , konduktancje G i susceptancje B . W tym przypadku możemy również posłużyć się schematem typu Π pamiętając o przeliczeniu parametrów na jedno napięcie. Symbol ogólny i schemat zastępczy transformatora jest przedstawiony na rys.1.2.

Parametry R_T , X_T , G_T i B_T obliczamy w oparciu o dane katalogowe transformatora: ΔP_{Cu} , $\Delta u_z\%$, ΔP_{Fe} i $I_0\%$.

Rezystancja uzwojeń R_T jest proporcjonalna do strat obciążeniowych ΔP_{Cu} , stąd:

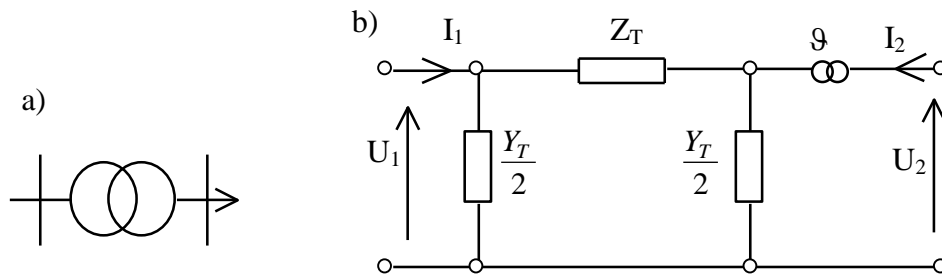
$$R_T = \frac{\Delta P_{Cu} \cdot U_n^2}{S_n^2} \quad (1.9)$$

Często straty są podawane w procentach mocy znamionowej:

$$\Delta P_{Cu\%} = \frac{\Delta P_{Cu}}{S_n} 100\% \quad (1.10)$$

wtedy:

$$R_T = \frac{\Delta P_{Cu\%} \cdot U_n^2}{100 S_n} \quad (1.11)$$



Rys. 1.2. Transformator: a) symbol ogólny, b) schemat zastępczy

Reaktancję X_T obliczamy wykorzystując napięcie zwarcia $\Delta u_{z\%}$ będące miarą impedancji transformatora:

$$Z_T = \frac{\Delta u_{z\%} U_n^2}{100 S_n} \quad (1.12)$$

stąd

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (1.13)$$

lub

$$X_T = \frac{\Delta u_{x\%} U_n^2}{100 S_n} \quad (1.14)$$

gdzie:
$$\Delta u_{x\%} = \sqrt{\Delta u_{z\%}^2 - \Delta u_{r\%}^2} \quad (1.15)$$

Procentowy spadek napięcia na rezystancji równy jest stratom obciążeniowym wyrażonym w procentach mocy znamionowej:

$$\Delta u_{r\%} = \Delta P_{Cu\%} \quad (1.16)$$

Pozostałe dane katalogowe służą do obliczania admitancji:

G_T – konduktancja jest zależna od strat w rdzeniu ΔP_{Fe}

$$G_T = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_n^2} \quad (1.17)$$

B_T – susceptancję obliczamy wykorzystując prąd biegu jałowego $I_{0\%}$, będący miarą admitancji

$$Y_T = \frac{I_{0\%} S_n}{100 U_n^2} \quad (1.18)$$

stąd:

$$B_T = \sqrt{Y_T^2 - G_T^2} \quad (1.19)$$

Układ równań Kirchhoffa dla przedstawionego schematu zastępczego wygląda następująco:

- równanie oczkowe

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_T \left(\underline{I}_1 - \frac{Y_T}{2} \underline{U}_1 \right) + \mathcal{G} \underline{U}_2 \quad (1.20)$$

- równanie węzłowe

$$\underline{I}_1 = \frac{Y_T}{2} \underline{U}_1 + \frac{Y_T}{2} \underline{U}_2 \mathcal{G} - \frac{1}{\mathcal{G}} \underline{I}_2 \quad (1.21)$$

Z pierwszego równania obliczamy I_1 i podstawiamy do równania drugiego, następnie po uporządkowaniu otrzymujemy:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{U}_1 \left(\frac{1}{\underline{Z}_T} + \frac{Y_T}{2} \right) - \frac{\mathcal{G}}{\underline{Z}_T} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 &= -\underline{U}_1 \frac{\mathcal{G}}{\underline{Z}_T} + \underline{U}_2 \left(\frac{1}{\underline{Z}_T} + \frac{Y_T}{2} \right) \mathcal{G}^2 \end{aligned} \right\} (1.22)$$

stąd macierz admitancji:

$$[\underline{Y}_T] = \begin{bmatrix} \frac{Y_T}{2} + \frac{1}{\underline{Z}_T}; & -\frac{\mathcal{G}}{\underline{Z}_T} \\ -\frac{\mathcal{G}}{\underline{Z}_T}; & \left(\frac{Y_T}{2} + \frac{1}{\underline{Z}_T} \right) \mathcal{G}^2 \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

a całe równanie dla danego obwodu zapisujemy:

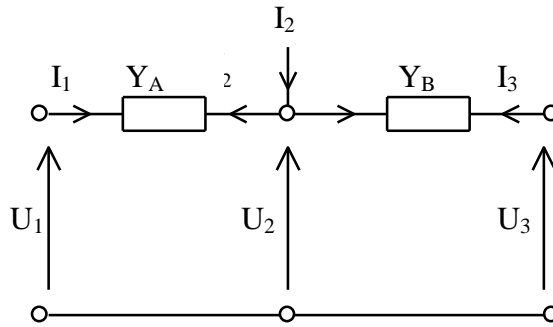
$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = [\underline{Y}_T] \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

Schemat zastępczy dwóch elementów

Sieć elektroenergetyczna składa się z określonej liczby linii i stacji, stąd schemat zastępczy sieci będzie połączeniem określonej liczby dwóch podstawowych schematów zastępczych. Przykładowo, jeśli mamy element o macierzy admitancyjnej Y_A i element o macierzy admitancyjnej Y_B , to schemat zastępczy przy połączeniu szeregowym będzie wyglądał jak na rys. 1.3.

Równania admitancyjne poszczególnych elementów:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11}^A & y_{12}^A \\ y_{21}^A & y_{22}^A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} \quad i \quad \begin{bmatrix} \underline{I}''_2 \\ \underline{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{22}^B & y_{23}^B \\ y_{32}^B & y_{33}^B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \end{bmatrix} \quad (1.25)$$



Rys. 1.3. Schemat zastępczy dwóch elementów połączonych szeregowo oraz równanie węzłowe:

$$\underline{I}_2 = \underline{I}'_2 + \underline{I}''_2 \quad (1.26)$$

Stąd dla całego układu otrzymujemy równanie admitancyjne połączone:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11}^A & y_{12}^A & 0 \\ y_{21}^A & (y_{22}^A + y_{22}^B) & y_{23}^B \\ 0 & y_{32}^B & y_{33}^B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \end{bmatrix} \quad (1.27)$$

W ten sposób można napisać równanie admitancyjne sieci złożonej z wielu elementów, otrzymując powiązanie wektorów prądów i napięć wszystkich węzłów sieci.

Ogólne równanie admitancyjne:

$$[\underline{I}] = [\underline{Y}] \cdot [\underline{U}] \quad (1.28)$$

1.1.2. Wyznaczanie potencjałów węzłowych metodą Warda-Hale'a

Wyznaczanie potencjałów węzłowych potrzebnych do obliczenia rozplywu mocy, polega na rozwiązaniu układu równań wiążących wektory prądów i napięć wszystkich węzłów sieci, czyli na rozwiązaniu równania ogólnego (wzór 1.28). Zgodnie z tym równaniem w układzie zawierającym n węzłów niezależnych (węzłem odniesienia $n+1$ jest ziemia) prąd dopływający do k -tego węzła wynosi:

$$\underline{I}_k = \sum_{l=1}^n \underline{Y}_{kl} \underline{U}_l \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (1.29)$$

gdzie: U_l – jest potencjałem l -tego węzła, ($l = 1, 2, \dots, n$),

Y_{kl} – admitancja własna węzła k gdy $l = k$, lub admitancja wzajemna między węzłami gdy $l \neq k$

a wartość sprzężona prądu:

$$\underline{I}_k^* = \sum_{l=1}^n \underline{Y}_{kl}^* \underline{U}_l^* \quad (1.30)$$

stąd moc dopływająca do węzła k :

$$\underline{S}_k = \underline{P}_k + j\underline{Q}_k = \underline{U}_k \underline{I}_k^* = \underline{U}_k \sum_{l=1}^n \underline{Y}_{kl}^* \underline{U}_l^* \quad (1.31)$$

Ponieważ napięcie w postaci zespolonej można zapisać:

$$\underline{U}_k = U_k \cdot e^{j\delta_k} \quad (1.32)$$

stąd
$$\underline{P}_k + j\underline{Q}_k = U_k \cdot e^{j\delta_k} \sum_{l=1}^n \underline{Y}_{kl}^* \underline{U}_l^* \quad (1.33)$$

Ze wzoru (1.33) wynika, że w każdym węźle występują cztery zmienne P_k , Q_k , U_k , δ_k , przy czym dwie z nich mogą być traktowane jako zmienne niezależne, a pozostałe dwie jako wymuszenie.

Zadaniem programów obliczania rozplywu mocy jest określenie wszystkich czterech wielkości w każdym węźle oraz obliczenie mocy i prądów gałęziowych oraz strat mocy czynnych i biernych we wszystkich elementach systemu.

Napięcie węzłowe dla zadanych obciążeń wyznacza się metodą iteracyjną, polegającą na kolejnych założeniach przybliżonych wartości wektora napięć węzłowych:

- W kroku zerowym – zakłada się pierwsze przybliżenie wektora napięć we wszystkich węzłach, pozwala to na obliczenie prądów węzłowych i mocy.
- Tak obliczone moce zwykle nie są równe mocom zadany, na podstawie różnicy mocy oblicza się poprawkę napięciową danego węzła, która dodana do napięcia w węźle zmniejsza niezbilansowane.
- Powtarza się to dla wszystkich węzłów odbiorczych i wytwórczych – węzeł bilansujący pomija się.

W kolejnych krokach iteracyjnych poprawki napięcia maleją.

Przy rozwiązywaniu równania (1.33) spotykamy się z trzema rodzajami węzłów i kombinacjami zmiennych zależnych i niezależnych:

1. elektrownia bilansująca (węzeł elektrowniany bilansujący) – tj. elektrownia, dla której przyjmujemy, że dany jest potencjał i argument U_k i δ_k ; szukamy mocy dopływającej P_k i Q_k ,
2. inne elektrownie (węzły elektrowniane), dla których dany jest moduł potencjału węzłowego U_k oraz moc planowana P_k , jaką elektrownia powinna oddawać do sieci; szukamy Q_k i δ_k
3. węzły obciążeniowe, dla których zakładamy znajomość P_k i Q_k , oraz szukamy U_k i δ_k .

Wynika stąd, że wyznaczenie potencjałów węzłowych w dużych układach elektroenergetycznych sprowadza się do rozwiązania równania głównego ze względu na dwie niewiadome w każdym węźle. Taki układ równań najwygodniej rozwiązać metodą iteracyjną, jednak wtedy dla każdego rodzaju węzła stosujemy nieco inny sposób postępowania i inne wzory.

Węzeł elektrowniany bilansujący

Zakładamy, że jest to węzeł $k = 1$, znamy potencjał U_1 , zakładamy $\delta_1 = 0$, szukamy obciążenia mocą czynną i bierną P_1 i Q_1 . Jest to elektrownia, która dyktuje poziom napięcia, a jej moc określimy po zbilansowaniu mocy odbieranych, strat mocy oraz mocy innych

elektrowni – stąd nazwa bilansująca (obciążenie elektrowni wynika z bilansu mocy systemu elektroenergetycznego).

Pozostałe elektrownie

W pozostałych elektrowniach zakładamy, że znamy obciążenie mocą czynną P_{ks} oraz moduł napięcia U_{ks} – nie znamy mocy biernej Q_k i argumentu δ_k .

Wprowadzamy oznaczenia:

$$\begin{aligned} \underline{I}_k &= a_k + jb_k, & \underline{U}_k &= e_k + jf_k \\ \underline{Y}_{kl} &= G_{kl} + jB_{kl}, & \underline{S}_k &= P_k + jQ_k \end{aligned}$$

i przystępujemy do rozwiązywania równania 1.33.

Literatura

Kierzkowski Z.: Algorytm obliczeń elektroenergetycznych na maszynach cyfrowych.
WNT 1968

Kujarczyk Sz.: Elektroenergetyczne układy przesyłowe. WNT, Warszawa 1997 r.

Kopeć B.: Podstawy elektroenergetyki (materiały pomocnicze). PRZ, Rzeszów 2002 r