

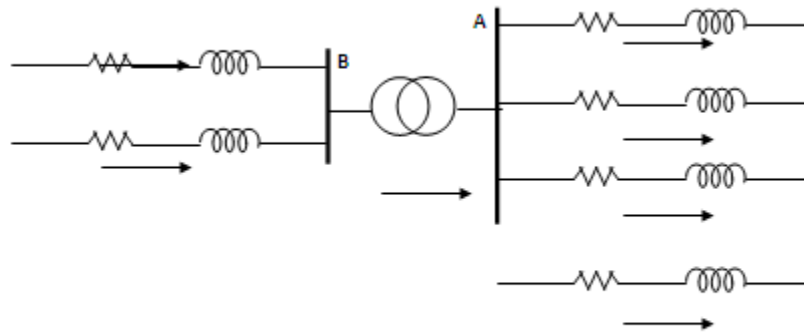
KONSEP DASAR ANALISIS HUBUNG SINGKAT

Analisis Sistem Tenaga
Pertemuan-11

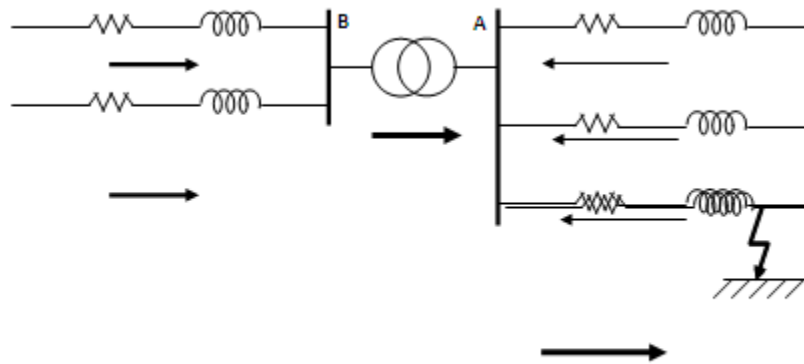
Konsep dasar perhitungan hubung singkat

- Sistem tenaga yang besar, dengan wilayah yang luas, sangat rentan dengan kemungkinan terjadinya kerusakan peralatan akibat suatu gangguan hubung singkat, baik yang bersifat temporer, seperti penghantar udara terkena ranting patah atau layang-layang. Juga yang bersifat permanen seperti kawat penghantar yang putus atau juga petir dan proses switching (manuver jaringan) yang menimbulkan tegangan berlebih yang bisa menyebabkan terjadinya flashover pada isolator

Konsep dasar perhitungan hubung singkat



a. sebelum terjadi gangguan (normal)



b. setelah terjadi gangguan

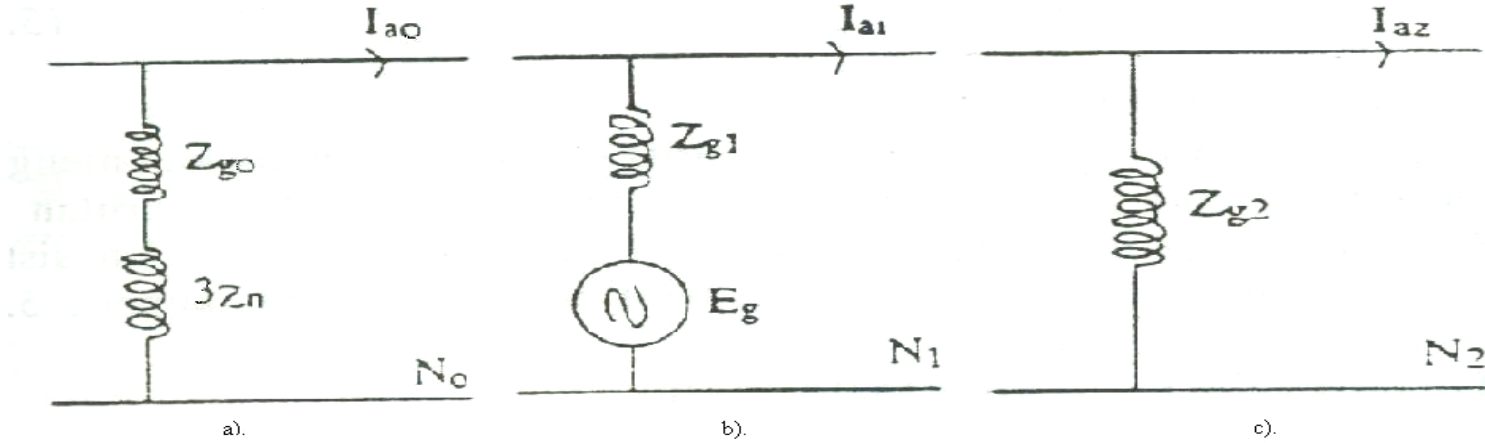
Pemodelan Elemen Sistem Tenaga Listrik

- **Busbar (*kapasitas PMT*)**
- Pada simulasi hubung singkat kita memerlukan data MVA hubung singkat pada setiap busbar yang ada. Praktisnya, hal ini berkaitan dengan kemampuan pemutusan arus (breaking capacity) dari PMT yang terdapat pada busbar tersebut.

Generator Sinkron

- Pada umumnya impedansi urutan positif, negatif, dan nol pada mesin serempak (sinkron) mempunyai nilai yang berbeda-beda.
- Besarnya impedansi urutan positif dari mesin sinkron dapat ditentukan dari nilai reaktansi subtransien (X''_d), transien (X'_d), atau reaktansi sinkronnya (X_d), tergantung pada asumsi waktu yang dilalui oleh gangguan awal (*initial fault*) yang terjadi secara tiba-tiba.

Generator Sinkron


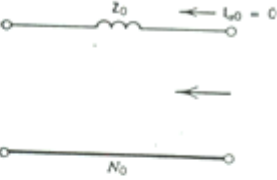

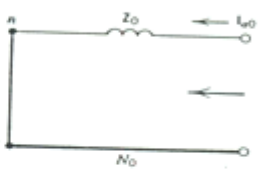

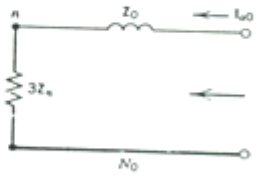
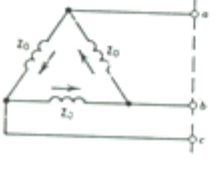
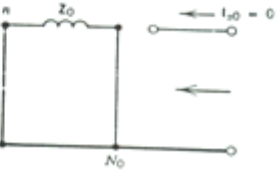


Transformator daya

- Pada transformator, impedansi urutan positif dan negatifnya mempunyai nilai yang sama

Beban

- Rangkaian urutan nol untuk beban 3 fasa yang dihubung delta atau bintang dapat dilihat pada tabel

Beban Tiga Fasa	Jaringan Urutan Nol
 <p>Diagram of a three-phase load connected in a star configuration. Three impedances Z_0 are connected from each phase (a, b, c) to a common neutral point 'n'. The neutral point is connected to the system neutral 'N₀'.</p>	 <p>Equivalent zero sequence network for a star-connected load. It consists of an impedance Z_0 in series with the system neutral N_0. The current entering the network is $I_{00} = 0$.</p>
 <p>Diagram of a three-phase load connected in a star configuration with the neutral point 'n' grounded. The ground is represented by a vertical line with a downward arrow. The current through the ground is labeled $3I_{00}$. Phase currents I_a, I_b, and I_c are shown.</p>	 <p>Equivalent zero sequence network for a star-connected load with a grounded neutral. It consists of an impedance Z_0 in series with the system neutral N_0. The current entering the network is I_{00}.</p>
 <p>Diagram of a three-phase load connected in a star configuration with the neutral point 'n' grounded. A fault impedance Z_f is connected from the neutral point to ground. The current through the fault is labeled $3I_{00}$. Phase currents I_a, I_b, and I_c are shown.</p>	 <p>Equivalent zero sequence network for a star-connected load with a grounded neutral and a fault. It consists of an impedance Z_0 in series with the system neutral N_0 and a fault impedance $3Z_f$ connected to ground. The current entering the network is I_{00}.</p>
 <p>Diagram of a three-phase load connected in a delta configuration. Three impedances Z_0 are connected between the phases (a-b, b-c, c-a). The neutral point 'n' is shown at the center of the delta.</p>	 <p>Equivalent zero sequence network for a delta-connected load. It consists of an impedance Z_0 in series with the system neutral N_0. The current entering the network is $I_{00} = 0$.</p>

Latar belakang Komponen Simetri

- Sebenarnya sistem tiga fasa seimbang hanya ada dalam teori saja, kenyataannya kebanyakan sistem hanya mendekati kondisi seimbangnya sehingga untuk mempermudah analisa maka sistem dianggap berada pada kondisi seimbang
- Fasor dari sistem tiga fasa yang tidak seimbang dapat diselesaikan kedalam fasor dari tiga sistem tiga fasa seimbang

Fasor dari sistem tiga fasa yang tidak seimbang dapat diselesaikan ke dalam fasor dari tiga sistem tiga fasa seimbang, yaitu :

- a. Sistem urutan positif
 - b. Sistem urutan negatif
 - c. Sistem urutan nol
- Urutan nol, positif, dan negatif ditunjukkan oleh *subscript* 0, 1, dan 2.

Sistem urutan positif

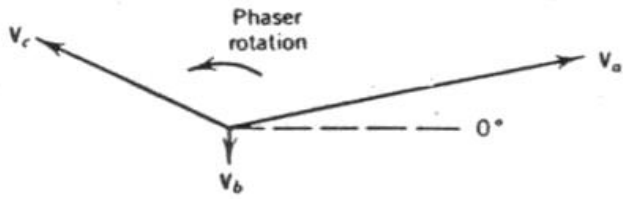
- Urutan ini digambarkan oleh fasor dari sistem seimbang yang mempunyai urutan fasa yang sama dengan sistem tidak seimbang aslinya. Ketiga fasor dari urutan positif ini besarnya sama dan terpisah satu sama lain dengan fasa sebesar 120° .

Sistem urutan negatif

- Sistem urutan ini digambarkan oleh fasor dari sistem seimbang yang mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan sistem aslinya. Nilai ketiga fasor urutan negatif ini besarnya sama dan terpisah satu sama lain dengan fasa sebesar 120° .

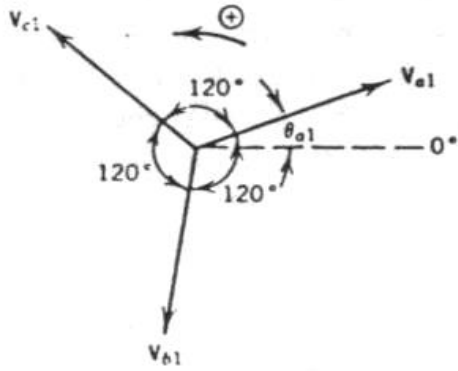
Sistem urutan nol

- Digambarkan oleh tiga fasor yang mempunyai magnitudo yang sama dan dengan pergeseran fasa sebesar 0° antara fasor yang satu dengan fasor yang lain.

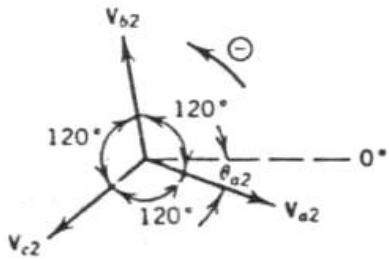
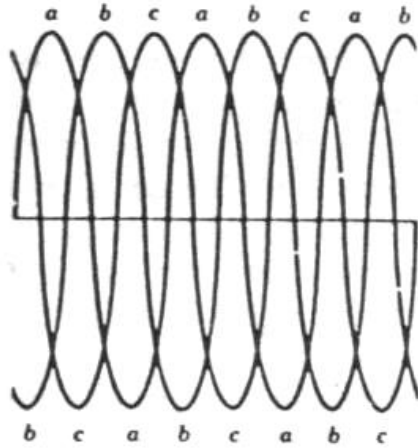


(a)

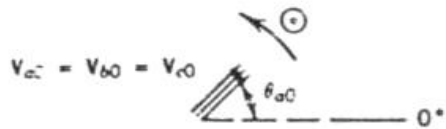
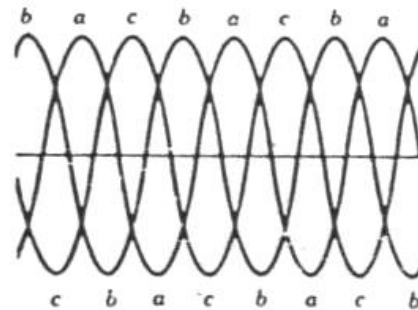
- (a) Fasor tegangan sistem tidak seimbang
- (b). Komponen urutan positif
- (c). Komponen urutan negatif
- (d). Komponen urutan nol.



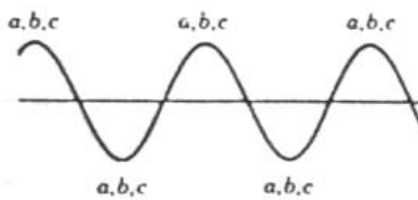
(b)



(c)



(d)



Phasor tegangan V_a , V_b , dan V_c yang diset tidak setimbang yang dapat diekpresikan menjadi komponen simetris sbb:

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2}$$

$$V_b = V_{b0} + V_{b1} + V_{b2}$$

$$V_c = V_{c0} + V_{c1} + V_{c2}$$

Operator komponen simetri (operator "a")

- Phasor unit atau operator akan memutar phasor lain 120° searah jarum jam tanpa merubah magnitudo dari phasor.

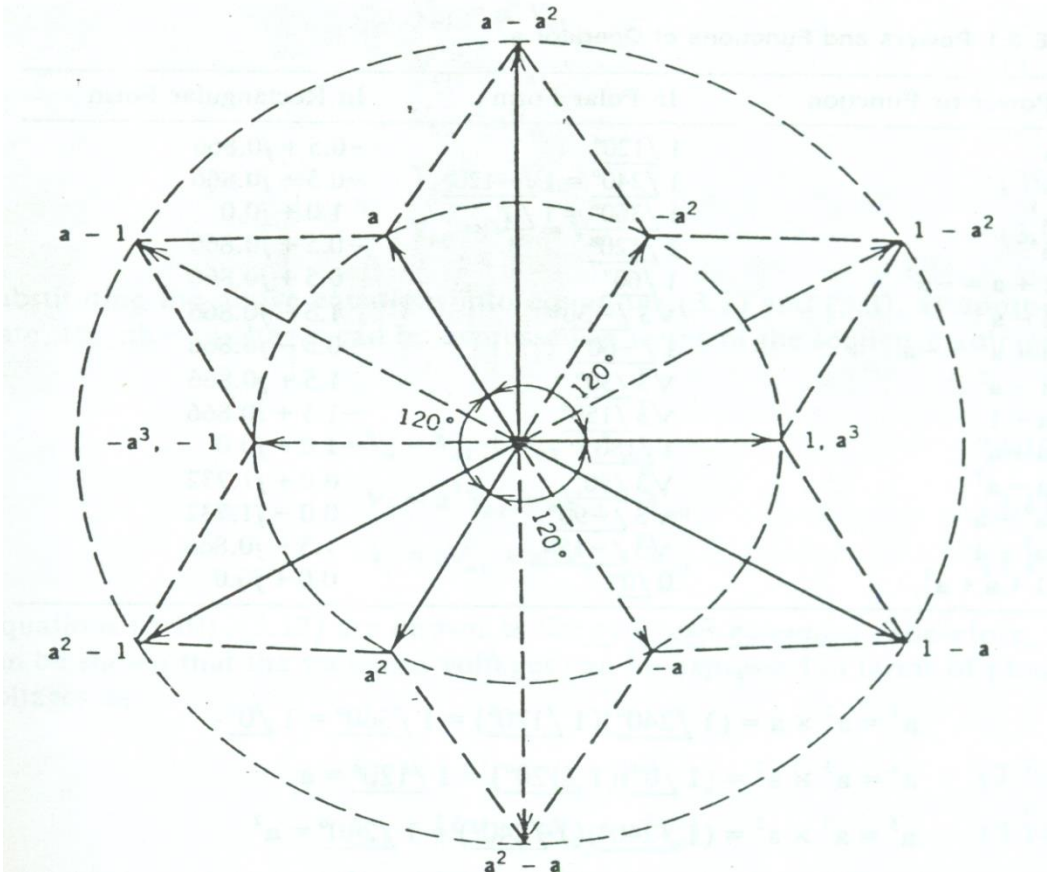


Diagram fasor operator a

operator “a”

- Operator ini didefinisikan sbb:

$$a = 1\angle 120^\circ$$

$$a = 1(\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ)$$

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{1}{2}\sqrt{3}$$

dimana

$$j = \sqrt{-1}$$

Kombinasi fungsi operator a .

Fungsi Operator a	Bentuk Polar	Bentuk Rectangular
a	$1 \angle 120^\circ$	$-0,5 + j 0,866$
a^2	$1 \angle 240^\circ = 1 \angle -120^\circ$	$-0,5 - j 0,866$
a^3	$1 \angle 360^\circ = 1 \angle 0^\circ$	$1,0 + j 0,0$
a^4	$1 \angle 120^\circ$	$-0,5 + j 0,866$
$1 + a = -a^2$	$1 \angle 60^\circ$	$0,5 + j 0,866$
$1 - a$	$\sqrt{3} \angle -30^\circ$	$1,5 - j 0,866$
$1 + a^2 = -a$	$1 \angle -60^\circ$	$0,5 - j 0,866$
$1 - a^2$	$\sqrt{3} \angle 30^\circ$	$1,5 + j 0,866$
$a - 1$	$\sqrt{3} \angle 150^\circ$	$-1,5 + j 0,866$
$a + a^2$	$1 \angle 180^\circ$	$-1,0 + j 0,0$
$a - a^2$	$\sqrt{3} \angle 90^\circ$	$0,0 + j 1,732$
$a^2 - a$	$\sqrt{3} \angle -90^\circ$	$0,0 - j 1,732$
$a^2 - 1$	$\sqrt{3} \angle -150^\circ$	$-1,5 - j 0,866$
$1 + a + a^2$	$0 \angle 0^\circ$	$0,0 + j 0,0$

Aplikasi Operator "a"

- Dalam aplikasi komponen simetris, biasanya digunakan phasa a sebagai referensi.
- Selanjutnya dengan menggunakan operator a, jaringan urutan positif, negatif dan nol dapat diekpresikan sbb :

$$V_{b1} = a^2 V_{a1}$$

$$V_{c1} = a V_{a1}$$

$$V_{b2} = a V_{a2}$$

$$V_{c2} = a^2 V_{a2}$$

$$V_{a0} = V_{b0} = V_{c0}$$

Persamaan tegangan tiap fasa dalam fungsi tegangan jaringan urutan adalah sbb:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0}$$

$$V_c = a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0}$$

$$V_b = a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0}$$

- Selanjutnya, dapat ditunjukkan tegangan urutan dalam fungsi tegangan tiap fasa sbb:

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

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

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

Sebagai alternatif, persamaan sintesis dan analisis dapat ditulis sebagai persamaan matrik sbb:

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

• Dimana:

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

dan

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

$$[A]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

atau

$$[V_{abc}] = [A] \cdot [V_{012}]$$

dan

$$[V_{012}] = [A]^{-1} [V_{abc}]$$

Persamaan matrik dari persamaan sintesis dan analisis dari arus urutan adalah sbb:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

dan

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

atau

$$[I_{abc}] = [A][I_{012}]$$

dan

$$[I_{012}] = [A]^{-1}[I_{abc}]$$

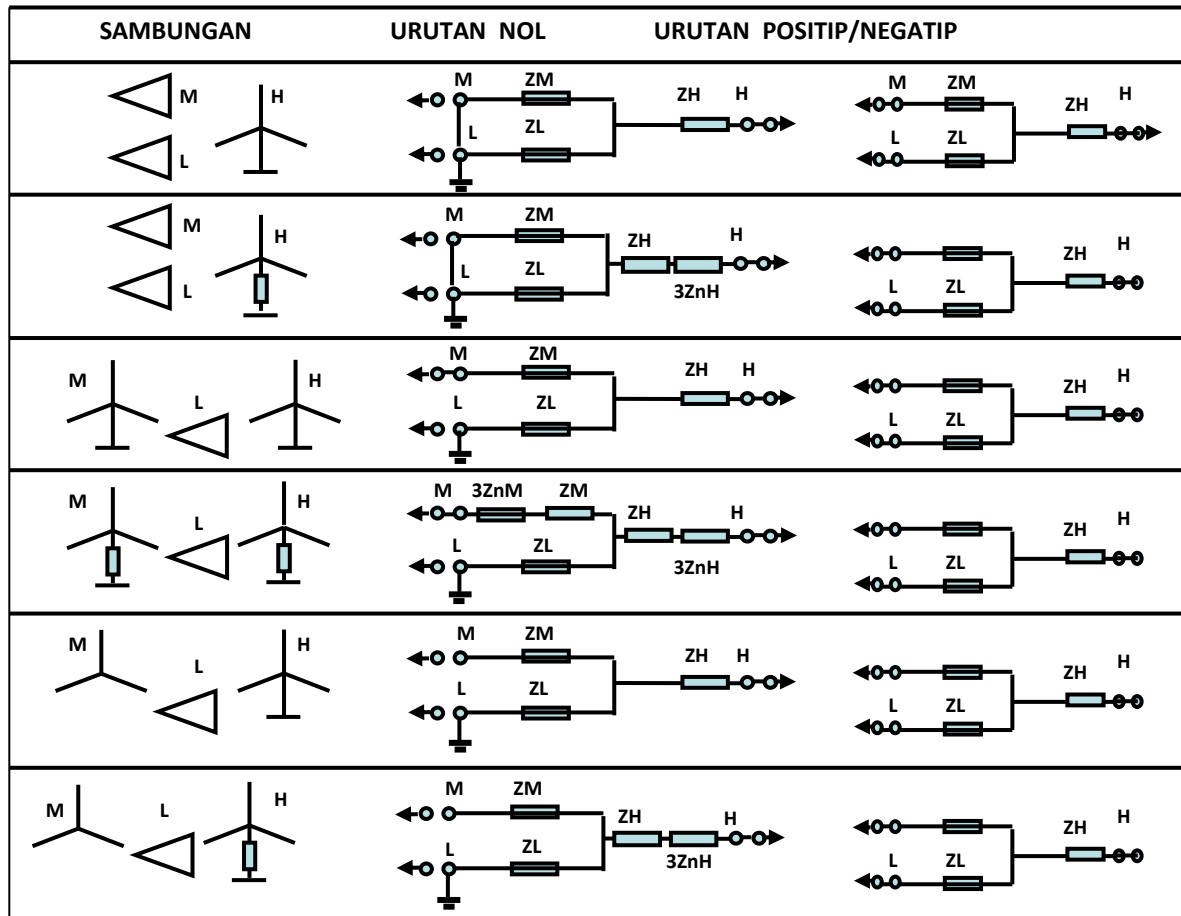
Hubungan Belitan Transformator

- Impedansi urutan positif/negatif dan urutan nol, untuk trafo dengan berbagai macam vektor group

SAMBUNGAN	URUTAN NOL	URUTAN POSITIF & NEGATIF

Hubungan Belitan Transformator

- Impedansi urutan positif/negatif dan urutan nol, untuk trafo dengan berbagai macam vektor group



Formulasi Gangguan dan Diagram Jaringan

- a) Gangguan 3 phasa
- b) Gangguan 2 phasa
- c) Gangguan 2 phasa ke tanah
- d) Gangguan 1 phasa ke tanah

Jenis Hubung Singkat

- Harga impedansi ekuivalen Z_e tergantung pada jenis gangguan hubung singkat, yang besarnya adalah :

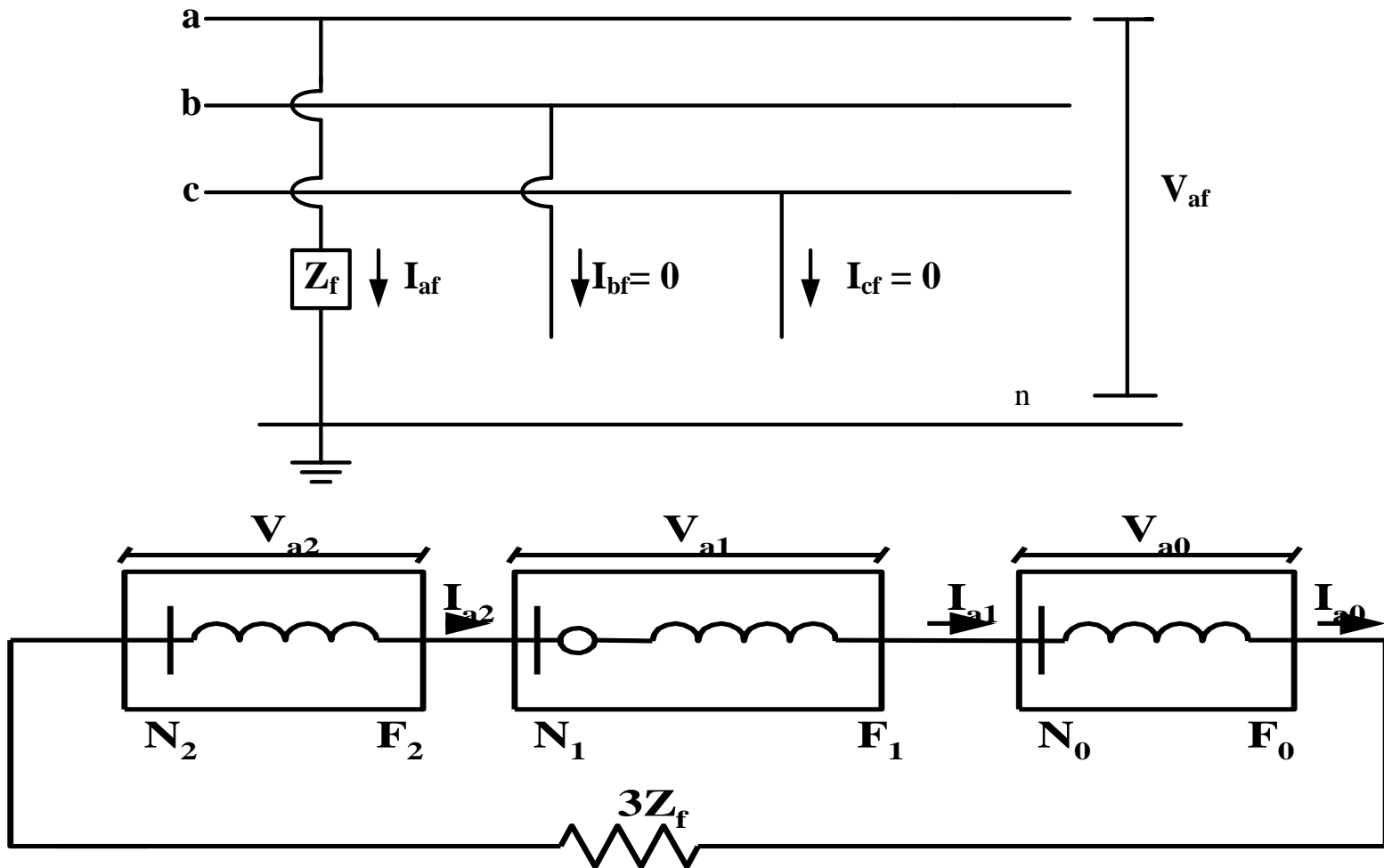
- Gangguan satu fasa – tanah : $Z_e = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f}{3}$

- Gangguan antar fasa : $Z_e = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_f}{\sqrt{3}}$

- Gangguan dua fasa – tanah : $Z_e = \frac{Z_1 Z_2 + (Z_1 + Z_2)(Z_0 + 3Z_f)}{\sqrt{3}(Z_0 + 3Z_f + aZ_2)}$

- Gangguan tiga fasa : $Z_e = Z_1 + Z_f$

Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah



- Gangguan satu fasa ke tanah
- (a) Representasi umum (b) Interkoneksi jaringan urutan

Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

- Persamaan umum perhitungan arus gangguan hubung singkat adalah :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_{bf} \\ I_{cf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

- Berdasarkan gambar di atas masing-masing besarnya arus urutan positif, negatif dan nol yaitu :

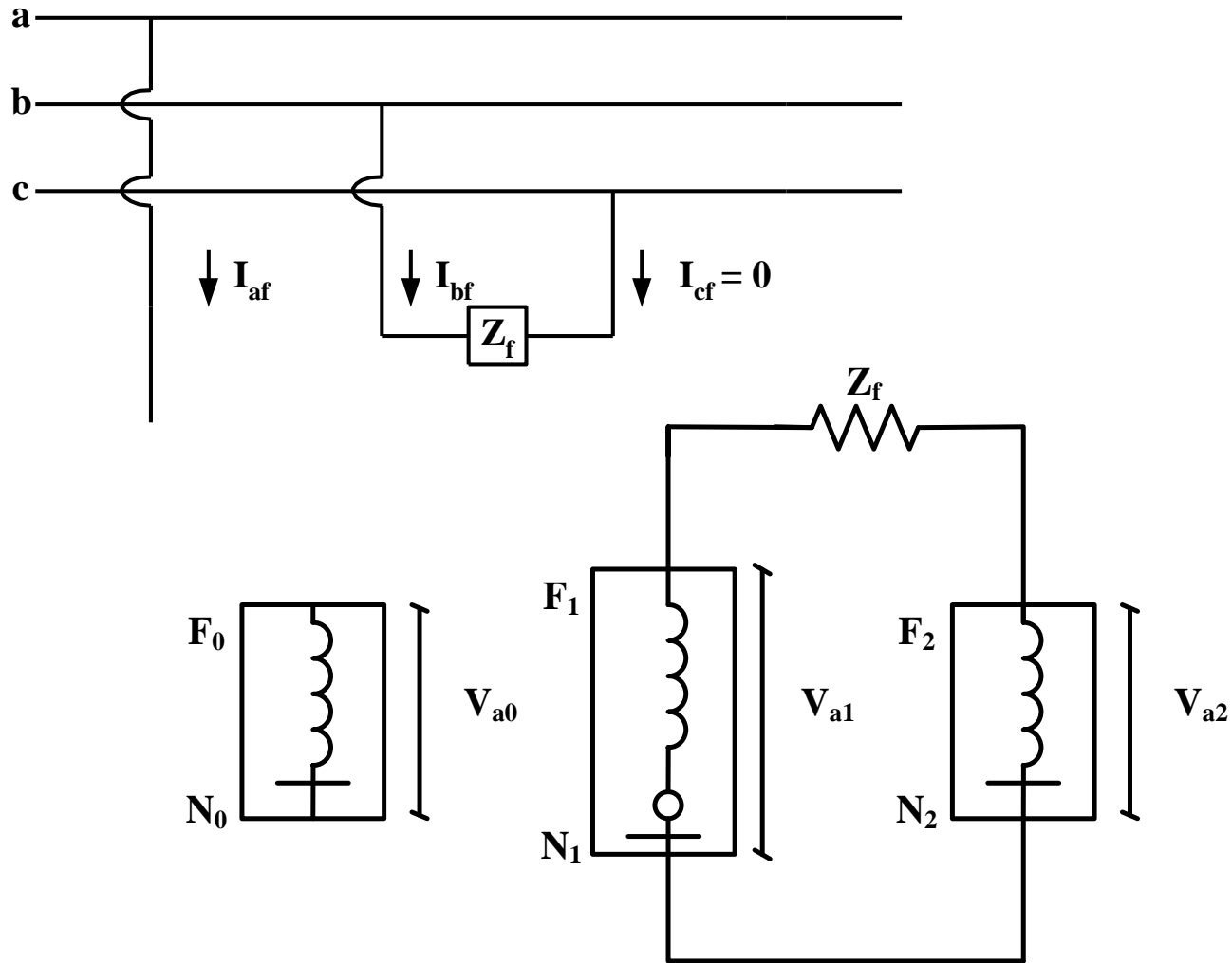
$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f}$$

- maka, nilai arus gangguan hubung singkat pada fasa a adalah :

$$I_{af} = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}$$

$$I_{af} = 3I_{a0} = 3I_{a1} = 3I_{a2}$$

Hubung Singkat Dua Fasa



- Gangguan dua fasa
- (a) Representasi umum (b) Interkoneksi jaringan urutan

Hubung Singkat Dua Fasa

- Berdasarkan gambar di atas masing-masing besarnya arus urutan positif, dan negatif yaitu :

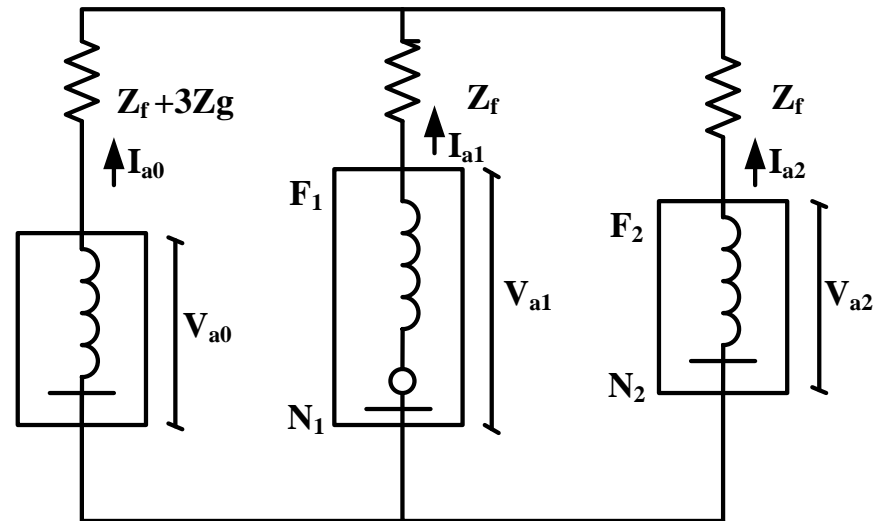
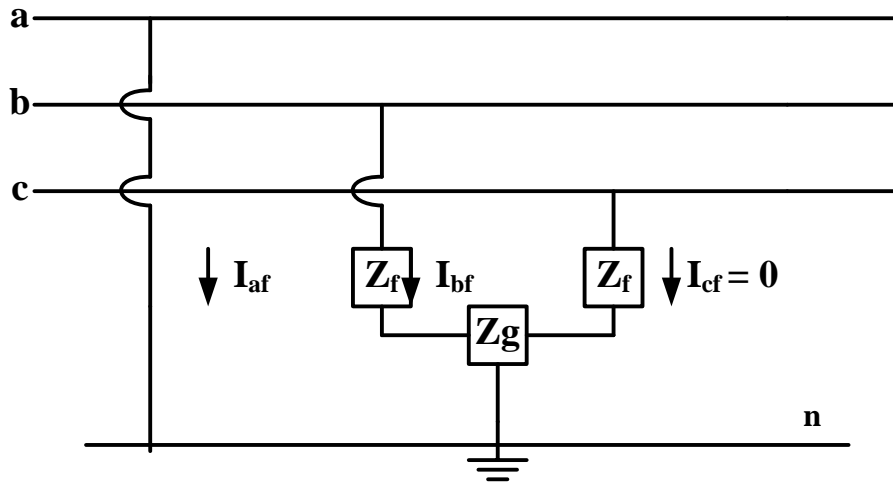
$$I_{a0} = 0$$

$$I_{a1} = -I_{a2} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f}$$

$$I_{af} = 0$$

$$I_{bf} = -I_{cf} = \sqrt{3}I_{a1} \angle -90^\circ$$

Hubung Singkat Dua Fasa Ke Tanah



- Gangguan dua fasa
- (a) Representasi umum (b) Interkoneksi jaringan urutan

Hubung Singkat Dua Fasa

- Berdasarkan gambar di atas masing-masing besarnya arus urutan positif, dan negatif yaitu :

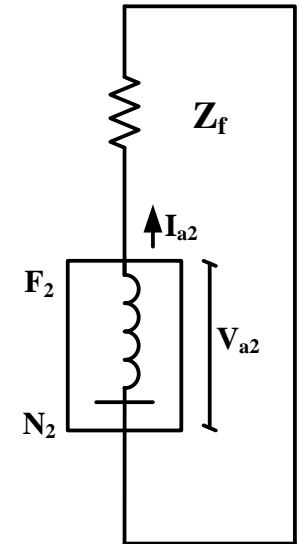
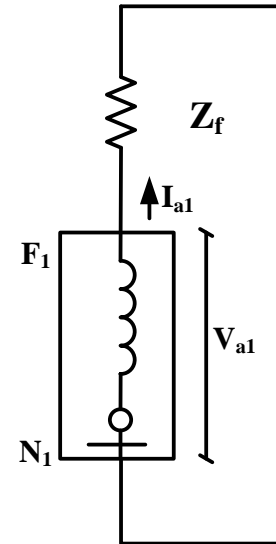
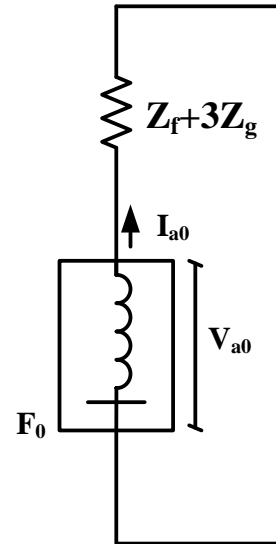
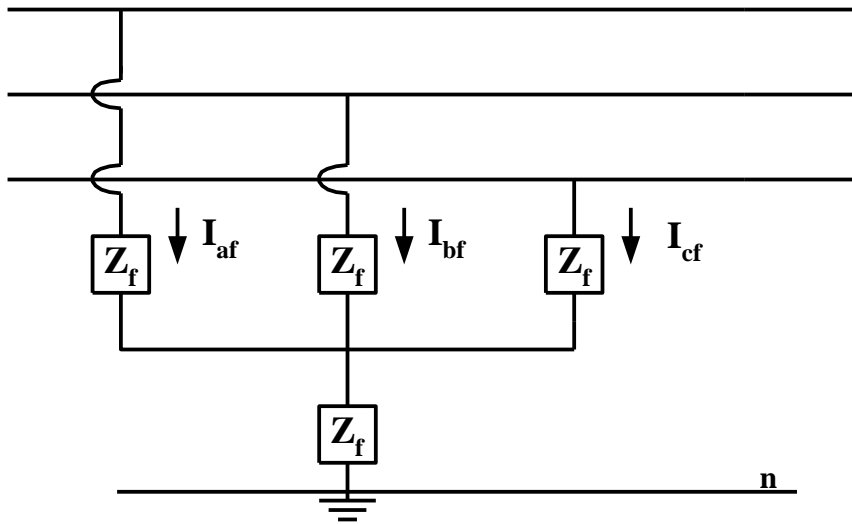
$$I_{a1} = \frac{E \angle 0^\circ}{\left\{ (Z_1 + Z_f) + \frac{(Z_2 + Z_f)(Z_0 + Z_f + 3Z_g)}{Z_0 + Z_2 + 2Z_f + 3Z_g} \right\}}$$

$$I_{a2} = - \left[\frac{Z_0 + Z_f + 3Z_g}{(Z_0 + Z_f + 3Z_g) + (Z_2 + Z_f)} \right] I_{a1}$$

$$I_{a0} = \left[\frac{Z_2 + Z_f}{(Z_0 + Z_f + 3Z_g) + (Z_2 + Z_f)} \right] I_{a1}$$

$$I_{bf} = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} \quad I_{cf} = I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2}$$

Hubung Singkat Tiga Fasa



- Gangguan dua fasa
- (a) Representasi umum (b) Interkoneksi jaringan urutan

Hubung Singkat Tiga Fasa

- Berdasarkan gambar di atas masing-masing besarnya arus urutan positif, dan negatif yaitu :

$$I_{a0} = 0 \quad I_{a2} = 0 \quad I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f}$$

$$I_{af} = I_{a1} = \frac{E \angle 0^\circ}{Z_1 + Z_f}$$

$$I_{bf} = a^2 I_{a1} = \frac{E \angle 240^\circ}{Z_1 + Z_f}$$

$$I_{cf} = a \cdot I_{a1} = \frac{E \angle 120^\circ}{Z_1 + Z_f}$$

STANDAR IEC 60909

- IEC 60909 adalah standar yang digunakan untuk menghitung besarnya arus hubung singkat yang dapat terjadi dalam suatu sistem tenaga listrik. Standar ini dapat diaplikasikan pada seluruh bentuk jaringan, baik itu radial maupun jala-jala, dengan jangkauan tegangan pada sistem sampai 230 kV
- Besarnya arus hubung singkat yang dapat timbul pada sistem mempunyai nilai yang berbeda-beda, tergantung pada jenis gangguan yang terjadi

STANDAR IEC 60909

1. Gangguan tiga fasa

- Besarnya arus awal hubung singkat I_{hs} (*initial short-circuit current*) atau yang dikenal dengan I''_k untuk jenis gangguan tiga fasa adalah sebagai berikut

$$I''_k = I_{hs} = \frac{U_{hs}}{|Z_1|} \quad \Rightarrow \quad I''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3}|Z_1|}$$
$$U_{hs} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}}$$

dengan

U_n = tegangan fasa-netral jaringan di titik gangguan
 c = faktor tegangan yang nilainya dapat dilihat pada tabel

STANDAR IEC 60909

1. Gangguan tiga fasa

- Nilai faktor tegangan c .

Rated voltage U_n	max	min
LV		
230 - 400 V	1	0.95
Others	1.05	1
HV		
1 to 230 kV	1.1	1

Nilai faktor tegangan c ditentukan berdasarkan pendekatan nilai rata-rata dari tegangan nominal sistem, yaitu $\pm 5\%$ untuk tegangan rendah (LV) dan $\pm 10\%$ untuk tegangan tinggi (HV).

STANDAR IEC 60909

2. Gangguan fasa-fasa

- Berdasarkan IEC 60909, besarnya arus awal hubung singkat fasa-fasa (I''_k) untuk jenis gangguan fasa-fasa adalah :

$$E_a = \frac{cU_n}{\sqrt{3}}$$

E_a adalah tegangan ekuivalen urutan positif di titik gangguan, sehingga

$$I''_k = \frac{\sqrt{3} cU_n}{\sqrt{3} |Z_1 + Z_2|} \quad \Rightarrow \quad I''_k = \frac{cU_n}{|Z_1 + Z_2|}$$

STANDAR IEC 60909

3. Gangguan fasa-tanah

- Berdasarkan IEC 60909, besarnya arus awal hubung singkat fasa-fasa (I''_k) untuk jenis gangguan fasa-tanah adalah :

c_c

$$I''_k = I_a = \frac{3E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0} = \frac{3cU_n}{\sqrt{3}|Z_1 + Z_2 + Z_0|}$$

$$I''_k = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|Z_1 + Z_2 + Z_0|}$$

STANDAR IEC 60909

4. Gangguan fasa-fasa-tanah

- Berdasarkan IEC 60909, besarnya arus awal hubung singkat fasa-fasa (I''_k) untuk jenis gangguan fasa-fasa tanah adalah :

$$\begin{aligned} |I_{hs}| &= I''_k = \frac{3cU_n |Z_2|}{\sqrt{3} |Z_0 Z_1 + Z_0 Z_2 + Z_1 Z_2|} \\ &= \frac{c U_n |Z_2| \sqrt{3}}{|Z_0 Z_1 + Z_0 Z_2 + Z_1 Z_2|} \end{aligned}$$

Arus hubung singkat maksimum dan minimum

- Perbedaan besarnya arus ini ditentukan oleh nilai faktor tegangan c yang digunakan dalam menghitung besarnya arus hubung singkat

Arus hubung singkat maksimum dan minimum

- Arus hubung singkat maksimum digunakan untuk menentukan beberapa hal antara lain :
 - Kapasitas pengrusakan *circuit breaker* (CB)
 - Kapasitas pembuatan CB
 - Kapasitas dari arus yang dapat ditahan CB

Arus hubung singkat maksimum dan minimum

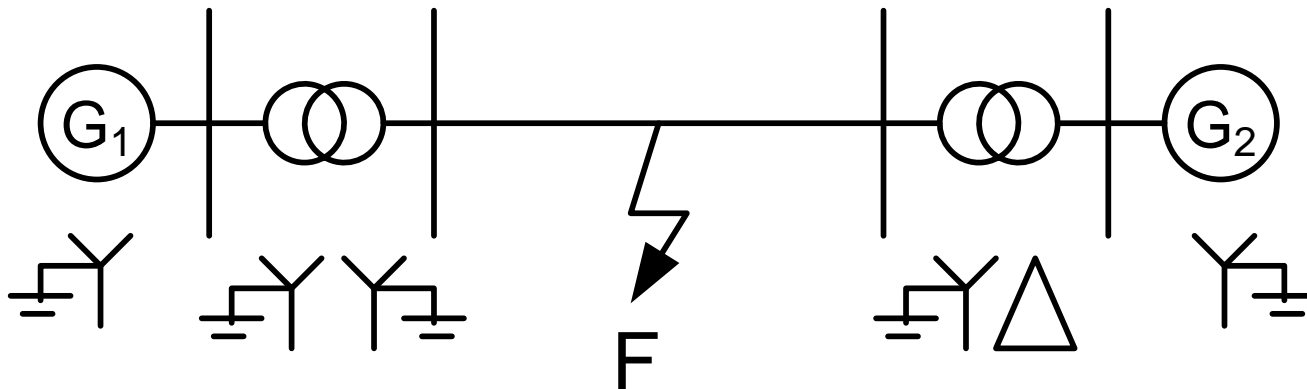
- Arus hubung singkat minimum, sangat dibutuhkan dalam menentukan kurva waktu kerja dari CB maupun fuse yang akan digunakan.

Arus awal hubung singkat (*initial short-circuit current*)

- Besarnya arus awal dari hubung singkat dapat dihitung dengan menggunakan persamaan-persamaan yang telah disebutkan di atas yang nilainya tergantung pada jenis gangguan yang terjadi pada sistem.

Pembentukan Diagram Urutan Positif Negatif dan Nol

- Jika diketahui suatu sistem sebagai berikut



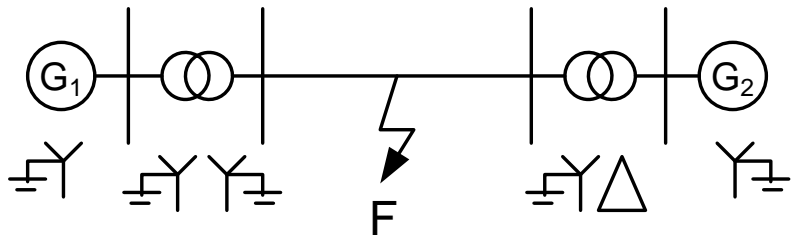


Diagram Impedansi Urutan Positif

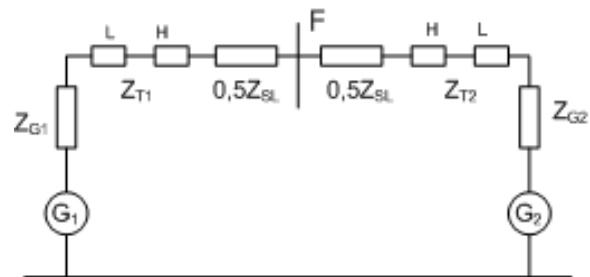


Diagram Impedansi Urutan Negatif

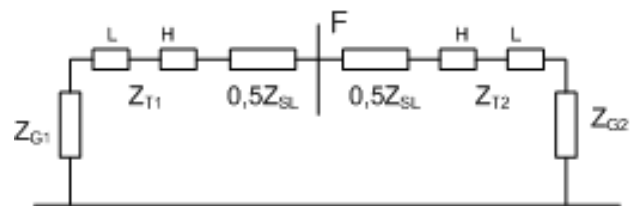
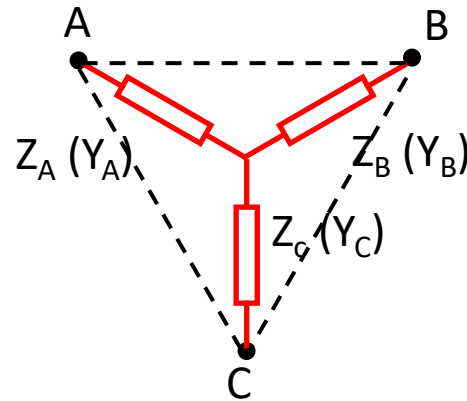


Diagram Impedansi Urutan Nol



ANALISA HUBUNG SINGKAT

TRANSFORMASI D - Y.



$$Z_A = \frac{Z_{AB} Z_{CA}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CA}}$$

$$Z_B = \frac{Z_{BC} Z_{AB}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CA}}$$

$$Z_C = \frac{Z_{CA} Z_{BC}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CA}}$$

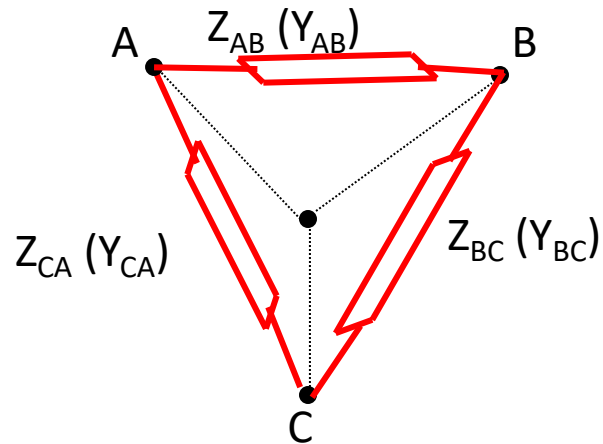
$$Y_A = \frac{Y_{AB} Y_{CA} + Y_{BC} Y_{AB} + Y_{CA} Y_{BC}}{Y_{BC}}$$

$$Y_B = \frac{Y_{AB} Y_{CA} + Y_{BC} Y_{AB} + Y_{CA} Y_{BC}}{Y_{CA}}$$

$$Y_C = \frac{Y_{AB} Y_{CA} + Y_{BC} Y_{AB} + Y_{CA} Y_{BC}}{Y_{AB}}$$

ANALISA HUBUNG SINGKAT

TRANSFORMASI Y - D



$$Z_{AB} = \frac{Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_C Z_A}{Z_C}$$

$$Y_{AB} = \frac{Y_A Y_B}{Y_A + Y_B + Y_C}$$

$$Z_{BC} = \frac{Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_C Z_A}{Z_A}$$

$$Y_{BC} = \frac{Y_B Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}$$

$$Z_{CA} = \frac{Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_C Z_A}{Z_B}$$

$$Y_{CA} = \frac{Y_C Y_A}{Y_A + Y_B + Y_C}$$

Terima Kasih

Tugas Pengayaan 11

- Simulasi Aliran Daya dengan ETAP. Kasus nya bebas sesuai tutorial yang kalian dapat (dijelaskan dalam video rekam layar).
- Rangkum poin-poin penting tulis tangan, Chapter 10 Hadi Saadat.
Kemudian di sub-chapter 10.2 s/d 10.9 (Ambil satu example setiap sub-chapter, simulasikan di Matlab).