

# KOMPONEN SIMETRIS DAN IMPEDANSI URUTAN

# A. Sintesis Fasor Tak Simetris dari Komponen-Komponen Simetrisnya

Menurut teorema Fortescue, tiga fasor tak seimbang dari sistem tiga-fasa dapat diuraikan

menjadi tiga sistem fasor yang seimbang. Himpunan seimbang komponen itu adalah:

1. Komponen urutan-positif (positive sequence components) yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar  $120^\circ$ , dan mempunyai urutan fasa yang sama seperti fasor aslinya.
2. Komponen urutan-negatif yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar  $120^\circ$ , dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan fasor aslinya.
3. Komponen urutan nol yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan dengan penggeseran fasa nol antara fasor yang satu dengan yang lain.

Jadi, urutan fasa komponen urutan positif dari fasor tak seimbang itu adalah  $abc$ , sedangkan urutan fasa dari komponen urutan negatif adalah  $acb$ . Jika fasor aslinya adalah tegangan, maka tegangan tersebut dapat dinyatakan dengan  $V_a, V_b$ , dan  $V_c$ . Ketiga himpunan komponen simetris dinyatakan dengan subskrip tambahan 1 untuk komponen urutan-positif, 2 untuk, komponen urutan-negatif, dan 0 untuk komponen urutan nol. Komponen urutan positif dari  $V_a$ ,  $V_b$  dan  $V_c$  adalah  $V_{a1}, V_{b1}$ , dan  $V_{c1}$ . Demikian pula, komponen urutan negatif adalah  $V_{a2}, V_{b2}$ , dan  $V_{c2}$ , sedangkan komponen urutan nol adalah  $V_{a0}, V_{b0}$ , dan  $V_{c0}$ .

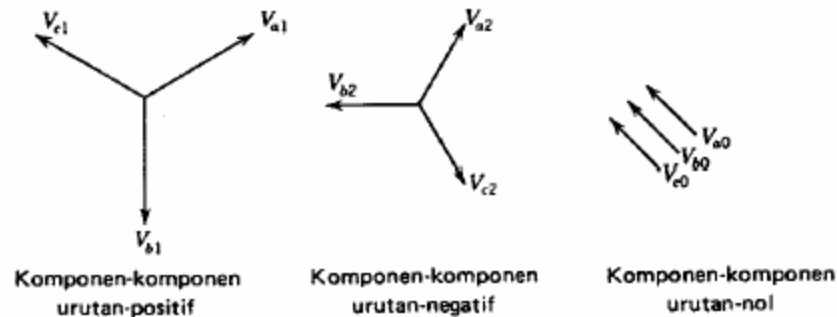
Karena setiap fasor tak seimbang, yang asli adalah jumlah komponen, fasor asli yang dinyatakan dalam suku-suku komponennya adalah

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (11.1)$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad (11.2)$$

- Sintesis himpuna:  $V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0}$  (11.3) an komponen simetris

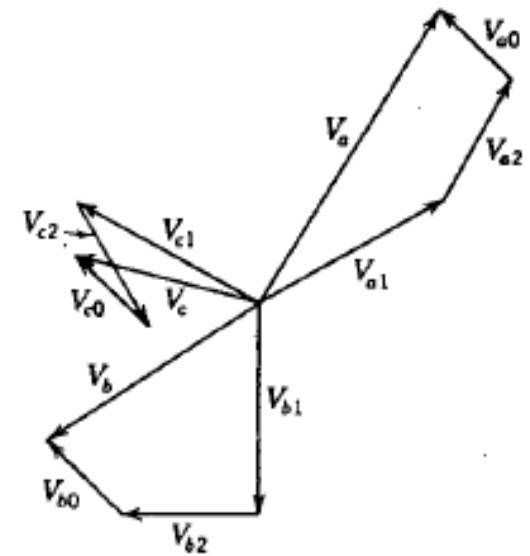
- dalam Gambar 11.1. diperlihatkan pada Gambar 11.2.



Gambar 11.1. Tiga himpunan fasor seimbang yang merupakan komponen simetris dari tiga fasor tak-seimbang.

Gambar 11.2. Penjumlahan secara grafis komponen-komponen pada Gambar 1. untuk mendapatkan tiga fasor tak seimbang.

Beragam-macam keuntungan dari analisis sistem daya dengan metoda komponen simetris akan berangsur-angsur menjadi jelas bila kita menerapkan metoda ini untuk menelaah gangguan tak simetris pada sistem yang lepas dari gangguan tersebut adalah simetris. Cukup untuk kita sebutkan di sini bahwa metoda itu terdiri dari mendapatkan komponen simetris arus pada gangguan. Kemudian nilai arus dan tegangan pada berbagai titik dalam sistem dapat diperoleh. Metoda yang cukup sederhana ini dapat memberikan ramalan yang seksama tentang perilaku sistem itu.



## B. Operator-Operator

Karena adanya pergeseran fasa pada komponen simetris tegangan dan arus dalam sistem tiga-fasa, akan sangat memudahkan bila kita mempunyai metoda penulisan cepat untuk menunjukkan perputaran fasor dengan  $120^\circ$ . Hasil-kali dua buah bilangan kompleks adalah hasil-kali besarannya dan jumlah sudut fasanya. Jika bilangan kompleks yang menyatakan fasor dikalikan dengan bilangan kompleks yang besarnya satu dan sudutnya  $\theta$ , bilangan kompleks yang dihasilkan adalah fasor yang sama besar dengan fasor aslinya tetapi fasanya tergeser dengan sudut  $\theta$ . Bilangan kompleks dengan besar satu dan sudut  $\theta$  merupakan operator yang memutar fasor yang dikenakannya melalui sudut  $\theta$

Kita sudah kenal dengan operator  $j$ , yang menyebabkan perputaran sebesar  $90^\circ$ , dan operator  $-1$ , yang menyebabkan perputaran sebesar  $180^\circ$ . Penggunaan operator  $j$  sebanyak dua kali berturut-turut akan menyebabkan perputaran melalui  $90^\circ + 90^\circ$ , yang membawa kita pada kesimpulan bahwa  $j \times j$  menyebabkan perputaran sebesar  $180^\circ$ , dan karena itu kita ingat kembali bahwa  $j^2$  adalah sama dengan  $-1$ . Pangkat-pangkat yang lain dari operator  $j$  dapat diperoleh dengan analisis yang serupa.

Huruf  $a$  biasanya digunakan untuk menunjukkan operator yang menyebabkan perputaran sebesar  $120^\circ$  dalam arah yang berlawanan dengan arah jarum jam.

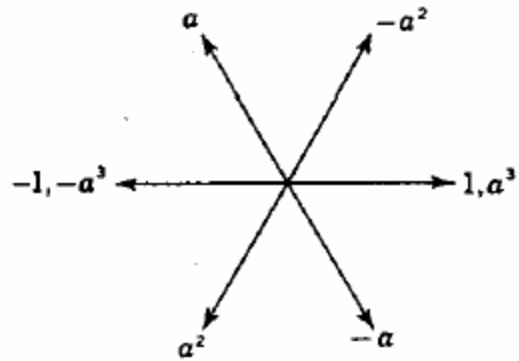
Operator semacam ini adalah bilangan kompleks yang besarnya satu dan sudutnya  $120^\circ$  dan didefinisikan

$$a = 1 \angle 120^\circ = 1e^{j2\pi/3} = -0,5 + j0,866$$

Jika operator  $a$  dikenakan pada fasor dua kali berturut-turut, maka fasor itu akan diputar dengan sudut sebesar  $240^\circ$ . Untuk penerapan tiga kali berturut-turut fasor akan diputar dengan  $360^\circ$ . Jadi,

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ = -0,5 - j0,866$$

$$a^3 = 1 \angle 360^\circ = 1 \angle 0^\circ = 1$$



Gambar 11.3. Diagram fasor berbagai pangkat dari operator  $a$ .



# C. Simetris Fasor Tak Simetris

Telah kita lihat pada Gambar 2. sintesis tiga fasor tak simetris dari tiga himpunan fasor simetris. Sintesis itu telah dilakukan sesuai dengan Persamaan (11.1) sampai dengan (11.3). Sekarang marilah kita periksa persamaan tersebut untuk menentukan bagaimana menguraikan ketiga fasor tak simetris itu menjadi komponen simetrisnya. Mula-mula, kita perhatikan bahwa banyaknya kuantitas yang diketahui dapat dikurangi dengan menyatakan masing-masing komponen  $V_b$  dan  $V_c$  sebagai hasil kali fungsi operator  $a$  dan komponen  $V_a$ . Dengan berpedoman pada Gambar 11.1, hubungan berikut dapat diperiksa kebenarannya:

$$\begin{aligned} V_{b1} &= a^2 V_{a1} & V_{c1} &= a V_{a1} \\ V_{b2} &= a V_{a2} & V_{c2} &= a^2 V_{a2} \\ V_{b0} &= V_{a0} & V_{c0} &= V_{a0} \end{aligned} \quad (11.4)$$

Dengan mengulangi Persamaan (11.1) dan memasukkan Persamaan (11.4) ke dalam

Persamaan (11.2) dan (11.3) dihasilkan  $V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0}$  (11.5)

$$V_b = a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \quad (11.6)$$

$$V_c = a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0} \quad (11.7)$$

Atau dalam bentuk matriks:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (11.8)$$

Untuk memudahkan kita misalkan:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (11.9)$$

Maka, seperti dapat dibuktikan dengan mudah

$$\mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (11.10)$$

dan dengan mengalikan kedua sisi Persamaan (11.8) dengan  $\mathbf{A}^{-1}$  diperoleh:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (11.11)$$

yang menunjukkan pada kita bagaimana menguraikan tiga fasor tak simetris menjadi komponen simetrisnya. Hubungan ini demikian pentingnya sehingga kita dapat menulis masing-masing persamaan itu dalam bentuk yang biasa. Dari Persamaan (11.11), kita peroleh:

$$V_{a0} = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \quad (11.12)$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (11.13)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (11.14)$$

- Persamaan yang terdahulu sebenarnya dapat pula ditulis untuk setiap himpunan
- fasor yang berhubungan, dan kita dapat pula menuliskannya untuk arus sebagai ganti
- tegangan. Persamaan tersebut dapat diselesaikan baik secara analitis maupun secara
- grafis. Karena beberapa persamaan yang terdahulu sangat mendasar, marilah kita
- tuliskan ringkasannya untuk arus-~~arus~~ arus:  $I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}$  (11.15)

$$I_b = a^2I_{a1} + aI_{a2} + I_{a0} \quad (11.16)$$

$$I_c = aI_{a1} + a^2I_{a2} + I_{a0} \quad (11.17)$$

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (11.18)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) \quad (11.19)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) \quad (11.20)$$

Contoh 1 :

Salah satu pengantar saluran tiga-fasa terbuka. Arus yang mengalir ke beban yang dihubungkan-□ melalui saluran  $a$  adalah 10A. Dengan arus dalam saluran  $a$  sebagai pedoman dan dengan memisalkan bahwa saluran  $c$  terbuka, hitunglah komponen simetris arus salurannya.

Jawab:

Gambar 11. 4 adalah diagram rangkaian itu. Arus saluran adalah :

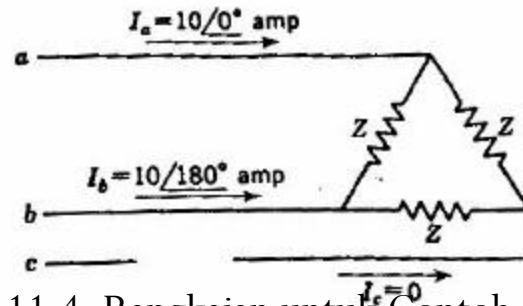
$$I_a = 10\angle 0^\circ \text{ A} \quad I_b = 10\angle 180^\circ \text{ A} \quad I_c = 0 \text{ A}$$

Dari Persamaan (11.18) sampai dengan (11.20)

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(10\angle 0^\circ + 10\angle 180^\circ + 0) = 0$$

$$\begin{aligned} I_{a1} &= \frac{1}{3}(10\angle 0^\circ + 10\angle 180^\circ + 120^\circ + 0) \\ &= 5 - j2,89 = 5,78 \angle -30^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{a2} &= \frac{1}{3}(10\angle 0^\circ + 10\angle 180^\circ + 240^\circ + 0) \\ &= 5 + j2,89 = 5,78\angle 30^\circ \text{ A} \end{aligned}$$



Gambar 11.4. Rangkaian untuk Contoh 1.

$$\begin{array}{ll}
 I_{b1} = 5,78 \underline{-150^\circ} \text{ A} & I_{c1} = 5,78 \underline{90^\circ} \text{ A} \\
 I_{b2} = 5,78 \underline{150^\circ} \text{ A} & I_{c2} = 5,78 \underline{-90^\circ} \text{ A} \\
 I_{b0} = 0 & I_{c0} = 0
 \end{array}$$

Kita lihat bahwa komponen  $I_{c1}$  dan  $I_{c2}$  mempunyai nilai tertentu meskipun saluran  $c$  terbuka dan tidak dapat mengalirkan arus bersih (net current). Oleh karena itu, seperti yang diharapkan, jumlah komponen pada saluran  $c$  adalah nol. Sudah tentu, jumlah komponen pada saluran  $a$  adalah  $10 \angle 0^\circ \text{ A}$ , dan jumlah komponen pada saluran  $b$  adalah  $10 \angle 180^\circ \text{ A}$ .

#### D. Daya dengan Komponen Simetris sebagai Sukunya

Jika komponen simetris arus dan tegangan diketahui, maka daya yang terpakai pada rangkaian tiga-fasa dapat langsung dihitung dari komponen tersebut. Peragaan pernyataan ini merupakan contoh yang baik dari manipulasi matriks komponen simetris.

Daya kompleks total yang mengalir ke dalam rangkaian tiga-fasa melalui tiga saluran  $a$ ,  $b$ , dan  $c$  adalah:

$$S = P + jQ = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* \quad (11.27)$$

di mana  $V_a, V_b$ , dan  $V_c$  adalah tegangan ke netral pada terminal dan  $I_a, I_b$ , serta  $I_c$  adalah arus yang mengalir ke dalam rangkaian pada ketiga saluran tersebut. Di sini, sambungan netral boleh ada

$$\mathbf{S} = [V_a \quad V_b \quad V_c] \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^* = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^* \quad (11.28)$$

di mana pasangan (conjugate) matriks diartikan terdiri dari beberapa unsur yang merupakan pasangan unsur yang bersesuaian pada matriks aslinya.

- Jadi, daya kompleks adalah

$$V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* = 3V_0 I_0^* + 3V_1 I_1^* + 3V_2 I_2^* \quad (11.35)$$

- yang menunjukkan bagaimana daya kompleks dapat dihitung dari komponen
- simetris tegangan dan arus rangkaian tiga-fasa seimbang.

# E. IMPEDANSI SERI TAK SIMETRIS

Kita tidak dapat mengabaikan pentingnya sistem yang dalam keadaan normal adalah seimbang dan menjadi tak seimbang hanya karena timbulnya gangguan tak simetris. Akan tetapi, marilah kita lihat persamaan rangkaian tiga-fasa bila impedansi serinya tidak sama. Kita akan sampai pada suatu kesimpulan periling dalam analisis dengan komponen simetris. Gambar 11.12 menunjukkan bagian yang tak simetris dari suatu sistem dengan tiga impedansi seri yang tidak sama, yaitu  $Z_a$ ,  $Z_b$ , dan  $Z_c$ . Jika kita misalkan bahwa tidak ada induktansi bersama (tidak ada gandengan) antara ketiga impedansi tersebut, jatuh-tegangan pada bagian sistem yang diperlihatkan itu diberikan oleh persamaan matriks :

$$\begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{bb'} \\ V_{cc'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (11.36)$$



dan dengan suku-suku komponen simetris tegangan dan arus

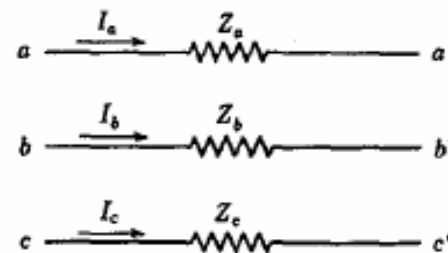
$$\mathbf{A} \begin{bmatrix} V_{aa'0} \\ V_{aa'1} \\ V_{aa'2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} \mathbf{A} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (11.37)$$

di mana  $\mathbf{A}$  adalah matriks yang didefinisikan dengan Persamaan (11.9). Dengan mem-prakalikan kedua sisi persamaan itu dengan  $\mathbf{A}^{-1}$  dihasilkan persamaan matriks dari mana kita peroleh

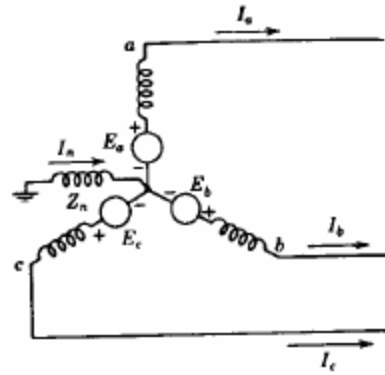
$$\begin{aligned} V_{aa'1} &= \frac{1}{3}I_{a1}(Z_a + Z_b + Z_c) + \frac{1}{3}I_{a2}(Z_a + a^2Z_b + aZ_c) \\ &\quad + \frac{1}{3}I_{a0}(Z_a + aZ_b + a^2Z_c) \\ V_{aa'2} &= \frac{1}{3}I_{a1}(Z_a + aZ_b + a^2Z_c) + \frac{1}{3}I_{a2}(Z_a + Z_b + Z_c) \\ &\quad + \frac{1}{3}I_{a0}(Z_a + a^2Z_b + aZ_c) \\ V_{aa'0} &= \frac{1}{3}I_{a1}(Z_a + a^2Z_b + aZ_c) + \frac{1}{3}I_{a2}(Z_a + aZ_b + a^2Z_c) \\ &\quad + \frac{1}{3}I_{a0}(Z_a + Z_b + Z_c) \end{aligned} \quad (11.38)$$

Jika impedansi-impedansi dibuat sama (yaitu bila  $Z_a = Z_b = Z_c$ ), Persamaan (11.38) menjadi

$$V_{aa'1} = I_{a1}Z_a \quad V_{aa'2} = I_{a2}Z_a \quad V_{aa'0} = I_{a0}Z_a \quad (11.39)$$



Gambar 11.12 Bagian sistem tiga-fasa yang menunjukkan tiga impedansi seri yang tidak sama.



Gambar 11.13. Diagram rangkaian suatu generator tanpa-beban yang ditanahkan melalui suatu reaktansi. Emf masing-masing fasa ini adalah  $E_a$ ,  $E_b$ , dan  $E_c$

Jadi kita dapat menyimpulkan bahwa komponen simetris dari arus tak seimbang yang mengalir pada beban Y-seimbang atau pada impedansi seri seimbang akan menghasilkan tegangan jatuh dengan urutan yang sama, asalkan tidak terdapat gandengan di antara fasa-fasa itu. Tetapi jika impedansinya tidak sama, Persamaan

(11.38) menunjukkan bahwa jatuh tegangan pada salah satu urutan akan tergantung pada arus pada ketiga urutannya. Jika ada gandengan di antara ketiga impedansi tadi dalam Gambar 11.13, misalnya induktansi-bersama, matriks bujursangkar pada Persamaan (11.36), dan (11.37) akan mengandung unsur di luar-diagonal dan Persamaan (11.38) akan mempunyai suku-suku tambahan.

## F. IMPEDANSI URUTAN DAN JARINGAN URUTAN

Dalam setiap bagian rangkaian, jatuh tegangan yang disebabkan oleh arus dengan urutan tertentu tergantung pada impedansi bagian rangkaian itu terhadap arus dengan urutan tersebut. Impedansi setiap bagian suatu jaringan yang seimbang terhadap arus salah satu urutan dapat berbeda dengan impedansi terhadap arus dari urutan yang lain. Impedansi suatu rangkaian yang hanya mengalir arus urutan positif disebut *impedansi terhadap arus urutan-positif*. Demikian pula, bila hanya ada arus urutan-negatif, impedansinya dinamakan *impedansi terhadap arus urutan-negatif*. Jika hanya ada arus urutan nol, impedansinya dinamakan *impedansi terhadap arus urutan-nol*. Sebutan impedansi rangkaian terhadap arus dari urutan yang berbeda, ini biasanya disingkat menjadi istilah yang sebenarnya

kurang jelas artinya, yaitu *impedansi urutan-positif*, *impedansi urutan-negatif* dan *impedansi urutan-nol*.

Analisis gangguan tak simetris pada sistem yang simetris terdiri dari penentuan komponen simetris dari arus tak seimbang yang mengalir. Karena arus komponen dari salah satu urutan fasa menimbulkan tegangan-jatuh dengan urutan yang sama dan tidak tergantung pada arus dari urutan yang lain, dalam suatu sistem yang seimbang arus dari salah satu urutan dapat dianggap mengalir dalam jaringan bebas yang terdiri hanya dari impedansi terhadap arus dari urutan itu saja.

Rangkaian ekuivalen fasa-tunggal yang hanya terdiri dari impedansi terhadap arus salah satu urutan saja dinamakan *jaringan urutan* untuk urutan tertentu jaringan. Jaringan urutan ini meliputi setiap emf yang dibangkitkan pada urutan yang sama. Jaringan urutan yang mengalirkan arus  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$  dan  $I_{a0}$  diantarhubungkan untuk melukiskan berbagai keadaan gangguan tak seimbang. Oleh karena itu, untuk menghitung pengaruh gangguan dengan metode komponen simetris, adalah penting sekali untuk menentukan impedansi urutannya dan meng-gabungkannya untuk membentuk jaringan urutan masing-masing.

## G. JARINGAN URUTAN GENERATOR TAK BERBEBAN

Suatu generator tak berbeban, yang ditanahkan melalui reaktor, dapat Anda lihat dalam Gambar 11.13. Bila gangguan (yang tidak diperlihatkan dalam gambar) terjadi pada terminal generator itu, maka  $I_a$ ,  $I_b$  dan  $I_c$  akan mengalir dalam salurannya. Jika gangguan tersebut melibatkan tanah, arus yang mengalir ke netral generator dinyatakan sebagai  $I_n$ . Salah satu atau dua dari arus saluran dapat sama dengan nol, tetapi arus itu dapat diuraikan ke dalam komponen simetrisnya tanpa memandang bagaimana ketidakseimbangannya.

Menggambar jaringan urutan itu adalah sangat mudah. Tegangan yang dibangkitkan hanyalah dari urutan-positif saja, karena generator tadi dirancang untuk mencatu tegangan tiga-fasa seimbang. Oleh karena itu, jaringan urutan-positif terdiri dari suatu emf dalam hubungan seri dengan impedansi urutan-positif generator itu. Jaringan urutan-negatif dan urutan-nol tidak mengandung emf tetapi mencakup impedansi generator terhadap arus urutan-negatif dan -nol. Komponen urutan arus ditunjukkan pada Gambar 11.14. Arus itu mengalir melalui impedansi urutannya sendiri, seperti ditunjukkan oleh subskrip yang bersesuaian pada impedansi yang diperlihatkan dalam gambar itu. Jaringan urutan yang terlihat pada

Gambar 11.14 adalah rangkaian ekuivalen fasa-tunggal dari rangkaian tiga-fasa yang seimbang yang dianggap dilalui oleh komponen simetris arus tiga-fasa yang seimbang yang dianggap dilalui oleh komponen simetris arus tak seimbangnya. Emf yang dibangkitkan pada jaringan urutan-positif adalah tegangan terminal ke netral pada keadaan tak berbeban, yang juga sama dengan tegangan internal peralihan dan sub-peralihan karena generatornya tidak dibebani. Reaktansi pada jaringan urutan-positif adalah reaktansi sub-peralihan, peralihan, atau serempak, tergantung pada apakah keadaan yang sedang dibahas itu dalam keadaan subperalihan, peralihan, atau keadaan-tetap.

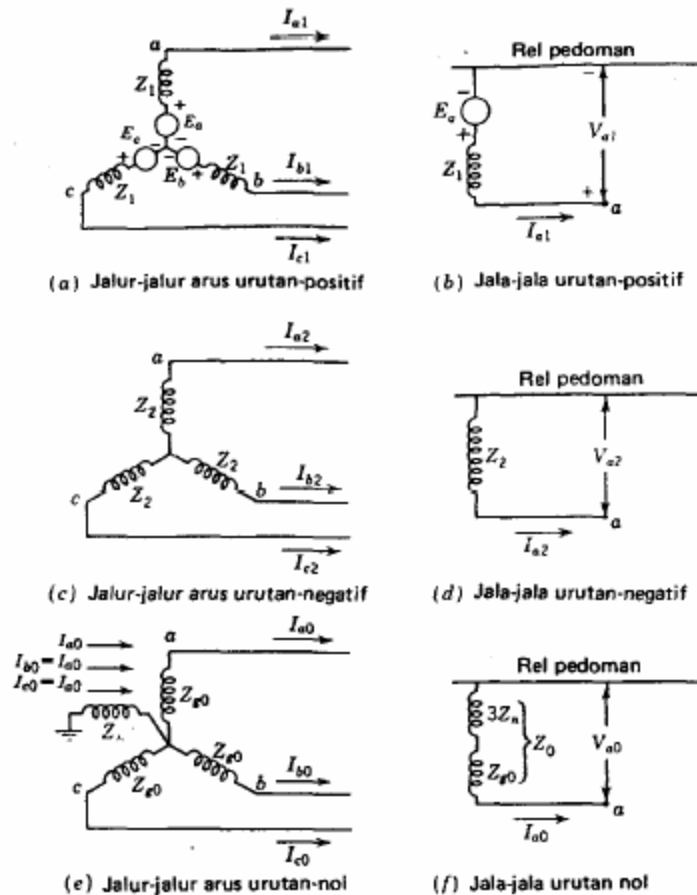
Rel pedoman untuk jaringan urutan-positif dan -negatif adalah netral generator tersebut. Bagi komponen urutan-positif dan -negatif itu sendiri netral generator berada pada potensial tanah jika di antara netral tanah terdapat sambungan yang mempunyai impedansi tertentu atau nol, karena sambungan tersebut tidak akan mengalirkan arus urutan-positif atau -negatif.

Arus yang mengalir pada impedansi  $Z_n$  di antara netral dan tanah adalah  $3I_{a0}$ . Dengan berpedoman pada Gambar 11.14e, kita lihat bahwa *jatuh* tegangan urutan nol dari titik  $a$  ke tanah adalah  $-3 I_{a0} Z_n - I_{a0} Z_{g0}$  di mana  $Z_{g0}$  adalah impedansi urutan nol per fasa pada generator itu. Jaringan urutan-nolnya, yang merupakan rangkaian fasa-tunggal yang dianggap hanya mengalirkan arus urutan-nol salah satu fasanya, dengan demikian harus mempunyai impedansi sebesar  $3Z_n + Z_{g0}$  seperti terlihat dalam Gambar 11.14 f. Impedansi urutan-nol total di mana mengalir arus  $I_{a0}$  adalah

$$Z_0 = 3Z_n + Z_{g0} \quad (11.40)$$

Biasanya, komponen arus dan tegangan untuk fasa  $a$  diperoleh dari persamaan yang ditentukan oleh jaringan urutannya. Persamaan untuk komponen *jatuh* tegangan dari titik  $a$  fasa  $a$  ke rel pedoman (atau tanah) adalah, sebagaimana dapat diturunkan dari Gambar 11.14,

Biasanya, komponen arus dan tegangan untuk fasa  $a$  diperoleh dari persamaan yang ditentukan oleh jaringan urutannya. Persamaan untuk komponen jatuh tegangan dari titik  $a$  fasa  $a$  ke rel pedoman (atau tanah) adalah, sebagaimana dapat diturunkan dari Gambar 11.14,



Gambar 11.14. Jalur yang digambarkan untuk arus pada setiap urutan dalam generator dan jaringan



di mana  $E_a$  adalah tegangan tanpa-beban urutan-positif ke netral,  $Z_1$  dan  $Z_2$  impedansi urutan-positif dan -negatif generator, dan  $Z_0$  didefinisikan oleh Persamaan (11.40). Persamaan di atas yang berlaku untuk setiap generator yang mengalirkan arus seimbang merupakan titik tolak untuk menurunkan persamaan tadi untuk komponen arus dari bermacam-macam jenis gangguan. Persamaan itu berlaku untuk generator yang dibebani dalam keadaan-tetap. Bila kita menghitung keadaan peralihan atau sub-peralihan, maka persamaan itu berlaku untuk generator yang dibebani hanya jika  $E'g$  atau  $E''g$  digantikan dengan  $E_a$ .

## H. IMPEDANSI URUTAN PADA UNSUR RANGKAIAN

Impedansi urutan-positif dan -negatif dari rangkaian yang linier, simetris, dan statis adalah identik karena impedansi rangkaian semacam itu tidak tergantung pada urutan fasanya asal tegangan yang dikenakan seimbang. Impedansi saluran transmisi terhadap arus urutan-nol berbeda dengan impedansinya terhadap arus urutan-positif dan urutan-negatifnya.

Impedansi mesin berputar terhadap arus dari ketiga urutan tersebut, pada umumnya berbeda untuk masing-masing urutan. 'mmf yang ditimbulkan oleh arus jangkar urutan-negatif berputar dengan arah yang berlawanan dengan arah putaran rotor di mana terdapat gulungan medan dc-nya. Tidak seperti fluks yang dibangkitkan oleh arus urutan-positif yang berada dalam keadaan berhenti (stationary) terhadap rotor, fluks yang dibangkitkan oleh arus urutan-negatif bergerak dengan cepat menyapu permukaan rotor.

Arus yang diimbaskan pada gulungan medan dan peredam oleh fluks jangkar yang berputar mencegah fluks menembus rotornya. Keadaan ini sama dengan fluks yang berubah dengan cepat segera setelah terjadinya hubungan-singkat pada terminal mesin. Jalur fluks sama dengan yang kita jumpai dalam perhitungan untuk reaktansi sub-peralihan. Jadi, dalam suatu mesin dengan rotor berbentuk silinder, reaktansi sub-peralihan dan reaktansi urutan negatif adalah sama. Nilai-nilai yang diberikan dalam Tabel A.4 membenarkan pernyataan ini.

Jika arus yang mengalir pada gulungan jangkar mesin tiga-fasa hanyalah arus urutan-nol, maka arus dan mmf pada salah satu fasanya mencapai maksimum pada waktu yang sama seperti arus dan mmf pada setiap fasa yang lain. Gulungan tersebut tersebar di sekeliling jangkar sedemikian rupa sehingga titik mmf maksimum yang dibangkitkan oleh salah satu fasa dipisahkan 120 derajat listrik dalam ruang dari titik mmf maksimum setiap fasa yang lain.

Jika mmf yang ditimbulkan oleh arus masing-masing fasa mempunyai distribusi dalam ruang yang berbentuk sinusoida sempurna, grafik mmf di sekeliling jangkar akan memberikan tiga buah lengkungan berbentuk sinusoida yang jumlahnya di setiap titik akan sama dengan nol. Tidak akan ada fluks yang ditimbulkan pada celah udara, dan satu-satunya reaktansi dari setiap gulungan fasa adalah yang disebabkan oleh kebocoran dan lilitan ujung. Dalam mesin yang sesungguhnya, distribusi gulungan tidak menghasilkan mmf yang berbentuk sinusoida murni. Fluks yang dihasilkan dari jumlah mmf. Ini memang sangat kecil, tetapi cukup membuat reaktansi urutan-nol agak lebih tinggi daripada dalam keadaan idealnya di mana tidak ada fluks celah-udara yang disebabkan oleh arus urutan nol.

Dalam menurunkan persamaan induktansi dan kapasitansi saluran transmisi yang ditransposisikan, kita telah memisalkan arus tiga-fasa yang seimbang tetapi kita tidak menetapkan urutan fasanya. Oleh karena itu, persamaan yang dihasilkan berlaku baik untuk impedansi urutan-positif maupun impedansi urutan-negatif. Bila hanya arus urutan-nol yang mengalir dalam saluran transmisi, arus pada setiap fasa adalah identik. Arus itu kembali melalui tanah, melalui kawat tanah di atas tiang, atau melalui kedua-duanya.

Karena arus urutan-nol pada setiap penghantar fasa identik (bukan hanya sama besarnya dan tergeser dalam fasa sejauh  $120^\circ$  dan arus fasa yang lain), medan magnet yang ditimbulkan oleh arus urutan-nol akan berbeda sekali dengan medan magnet yang ditimbulkan arus urutan-positif atau urutan-negatif. Beda dalam medan magnet ini mengakibatkan bahwa reaktansi induktif urutan-nol saluran transmisi di atas tiang menjadi 2 sampai 3 kali lebih besar dari reaktansi urutan-positif.

Perbandingan ini mengarah ke bagian yang lebih tinggi dari daerah yang telah ditetapkan untuk saluran rangkaian-ganda dan saluran tanpa kawat tanah.

Sebuah transformator dalam rangkaian tiga-fasa dapat terdiri dari tiga unit transformator fasa-tunggal, atau dapat juga berupa transformator tiga-fasa langsung. Meskipun impedansi seri urutan-nol dari unit tiga-fasa itu dapat sedikit berbeda dari nilai urutan-positif dan negatifnya, sudah menjadi kebiasaan untuk menganggap bahwa impedansi seri untuk semua urutan adalah sama, tanpa memandang jenis transformator tersebut. Tabel A.5 memberikan reaktansi transformator. Untuk transformator 1000 kVA atau yang lebih besar, reaktansi dan impedansinya hampir sama. Untuk menyederhanakan perhitungan, kita akan mengabaikan saja admitansi *shunt*, yang memperhitungkan adanya arus penguatan (exciting current).

Impedansi urutan-nol dari beban seimbang yang terhubung-Y dan  $\Delta$  akan sama dengan impedansi urutan-positif dan urutan-negatifnya. Jaringan urutan-nol untuk beban semacam ini akan kita bahas dalam Bagian 11.11.

# JARINGAN URUTAN-POSITIF DAN NEGATIF

Dalam Bab 6 telah kita bahas penyusunan beberapa jaringan urutan-positif yang

agak kompleks. Peralihan dari jaringan urutan-positif ke jaringan urutan-negatif

sangat sederhana. Generator dan motor serempak tiga-fasa hanya mempunyai

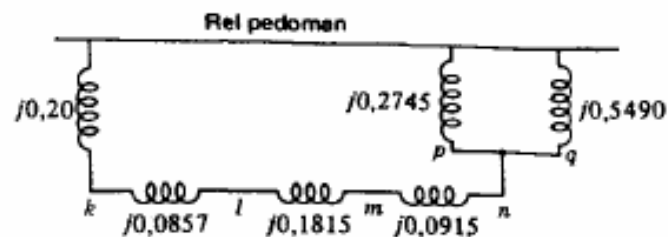
tegangan internal urutan-positif, karena mesin tersebut dirancang untuk membangkitkan tegangan yang seimbang. Karena impedansi urutan-positif dan negatif sama dalam sistem simetris statis, tentu saja pengubahan jaringan

urutan-positif menjadi jaringan urutan-negatif dapat dicapai hanya dengan mengubah, bila perlu, impedansi yang mewakili mesin berputar itu saja dan dengan mengabaikan emf-nya. Pengabaian emf ini didasarkan pada anggapan

oto.sukisno@uny.ac.id bahwa tegangan yang dibangkitkan adalah seimbang dan bahwa tidak ada

tegangan urutan negatif yang diimbangi dari sumber luar

Karena semua titik netral dari sistem tiga-fasa simetris berada pada potensial yang sama bila di dalamnya mengalir arus tiga-fasa seimbang, maka semua titik netral harus terletak pada potensial yang sama baik untuk arus urutan-positif maupun untuk arus urutan-negatif. Oleh karena itu, titik netral sistem tiga-fasa simetris adalah potensial pedoman yang logis untuk menetapkan jatuh-tegangan urutan-positif dan -negatif, dan merupakan rel pedoman bagi jaringan urutan-positif dan -negatif. Impedansi yang terhubung di antara titik netral mesin dan tanah bukan merupakan bagian jaringan urutan-positif atau pun jaringan urutan-negatif, karena baik arus urutan-positif maupun urutan-negatif tidak dapat mengalir dalam impedansi yang dihubungkan seperti itu.



Gambar 11.15. Jaringan urutan-negatif untuk Contoh 11.3.



Contoh 11.3 Gambarlah jaringan urutan-negatif untuk sistem yang telah dilukiskan dalam Contoh 6.10. Misalkan bahwa reaktansi urutan-negatif dari masing-masing mesin sama dengan reaktansi sub-peralihannya. Abaikanlah resistansi.

Jawaban : Karena semua reaktansi urutan-negatif sistem tersebut sama dengan reaktansi urutan-positifnya, jaringan urutan-negatifnya identik dengan jaringan urutan-positif dari Gambar 6.30 kecuali bahwa emf-emf telah dihilangkan dari

jaringan urutan-negatif tersebut. Jaringan yang diminta

# J. JARINGAN URUTAN-NOL

Bagi arus urutan-nol, sistem tiga-fasa bekerja seperti fasa-tunggal, karena arus urutan-nol selalu sama dalam besar dan fasanya di setiap titik pada semua fasa sistem tersebut. Oleh karena itu, arus urutan-nol hanya akan mengalir jika terdapat jalur kembali yang membentuk rangkaian lengkap. Pedoman untuk tegangan urutan-nol ialah potensial tanah pada titik dalam sistem itu dimana setiap tegangan tertentu ditetapkan.

Karena arus urutan-nol dapat mengalir dalam tanah, tanah tidak selalu harus berpotensi sama pada semua titik dan rel pedoman pada jaringan urutan-nol tidak merupakan suatu tanah dengan potensial yang seragam.

Impedansi tanah dan kawat tanah harus dimasukkan ke dalam impedansi urutan-nol dari saluran transmisi, dan rangkaian kembali jaringan urutan-nol ialah penghantar dengan impedansi nol, yang merupakan rel pedoman untuk sistem itu. Karena impedansi tanah dimasukkan ke dalam impedansi urutan-nol, maka tegangan yang diukur terhadap rel pedoman jaringan urutan-nol itu akan memberikan tegangan ke tanah yang benar.

KEADAAN 1: *Bangku Y-Y, dengan Satu Ditanahkan.* Jika ada satu dari netral bangku Y-Y tidak ditanahkan, maka arus urutan-nol tidak dapat mengalir pada kedua gulungan. Tidak adanya jalur melalui salah satu gulungan mencegah mengalirnya arus pada gulungan yang lainnya. Jadi, terdapat rangkaian terbuka untuk arus urutan-nol di antara kedua bagian dari sistem yang dihubungkan oleh transformator itu.

KEADAAN 2: *Bangku Y-Y, dengan Kedua Netralnya Ditanahkan.* Bila kedua netral bangku Y-Y ditanahkan akan terdapat jalur lewat transformator untuk arus urutan-nol kedua gulungannya. Asalkan arus urutan-nol itu dapat mengikuti rangkaian lengkap di luar transformator pada kedua sisinya, arus itu dapat mengalir pada kedua gulungan transformator tersebut. Dalam jaringan urutan-nol, titik-titik pada kedua sisi transformator dihubungkan oleh impedansi urutan-nol transformator dengan cara yang sama seperti pada jaringan urutan-positif dan -negatifnya.

KEADAAN 3: *Beban Y- $\Delta$ , Y ditanahkan.* Jika netral bangku Y- $\Delta$  ditanahkan, arus urutan-nolnya akan mempunyai jalur ke tanah melalui Y karena arus imbasnya yang bersesuaian dapat beredar di dalam  $\Delta$ . Arus urutan-nol yang beredar di dalam  $\Delta$  untuk mengimbangi arus urutan-nol di dalam Y tidak dapat mengalir pada saluran yang terhubung ke- $\Delta$ . Rangkaian ekivalennya harus menyediakan jalur dari saluran pada sisi Y melalui resistansi dan reaktansi bocor ekivalen transformator ke rel pedoman. Suatu rangkaian terbuka harus terdapat di antara saluran dan rel pedoman pada sisi  $\Delta$ . Jika hubungan antara netral dan tanah mengandung impedansi  $Z_n$ , maka rangkaian

LAMBANG	DIAGRAM-DIAGRAM HUBUNGAN	RANGKAIAN EKIVALEN URUTAN-NOL
		<p>Rel pedoman</p>
		<p>Rel pedoman</p>
		<p>Rel pedoman</p>
		<p>Rel pedoman</p>

Gambar 11.18. Rangkaian ekivalen urutan-nol banku transformator (transformer banks) tiga-fasa, bersama dengan diagram hubungan dan lambangnya untuk diagram segaris.

ekivalen urutan-nolnya harus mempunyai impedansi sebesar  $3 Z_n$  yang sering dengan resistansi dan reaktansi bocor ekivalen transformator untuk menghubungkan saluran pada sisi Y ke tanah.

KEADAAN 4: *Bangku Y-  $\Delta$* , Y tidak ditanahkan. Bila Y tidak ditanahkan sama halnya dengan keadaan di mana impedansi  $Z_n$  di antara netral dan tanah adalah tak terhingga. Impedansi  $3 Z_n$  pada rangkaian ekivalen dalam keadaan-3 untuk impedansi urutan-nol menjadi tak terhingga. Arus urutan-nol tidak dapat mengalir pada gulungan transformator itu.

KEADAAN 5: *Bangku  $\Delta - \Delta$* . Karena rangkaian A tidak menyediakan jalur kembali untuk arus urutan-nol, arus urutan-nol tidak dapat mengalir ke dalam bangku  $\Delta - \Delta$ , meskipun arus tersebut dapat beredar di dalam gulungan  $\Delta$ -nya.

Rangkaian ekivalen urutan-nol yang secara terpisah telah ditentukan untuk berbagai bagian sistem, dengan mudah dapat digabungkan untuk membentuk jaringan urutan-nol yang lengkap. Gambar 11.19 dan 11.20 menunjukkan diagram segaris untuk dua sistem daya yang kecil dan jaringan urutan-nolnya yang sesuai telah disederhanakan. dengan mengabaikan resistansi dan administrasi shuntnya.

Contoh 11.4. Gambarlah jaringan urutan-nol untuk sistem yang telah diuraikan dalam Contoh 6.10. Misalkan bahwa reaktansi urutan-nol untuk generator dan motor itu adalah 0.05 per satuan. Reaktansi pembatas arus sebesar 0,4  $\square$  masingmasing terpasang pada netral generator dan motor yang lebih besar. Reaktansi urutan-nol saluran transmisinya adalah 1,5 ohm/km.

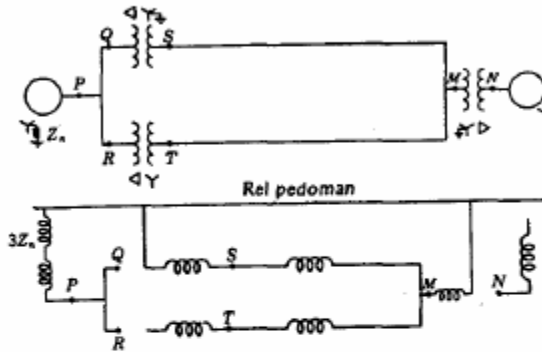
JAWABAN: Reaktansi bocor urutan-nol untuk transformator sama dengan reaktansi urutan-positifnya. Jadi, untuk transformator itu,  $X_0 = 0.0857$  per satuan dan 0,0915 per satuan, seperti dalam Gambar 6.10.

Reaktansi urutan-nol untuk generator dan motor adalah

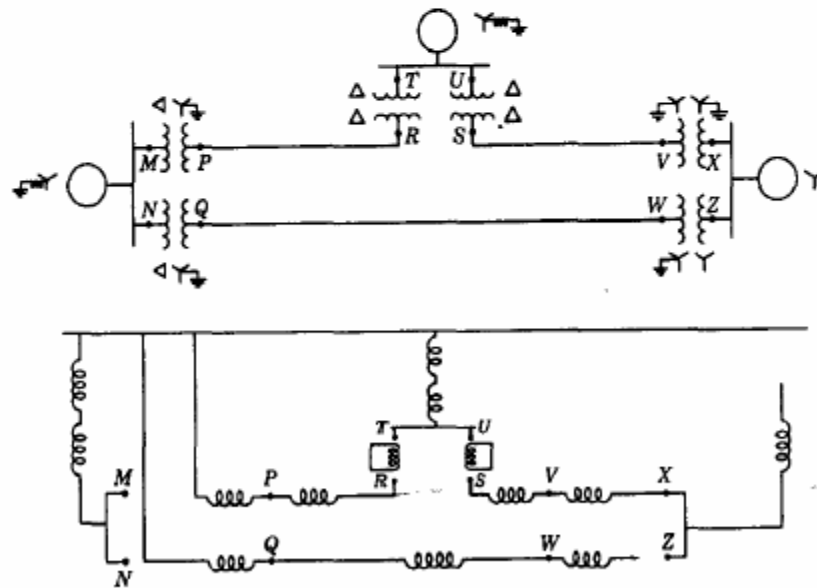
Generator:  $X_0 = 0,05$  per satuan

Motor 1:  $X_0 = 0,05 \frac{300}{200} \left( \frac{13,2}{13,8} \right)^2 = 0,0686$  per satuan

Motor 2:  $X_0 = 0,05 \frac{300}{100} \left( \frac{13,2}{13,8} \right)^2 = 0,1372$  per satuan



Gambar 11.19. Diagram segaris sistem daya kecil dan jaringan urutan-nol yang sesuai.



Gambar 11.20. Diagram segaris sistem daya kecil dan jaringan urutan-nol yang sesuai.



Dalam rangkaian generator

$$Z \text{ dasar} = \frac{(20)^2}{300} = 1,333 \Omega$$

dan dalam rangkaian motor

$$Z \text{ dasar} = \frac{(13,8)^2}{300} = 0,635 \Omega$$

Dalam jaringan impedansi untuk generator

$$3Z_n = 3 \frac{0,4}{1,333} = 0,900 \text{ per satuan}$$

dan untuk motor

$$3Z_n = 3 \frac{0,4}{0,635} = 1,890 \text{ per satuan}$$

Untuk saluran transmisi

$$X_o = \frac{1,5 \times 64}{176,3} = 0,5445 \text{ per satuan}$$

Jaringan urutan-nolnya terlihat pada Gambar 11.21.

# K. RINGKASAN

Tegangan dan arus tak seimbang dapat diuraikan ke dalam komponen simetrisnya. Soal-soal akan diselesaikan dengan menangani masing-masing himpunan komponen secara terpisah dan kemudian menggabungkan hasilnya. Dalam jaringan seimbang yang tidak mempunyai gandengan (coupling) antara beberapa fasa, arus salah satu urutan fasa rnengimbas jatuh-tegangan dengan urutan yang sama saja. Impedansi elemen rangkaian terhadap arus yang berbeda urutannya tidak perlu selalu sama.

Suatu pengetahuan tentang jaringan urutan-positif diperlukan untuk studi beban pada sistem daya, untuk perhitungan gangguan, dan untuk studi kestabilan. Jika perhitungan gangguan atau studi kestabilan itu menyangkut gangguan tidak simetris pada sistem yang selebihnya adalah simetris, diperlukan juga jaringan urutan-negatif dan urutan-nol. Diperlukan perhatian khusus untuk mensintesis jaringan urutan-nol, karena jaringan urutan-nol ini mungkin sangat berbeda dari yang lain.