

BAB II

PERHITUNGAN ARUS HUBUNGAN SINGKAT

2.1. Pendahuluan

Sistem tenaga listrik pada umumnya terdiri dari pembangkit, gardu induk, jaringan transmisi dan distribusi . Berdasarkan konfigurasi jaringan, Pada sistem ini setiap gangguan yang ada pada penghantar, akan mengganggu semua beban yang ada atau apabila terjadi gangguan pada salah satu feeder maka semua pelanggan yang terhubung pada GI tersebut akan terganggu.

Apabila gangguan tersebut bersifat permanen dan memerlukan perbaikan terlebih dahulu sebelum dapat dioperasikan kembali, maka pelanggan yang mengalami gangguan pelayanan jumlahnya relatif banyak.

Suatu gangguan didalam peralatan listrik didefinisikan sebagai terjadinya suatu kerusakan di dalam sirkuit listrik yang menyebabkan aliran arus listrik keluar dari saluran yang seharusnya. Gangguan ini umumnya disebabkan oleh putusnya

kawat saluran transmisi sehingga terjadi hubung singkat ke tanah, pecahnya isolator atau rusaknya isolasi. Impedansi gangguan umumnya rendah, sehingga arus gangguan menjadi besar.

Selama terjadi gangguan, tegangan tiga fasa menjadi tidak seimbang dan mempengaruhi suplai ke sirkuit tiga fasa yang berdekatan. Arus gangguan yang besar dapat merusak tidak hanya peralatan yang terganggu, tetapi juga instalasi yang dilalui arus gangguan. Gangguan dalam peralatan yang penting dapat mempengaruhi stabilitas system tenaga listrik. Misalnya suatu gangguan pada daerah suatu pembangkit yang dapat mempengaruhi stabilitas system interkoneksi.

Gangguan yang terjadi pada GI bersifat temporer, apabila terjadi gangguan maka gangguan tersebut tidak akan lama dan dapat normal kembali baik secara otomatis maupun secara manual. Salah satu contoh gangguan yang bersifat sementara ini adalah gangguan akibat sentuhan pohon yang tumbuh disekitar jaringan, akibat burung, dan kelelawar serta layang-layang (PT. PLN 2005:13). Gangguan ini dapat hilang dengan sendirinya yang disusul dengan penutupan kembali peralatan hubungannya. Apabila gangguan temporer sering terjadi maka hal tersebut akan menimbulkan kerusakan pada peralatan dan akhirnya menimbulkan gangguan yang bersifat permanen.

Perhitungan hubung singkat adalah analisis suatu system tenaga listrik pada keadaan gangguan hubung singkat, dimana dengan cara ini diperoleh nilai besaran-besaran listrik yang dihasilkan sebagai akibat gangguan hubung singkat tersebut.

Gangguan hubung singkat dapat didefinisikan sebagai gangguan yang terjadi akibat adanya penurunan kekuatan dasar isolasi antara sesama kawat fasa dengan tanah yang menyebabkan kenaikan arus secara berlebihan. Analisis gangguan hubung singkat diperlukan untuk mempelajari system tenaga listrik baik waktu perencanaan maupun setelah beroperasi.

2.2. Komponen Simetris

Metode komponen simetris digunakan dalam perhitungan yang berhubungan dengan keadaan yang tak seimbang pada perangkat listrik tiga fasa, dan secara khusus untuk perhitungan hubung singkat yang tidak seimbang pada perangkat listrik.

Komponen-komponen yang seimbang ini dinamakan menjadi tiga komponen urutan :

- a. **Komponen urutan positif**, yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan berbeda sudut fasanya 120^0 dan mempunyai urutan yang sama dengan fasa aslinya.
- b. **Komponen urutan negatif**, yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan berbeda sudut fasanya 120^0 dan mempunyai fasor urutan yang berlawanan dengan fasa aslinya.
- c. **Komponen urutan nol**, yang terdiri dari tiga fasor yang sama simetris besarnya dan berbeda fasa nol derajat.

Impedansi urutan dapat didefinisikan sebagai suatu impedansi yang dirasakan oleh arus urutan bila tegangan urutannya dipasang pada peralatan atau system tersebut. Seperti juga tegangan dan arus di dalam metode komponen simetris dan tak simetris.

Impedansi yang dikenal ada tiga macam yaitu :

- a. **Impedansi urutan positif (Z_1)**, yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan positif.
- b. **Impedansi urutan negatif (Z_2)**, yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan negatif.
- c. **Impedansi urutan nol (Z_0)**, yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan nol.

Cara yang biasa dilakukan dalam menghitung besar arus gangguan hubung singkat pada komponen simetris adalah memulai perhitungan pada rel daya tegangan primer di gardu induk untuk berbagai jenis gangguan, kemudian menghitung pada titik-titik lainnya yang terletak semakin jauh dari gardu induk tersebut.

Impedansi saluran suatu system tenaga listrik tergantung dari jenis konduktornya yaitu dari bahan apa konduktor itu dibuat yang juga tentunya pula dari besar kecilnya penampang konduktor dan panjang saluran yang digunakan jenis konduktor ini.

Komponen simetris adalah lazim digunakan di dalam menganalisa gangguan yang tidak simetris di dalam suatu sistem kelistrikan, misalnya :

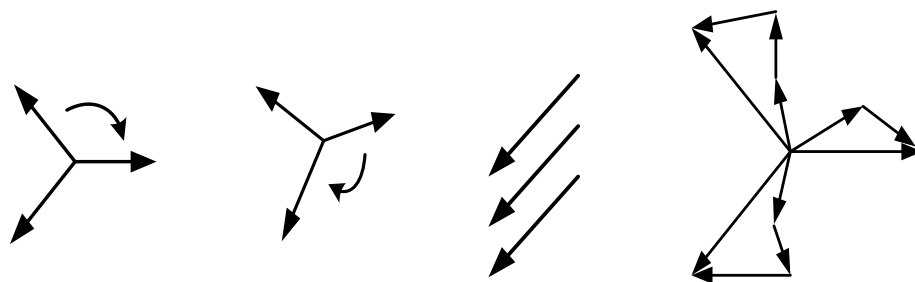
- A. Gangguan satu phasa ke tanah.

B. Gangguan tiga phasa

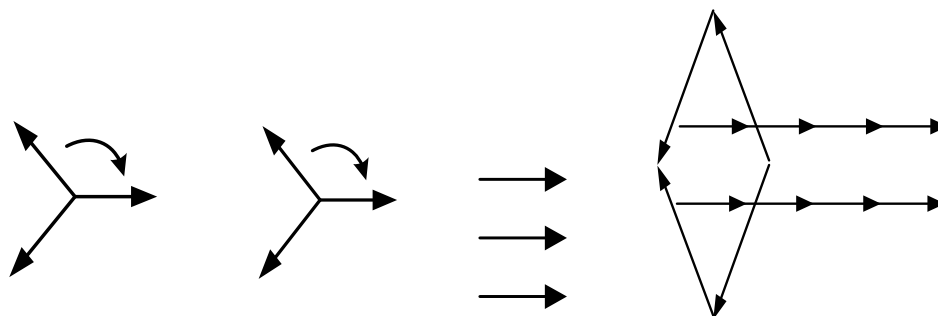
C. Gangguan phasa ketanah

Dimana phasa ini mempunyai komponen urutan (sequence) :

- Komponen urutan nol (Zero sequence component), adalah tiga buah fasor yang arah bersamaan sama dengan magnitudes urutan nol (zero sequence).
- Komponen urutan positif (positif sequence), adalah 3 fasor yang mempunyai beda sudut $\pm 120^\circ$ antara phasa sama dengan magnitudes dari urutan positif (positif sequence).
- Komponen urutan negatif (negatif sequence component), adalah 3 buah fasor yang mempunyai beda sudut $\pm 120^\circ$ antara phasa sama dengan magnitudes dari urutan negatif (negatif sequence).



Gambar 2.1 Komponen urutan untuk tegangan



Gambar 2.2 Komponen urutan untuk arus

Dalam penulisan bahwa komponen urutan nol, urutan positif dan urutan negatif misal untuk phasa a, yang mana masing-masing tegangan adalah V_{a0} , V_{a1} dan V_{a2} .

Dapat ditulis sebagai urutan komponen V_0 , V_1 dan V_2 penjelasan hal tersebut dapat dilihat pada perkalian matrik sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\text{Dimana : } a = 1 \angle 120^\circ = \frac{-1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Dari persamaan 2.8, dapat di uraikan menjadi 3 buah persamaan sebagai berikut :

$$V_a = V_0 + V_1 + V_2$$

$$V_b = V_0 + a^2 V_1 + a V_2$$

$$V_c = V_0 + a V_1 + a^2 V_2$$

$$\text{Bila } V_{ph} = A \cdot V_s \text{ dan } V_s = A^{-1}$$

Dimana : V_{ph} = vektor kolom dari tegangan phasa

V_s = vektor kolom tegangan urutan (sequence voltage)

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

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

$$\text{Maka : } V_s = A^{-1} \cdot V_{ph}$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.2)$$

Perkalian matrik pada persamaan 2.2, sebagai berikut :

$$V_0 = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \dots\dots\dots (2.3)$$

$$V_1 = \frac{1}{3} (V_a + a V_b + a^2 V_c) \dots\dots\dots (2.4)$$

$$V_2 = \frac{1}{3} (V_a + a^2 V_b + a V_c) \dots\dots\dots (2.5)$$

Pada persamaan 2.3 memperlihatkan bahwa tegangan urutan nol adalah sistem tiga phasa yang seimbang karena penjumlahan 3 fasor seimbang sama dengan nol. Dalam sistem yang tidak seimbang phasanya, tegangan phasa-netral mempunyai komponen urutan nol tetapi phasa-phasa tidak mempunyai komponen urutan nol.

Komponen simetris ini dapat juga dipergunakan untuk arus, sebagai berikut :

Bila $I_{ph} = A \cdot I_s$ dan $I_s = A^{-1} \cdot I_{ph}$

Dimana A = Vektor dari arus fasa

I_s = Vektor dari arus urutan (sequence current)

$$I_{ph} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

$$I_s = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

Maka : $I_s = A^{-1} \cdot I_{ph}$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.6)$$

Perhatikan matrik pada persamaan 2.13, sebagai berikut :

$$I_0 = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) \dots\dots\dots (2.7)$$

$$I_1 = \frac{1}{3} (I_a + aI_b + a^2I_c) \dots\dots\dots (2.8)$$

$$I_2 = \frac{1}{3} (I_a + a^2I_b + aI_c) \dots\dots\dots (2.9)$$

Dalam sistem tiga fasa hubungan Y, arus netral I_0 sama dengan jumlah arus fasa

$$I_n = I_a + I_b + I_c \dots\dots\dots (2.10)$$

Dari persamaan 2.14 dan 2.20, diperoleh :

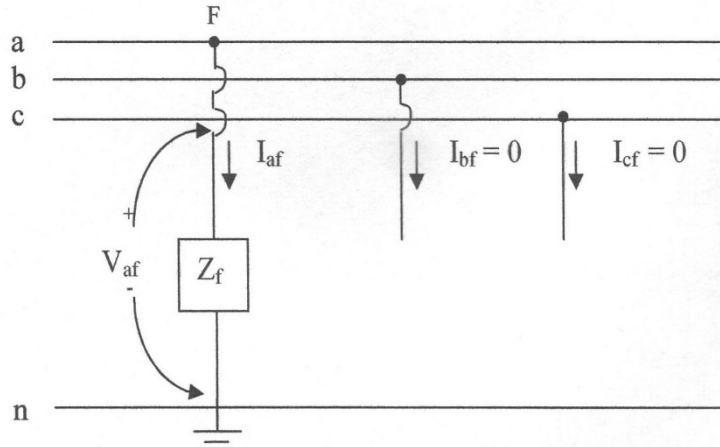
$$I_n = 3 \cdot I_0 \dots\dots\dots (2.11)$$

Arus netral sama dengan tiga kali arus urutan nol untuk beban seimbang dengan hubungan sistem Y, arus fasa tidak mempunyai komponen urutan nol, sejak arus netral sama dengan nol, juga pada sistem 3 fasa yang tidak mempunyai penghantar netral seperti pada hubungan Δ atau hubungan Y yang tidak ada penghantar netral arus fasa tidak mempunyai urutan nol.

2.3 Jenis-jenis Gangguan

2.3.1 Gangguan Satu Fasa ke Tanah

Untuk gangguan ini dapat dianggap fasa a mengalami gangguan dapat digambarkan pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.1. Gangguan Satu Fasa ke Tanah

Kondisi terminalnya sebagai berikut :

$$I_b = 0 ; I_c = 0 ; V_a = I_a Z_f$$

Untuk persamaan arus yang digunakan diperoleh dari komponen simetris arus :

$$I_{a0} = 1/3 (I_a + I_b + I_c) = 1/3 I_a$$

$$I_{a1} = 1/3 (I_a + a I_b + a^2 I_c) = 1/3 I_a$$

$$I_{a2} = 1/3 (I_a + a^2 I_b + a I_c) = 1/3 I_a$$

$$\text{Jadi, } I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = 1/3 I_a \quad (2.12)$$

Persamaan di atas menunjukkan bahwa masing-masing arus urutan sama.

$$V_{a0} = -I_{a0} * Z_0$$

$$V_{a1} = V_f - I_{a1} * Z_1$$

$$V_{a2} = -I_{a2} * Z_2$$

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} = V_{a0} \quad (2.13)$$

$$\text{Dari kondisi terminalnya diketahui : } V_a = I_a * Z_f$$

$$\text{Dari persamaan (2.1) didapat : } I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = 1/3 I_a$$

Maka :

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} = V_{a0} = (I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}) Z_f = 3 * I_{a1} * Z_f \quad (2.14)$$

$$V_a = V_f - I_{a1} * Z_1 - I_{a2} * Z_2 - I_{a0} * Z_0$$

$$V_a = V_f - I_{a1} (Z_1 + Z_2 + Z_0)$$

Sehingga diperoleh :

$$V_f - I_{a1} (Z_1 + Z_2 + Z_0) = 3 * I_{a1} * Z_f \quad (2.15)$$

$$V_f = I_{a1} (Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3 * Z_f)$$

$$I_{a1} = 1/3 I_a = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \quad (2.16)$$

$$I_{a1} = I_f = \frac{3V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (2.17)$$

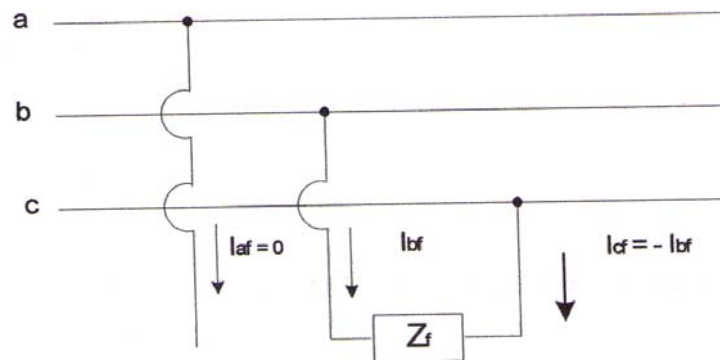
$$I_{f \phi \text{ ke tanah}} = \frac{V_{L-N}}{Z_G} \quad (2.18)$$

$$\text{Dimana } Z_G = \frac{2Z_1 + Z_0}{3} \quad (2.19)$$

$$I_{f \phi \text{ ke tanah}} = \frac{V_{L-N}}{2Z_1 + Z_0} \quad (2.20)$$

2.3.2 Gangguan Dua Fasa (fasa-fasa)

Misalnya gangguan terjadi pada fasa a dan fasa b seperti gambar dibawah



Gambar 2.2. Gangguan dua fasa

$$I_a = 0 ; I_b = -I_c ; V_b - V_c = Z_f * I_b$$

Dari komponen-komponen simetris :

$$\begin{aligned} I_{a0} &= 1/3 (I_a + I_b + I_c) \\ &= 1/3 (0 + -I_c + I_c) = 0 \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} I_{a1} &= 1/3 (I_a + a I_b + a^2 I_c) \\ &= 1/3 (0 + a I_b - a^2 I_b) = 1/3 (a - a^2) * I_b \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned} I_{a2} &= 1/3 (I_a + a^2 I_b + a I_c) \\ &= 1/3 (0 + a^2 I_b - a I_b) = 1/3 (a^2 - a) * I_b \end{aligned} \quad (2.23)$$

Sehingga :

$$I_{a1} = - I_{a2}$$

$$V_b - V_c = Z_f * I_b$$

$$V_b - V_c = (a^2 - a) (V_{a1} - V_{a2}) \quad (2.24)$$

$$(a^2 - a) [V_f - (Z_1 + Z_2) I_{a1}] = Z_f * I_b$$

Substitusikan I_b ke persamaan (2.24), maka:

$$(a - a^2) (a^2 - a) = 3$$

Sehingga diperoleh :

$$V_f - (Z_1 + Z_2) I_{a1} = \frac{3 I_{a1}}{(a - a^2) * (a^2 - a)} \quad (2.25)$$

$$Z_f = (a - a^2) (a^2 - a)$$

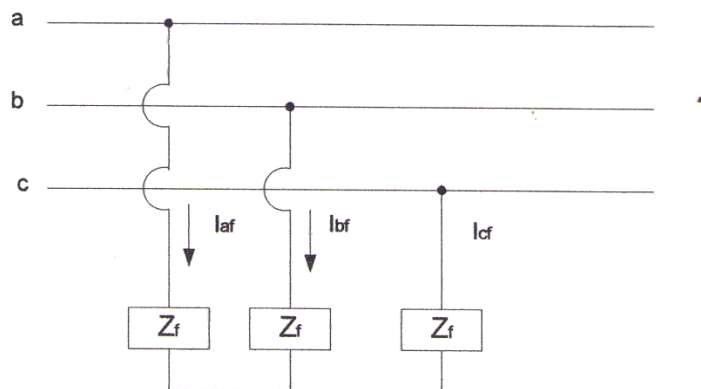
Sehingga diperoleh :

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (2.26)$$

$$I_{fL-L} = \frac{j\sqrt{3} \times V_{L-N}}{Z_1 + Z_2} \quad (2.27)$$

2.3.3 Gangguan Tiga Fasa

Misalnya gangguan terjadi pada fasa a, fasa b dan fasa c seperti gambar dibawah



Gambar 2.3. Gangguan Tiga Fasa

Misalnya gangguan terjadi pada fasa a dan fasa b seperti gambar dibawah

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

$$I_a = 0$$

$$E = E_b = E_c$$

Karena sistemnya seimbang maka urutan negatif dan urutan nol tidak ada, sehingga diperoleh :

$$V_a = V_f - I_{a1} * Z_{a1} = 0 \quad (2.28)$$

$$I_{a1} = I_a = I_f = \frac{V_f}{Z_1} \quad (2.29)$$

$$I_{f\phi_3} = \frac{V_{L-N}}{Z_1} \quad (2.30)$$

2.3.4 Arus gangguan hubung singkat dalam sistem (transformator tenaga)

Data-data yang di perlukan sebagai berikut : MVA_{hs} di sisi busbar tegangan tinggi, MVA, ZT%, kV dari trafo tenaga yang mensuplai jaringan, karena incoming trafo tenaga mensuplai tegangan untuk jaringan .

Contoh perhitungan arus gangguan hubung singkat pada jaringan tegangan menengah (20 kV) yang di suplai dari GI 150 kV, yaitu:

1. Perhitungan Impedansi sumber

Pada sisi 20 kV dari gardu induk 150 kV dengan data MVA hubung singkat yang ada, maka:

$$Z_s = \frac{kV^2}{MVA_{hs}} \quad (2.31)$$

2. Perhitungan Impedansi Trafo

$$Z_{t1} = \frac{\%Z_T (V_{L-L})^2 \times 10}{MVA_{hs}} \quad (2.32)$$

3. Perhitungan Impedansi Feeder

Impedansi feeder yang akan dihitung tergantung dari besarnya impedansi per km dari feeder yang bersangkutan

$$Z_1 = Z_2 = \% \text{ panjang} \times \text{Panjang feeder} \times (R_1 + jX_1) \quad (2.33)$$

$$Z_1 = Z_2 = \% \text{ panjang} \times \text{Panjang feeder} \times (R_1 + jX_1)$$

4. Perhitungan Impedansi Jaringa Ekvivalen

Untuk menghitung nilai impedansi ekuivalen untuk jaringa adalah:

$$Z_{1ekv} = Z_{2Eq} = Z_s + Z_{t1} + Z_{1 \text{ feeder}}$$

$$Z_{0ekv} = Z_{t0} + 3 * R_n + Z_{0 \text{ feeder}} \quad (2.34)$$

5. Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat

- a. Arus gangguan hubung singkat 3 fasa

$$I_{f\phi 3} = \frac{V_{L-N}}{Z_1 + Z_2} \quad (2.35)$$

Dimana nilai dari Z_1 adalah nilai impedansi jaringan ekuivalen.

- b. Arus gangguan hubung singkat 2 fasa

$$I_{fL-L} = \frac{j\sqrt{3} \times V_{L-N}}{Z_1 + Z_2} \quad (2.36)$$

Nilai Z_1 dan nilai Z_2 adalah nilai impedansi jaringan ekuivalen.

- c. Arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah

$$I_{f\phi \text{ ke tanah}} = \frac{V_{L-N}}{2Z_1 + Z_0} \quad (2.37)$$

Nilai Z_1 dan nilai Z_0 adalah nilai impedansi jaringan ekuivalen.

Contoh:

Suatu generator sinkron 15 MVA, 11 kV, 3 fasa dengan netral yang di groundkan mempunyai reaktansi sub transient netral 25 %. Reaktansi urutan negative dan nol 35 % dan 10 % .

Hitunglah, a. Arus sub transient generator apabila terjadi gangguan fasa ke fasa

- b. Tegangan ketika terjadi bila terjadi hubungan singkat fasa ke netral pada terminal generator yang sedang operasi.

Solusi:

Rating daya Output = 15 MVA = 15.000 kVA

Tegangan terminal tanpa beban $V_L = 11 \text{ kV}$

Reaktansi positif subtransient $Z_1 = j25 \% = j 0,25 \text{ pu}$

Reaktansi negative subtransient $Z_2 = j35 \% = j 0,35 \text{ pu}$

Reaktansi urutan nol subtransient $= j10 \% = j 0,1 \text{ pu}$

Harga daya dasar adalah 15.000 kVA dan tegangan dasar 11 kV

Tegangan terminal (E_a) tanpa beban = 1,0 pu

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

$$I_{a1} = \frac{1 + j0}{j0.25 + j0.35 + j0.1} = -1.43 \text{ pu}$$

$$I_a = 3 I_{a1} = 3 \times (-j 1.43) = -j 4.29 \text{ pu}$$

$$\text{Arus dasar} = \frac{\text{dasar.kVA}}{\sqrt{3} \times \text{tegangan.dasar}} = \frac{15.000}{\sqrt{3} \times 11} = 787.3 \text{ A}$$

Arus sub transient pada fase a

$$I_a = -j4.29 \times 787.3 = -j3.377 \text{ A atau } 3.377 < 270^0$$

Komponen simetrical tegangan dari titik gangguan ke ground pada fasa a

$$\begin{aligned} V_{a1} &= E_a - I_{a1} \cdot Z_1 \\ &= 1.0 - (-j1.43) \times (j 0.25) = 0.643 \text{ pu} \end{aligned}$$

$$V_{a2} = -I_{a2} \cdot Z_2 = -(-j1.43) \times (j0.33) = -0.5 \text{ pu}$$

$$V_{a0} = I_{a0} \cdot Z_0 = -(-j1.43) \times (j0.1) = -0.143 \text{ pu.}$$

Tegangan fasa ke ground

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = 0.643 - 0.5 - 0.143 = 0$$

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

$$\begin{aligned} V_b &= 0.643 (-0.5-j0.866) - 0.5 (-0.5+j0.866) - 0.143 \\ &= (-0.125-j0.99) \text{ pu} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} &= 0.643 (-0.5+j0.866) - 0.5 (-0.5-j0.866) - 0.143 \\ &= (-0.125+j0.99) \text{ pu} \end{aligned}$$

Tegangan fasa ke fasa adalah

$$V_{ab} = V_a - V_b = 0 - V_b = 0.215 + j 0.99 = 1.01 < 77.7^0$$

$$V_{bc} = V_b - V_c = (-0.215 - j 0.99) - (-0.215 + j 0.99) = -j1.98 = 1.98 < 270^0$$

$$V_{ca} = V_c - V_a = -0.215 + j 0.99 - 0 = 1.01 < 102.3^0 \text{ pu}$$

Jadi tegangan fasa ke fasa (kV)

$$V_{ab} = 1.01 < 77.7^0 \times \frac{11}{\sqrt{3}} = 6.41 < 77.7^0 \text{ kV}$$

$$V_{bc} = 1.98 < 270^0 \times \frac{11}{\sqrt{3}} = 12.57 < 270^0 \text{ kV}$$

$$V_{ca} = 1.01 < 102.3^0 \times \frac{11}{\sqrt{3}} = 6.41 < 102.3^0 \text{ kV}$$