

7. OBLICZENIA WIELKOŚCI ZWARCIOWYCH ZA POMOCĄ KOMPUTERÓW

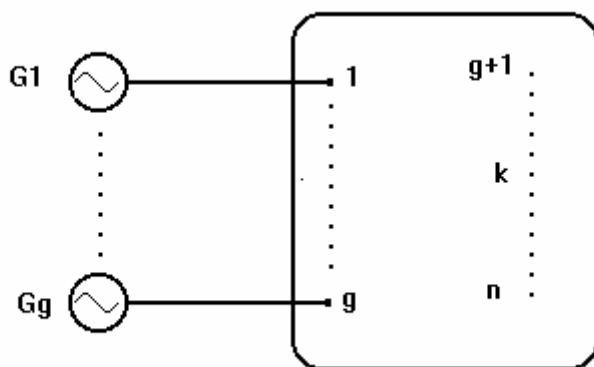
7.1. Zastosowanie metody potencjałów węzłowych do obliczania zwarć przy założeniu jednakowych sił elektromotorycznych generatorów

7.1.1. Obliczanie prądów i napięć przy zwarciach symetrycznych

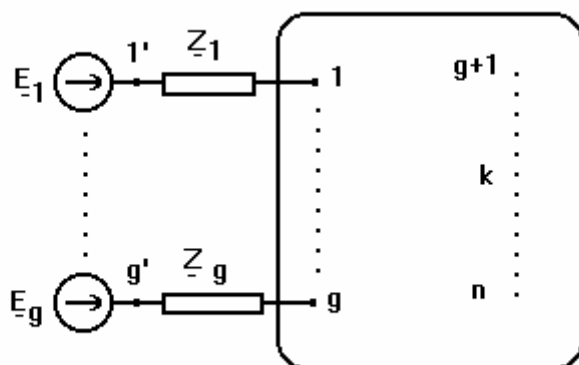
Rozpatrzmy sieć elektroenergetyczną, n - węzłową, w której w węzłach od 1 do g są przyłączone generatory (rys. 7.1). Dla obliczeń zwarciovych wszystkie generatory odwzorowano za pomocą źródła napięciowego o jednakowej sile elektromotorycznej $\underline{E}_d'' = \underline{E}$ i impedancji \underline{Z}'' - różnej dla każdego generatora. Rozpoczynając tworzenie modelu matematycznego systemu elektroenergetycznego dla stanu zakłóceniewego założono, że:

- rozpatrywana sieć jest siecią symetryczną,
- zostanie zastosowana metoda potencjałów węzłowych wraz z metodą składowych symetrycznych.

Zakładając ponadto, że dla zwarcia symetrycznego w węźle k -tym można narysować schemat zastępczy sieci do wyznaczania zwarć jak na rys. 7.2.



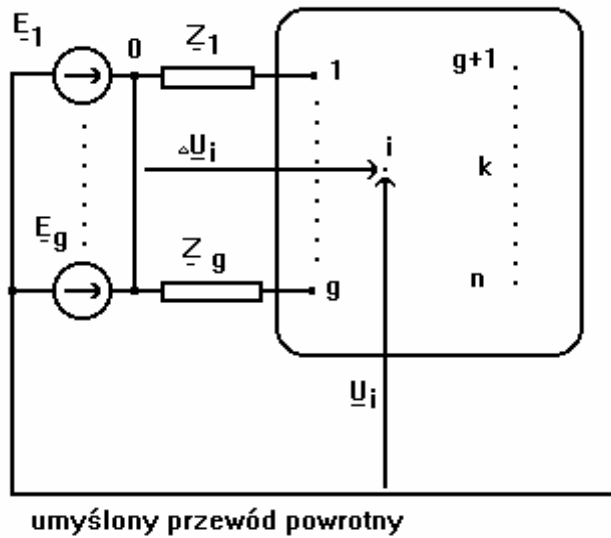
Rys. 7.1. Schemat ogólny sieci elektroenergetycznej.



Rys.7.2. Schemat sieci dla obliczeń zwarciovych.

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

Węzły 1', 2'...'g' są punktami ekwipotencjalnymi i można je połączyć. Przyjęto, że węzeł ten jest węzłem odniesienia rozpatrywanej sieci i nadajemy mu numer zero. Posiada on zerowy potencjał (rys. 7.3). Równanie potencjałów węzłowych będzie postaci:



Rys.7.3. Schemat zastępczy sieci dla obliczeń zwarciovych.

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \vdots \\ \underline{I}_k \\ \vdots \\ \underline{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{1,1} & \cdots & \underline{Y}_{1,k} & \cdots & \underline{Y}_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ \underline{Y}_{k,1} & \cdots & \underline{Y}_{k,k} & \cdots & \underline{Y}_{k,n} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Y}_{n,1} & \cdots & \underline{Y}_{n,k} & \cdots & \underline{Y}_{n,n} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta \underline{U}_1 \\ \vdots \\ \Delta \underline{U}_k \\ \vdots \\ \Delta \underline{U}_n \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

gdzie:

- $\underline{I}_1 \dots \underline{I}_k$ - prądy węzłowe;
- $\Delta \underline{U}_1 \dots \Delta \underline{U}_n$ - napięcia węzłów od 1 do n względem węzła odniesienia (napięcia węzłowe);
- $\underline{Y}_{1,1} \dots \underline{Y}_{n,n}$ - elementy macierzy admitancyjnej węzłowej sieci.

Równanie (6.1) można zapisać w postaci:

$$\underline{I} = \underline{Y} * \Delta \underline{U} \quad (7.2)$$

gdzie:

- \underline{I} - macierz prądów węzłowych;
- \underline{Y} - macierz admitancyjna węzłowa sieci;
- $\Delta \underline{U}$ - wektor napięć węzłowych.

Przy zwarciu w k-tym węźle mamy:

$$\underline{I}_1 = \dots = \underline{I}_{k-1} = \underline{I}_{k+1} = \dots = \underline{I}_n = 0 \quad \text{oraz} \quad \underline{I}_k \neq 0 \quad (7.3)$$

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

$$\Delta \underline{U}_k = -\underline{E}_d'' = -\underline{E} \quad (7.4)$$

Wektory prądów i napięć węzłowych są więc następujące:

$$\underline{I} = [0 \quad \dots \quad 0 \quad \underline{I}_k \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T \quad (7.5)$$

$$\Delta \underline{U} = [\Delta \underline{U}_1 \quad \dots \quad \Delta \underline{U}_{k-1} \quad -\underline{E} \quad \Delta \underline{U}_{k+1} \quad \dots \quad \Delta \underline{U}_n]^T \quad (7.6)$$

Równanie (7.2) to układ n równań węzłowych, w których wielkościami nieznanymi są:

- napięcia węzłowe oprócz $\Delta \underline{U}_k = -\underline{E}_d'' = -\underline{E}$,
- prąd węzłowy w węźle k-tym.

Aby rozwiązać powyższy układ równań można go przekształcić do postaci:

$$\Delta \underline{U} = \underline{Y}^{-1} * \underline{I} = \underline{Z} * \underline{I} \quad (7.7)$$

gdzie:

- \underline{Z} - macierz impedancyjna węzłowa sieci.

Równanie (7.7) jest teraz postaci:

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{U}_1 \\ \vdots \\ -\underline{E} \\ \vdots \\ \Delta \underline{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{1,1} & \dots & \underline{Z}_{1,k} & \dots & \underline{Z}_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ \underline{Z}_{k,1} & \dots & \underline{Z}_{k,k} & \dots & \underline{Z}_{k,n} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Z}_{n,1} & \dots & \underline{Z}_{n,k} & \dots & \underline{Z}_{n,n} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \underline{I}_k \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.8)$$

Z równania (7.8) prąd węzłowy w węźle k-tym wynosi :

$$\underline{I}_k = -\frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{k,k}} \quad (7.9)$$

W rzeczywistości prąd zwarciaowy \underline{I}_{zk} przy zwarcia w węźle k-tym odpływa od tego węzła, a więc ma kierunek przeciwny do prądu węzłowego \underline{I}_k , który dopływa do węzła, czyli :

$$\underline{I}_{zk} = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{k,k}} \quad (7.10)$$

Należy zauważyć, że prąd \underline{I}_{zk} to prąd zwarciaowy początkowy. Napięcie w dowolnym i-tym węźle możemy obliczyć ze wzoru:

$$\begin{aligned} \underline{U}_i &= \underline{E} + \Delta \underline{U}_i = \underline{E} + \underline{Z}_{i,k} \underline{I}_k = \underline{E} - \underline{Z}_{i,k} \underline{I}_{Zk} = \underline{E} + \underline{Z}_{i,k} \left(-\frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{k,k}} \right) = \\ &= \underline{E} \left(\frac{\underline{Z}_{k,k} - \underline{Z}_{i,k}}{\underline{Z}_{k,k}} \right) = (\underline{Z}_{k,k} - \underline{Z}_{i,k}) \underline{I}_{Zk} \end{aligned} \quad (7.11)$$

Znając napięcia w węzłach można obliczyć rozptyw prądów, i tak prąd w gałęzi łączącej węzły p oraz q wynosi:

$$\underline{I}_{pq} = \frac{\underline{U}_p - \underline{U}_q}{\underline{Z}_{pq}} = \underline{E} \frac{\underline{Z}_{q,k} - \underline{Z}_{p,k}}{\underline{Z}_{k,k} \underline{Z}_{pq}} = \underline{I}_{Zk} \frac{\underline{Z}_{q,k} - \underline{Z}_{p,k}}{\underline{Z}_{pq}} \quad (7.12)$$

gdzie:

- \underline{Z}_{pq} - impedancja gałęzi łączącej węzły p oraz q.

Z powyższych rozważań wynika, że znając macierz impedancyjną węzłową sieci otrzymaną poprzez odwrócenie macierzy admitancyjnej węzłowej możemy obliczać wielkości zwarciove przy zwarcu w dowolnym węzle sieci.

7.1.2. Obliczanie prądów i napięć przy zwarciach niesymetrycznych

Obliczanie wielkości zwarciowych przy zwarciach niesymetrycznych najlepiej wykonywać przy zastosowaniu metody składowych symetrycznych. Załóżmy dodatkowo, że obliczenia te będziemy wykonywać w oparciu o otrzymane macierze impedancyjne węzłowe sieci dla składowych symetrycznych:

- zgodnej $\underline{Z}_{(1)}$,
- przeciwnej $\underline{Z}_{(2)}$,
- zerowej $\underline{Z}_{(0)}$.

Składowe symetryczne prądu zwarciowego przy zwarcu w węzle k-tym wynoszą:

1. trójfazowym

$$\underline{I}_{(1)k} = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{(1)k,k} + \underline{Z}_P} \underline{I}_{(2)k} = \underline{I}_{(0)k} = 0 \quad (7.13)$$

gdzie:

- \underline{Z}_P - impedancja przejścia w miejscu zwarcia.

2. dwufazowym

$$\underline{I}_{(1)k} = -\underline{I}_{(2)k} = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{(1)k,k} + \underline{Z}_{(2)k,k} + \underline{Z}_P} \underline{I}_{(0)k} = 0 \quad (7.14)$$

3. dwufazowym doziemnym

$$\underline{I}_{(1)k} = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{(1)k,k} + \frac{\underline{Z}_{(2)k,k}(\underline{Z}_{(0)k,k} + 3\underline{Z}_P)}{\underline{Z}_{(2)k,k} + \underline{Z}_{(0)k,k} + 3\underline{Z}_P}} \quad (7.15)$$

$$\underline{I}_{(2)k} = -\underline{I}_{(1)k} \frac{\underline{Z}_{(0)k,k} + 3\underline{Z}_P}{\underline{Z}_{(2)k,k} + \underline{Z}_{(0)k,k} + 3\underline{Z}_P} \quad (7.16)$$

$$\underline{I}_{(0)k} = -\underline{I}_{(1)k} \frac{\underline{Z}_{(2)k,k}}{\underline{Z}_{(2)k,k} + \underline{Z}_{(0)k,k} + 3\underline{Z}_P} \quad (7.17)$$

4. jednofazowym

$$\underline{I}_{(1)k} = \underline{I}_{(2)k} = \underline{I}_{(0)k} = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{(1)k,k} + \underline{Z}_{(2)k,k} + \underline{Z}_{(0)k,k} + 3\underline{Z}_P} \quad (7.18)$$

Prądy fazowe w miejscu zwarcia oblicza się transformując prądy składowych symetrycznych do układu współrzędnych fazowych wg zależności:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{L1k} \\ \underline{I}_{L2k} \\ \underline{I}_{L3k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \underline{I}_{(0)k} \\ \underline{I}_{(1)k} \\ \underline{I}_{(2)k} \end{bmatrix} \quad (7.19)$$

lub zapisując krócej:

$$\underline{I}^f = \underline{S}^{-1} \underline{I}^s \quad (7.20)$$

Napięcia w dowolnym i-tym węźle, w tym i w węźle zwartym, obliczono z wzorów:

$$\underline{U}_{(1)i} = \underline{E} - \underline{Z}_{(1)i,k} \underline{I}_{(1)k} \quad (7.21)$$

$$\underline{U}_{(2)i} = -\underline{Z}_{(2)i,k} \underline{I}_{(2)k} \quad (7.22)$$

$$\underline{U}_{(0)i} = -\underline{Z}_{(0)i,k} \underline{I}_{(0)k} \quad (7.23)$$

Następnie wyznaczono wielkości fazowe:

$$\underline{U}^f = \underline{S}^{-1} \underline{U}^s \quad (7.24)$$

Prądy w dowolnej gałęzi łączącej węzły p oraz q wyznaczono z wzoru:

$$\underline{I}_{(\alpha)pq} = \frac{\underline{U}_{(\alpha)p} - \underline{U}_{(\alpha)q}}{\underline{Z}_{(\alpha)pq}} = \underline{I}_{(\alpha)k} \frac{\underline{Z}_{(\alpha)q,k} - \underline{Z}_{(\alpha)p,k}}{\underline{Z}_{(\alpha)pq}} \quad \text{dla } \alpha = 1,2,0 \quad (7.25)$$

Przed określeniem wielkości fazowych prądu w gałęzi lub napięcia w węźle, w obliczeniach wartości składowych symetrycznych, program uwzględnia transformacje składowych

symetrycznych na skutek stosowania w sieci transformatorów o układach połączeń Yd, Dy, Dz oraz Zy. Dla każdego węzła określa się kąt przesunięcia napięcia w tym węźle, w stanie jałowym względem węzła odniesienia. Powyższej transformacji dokonano według zależności:

$$I'_{(1)pq} = I_{(1)pq} e^{j(\varphi_p - \varphi_q)} \quad (7.26)$$

$$I'_{(2)pq} = I_{(2)pq} e^{-j(\varphi_p - \varphi_q)} \quad (7.27)$$

$$U'_{(1)i} = U_{(1)i} e^{j(\varphi_i - \varphi_k)} \quad (7.28)$$

$$U'_{(1)i} = U_{(1)i} e^{-j(\varphi_i - \varphi_k)} \quad (7.29)$$

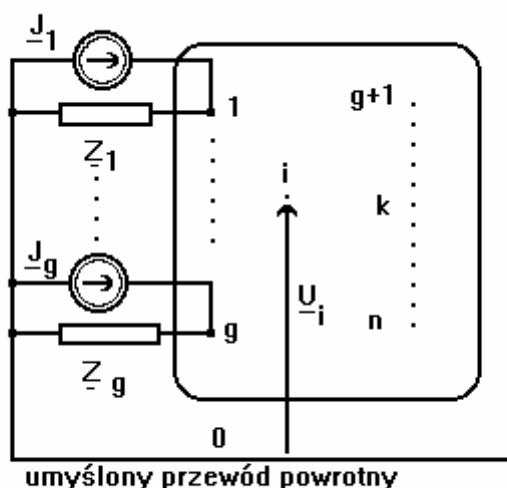
gdzie:

- $\varphi_p, \varphi_q, \varphi_i$, oraz φ_k - kąty przesunięcia napięcia w tym węźle, w stanie jałowym względem węzła odniesienia.

W oparciu o zaprezentowaną teorię można obliczać wielkości zwarciove dla zwarć symetrycznych i niesymetrycznych w sieci ze skutecznie uziemionym punktem neutralnym. Jest to klasyczny algorytm obliczania tych stanów.

7.2. Zastosowanie metody potencjałów węzłowych do obliczania zwarć w sieci ze skutecznie i nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym

Możliwość obliczania wielkości zwarciowych w sieci ze skutecznie i nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym jest dużym udogodnieniem. Model matematyczny dla obliczania zwarć w sieci elektroenergetycznej ze skutecznie i nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym można otrzymać zamieniając modele matematyczne generatora, ze źródła napięciowego (rys. 7.3) na źródło prądowe (rys.7.4).



Rys.7.4. Schemat zastępczy sieci dla obliczeń zwarciowych.

Prąd ten jest prądem węzłowym dołączonym w węźle dołączenia generatora do sieci. Węzłem odniesienia jest w tym przypadku umyślony przewód powrotny. Prąd węzłowy źródła, dołączonego

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

do j-tego węzła dla α -tej składowej $I_{(\alpha)j}^n$ otrzymano zamieniając to źródło z modelu napięciowego na model prądowy co można obliczyć ze wzoru:

$$I_{(\alpha)j}^n = \frac{E_{(\alpha)j}}{Z_{(\alpha)j}} \quad \text{dla} \quad \alpha = 1, 2, 0 \quad (7.30)$$

gdzie:

- $E_{(\alpha)j}$ - siła elektromotoryczna źródła dołączonego do j-tego węzła dla α -tej składowej;
- $Z_{(\alpha)j}$ - impedancja źródła dołączonego do j-tego węzła dla α -tej składowej.

W węzłach do których nie jest dołączone żadne źródło prąd węzłowy źródła wynosi zero. Równania dla każdej składowej możemy zapisać w postaci:

$$\mathbf{U}_{(\alpha)} = \mathbf{Z}_{(\alpha)} \mathbf{I}'_{(\alpha)} \quad \text{dla} \quad \alpha = 1, 2, 0 \quad (7.31)$$

gdzie:

- $\mathbf{U}_{(\alpha)}$ - napięcie węzłowe α -tej składowej, równe napięciu w danym węźle dla danej składowej;
- $\mathbf{I}'_{(\alpha)}$ - prąd węzłowy α -tej składowej;
- $\mathbf{Z}_{(\alpha)}$ - macierz impedancyjna węzłowa sieci dla α -tej składowej.

Przy założeniu, że zakłócenia modeluje się za pomocą prądu węzłowego, prąd $\mathbf{I}'_{(\alpha)}$ ma dwa składniki:

- składnik prądu źródłowego $\mathbf{I}_{(\alpha)}^n$,
- składnik prądu zakłócenia $\mathbf{I}_{(\alpha)}$,

przy czym:

$$\mathbf{I}'_{(\alpha)} = \mathbf{I}_{(\alpha)}^n + \mathbf{I}_{(\alpha)} \quad (7.32)$$

W przypadku symetrii źródeł mamy:

$$\mathbf{I}_{(2)}^n = \mathbf{I}_{(0)}^n = 0 \text{ i } \mathbf{I}_{(1)}^n \neq 0 \quad (7.33)$$

Równanie (6.31) wygodnie jest przekształcić do postaci:

$$\mathbf{U}_{(\alpha)} = \mathbf{Z}_{(\alpha)} (\mathbf{I}_{(\alpha)}^n + \mathbf{I}_{(\alpha)}) = \mathbf{Z}_{(\alpha)} \mathbf{I}_{(\alpha)}^n + \mathbf{Z}_{(\alpha)} \mathbf{I}_{(\alpha)} = \mathbf{U}_{(\alpha)}^n + \mathbf{Z}_{(\alpha)} \mathbf{I}_{(\alpha)} \quad (7.34)$$

Wektor $\mathbf{U}_{(\alpha)}^n$ są to napięcia w poszczególnych węzłach w stanie normalnym. Taki sposób postępowania umożliwi uwzględnianie:

- różnych sił elektromotorycznych (co do modułu i fazy) w poszczególnych źródłach,
- gałęzi przyłączonych między węzłem a węzłem odniesienia np. gałęzi odbiorczych czy gałęzi poprzecznych w schematach zastępczych elementów.

Te możliwości modelu matematycznego sieci elektroenergetycznej pozwalają za pomocą jednego modelu - równania (7.34) - obliczać:

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

- prądy i napięcia podczas zwarć wielkoprądowych, tzn. zwarć symetrycznych i niesymetrycznych w sieci ze skutecznie uziemionym punktem neutralnym,
- prądy i napięcia podczas zwarć małoprądowych, tzn. zwarć jednofazowych w sieci z nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym,
- stany ustalone normalne gdyby odbiory zamodelować stałymi impedancjami a wektor prądu zakłóceniewego przyjąć równy zero,
- stany ustalone normalne gdyby odbiory zamodelować stałymi prądami zapisanymi w wektorze prądu zakłóceniewego,
- stany ustalone normalne niesymetryczne, gdyby odbiory zamodelować stałymi prądami różnymi w każdej fazie, zapisanymi w wektorze prądu zakłóceniewego,
- prądy i napięcia podczas zakłóceń z uwzględnieniem prądów obciążeniowych przy modelowaniu odbiorów za pomocą jednego z podanych sposobów.

W przypadku zwarcia w węźle k-tym wektor prądu zakłóceniewego jest następujący:

$$\mathbf{I}_{(\alpha)k}^T = [0 \dots 0 - I_{(\alpha)k} 0 \dots 0] \quad (7.35)$$

a układ równań odwzorowujący zwarcie będzie postaci:

$$U_{(\alpha)k} = U_{(\alpha)k}^n - Z_{(\alpha)k,k} I_{(\alpha)k} \quad (7.36)$$

gdzie:

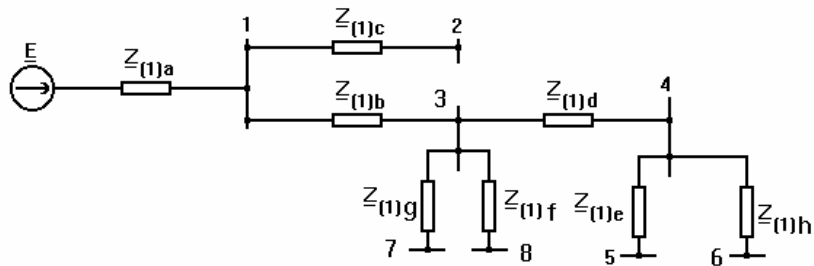
- $Z_{(\alpha)k,k}$ - impedancja własna węzła k-tego dla α -tej składowej.

W powyższym układzie trzech równań mamy sześć niewiadomych, trzy napięcia $U_{(\alpha)k}$ oraz trzy prądy $I_{(\alpha)k}$. Układ ten można rozwiązać dopisując trzy równania zależne od rodzaju zwarcia, tzn. równania brzegowe zwarcia.

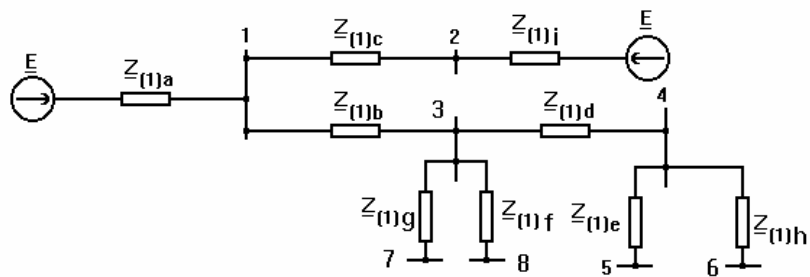
W oparciu o zaprezentowaną teorię opracowano program ZWAK20_6. Za pomocą tego programu możemy obliczać wielkości zwarciovowe dla zwarć symetrycznych i niesymetrycznych w sieci ze skutecznie i nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym. W przypadku wykonywania obliczeń zwarć doziemnych w sieci z nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym należy w schematach zastępczych gałęzi uwzględnić ich elementy poprzeczne (pojemności).

7.3. Pytania kontrolne

1. Omówić sposób zastosowania metody potencjałów węzłowych dla obliczania zwarć w sieci.
2. Omówić metodę obliczania macierzy admitancyjnej węzłowej sieci.
3. Dla sieci jak na rys. 7.5 i rys. 7.6 obliczyć macierz impedancyjną węzłową korzystając jedynie z interpretacji fizycznej pojęcia impedancji własnych i wzajemnych.
4. Omówić wzory umożliwiające obliczanie prądów zwarciovych, jego rozptywu i napięć w węzłach przy różnych rodzajach zwarć w przypadku gdy znamy macierze impedancyjne sieci dla składowych symetrycznych.
5. Dana jest macierz impedancyjna węzłowa sieci dla składowej zgodnej, przeciwnej i zerowej. Dla wybranego zwarcia niesymetrycznego podać algorytm postępowania przy obliczaniu:
 - prądu w miejscu zwarcia przy zwarciu w węźle k-tym,
 - napięcia w węźle i-tym przy zwarciu w węźle k-tym,
 - prądu w gałęzi łączącej węzły i-ty z j-tym przy zwarciu w węźle k-tym.



Rys. 7.5 Przykładowy schemat sieci otwartej.



Rys. 7.6 Przykładowy schemat sieci zamkniętej.