

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Gardu Induk<sup>(1)</sup>**

Gardu induk merupakan bagian ( sub sistem ) dari sistem transmisi, berfungsi untuk :

1. Mentransformasikan tenaga listrik tegangan tinggi yang satu ke tegangan lainnya ( 500 kV/ 150 kV, 150 kV / 70 kV ) atau dari tegangan tinggi ke tegangan menengah ( 150 kV / 20 kV, 70 kV / 20 kV ).
2. Pengukuran, pengawas operasi serta pengaturan pengamanan sistem tenaga listrik.
3. Pengaturan pelayanan beban ( daya ) ke gardu – gardu induk lainnya melalui tegangan tinggi dan ke gardu gardu distribusi setelah melalui proses penurunan tegangan melalui penyulang ( *feeder* ) tegangan menengah.

#### **2.1.1 Bagian- bagian Gardu Induk**

##### **a. Transformator daya**

Berfungsi untuk menyalurkan besaran daya tertentu dengan merubah besaran tegangannya, Transformator daya dilengkapi dengan trafo pentanahan atau disebut *Neutral Current Transformer* ( NCT ), berfungsi untuk mendapatkan titik neutral dari trafo tenaga.



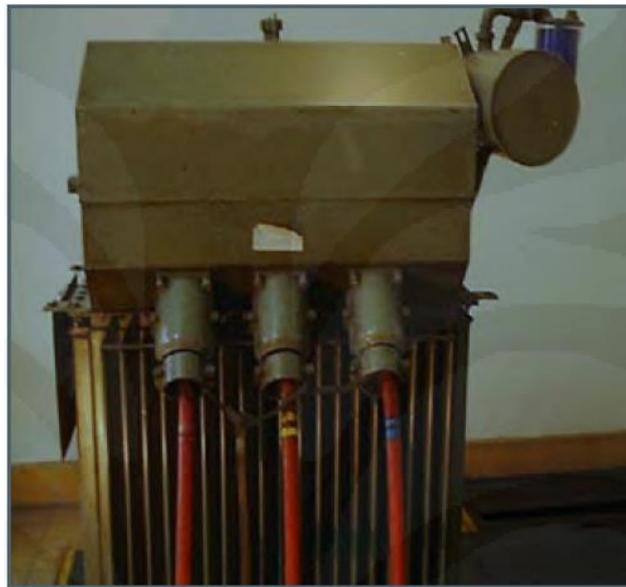
Gambar 2.1 Trafo Daya

---

<sup>1)</sup> Prasetyo, Nur Edi (2009). *Perhitungan Waktu Kerja Rele Karena Gangguan Simpatetik*. Hal. 3

**b. Trafo Pemakaian Sendiri ( PS )**

Trafo PS berfungsi sebagai alat listrik untuk menurunkan tegangan tinggi (biasanya 20 kV) menjadi tegangan rendah ( 220/380 Volt ). Trafo PS ini berguna sebagai sumber AC 3 phase – 220/380 Volt untuk kebutuhan listrik di suatu Gardu Induk misalnya : untuk penerangan, AC-AC, Rectifier dan peralatan lain yang memerlukan tenaga listrik.



Gambar 2.2. Trafo Pemakaian sendiri

**c. Trafo arus ( *Current Transformer* ), berfungsi :**

1. Memperkecil besaran arus listrik ( amper ) pada sistem tenaga listrik menjadi besaran arus untuk sistem pengukuran dan sistem proteksi.
2. Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer yaitu memisahkan instalasi pengukuran dengan proteksi terhadap tegangan tinggi.



Gambar 2.3. Current Transformator.



Kelas Ketelitian CT (IEC 185 /1987)

Untuk menunjukkan ketelitian C.T. dinyatakan dengan kesalahannya. Suatu alat semakin kecil kesalahannya semakin teliti alat tersebut.

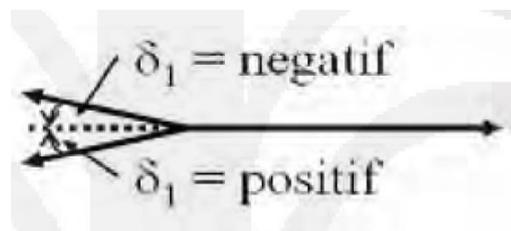
Pada C.T. dikenal 2 macam kesalahan yaitu

**a. Kesalahan perbandingan  $\epsilon$**

$$\epsilon = \frac{(K_T I_S - I_P)}{I_P} * 100\% \quad (2.1)$$

KT : perbandingan transformasi nominal

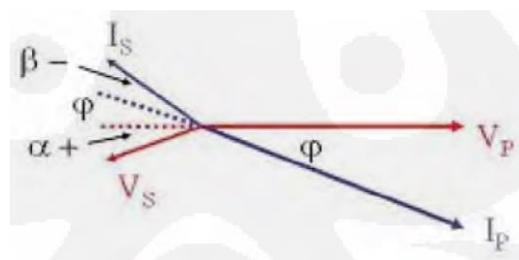
**b. Kesalahan sudut  $\delta$**



Gambar.2.4.Kesalahan Sudut

**Pengaruh kesalahan sudut fase**

Kesalahan sudut fase berpengaruh bila pengukuran menyangkut besaran arus dan tegangan misalnya pengukuran daya aktif maupun reaktif, pengukuran energi dan relai arah.



Gambar.2.5.Pengaruh Kesalahan Sudut

$$P = V_P \times I_P \times \cos \phi$$

$$= K_{PT} \times K_{CT} \times V_S \times I_S \times \cos \phi$$

$$\text{Pembacaan meter} = K_{PT} \times K_{CT} \times V_S \times I_S \times \cos (\alpha + \beta + \phi)$$

Kesalahan pengukuran tergantung kesalahan rasio dan kesalahan sudut

Kelas ketelitian trafo arus untuk meter dapat dilihat pada Tabel 2.1. dan Tabel 2.2



### Batas Kesalahan Trafo Arus<sup>(2)</sup>

Tabel 2.1 Kelas Ketelitian CT

Kelas Ketelitian	+/- % Kesalahan rasio arus pada % dari arus pengenal				+/- % Kesalahan rasio arus pada % dari menit (1/60 derajat)			
	5	20	100	120	5	20	100	120
0.1	0.4	0.2	0.1	0.1	15	8	5	5
0.2	0.75	0.35	0.2	0.2	30	15	10	10
0.5	1.5	0.75	0.5	0.5	90	45	30	30
1.0	3.0	1.5	1.0	1.0	180	90	60	60

### Batas Kesalahan Trafo Arus Khusus

Tabel 2.2 Kelas Ketelitian CT

Kelas Ketelitian	+/- % Kesalahan rasio arus pada % dari arus pengenal					+/- % Kesalahan rasio arus pada % dari menit (1/60 derajat)				
	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0.2	0.75	0.35	0.2	0.2	0.2	30	15	10	10	10
0.5	1.5	0.75	0.5	0.5	0.5	90	45	30	30	30

#### d. Trafo tegangan ( Potential Transformator ), berfungsi :

1. Memperkecil besaran tegangan pada sistem tenaga listrik menjadi besaran tegangan untuk sistem pengukuran dan sistem proteksi.
2. Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer yaitu memisahkan instalasi pengukuran dan proteksi terhadap tegangan tinggi.

#### e. Pemutus Tenaga ( PMT )

PMT merupakan saklar yang dapat digunakan untuk menghubungkan atau memutuskan arus / daya listrik sesuai dengan ratingnya. Pada saat menghubungkan atau menghubungkan arus akan timbul busur listrik, untuk memadamkan busur listrik maka PMT dilengkapi bahan pemadam seperti minyak , gas, dan media vacuum.

<sup>2)</sup> SPLN 60-7 : 1992. Hal. 3-4



Gambar 2.6 PMT dengan pemadam busur api media vacuum

#### f. Pemisah ( PMS )

Pemisah berfungsi sebagai pemisah tegangan pada instalasi tegangan tinggi. Dilihat dari penempatannya dibedakan atas:

1. PMS Rel : Pemisah yang dipasang pada sisi rel
2. PMS Kabel : Pemisah yang dipasang pada sisi kabel.
3. PMS Seksi : Pemisah yang dipasangkan pada rel sehingga rel dapat dipisahkan.
4. PMS Tanah : Pemisah yang dipasangkan pada kabel dan dapat dihubungkan / dibuka ke tanah.

#### g. Sel 20 kV

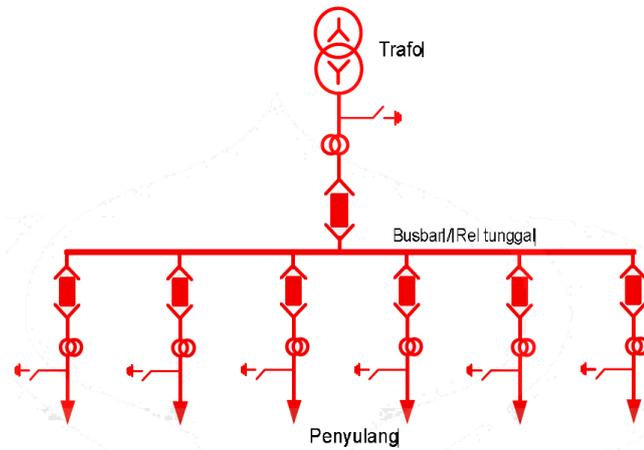
Suatu ruangan bagian dari Gardu induk yang terdiri dari Incoming Trafo dan feeder (penyulang).

#### h. Busbar ( Rel )

Busbar merupakan tempat pertemuan / hubungan incoming trafo dan penyulang ataupun seksi ( pada sisi 20 kV ).

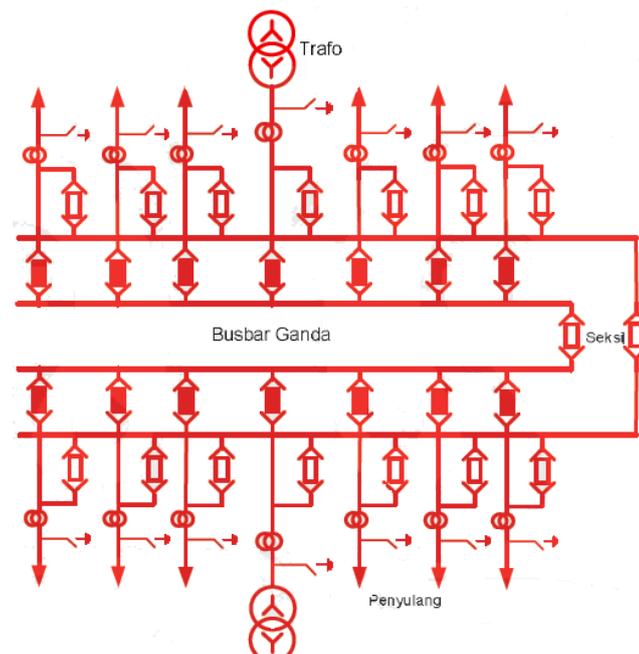
Busbar dibagi menjadi dua sistem :

1. Busbar/ Rel tunggal , semua peralatan dihubungkan dengan satu rel.



Gambar 2.7 Busbar Tunggal

2. Busbar / Rel Ganda, peralatan dihubungkan dengan dua rel.



Gambar 2.8 Busbar Ganda

### i. Penyulang 20 kV

Instalasi pembagi beban sehingga energi listrik dapat tersalurkan sesuai kebutuhan konsumen. Jumlah penyulang disesuaikan dengan kapasitas penyulang dengan bebannya serta kapasitas trafo pemasok yang ada di gardu induk. Setiap penyulang lengkap dengan fasilitas proteksi dan meter terutama meter energy (kwh), sehingga dapat dihitung rendemen dari trafo tersebut.



## 2.2 Pengamanan Sistem Jaringan Tegangan Menengah 20 KV

Dengan bertambahnya kebutuhan listrik dimasyarakat dan usaha meningkatkan mutu pengadaan listrik maka diperlukan kehandalan sistem untuk menjaga jaringan listrik tersebut. Diantaranya memerhatikan pengamanan pada sistem tersebut dengan memaksimalkan keefektifan dari peralatan pengaman itu sendiri.

### 2.2.1 Fungsi Proteksi :

1. Mengurangi atau menghindari kerusakan akibat gangguan pada peralatan yang terganggu atau peralatan yang dilalui arus gangguan.
2. Melokalisir atau mengisolasi daerah menjadi sekecil mungkin sehingga bagian sistem yang tidak terganggu masih dapat memberikan

### 2.2.2. Fungsi relai sebagai pengaman

Relai merupakan peralatan yang direncanakan dapat merasakan ataupun mendeteksi dan mengukur adanya suatu gangguan yang ada di jaringan dan memerintahkan Pemutus Tenaga untuk membuka sehingga dapat memisahkan daerah gangguan itu sendiri.

## 2.3. Relai Arus lebih

Relai arus lebih bekerja jika arus yang mengalir melewati batas tertentu yang telah ditetapkan atau disebut arus kerja / arus pick up. Pada relai arus lebih terdapat beberapa karakteristik waktu yang dikelompokkan menjadi 4, yaitu :

### 1. Relai Arus Lebih Waktu Seketika ( *Instanteous* )

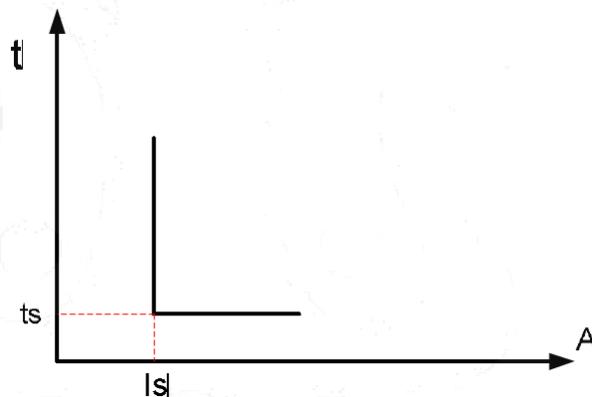
Relai ini akan memberikan perintah kepada PMT pada saat terjadi gangguan bila besar arus gangguan melampaui batas penyetelan (  $I_s$  ) dan jangka waktu kerja mulai pick-up sampai kerja relai sangat singkat ( 20 – 60 milidetik ).



Gambar 2.9 .Karakteristik waktu seketika (waktu – arus)<sup>(3)</sup>

## 2. Relai Arus Lebih Waktu Tertentu ( *Definite* )

Relai akan memberikan perintah kepada PMT saat terjadi gangguan bila besar gangguannya melampaui batas penyetelan (  $I_s$  ) dan jangka waktu kerja relai mulai pick-up sampai diperpanjang dengan waktu tertentu tidak tergantung besarnya arus.

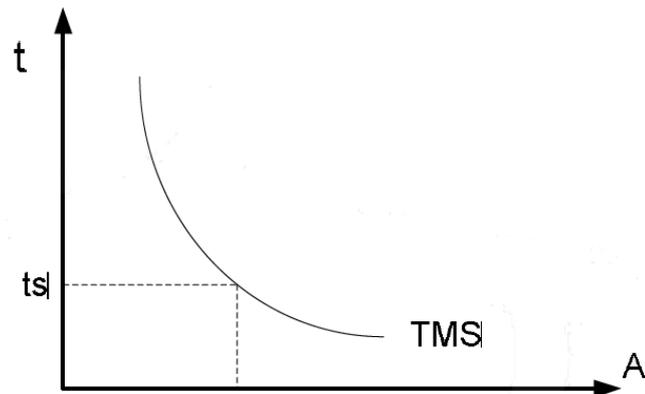


Gambar 2.10.Karakteristik waktu tertentu (waktu – arus)<sup>(3)</sup>

## 3. Relai Arus Lebih Waktu Terbalik ( *Inverse* )

Relai akan memberi perintah kepada PMT pada saat terjadi gangguan, bila besar arus gangguannya melampaui penyetelan (  $I_s$  ) dan jangka waktu relai mulai pick-up sampai kerja relai diperpanjang waktunya berbanding terbalik dengan besarnya arus gangguan.

<sup>3)</sup> Sitompul, Carlos R. dan Rumiasih, 2012. *Praktikum Sistem Proteksi TL 122610*

Gambar 2.11. Karakteristik Waktu Terbalik (waktu – arus)<sup>(3)</sup>

#### 2.4 Kriteria Penyetelan Relai Arus Lebih.

Untuk gangguan antar fasa :

a. Batas minimum

Relai arus lebih tidak boleh bekerja pada beban maksimum, batas penyetelan arus pick up minimum adalah :

$$I_{s \min} = (k_s / k_d) \cdot I_{\text{maks}} \quad (2.2)$$

Dimana :  $I_{s \min}$  = arus setting minimum

$I_{\text{maks}}$  = arus beban maksimum

$K_s$  = faktor keamanan ( 1,1 – 1,2 )

$K_d$  = faktor arus kembali ( arus kembali ), untuk relai dengan karakteristik waktu terbalik ( relai jenis induksi ) dan relai statis mendekati 1,0

Umumnya  $I_s$  disetting 1,2 – 1,5 kali pengenal trafo arus.

b. Batas maksimum

Relai arus lebih selain sebagai pengaman utama juga sebagai pengaman cadangan untuk seksi hilir berikutnya. Sehingga relai ini harus dapat menjangkau ujung seksi hilir berikutnya pada arus gangguan yang minimum.

$$I_{\text{maks}} = k_s \times I_{hs \min} \quad (2.3)$$

Dimana :  $I_{\text{maks}}$  = penyetelan arus kerja maksimum.

$k_s$  = faktor keamanan dalam hal ini 0,7 – 0,8.

$I_{hs \min}$  = arus gangguan 2 fasa pada pembangkitan minimum satu



seksi dihilirnya.

c. Penyetelan waktu kerja

Pertimbangan penyetelan waktu diusahakan relai secara keseluruhan bekerja cepat dan selektif.

## 2.5 Gangguan Pada Jaringan Listrik Tegangan Menengah

Gangguan – gangguan yang biasa terjadi pada jaringan listrik tegangan menengah bisa disebabkan oleh beberapa faktor, salah satunya yaitu komponen – komponen simetris. Adapun komponen-komponen simetris dapat dijelaskan lagi menjadi beberapa bagian diantaranya :

### 2.5.1 Sintesis Fasor Tak Simetris dari Komponen-Komponen Simetrisnya

Tiga fasor tak seimbang dari sistem tiga fasa dapat di uraikan menjadi tiga sistem fasor yang seimbang. Himpunan seimbang komponen tersebut 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. Dalam memecahkan permasalahan dengan menggunakan komponen simetris ketiga fasa dari sistem dinyatakan sebagai a, b, c dengan cara yang demikian sehingga urutan fasa tegangan dan arus dalam sistem adalah abc. 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  $V_a, V_b, V_c$ . Ketiga himpunan komponen simetris dinyatakan dengan subskrip tambahan 1 untuk komponen urutan-positif, 2 untuk, komponen urutan-negatif, dan 0



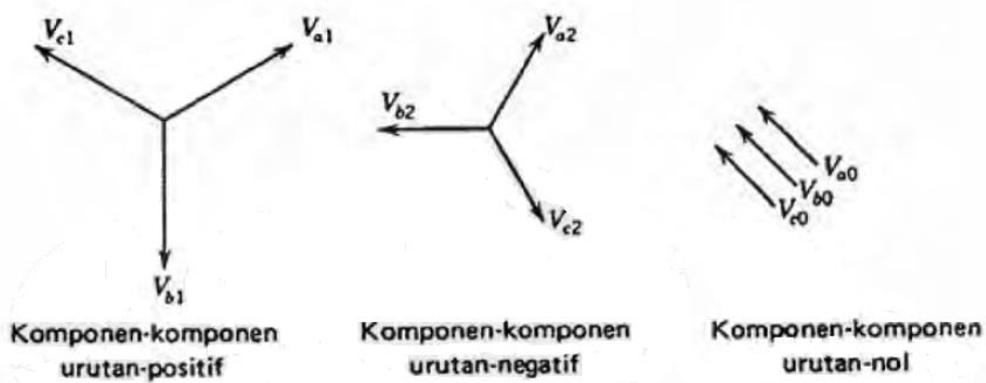
untuk komponen urutan nol. Komponen urutan positif dari  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  adalah  $V_{a1}$ ,  $V_{b1}$ ,  $V_{c1}$ . Demikian pula, komponen urutan negatif adalah  $V_{a2}$ ,  $V_{b2}$ ,  $V_{c2}$ , sedangkan komponen urutan nol adalah  $V_{a0}$ ,  $V_{b0}$ ,  $V_{c0}$ . Karena setiap fasor tak seimbang, yang asli adalah jumlah komponen, fasor asli yang dinyatakan dalam suku-suku komponennya adalah

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (2.4)$$

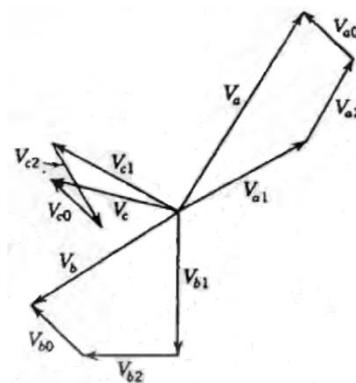
$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad (2.5)$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad (2.6)$$

Sintesis himpunan tiga fasor tak seimbang dari ketiga himpunan komponen simetris ditunjukkan oleh gambar 2.12



Gambar 2.12 Tiga himpunan fasor seimbang yang merupakan komponen simetris dari tiga fasor tak-seimbang



Gambar.2.13 Penjumlahan secara grafis komponen-komponen pada Gambar 2.12 untuk mendapatkan tiga fasor tak seimbang



### 2.5.2 Operator-Operator

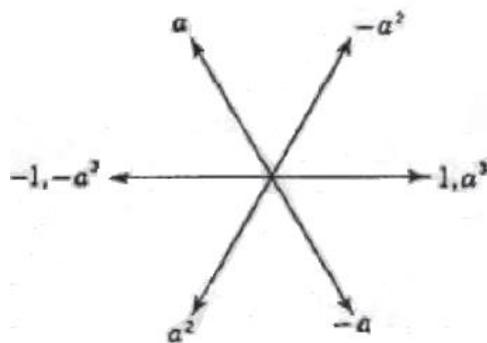
Karena adanya pergeseran fasa pada komponen simetris tegangan dan arus dalam sistem tiga-fasa, akan sangat memudahkan bila mempunyai metoda penulisan untuk menunjukkan perputaran fasor dengan  $120^\circ$ . Hasil-kali dua buah bilangan kompleks adalah hasil-kali besarannya dan jumlah sudut fasanya. Jika 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 mengenal 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 pada kesimpulan bahwa  $j \times j$  menyebabkan perputaran sebesar  $180^\circ$ , dan karena adalah bilangan kompleks yang besarnya satu dan sudutnya  $120^\circ$  dan didefinisikan sebagai

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

Jika operator  $a$  dikenakan pada fasor dua kali berturut-turut, maka fasor itu akan diputar dengan sudut sebesar  $240^\circ$ . Untuk pengenaan 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 2.14 Diagram fasor berbagai pangkat dari operator a

### 2.5.3 Simetris Fasor Tak Simetris

Pada Gambar 2.13 sintesis tiga fasor tak simetris dari tiga himpunan fasor simetris. Sintesis itu telah dilakukan sesuai dengan Persamaan (2.4) sampai dengan (2.6). Menentukan cara menguraikan ketiga fasor tak simetris diatas menjadi komponen simetrisnya. Dengan memperhatikan banyaknya kuantitas yang diketahui dapat dikurangi dengan menyatakan masing- masing komponen  $V_b$ ,  $V_c$ , sebagai hasil kali fungsi operator a dan komponen  $V_a$ . Dengan menggunakan pedoman gambar 2.12. hubungan dibawah ini dapat diperiksa kebenarannya

$$\begin{aligned} V_{b1} &= a^2 V_{a1} & V_{c1} &= a^2 V_{a1} \\ V_{b2} &= a^2 V_{a2} & V_{c2} &= a^2 V_{a2} \\ V_{b0} &= a^2 V_{a0} & V_{c0} &= a^2 V_{a0} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Dengan mengulangi Persamaan (2.4) dan memasukkan Persamaan (2.7) ke dalam Persamaan (2.5) dan (2.6) dihasilkan

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (2.8)$$

$$V_b = V^2_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (2.9)$$

$$V_c = V_{a1} + V^2_{a2} + V_{a0} \quad (2.10)$$

atau dalam bentuk matriks

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Contoh:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Maka dapat dibuktikan

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (2.13)$$



dan dengan memperkalikan kedua sisi Persamaan (2.11) dengan  $A \exp -1$  diperoleh:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

menunjukkan bahwa bagaimana menguraikan tiga fasor tak simetris menjadi komponen simetrisnya. Hubungan ini penting sehingga dapat ditulis masing-masing persamaan tersebut dalam bentuk yang biasa. Dari Persamaan 2.14, dapat diperoleh:

$$V_{a0} = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \quad (2.15)$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2 V_c) \quad (2.16)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (2.17)$$

Persamaan (2.15) menunjukkan bahwa tidak akan ada komponen urutan-nol jika jumlah fasor tak seimbang itu sama dengan nol. Karena jumlah fasor tegangan antar saluran pada sistem tiga- fasa selalu nol, maka komponen urutan-nol tidak pernah terdapat dalam tegangan saluran itu, tanpa memandang besarnya ketidak seimbangannya. Jumlah ketiga fasor tegangan saluran ke netral tidak selalu harus sama dengan nol, dan tegangan ke netral dapat mengandung komponen urutan-nol.

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \quad (2.18)$$

$$I_b = a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0} \quad (2.19)$$

$$I_c = a I_{a1} + a^2 I_{a2} + I_{a0} \quad (2.20)$$

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (2.21)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(I_a + a I_b + a^2 I_c) \quad (2.22)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c) \quad (2.23)$$

Dalam sistem tiga- fasa, jumlah arus saluran sama dengan arus  $I_n$  dalam jalur kembali lewat netral. Jadi,

$$I_a + I_b + I_c = I_n \quad (2.24)$$



Dengan membandingkan Persamaan (2.21) dan (2. 24) diperoleh

$$I_n = 3I_{a0} \quad (2.25)$$

Jika tidak ada jalur yang melalui netral dari sistem tiga fasa adalah nol dan arus saluran tidak mengandung komponen urutan-no 1. Suatu beban dengan hubungan tidak menyediakan jalur ke netral, dan karena itu arus saluran yang mengalir ke beban yang dihubungkan tidak dapat mengandung komponen urutan nol.

#### 2.5.4 Daya dengan Komponen Simetris sebagai Sukunya

Jika komponen simetris arus dan tegangan d iketahui, maka daya yang terpakai pada rangkaian tiga-fasa dapat langsung dihitung dari komponen tersebut. Peragaan pernyataan ini merupakan contoh dari manipulasi matriks komponen simetris. Daya kompleks s total yang mengalir ke dalam rangkaian tiga-fasa melalui tiga saluran a, b, c adalah

$$S = P + jQ = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* \quad (2.26)$$

Dimana  $V_a, V_b, V_c$  adalah tegangan ke netral pada terminal  $I_a, I_b$ , serta  $I_c$ . adalah arus yang mengalir ke dalam rangkaian pada ketiga saluran tersebut. Di sini, sambungan netral boleh ada atau diabaikan. Dalam notasi matriks

$$S = [V_a \ V_b \ V_c] \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^* = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^* \quad (2.27)$$

di mana pasangan (conjugate) matriks diartikan terdiri dari beberapa unsur yang merupakan pasangan unsur yang bersesuaian pada matriks aslinya. Untuk memperlihatkan komponen simetris tegangan dan arus, dapat digunakan Persamaan (2.11) dan (2.12) untuk mendapatkan

$$S = [AV]^T [AI]^* \quad (2.28)$$

Dimana

$$V = \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad \text{dan} \quad I = \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$



Aturan pembalikan (*reversal rule*), pada aljabar matriks menyatakan bahwa transpose hasil-kali dua buah matriks sama dengan hasil-kali *transpose-transpose* matriks tersebut dengan urutan yang terbalik. Jadi sesuai dengan aturan ini

$$[AV]^T = V^T A^T \quad (2.30)$$

Dan juga

$$S = V^T A^T [AI]^* = V^T A^T A^* I^* \quad (2.31)$$

Dengan memperhatikan bahwa  $A = A$  dan  $a$  dan  $a^*$  adalah pasangan, maka didapat

$$S = [V_{a0} \ V_{a1} \ V_{a2}] \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}^* \quad (2.32)$$

atau, karena  $A = A^*$  sama dengan

$$3 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.333)$$

Jadi, daya kompleks adalah

$$S = 3[V_{a0} \ V_{a1} \ V_{a2}] \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}^* \quad (2.34)$$

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

### 2.5.5 Impedansi Seri Tak Simetris

Jika ada induktansi bersama (tidak ada gandengan) antara ketiga impedansi tersebut jatuh tegangan pada bagian sistem yang diperlihatkan itu diberikan oleh persamaan matriks :

$$\begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{bb'} \\ V_{cc'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

dan dengan suku-suku komponen simetris tegangan dan arus

$$A \begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{bb'} \\ V_{cc'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} A \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

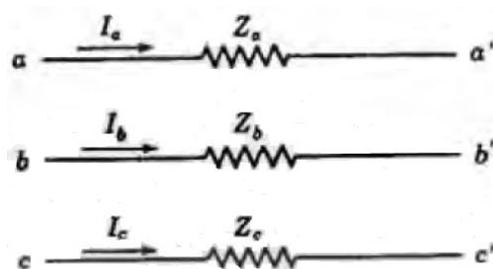


di mana A adalah matriks yang didefinisikan dengan Persamaan (2.12). Dengan memperkalikan kedua sisi persamaan itu dengan A-1 dihasilkan persamaan matriks

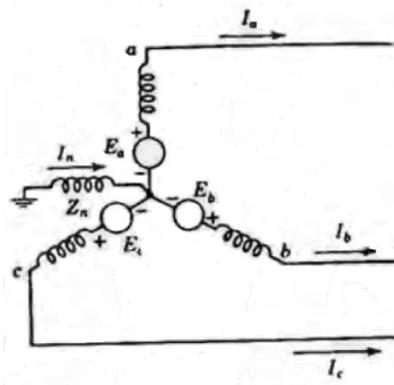
$$\begin{aligned}
 V_{aa'1} &= \frac{1}{3}I_{a1}(Z_a + Z_b + Z_c) + \frac{1}{3}I_{a2}(Z_a + a^2Z_b + aZ_c) + \\
 &\quad \frac{1}{3}I_{a0}(Z_a + aZ_b + a^2Z_c) \\
 V_{aa'2} &= \frac{1}{3}I_{a1}(Z_a + aZ_b + a^2Z_c) + \frac{1}{3}I_{a2}(Z_a + Z_b + Z_c) + \\
 &\quad \frac{1}{3}I_{a0}(Z_a + a^2Z_b + aZ_c) \\
 V_{aa'0} &= \frac{1}{3}I_{a1}(Z_a + a^2Z_b + aZ_c) + \frac{1}{3}I_{a2}(Z_a + aZ_b + a^2Z_c) + \\
 &\quad \frac{1}{3}I_{a0}(Z_a + Z_b + Z_c)
 \end{aligned} \tag{2.37}$$

Jika impedansi-impedansi dibuat sama (yaitu bila  $Z_a = Z_b = Z_c$ ), Persamaan 2.35 menjadi

$$V_{aa'1} = I_{a1}Z_a \quad V_{aa'2} = I_{a2}Z_a \quad V_{aa'0} = I_{a0}Z_a \tag{2.38}$$



Gambar 2.15 Bagian sistem tiga-fasa yang menunjukkan tiga impedansi seri yang tidak sama



Gambar 2.16 Diagram rangkaian suatu generator tanpa-beban yang ditanahkan melalui suatu reaktansi. Emf masing-masing fasa ini adalah  $E_a$ ,  $E_b$ ,  $E_c$



Jadi dapat disimpulkan 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.

### 2.5.6 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 *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  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$ ,  $I_{a0}$ . diantarhubungkan untuk menggambarkan berbagai keadaan gangguan tak seimbang.



### 2.5.7 Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat<sup>(4)</sup>

Seperti yang telah diketahui bahwa gangguan hubung singkat mungkin terjadi pada setiap titik pada jaringan distribusi. Dalam hal ini kita perlu menghitung besarnya arus gangguan hubung singkat, sehingga bila gangguan hubung singkat itu benar-benar terjadi didalam sistem, dapat di ketahui terlebih dahulu besar arus gangguannya dan arus gangguan yang dihitung dapat juga di pergunakan untuk *mensetting* peralatan proteksi.

Gangguan hubung singkat pada sistem 3 fase, adalah :

- Gangguan 3 fase
- Gangguan 2 fase
- Gangguan 2 fase atau 1 fase ke tanah.

Arus gangguan hubung singkat 3 fase, 2 fase, 2 fase ke tanah atau 1 fase ke tanah, arus gangguannya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan umum (Hukum Ohm), yaitu:

$$I = \frac{E}{Z} \text{ Amp} \quad (2.38)$$

Dimana:

I = Arus yang mengalir pada hambatan Z (Amp)

E = Tegangan Sumber (volt)

Z = Impedansi jaringan, nilai equivalen dari seluruh impedansi di dalam jaringan dari sumber tegangan sampai titik gangguan (ohm).

Dengan mengetahui besarnya tegangan sumber dan nilai impedansi tiap komponen jaringan, serta bentuk konfigurasi didalam sistem, maka besarnya arus gangguan hubungan singkat dapat dihitung.

Lebih lanjut besarnya arus yang mengalir pada tiap komponen jaringan juga dapat dihitung dengan bantuan rumus tersebut. Yang membedakan antara gangguan hubungan singkat 3 fase, 2 fase, 2 fase ketanah atau 1 fase ketanah adalah

---

<sup>4)</sup> Pribadi, K & Wahyudi, SN. *Perhitungan Setting dan Koordinasi Proteksi Sistem Distribusi*. Hal. 15



impedansi yang terbentuk sesuai dengan macam gangguan hubung singkat itu sendiri, seperti ditunjukkan berikut ini:

Z untuk gangguan 3 fase	$Z = Z_1$
Z untuk gangguan 2 fase	$Z = Z_1 + Z_2$
Z untuk gangguan 2 fase ketanah	$Z = Z_1 + \frac{Z_2 Z_0}{Z_1 + Z_0}$
Z untuk gangguan 1 fase ketanah	$Z = Z_1 + Z_2 + Z_0$

Dimana:

$Z_1$  = Impedansi urutan positif

$Z_2$  = Impedansi urutan negatif

$Z_0$  = Impedansi urutan nol

### 2.5.8 Reaktansi Pada Transformator Tenaga

*Reaktansi urutan positif ( $X_1$ )*

Reaktansi urutan positif tercantum pada papan nama (nameplate) transformator, besarnya tergantung dari kapasitas transformator tenaga dimana  $X_{T1} = X_{T2}$

*Reaktansi urutan nol ( $X_{T0}$ )*

Reaktansi urutan negatif, diperoleh dari data Transformator tenaga itu sendiri, yaitu melihat adanya belitan **delta** sebagai belitan ketiga dalam transformator tenaga tersebut.

- Untuk transformator tenaga dengan hubungan belitan  $\nabla Y$ , dimana kapasitas belitan delta ( $\nabla$ ) sama besar dengan kapasitas belitan Y maka  $X_{T0} = X_{T1}$   
Misal:  $X_{T1} = 4$  ohm, nilai  $X_{T0} = X_{T1} 4$  ohm.
- Untuk transformator tenaga dengan hubungan belitan  $Yy\nabla$ , dimana kapasitas belitan Delta ( $\nabla$ ) sepertiga dari kapasitas belitan Y (belitan yang dipakai untuk menyalurkan daya, sedangkan belitan delta tetap ada didalam transformator, tetapi tidak dikeluarkan kecuali satu terminal delta untuk ditanahkan), maka nilai  $X_{T0} = 3 * X_{T1}$ .



Misal:  $X_{T1} = 4 \text{ ohm}$ , nilai  $X_{T0} = 3 * 4 \text{ ohm} = 12 \text{ ohm}$ .

- Untuk transformator tenaga dengan hubungan belitan YY dan tidak mempunyai belitan delta didalamnya, maka besarnya  $X_{T0}$  berkisar antara 9 s/d  $14 * X_{T1}$ .

Misal:  $X_{T1} = 4 \text{ ohm}$  dan dipilih  $X_{T0} = 10 * X_{T1}$  maka besar  $X_{T0}$  sebagai berikut:  $X_{T0} = 10 * 4 \text{ ohm} = 40 \text{ ohm}$

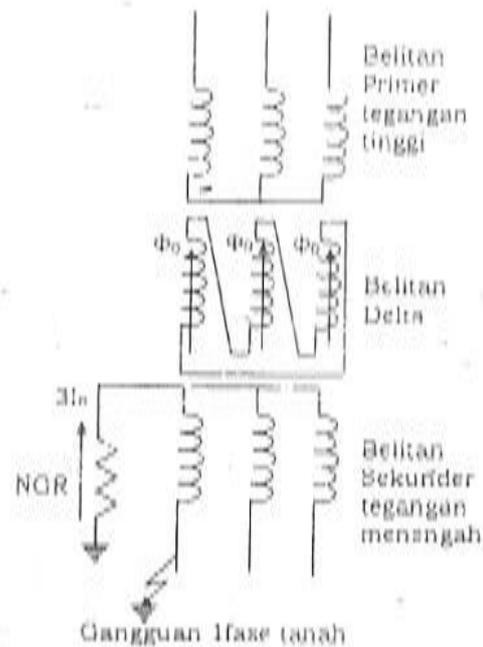
Nilai impedansi dari transformator tenaga yang tercantum pada nameplate transformator tenaga adalah nilai transformator tenaga saat di hubung singkat (shortcut circuit) disisi sekunder, disisi primer terdapat kebocoran fluks (flux leakage) yang dipresentasikan dalam bentuk reaktansi bocor (reactance leakage), dalam hal ini nilai tahanan murni tidak ada, jadi impedansi transformator tenaga adalah nilai reaktansinya (X) yang nilainya dalam persen (%).

Missal: transformator tenaga kapasitas 30 MVA, tegangan 150/20 kV dan impedansi = 10 % (nilai ini tercantum pada nameplate). Jika diperhitungkan dalam satuan ohm (sisi 20kV), adalah:

$$X_T = 10 \% \times \frac{20^2}{30} = 1,33 \text{ ohm}$$

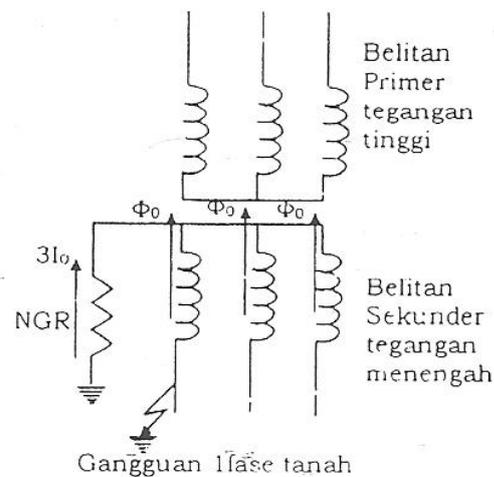
### **Penjelasan Reaktansi urutan Nol Transformator Tenaga:**

- Bila transformator tenaga mempunyai belitan delta: (lihat gambar 2.16). saat terjadi gangguan satu fase ketanah, Arus urutan Nol ( $3I_0$ ) mengalir pada tiap fasenya pada inti besi akan membentuk fluks ( $\Phi_0$ ), arus urutan Nol yang mengalir pada tiap fasenya menimbulkan fluks ( $\Phi_0$ ) pada inti besi, fluks ini akan berputar di belitan delta, sehingga fluks yang timbul, tidak akan berinteraksi dengan minyak trafo, yang dapat memperkecil besarnya nilai reaktansi urutan Nol. Nilainya tergantung dari besarnya kapasitas delta atau  $X_{T0} = 3 * X_{T1}$



Gambar 2.17 Rangkaian transformator tenaga  $Yy\Delta$  dengan belitan delta

- Jika transformator tenaga tidak mempunyai belitan delta lihat gambar II.2 maka fluks yang timbul karena adanya arus gangguan hubung singkat 1 fase ketanah, akan mengalir melalui minyak trafo sampai ke dinding transformator tenaga sehingga reluktansi dari minyak lebih besar daripada inti besi akibatnya reaktansi belitan menjadi lebih besar, nilainya bisa antara  $X_{T0} = 9 \text{ s/d } 14 * X_{T1}$

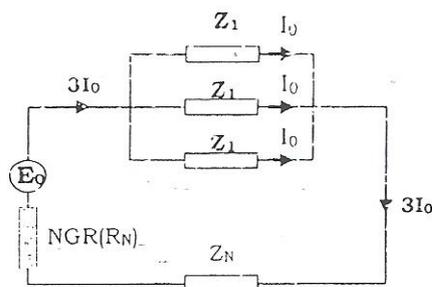


Gambar 2.18 Rangkaian belitan transformator tenaga YY (tanpa belitan delta)



### Penjelasan $3R_N$ dan $Z_0$ jaringan tenaga listrik

Saat terjadi gangguan satu fase ketanah akan timbul arus urutan  $N_0$  yang mengalir pada penghantar dan selanjutnya mengalir ke tanah seperti terlihat pada gambar 2.18, tegangan  $E_0$  dapat direpresentasikan sebagai berikut:



Gambar 2.19 Rangkaian arus  $3I_0$

$$E_0 = I_0 Z_1 + 3I_0 (Z_N + R_N)$$

$$E_0 = I_0 (Z_1 + 3Z_N + 3R_N) \quad (2.39)$$

$$\underline{E_0} = Z_1 = Z_1 + 3Z_N + 3R_N$$

Dari persamaan (II.2) diatas, Nilai  $(Z_1 + 3Z_N)$  adalah Impedansi penghantar dari tanah,  $3R_N$  adalah tahanan NGR.

Jadi dalam perhitungan arus gangguan hubung singkat, saat gangguan hubung singkat 1 fase ketanah di jaringan distribusi terdapat nilai  $3R_N$ .

#### 2.5.9 Impedansi Jaringan Distribusi

Perhitungan impedansi jaringan distribusi 20kV adalah impedansi (ohm/km) yang diperoleh dari tabel (lihat lampiran I) besarnya tergantung luas penampang, nilai impedansi dalam ohm tergantung dari panjang kawat.

*Misal:* suatu jaringan distribusi mempunyai  $Z = 0,250 + j 0,345$  ohm/km, dimana nilai 0,250 adalah sebesar resistansi ( $R$ ) dalam ohm/km dan  $j 0,345$  adalah nilai reaktansi ( $X_L$ ) dalam ohm/km.

Karena dalam hubungan untuk memperoleh arus gangguan, dimana titik gangguan terjadi di jaringan 20 kV, maka impedansi ini dikalikan dengan panjang penyulang, sebagai berikut:



Panjang jaringan 10 km (jaringan terpanjang dari jaringan distribusi), maka impedansi jaringan, sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Z &= (0,250 + j0,345) \text{ ohm/km} \times 10\text{km} \\ &= (2,5 + j3,45) \text{ ohm.} \end{aligned}$$

### Perhitungan Koordinasi Relai Arus Lebih

Pada tahap berikutnya, hasil perhitungan arus gangguan Hubung Singkat, dipergunakan untuk menentukan nilai setelah arus lebih, terutama nilai setelah Tms (*time multiple setting*), dan Relai Arus lebih dengan karakteristik jenis inverse. Disamping itu setelah nilai setelan Relai diperoleh, nilai-nilai arus gangguan hubung singkat pada setiap lokasi gangguan yang diasumsikan, dipakai untuk memeriksa relai Arus Lebih itu, apakah masih dapat dinilai selektif atau nilai setelan harus dirubah kenilai lain yang memberikan kerja Relai yang lebih selektif, atau didapatkan kerja selektifitas yang optimum (Relai bekerja tidak terlalu lama tetapi menghasilkan selektifitas yang baik).

Sedangkan untuk setelan arus dari Relai Arus lebih dihitung berdasarkan arus beban, yang mengalir di penyulang atau incoming feeder, artinya:

1. Untuk relai arus lebih yang terpasang di Penyulang keluar (*outgoing feeder*), dihitung berdasarkan arus beban maksimum (beban puncak) yang mengalir di penyulang tersebut.
2. Untuk relai arus lebih yang terpasang di penyulang masuk (Incoming feeder), dihitung berdasarkan arus nominal transformator tenaga.

Sesuai British Standard untuk:

1. **Relai *inverse* biasa diset sebesar 1,05 s/d 1,3 x I<sub>beban</sub>**
2. **Sedangkan Relai *Definite* diset sebesar 1,2 s/d 1,3 x I<sub>beban</sub>**

Persyaratan lain, yang harus dipenuhi adalah penyetelan waktu minimum dari Relai arus lebih (terutama di penyulang) **tidak lebih kecil dari 0,3 detik**. Pertimbangan ini diambil agar relai tidak sampai trip lagi, akibat arus Inrush



current dari transformator distribusi yang memang sudah tersambung di jaringan distribusi, sewaktu PMT Penyulang tersebut di operasikan.

**Penyetelan *Ground Fault Relay (GFR)*** dapat di setel milai 6 % s/d 12 % x arus gangguan hubung singkat 1 fase terjauh/terkecil atau = 6 % s/d 12 % x  $I_{F1\text{fae terkecil}}$ , nilai ini untuk mengantisipasi jika penghantar tersentuh pohon dimana tahanan pohon besar (sesuai standard – 26 ohm) yang dapat memperkecil besarnya arus gangguan hubung singkat 1 fase ketanah.

### **Setelan *Time Multiple Setting (Tms)***

Setelah time multiple setting (Tms) dan setelan waktu Relai pada jaringan distribusi mempergunakan standard Inverse, yang dihitung mempergunakan rumus kurva waktu Vs arus, dalam hal ini juga diambil persamaan kurva arus waktu dari standard British, sebagai berikut:

$$T_{ms} = \frac{\left[ \left[ \frac{I_{Fault}}{I_{Set}} \right]^{\alpha} - 1 \right]}{\beta} \quad (2.40)$$

Dari

$$t = \frac{\beta \times T_{ms}}{\left[ \frac{I_{Fault}}{I_{Set}} \right]^{\alpha} - 1} \quad (2.41)$$

Dimana:

t = Waktu trip (detik).

Tms = Time multiple setting (tanpa satuan)

$I_{FAULT}$  = besarnya arus gangguan hubung singkat (amp)

- Setelah Over Current Relay (inversee), diambil arus gangguan hubung singkat terbesar.
- Setelah Ground Fault Relay (inversee) diambil arus gangguan hubung singkat terkecil.

$I_{SET}$  = Besarnya arus setting sisi primer (Amp)



- Setelah Over Current Relay (Inverse) diambil (BS)  $1,05 \text{ s/d } 1,3 \times I_{\text{BEBAN}}$
- Setelah Ground fault relay (inverse) diambil  $6\% \text{ s/d } 12\% \times$  arus gangguan hubung singkat 1 fase terkecil.

$\alpha, \beta =$  Konstanta

Tabel 2.3 Faktor  $\alpha$  dan  $\beta$  tergantung pada kurva arus vs waktu:

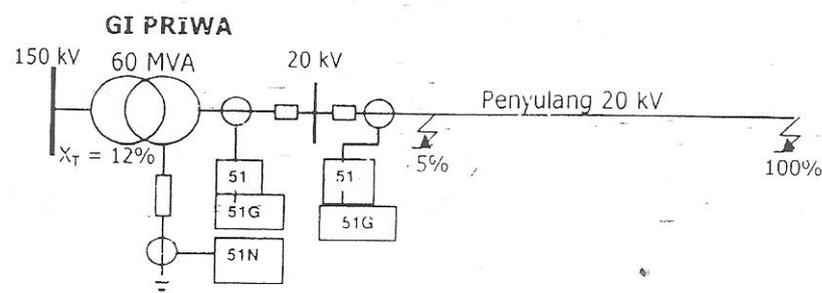
Nama Kurva	$\alpha$	$\beta$
<i>Standard Inverse</i>	0,02	0,14
<i>Very Inverse</i>	1	13,2
<i>Extremely Inverse</i>	2	80
<i>Long Inverse</i>	1	120

## 2.6 Aplikasi Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat dan Setelan Relai

Diantara aplikasi perhitungan arus gangguan hubung singkat dan setelan relai yang akan di bahas disini, kami memfokuskan perhitungan pada koordinasi proteksi antara incoming dan outgoing feeder tanpa gardu hubung.

### 2.6.1 Koordinasi proteksi antara incoming dan outgoing feeder

Sebagai contoh perhitungan arus gangguan hubung singkat dari sistem distribusi 20kV yang dipasang dari suatu gardu Induk seperti terlihat pada Gambar 2.19 dan uraiannya sebagai berikut:



Gambar 2.20 Pasokan daya dari gardu induk distribusi



Data yang diperlukan untuk perhitungan arus gangguan hubung singkat dan koordinasi relai (OCR dan GFR), adalah:

- $MVA_{\text{shortcircuit}}$  dibus 150kV
- Data trafo:
  - Kapasitas transformator tenaga (MVA)
  - Reaktansi urutan positif transformator tenaga (%)
  - Ratio tegangan
  - Mempunyai belitan delta atau tidak
  - Ratio CT di penyulan masuk (Incoming feeder)
  - Neutral Grounding Resistance (NGR) yang terpasang
- Impedansi urutan positif, negatif dan Nol penyulang
- Arus beban di penyulang
- Ratio CT di penyulang

### 2.6.2 Perhitungan Impedansi

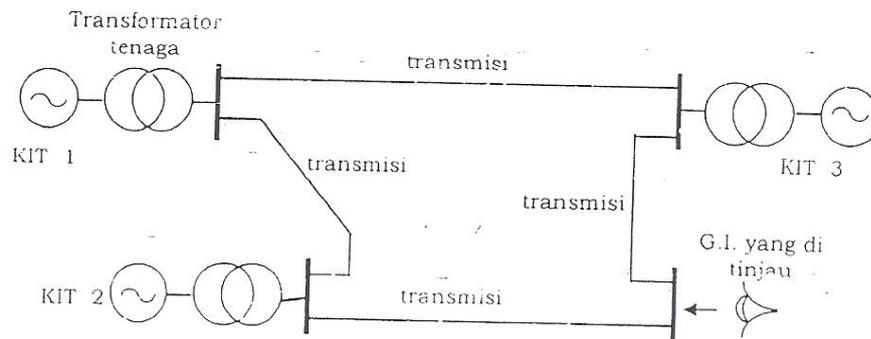
Data hubung singkat di bus 150kV Gardu Induk PRIWA dimisalkan sebesar 4547 MVA,  $MVA_{\text{sc}}$  diperoleh impedansi short circuit, sebagai berikut:

$$X_{\text{SC}} = \frac{kV^2}{MVA} \quad (2.42)$$

Dengan menggunakan persamaan 2.42 diperoleh:

$$X_{\text{SC}} = \frac{150^2}{4547} = 4,95 \text{ ohm}$$

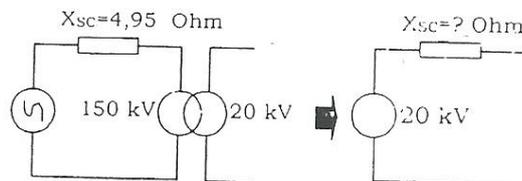
Perlu diingat bahwa impedansi sumber ini adalah nilai tahanan pada sisi 150 kV, yang mewakili semua unit pembangkit beroperasi. Adapun reaktansi (impedansi) sumber mencakup impedansi sumber pembangkit, impedansi transformator tenaga di Pusat listrik dan impedansi transmisi, seperti terlihat pada gambar 2.21 dibawah ini.



Gambar 2.21 Interkoneksi antara Pusat Listrik

Karena arus gangguan hubung singkat yang akan dihitung adalah gangguan hubung singkat disisi 20 kV (sebagai dasar perhitungan dalam perhitungan satuan listrik pada tegangan 20 kV), maka impedansi sumber tersebut harus dikonversikan dulu ke sisi 20 kV, sehingga perhitungan arus gangguan hubung singkatnya nanti sudah mempergunakan tegangan 20 kV (sebagai sumber tidak lagi menggunakan tegangan 150 kV, karena semua impedansi sudah dikonversikan ke sistem tegangan 20 kV).

Untuk mengkonversikan impedansi yang terletak disisi 150 kV kesisi 20 kV, dilakukan dengan cara sebagai berikut.



Gambar 2.22 Transformasi impedansi transformator tenaga

Daya transformator tenaga antara sisi primer dan sekunder sama, maka:

$$MVA_{150\text{ kV}} = MVA_{20\text{ kV}}$$

$$\frac{kV_1^2}{Z_1} = \frac{kV_2^2}{Z_2}$$

$$Z_2 = \frac{kV_2^2}{Z_2} \times Z_1 \quad (2.43)$$

Dimana:

$kV_1$  = Tegangan transformator tenaga sisi primer (kV)

$kV_2$  = Tegangan transformator tenaga sisi sekunder (kV)



$Z_1$  = Impedansi transformator tenaga sisi primer (Ohm)

$Z_2$  = Impedansi transformator tenaga sisi sekunder (Ohm)

### 2.6.3 Perhitungan Reaktansi Transformator Tenaga

Seperti yang telah kita ketahui bahwa transformator tenaga memiliki reaktansi urutan positif dan negatif serta reaktansi urutan nol. Maka cara menghitung reaktansi tersebut adalah dengan cara sebagai berikut:

- Reaktansi urutan positif dan reaktansi urutan negatif

Dimana  $X_{T1} = X_{T2}$

Dimisalkan reaktansi transformator tenaga 60 MVA adalah sebesar 12%. Untuk memperoleh nilai impedansi dalam ohm, dihitung dengan cara sebagai berikut. Cari terlebih dahulu nilai ohm pada 100% untuk kapasitas transformator tenaga 60 MVA pada sisi 20 kV, dengan mempergunakan persamaan (2.42), diperoleh :

$$X_{T \text{ (pada 100\%)}} = \frac{kV^2}{MVA} = \frac{20^2}{60} = 6,66 \text{ ohm}$$

Nilai reaktansi transformator tenaga ini adalah nilai reaktansi urutan positif dan negatif ( $X_{T1} = X_{T2}$ ), jadi:

$$\begin{aligned} X_{T1} &= X_{T1} (\%) \times X_T \text{ (ohm)} & (2.44) \\ &= 12\% \times 6,66 \text{ ohm} \\ &= 0,8 \text{ ohm.} \end{aligned}$$

- Reaktansi urutan nol ( $X_{T0}$ )

Pada perhitungan reaktansi urutan nol transformator tenaga, perlu dilihat, apakah ada belitan delta atau tidak, dalam aplikasi ini transformator tenaga mempunyai belitan delta, maka nilai reaktansi urutan nol, sebagai berikut:

$$\begin{aligned} X_{T0} &= 3 \times X_{T1} \\ &= 3 \times 0,8 \text{ ohm} \\ &= 2,4 \text{ ohm} \end{aligned}$$



#### 2.6.4 Perhitungan Impedansi Penyulang

Impedansi penyulang yang akan dihitung disini tergantung dari besarnya impedansi per km (ohm/km) dari penyulang yang dihitung, dimana nilainya ditentukan dari jenis penghantar, luas penampang dan panjang jaringan SUTM atau jaringan SKTM. Dalam aplikasi, penghantar 20 kV menggunakan kabel tanah XLPE 3 x 240 mm<sup>2</sup>, panjang 10 km.

$$Z = (R + jX) \text{ ohm/km}$$

$$Z_1 = Z_2 = (0,125 + j0,097) \text{ ohm/km}$$

$$Z_0 = (0,275 + j0,290) \text{ ohm/km}$$

Maka dengan demikian untuk mencari impedansi penyulang urutan positif dan negatif dapat di cari impedansi per persen panjang penyulang dengan rumus:

$$Z_1 \text{ dan } Z_2 \text{ 25\% panjang penyulang} = 0,25 * \text{panjang saluran (l)} * Z_1 \quad (2.45)$$

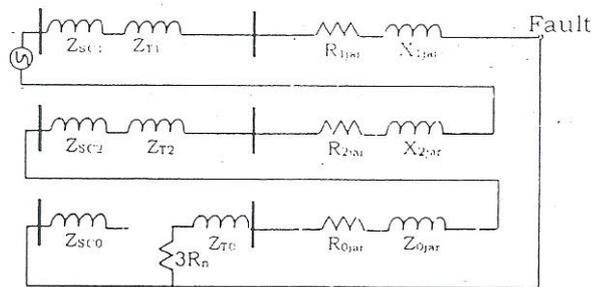
Sedangkan untuk mencari impedansi nol per persen panjang saluran, yaitu dengan rumus seperti berikut.

$$Z_0 \text{ 25\% panjang penyulang} = 0,25 * \text{panjang saluran (l)} * Z_0 \quad (2.46)$$

#### 2.6.5 Perhitungan Impedansi Equivalen

Perhitungan yang akan dilakukan disini adalah perhitungan besarnya nilai impedansi equivalen urutan positif ( $Z_{1eq}$ ), impedansi equivalen urutan negatif ( $Z_{2eq}$ ) dan impedansi equivalen urutan nol ( $Z_{0eq}$ ) dari titik gangguan sampai ke sumber, jaringan equivalennya terlihat pada gambar II.7 dibawah ini.

Perhitungan  $Z_{1eq}$  dan  $Z_{2eq}$  langsung dapat menjumlahkan impedansi – impedansi yang ada, sedangkan  $Z_{0eq}$  dimulai dari titik gangguan sampai ke transformator tenaga yang netralnya ditanahkan.



Gambar 2.23 Rangkaian equivalen saat terjadi gangguan hubung singkat  
 Untuk menghitung impedansi  $Z_{0eq}$  ini, diumpamakan transformator tenaga yang terpasang mempunyai hubungan Yyd, dimana nilai reaktansi nol, sebagai berikut:

$$X_{T0} = 3 * X_{T1} = 3 * 0,8 \text{ ohm} = 2,4 \text{ ohm}$$

Nilai tahanan pembumian :

Tahanan NGR = 40 ohm sesuai penjelasan pada II.3 bahwa tahanan NGR menjadi  
 $= 3 * R_N$

Maka tahanan NGR dalam perhitungan menjadi 120 ohm

Perhitungan  $Z_{1eq}$  dan  $Z_{2eq}$  :

$$\begin{aligned} Z_{1eq} = Z_{2eq} &= Z_{SC1} + Z_{T1} + Z_1 \text{ penyulang} & (2.47) \\ &= j 0,088 + j 0,8 + Z_1 \text{ penyulang} \\ &= j 0,89 + Z_1 \text{ penyulang} \end{aligned}$$

Perhitungan  $Z_{0eq}$  :

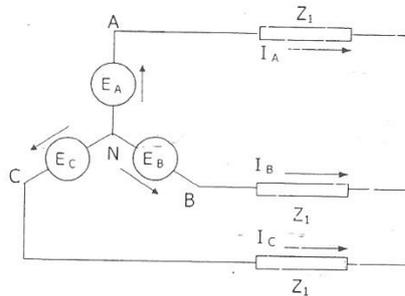
$$\begin{aligned} Z_{0eq} &= Z_{T0} + 3.R_N + Z_0 \text{ penyulang} & (2.48) \\ &= j 2,4 + 120 + Z_0 \text{ penyulang} \end{aligned}$$

## 2.7 Jenis – jenis gangguan Jaringan Tegangan Menengah

Setelah memperoleh impedansi equivalen sesuai dengan lokasi gangguan yang dipilih, selanjutnya dihitung besarnya arus gangguan hubung singkat seperti penjelasan di bawah ini.



### 2.7.1 Gangguan fasa tiga (*Three phase faults*)



Gambar 2.24 Arah arus dari masing-masing fasa

Gambar 2.23, ini mirip dengan kejadian gangguan 3 fasa, dimana ketiga arus fasa yang mengalir di masing-masing impedansi  $Z$  tidak ada yang melawan ggl  $E_A, E_B, E_C$  yang di bangkitkan, sehingga diartikan pada arah positif. Dengan demikian dapat dimengerti bahwa arus gangguan 3 fasa dihitung dengan rumus:

$$I_{3FASA} = \frac{E_{FASA}}{Z_1} \text{ Pada masing-masing fasanya} \quad (2.49)$$

Dengan mempergunakan persamaan (2.49), dapat dihitung besarnya arus gangguan hubungan singkat, sebagai berikut:

$$I = \frac{E_{ph}}{Z_{1eq}} \text{ Amp} \quad (2.50)$$

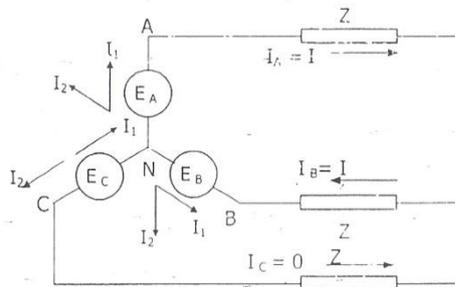
Dimana:

$I$  = Arus gangguan 3 fase yang dicari (Amp)

$E_{ph}$  = Tegangan fase netral sistem  $20 \text{ kV} = 20.000\sqrt{3}$

$Z_{1eq}$  = Impedansi equivalen urutan positif yang diperoleh dari perhitungan sebelumnya

### 2.7.2 Gangguan fasa ke fasa (*line to line fault*)



Gambar 2.25 Vektor arus urutan positif dan negatif



Hubungan impedansi  $Z_1$  dan  $Z_2$  di dalam rangkaian di atas adalah terseri, sehingga besarnya impedansi yang menghubungkan antara fasa A dan B adalah sebesar  $Z_1 + Z_2$ . Sehingga arus yang mengalir antara fasa A dan B itu dihitung dengan rumus sederhana 1 fasa adalah sebagai berikut,

$$I = \frac{E_{AB}}{Z_1 + Z_2} \quad (2.51)$$

Dengan mempergunakan persamaan (2.51) dapat dihitung besarnya arus gangguan hubung singkat 2 fase sebagai berikut (dimisalkan gangguan hubung singkat yang terjadi antara fasa A dan fasa B):

$$I_{f2\text{fase}} = \frac{E_{AB}}{Z_{1eq} + Z_{2eq}} \text{ karena } Z_1 = Z_2, \text{ maka:}$$

$$I_{f2\text{fase}} = \frac{E_{AB}}{2Z_{1eq}} \times \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}}$$

Karena arus gangguan singkat 3 fase (lihat persamaan 2.49) adalah :

$$I_{f3\text{fase}} = \frac{E_{ph}}{Z_{1eq}} = \frac{E_{ph-ph}/\sqrt{3}}{Z_{1eq}}, \text{ jadi arus gangguan 2 fase dapat di}$$

sederhanakan sebagai berikut:

$$I_{f2\text{fase}} = \frac{E_{f3\text{ FASA}}}{2Z_{1eq}} \sqrt{3} \quad (2.52)$$

Dimana:

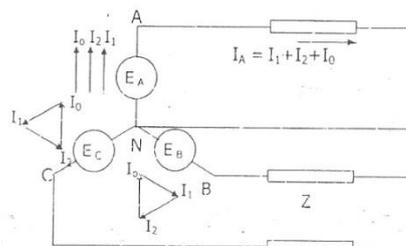
$I_{f2\text{fase}}$  = Arus gangguan 2 fase yang dicari (Amp)

$E_{ph-ph}$  = Tegangan fase-fase sistem 20 kV = 20.000 volt

$Z_{1eq}$  = Impedansi urutan positif yang diperoleh dari perhitungan

$Z_{2eq}$  = Impedansi urutan negatif yang diperoleh dari perhitungan

### 2.7.3 Gangguan satu fasa ke tanah



Gambar 2.26 Vektor arus urutan positif, negatif dan nol.



Seperti diketahui, di fasa yang tidak di bebani (B dan C) pada kenyataannya tidak ada arus yang keluar darinya karena tidak dibebani. Oleh sebab itu ada arus lain yang mengkompensir arus urutan negatif itu di fasa B dan C sehingga jumlahnya sama dengan nol. Akibatnya di fasa tersebut arus yang mengalir seolah melalui hambatan impedansi lain yang biasa disebut dengan impedansi urutan nol, yang hubungannya terseri juga.

Arus-arus ini pada fasa B dan C akan membentuk vector sama sisi, yang saling menghilangkan, sehingga arus urutan positif, negatif dan nol hanya mengalir pada fasa A yaitu :  $I_1$ ,  $I_2$  dan  $I_0$

Arus di fasa yang dibebani (fasa A). semua arus itu searah, sehingga arus yang mengalir pada Impedansi adalah  $I = I_1 + I_2 + I_0$  Karena  $I = I_0 = I_1 = I_2$ , maka  $I = 3 * I_0$  dan masing-masing urutan itu dapat dihitung dengan rumus:

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{E_A}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (2.53)$$

$$\text{Sedangkan } I_{1 \text{ fasa}} = \frac{3 E_A}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (2.54)$$

Dengan menggunakan persamaan (2.54) dapat dihitung besarnya arus gangguan hubung singkat 1 fase ke tanah, sebagai berikut:

$$I_{f1 \text{ fase}} = \frac{3 * E_{ph}}{Z_{1 \text{ eq}} + Z_{2 \text{ eq}} + Z_{0 \text{ eq}}} \quad (2.55)$$

Dimana:

$I_{f1 \text{ fase}}$  = arus gangguan 1 fase ke tanah yang dicari (Amp)

$E_{ph}$  = tegangan fase-netral sistem 20 kV =  $20.000/\sqrt{3}$

$Z_{1 \text{ eq}}$  = Impedansi equivalen urutan positif yang di peroleh

$Z_{2 \text{ eq}}$  = Impedansi equivalen urutan negatif yang di peroleh

$Z_{0 \text{ eq}}$  = Impedansi equivalen urutan nol yang di peroleh

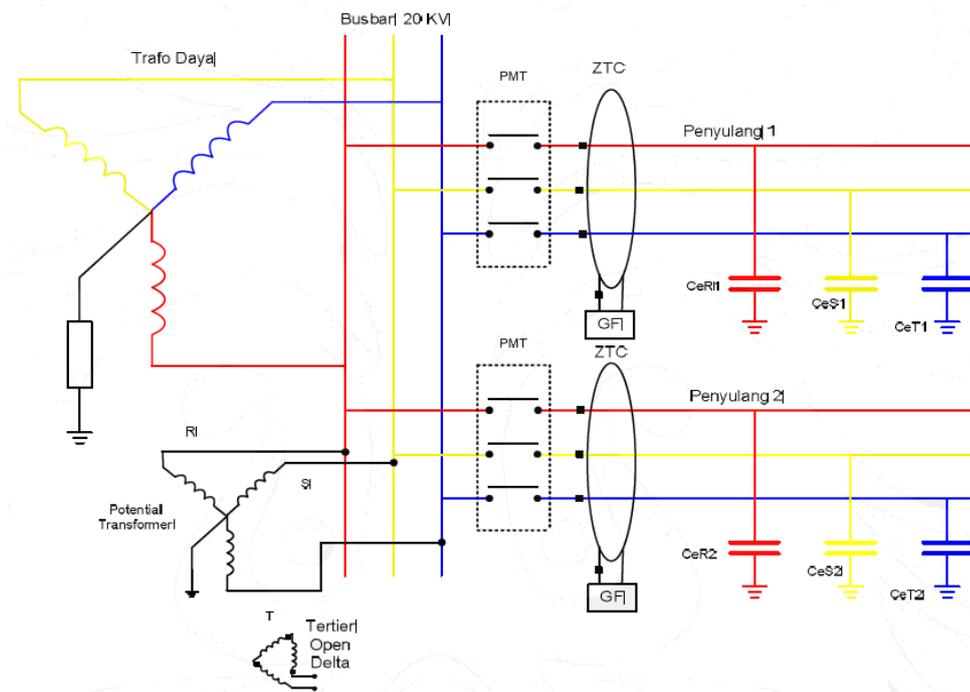
#### 2.7.4 Gangguan Simpatetik

Gangguan Simpatetik adalah terbukanya PMT dari penyulang-penyulang yang tidak terganggu oleh relai gangguan tanah akibat gangguan tanah yang dialami oleh penyulang lain. Umumnya gangguan simpatetik ini terjadi pada



penggunaan Relai gangguan tanah dari jenis definite time. Karena adanya kapasitansi antara konduktor fasa dan tanah pada jaringan itu masing-masing, arus kapasitif yang tidak seimbang sewaktu terjadi gangguan 1 fasa ketanah akan mengalir kembali kesumber melalui konduktor fasa yang terganggu tersebut di titik gangguan, tetapi karena ada beberapa penyulang yang terhubung pada bus yang sama di Gardu Induk, maka ketidak seimbangan arus kapasitif dari penyulang yang lain juga akan kembali kesumber melalui konduktor fasa di penyulang yang terganggu, sehingga arus kapasitif di Penyulang terganggu ini menjadi lebih besar lagi menuju ke sumber, yang kemudian mentripkan PMT penyulang yang terganggu oleh Relai gangguan tanah.

Jika arus kapasitif di penyulang lain (yang sehat) lebih besar dari setelan arus Relai gangguan tanah (GFR) dan Relai yang dipakai dari jenis *definite time*, maka arus kapasitif di penyulang yang sehat ini dapat membuat GFR bekerja (*pick up*) yang kemudian juga mentripkan PMT penyulang yang tidak terganggu.



Gambar 2.27 Penyulang 20 kV<sup>(5)</sup>

Keterangan:

CeR1, CeS1, CeT1 = Kapasitansi ketanah masing-masing fasa penyulang 1

<sup>5)</sup> Mochammad Facta, ST. MT. Simpatetik Tripping. Seminar Proteksi Teknik Elektro



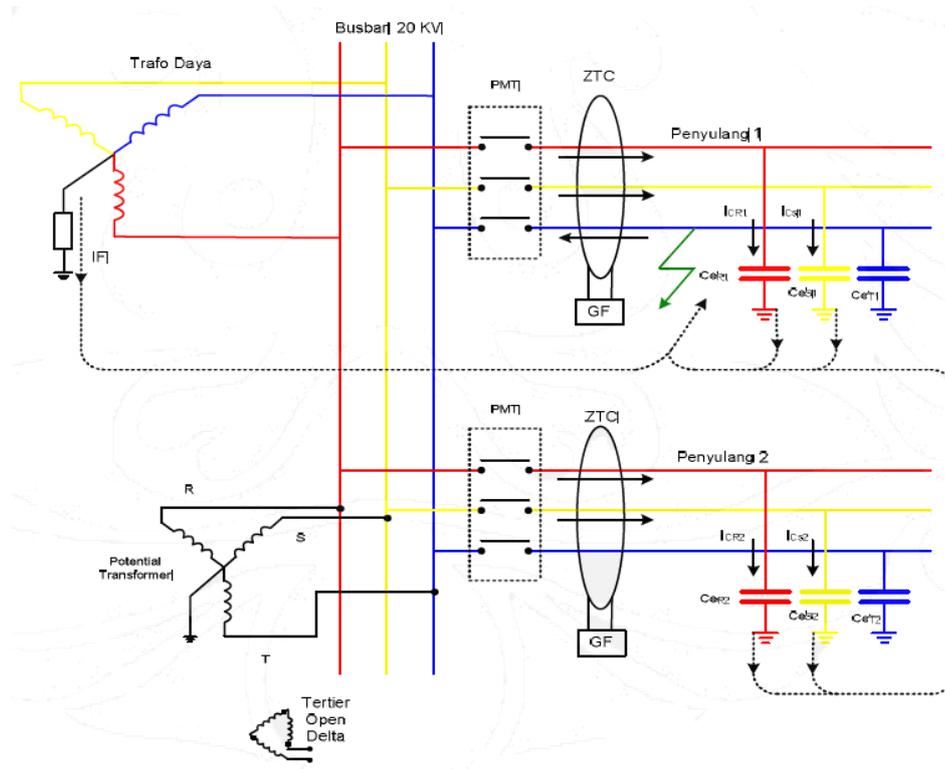
$C_{eR2}, C_{eS2}, C_{eT2}$  = Kapasitansi ketanah masing-masing fasa penyulang 2

$Z_{CT}$  = *Zero Sequence CT*

- = Tanda polaritas sefasa antara belitan primer dan sekunder

Pada gambar 2.27 menunjukkan bahwa antara konduktor fasa dan tanah akan mempunyai nilai kapasitansi yang dianggap sama pada masing-masing fasanya, walaupun jarak antara konduktor fasa tersebut ketanah belum tentu sama.

Jika terjadi gangguan satu fasa ketanah pada salah satu penyulang (misalkan terjadi di fasa T), maka kapasitansi konduktor fasa yang terganggu menjadi terhubung singkat oleh gangguan tanah tersebut, sedangkan fasa yang tidak terganggu (fasa R dan fasa S) tegangannya naik  $\sqrt{3}$  kali sehingga arus kapasitif hanya mengalir di fasa yang sehat saja mengalir kembali ke sumber melalui titik yang terganggu di fasa T (karena fasa T sedang terhubung ke tanah yang sementara gangguan tanah berfungsi sebagai common dari sumber fasa R dan fasa S dengan beban kapasitansi fasa R dan S ke tanah). Arus kapasitif ini di  $Z_{CT}$  menghasilkan resultante = 0 (nol). Jika penyulang di Gardu Induk lebih dari satu, maka arus kapasitif di Penyulang yang terganggu, pada Penyulang lainnya (penyulang yang sehat) juga akan mengalirkan arus kapasitif ke tanah dan akan kembali ke sumber melalui titik gangguan di penyulang yang terganggu. Arus kapasitif dari penyulang yang sehat ini yang dideteksi oleh Relai Gangguan tanah penyulang yang terganggu melalui  $Z_{CT}$ , selanjutnya dapat dijelaskan pada gambar 2.28.



Gambar 2.28 Penyulang 20 kV pada kondisi gangguan 1 fasa ketanah<sup>(4)</sup>

#### 2.7.4.1 Hubungan antara Gangguan 1 Fasa – Tanah dan Simpatetik Trip

Simpatetik sangat berkaitan dengan gangguan 1 fasa ketanah karena gangguan tersebut sering kali mengakibatkan terjadinya gangguan simpatetik. Sebagai contoh bila terdapat gangguan tanah yang terjadi pada fasa T di penyulang 1 akan mengakibatkan kapasitansi  $CT_1$  terhubung singkat oleh gangguan tanah, sehingga tegangan fasa R dan fasa S ke tanah diseluruh sistem distribusi naik sebesar  $\sqrt{3}$  kali  $E_{\text{phase}}$ . Tegangan pada kumparan primer PT fasa R dan fasa S naik  $\sqrt{3}$  kali dengan vektor tegangan. Titik netral trafo tenaga naik sebesar  $E_{\text{ph}}$  terhadap tanah. Pada Penyulang yang terganggu dalam contoh ini, arus di titik gangguan adalah arus komponen resistif (+ arus induktif jaringan) dan arus kapasitif yang kembali kesumber yang besarnya:

$$3 I_0 = I_F + \underbrace{I_{CeR1} + I_{CeS1}}_{I_{Ce \text{ Peny.1}}} + \underbrace{I_{CeR2} + I_{CeS2}}_{I_{Ce \text{ Peny.2}}} \quad (2.56)$$



dimana :

$$I_{CE} = 1 / \omega C \quad (2.57)$$

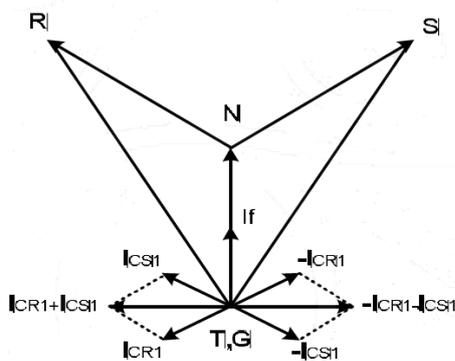
Keterangan:

$I_{CE}$  = Arus kapasitif (Amp)

$C$  = Besar kapasitansi kabel (mikroFarad/km)

**IF** maksimum didapat bila gangguan tanah terjadi di Bus (20 kV), arus  $I_{Ce}$  penyulang yang terganggu yang masuk ke Relai gangguan tanah (GFR) akan sama dengan nol karena saling terkompensir di  $Z_{CT}$ .

#### 2.7.4.2 Arus kapasitif dari fasa yang sehat secara vektoris yang masuk ke Relai gangguan tanah Penyulang terganggu



Gambar 2.29 Vektor arus gangguan 1 fasa ke tanah untuk penyulang yang terganggu

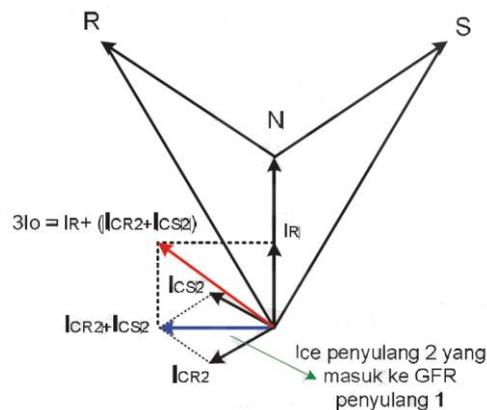
Dari gambar 2.27 & 2.28 diatas terlihat bahwa Arus  $I_F$  mengalir dari Netral (gambar 2.27), Fasa T menjadi berpotensi tanah karena sedang terganggu ketanah. Arus kapasitif fasa R ( $I_{CR1}$  dan  $I_{CR2}$  di Penyulang sehat) leading 900 dengan tegangan  $V_{RT}$ . Arus kapasitif fasa S ( $I_{CS1}$  dan  $I_{CS2}$  di Penyulang sehat) leading 900 dengan tegangan  $V_{ST}$  ( $V_{RT} = V_{RG}$  ,  $V_{ST} = V_{SG}$ ). Arus kapasitif kembali kesumbernya lewat titik gangguan di Penyulang 1 fasa T dan melalui  $Z_{CT}$ , khusus  $I_{CR1}$  dan  $I_{CS1}$  di fasa T ini didalam  $Z_{CT}$  arahnya berlawanan dengan vektor arus  $I_{CR1}$  dan  $I_{CS1}$  di fasa R dan S. Arus residu yang dihasilkan oleh  $Z_{CT}$  pada penyulang 1 yang masuk ke relai adalah:

1.  $I_F$  dengan arah kembali ke sumber (terminal fasa T Trafo) melalui titik gangguan.



2.  $I_{CR2}$  dan  $I_{CS2}$  (arus kapasitif penyulang 2) kembali ke Sumber juga melalui fasa T (penyulang 1) yang sedang terganggu ke tanah.

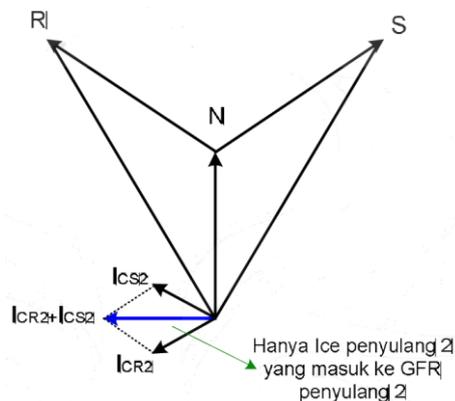
Uraian vektor arus yang masuk ke Relai gangguan tanah penyulang 1 terganggu seperti terlihat pada gambar 2.29



$I_F$  yang dominan  $I_R$  sefasa dengan  $V_{NT}$ ,  $(I_{CR2} + I_{CS2})$  leading 90 $^\circ$  terhadap  $V_{NT}$ . Resultante  $I_R$  dan  $(I_{CR2} + I_{CS2})$  yang mengerjakan relai gangguan tanah.

Gambar 2.30 Vektor Arus  $I_R$  dan  $I_{Ce}$  pada penyulang 1 yang terganggu satu fasa ketanah

Sementara di Penyulang 2 (penyulang sehat), arus kapasitif  $I_{CR2}$  dan  $I_{CS2}$  juga mengalir masuk ke Relai gangguan tanah penyulang 2, dan setelah Relai gangguan tanah ini di set rendah (sensitif) untuk menampung RARC (tahanan gangguan), sehingga jika Relai gangguan tanah dari jenis definite, arus kapasitif ini dapat mentripkan PMT Penyulang yang tidak terganggu satu fasa ke tanah.



Gambar 2.31 Vektor  $I_{Ce}$  pada penyulang 2 pada gangguan satu fasa ketanah di penyulang 1



Fasa T berpotensi tanah, kumparan primer dari potensial transformer (PT) fasa T terhubung singkat oleh gangguan, sehingga tidak menginduksikan tegangan ke tersier fasa T dalam rangkaian open delta, tetapi kumparan PT fasa R dan fasa S menjadi terkena tegangan  $\sqrt{3}$  kalinya dan sudut tegangan antara  $V_R$  dan  $V_S$  tidak lagi  $120^\circ$  tetapi menjadi  $60^\circ$ .

## 2.8 Sistem Proteksi

Sistem proteksi terdiri dari peralatan CT, PT, relai proteksi, yang diintegrasikan dalam satu kesatuan. Relai proteksi merupakan elemen peralatan proteksi yang sangat penting pada sistem proteksi. Fungsi peralatan proteksi yaitu mengidentifikasi gangguan dan memisahkan bagian jaringan yang terganggu dari bagian jaringan yang normal serta mengamankan bagian yang normal dari kerusakan atau kerugian yang lebih besar.

### 2.8.1 Syarat –syarat relai proteksi

#### 1. Kecepatan Bereaksi

Saat mulai ada gangguan sampai pelepasan pemutus (CB), dimana kadang-kadang diperlukan kelambatan waktu :

$$t_{op} = t_p + t_{cb}$$

$t_{op}$  = waktu total

$t_p$  = waktu bereaksi dari unit rele

$t_{cb}$  = waktu pelepasan CB

Kecepatan pemutus arus gangguan dapat mengurangi kerusakan serta menjaga stabilitas operasi peralatan.

#### 2. Kepekaan Operasi ( *sensitivity* )

Kemampuan rele pengaman untuk memberikan respon bila merasakan gangguan.

#### 3. Selektif ( *selectivity* )

Kemampuan rele pengaman untuk menentukan titik dimana gangguan muncul dan memutuskan rangkaian dengan membuka CB terdekat.



#### 4. Keandalan ( *reliability* )

Jumlah rele yang bekerja atau mengamankan terhadap jumlah gangguan yang terjadi. Keandalan rele yang baik adalah 90-99 %

#### 5. Ekonomis

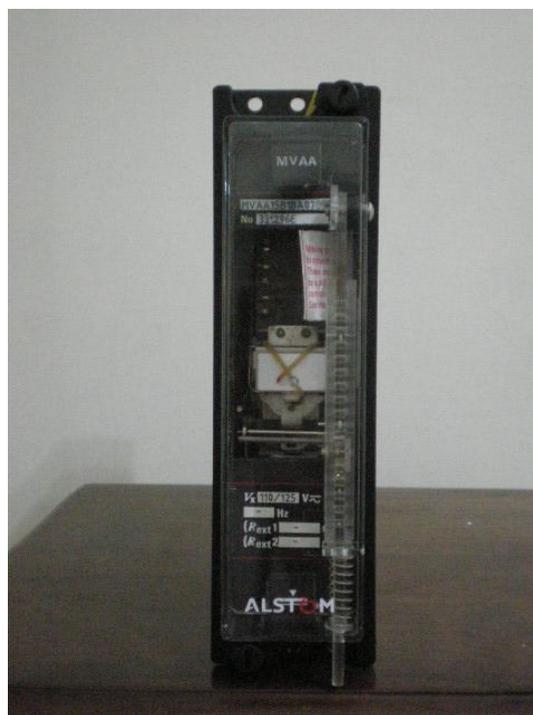
Penggunaan rele selain memenuhi syarat diatas, juga harus disesuaikan dengan harga peralatan yang diamankan.

#### 2.8.2 Relai Proteksi

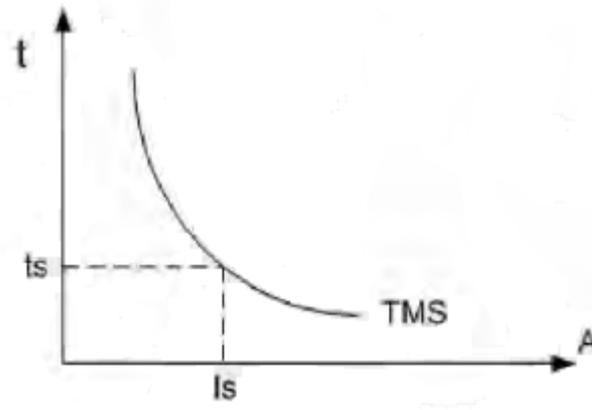
Peralatan listrik yang dirancang untuk mulai pemisahan bagian sistem tenaga listrik atau untuk mengoperasikan signal bila terjadi gangguan

##### 2.8.2.1 Relai *inverse*

Relai akan memberi perintah kepada PMT pada saat terjadi gangguan, bila besar arus gangguannya melampaui penyetelan (  $I_s$  ) dan jangka waktu relai mulai *pick-up* sampai kerja relai waktunya berbanding terbalik dengan besarnya arus gangguan.

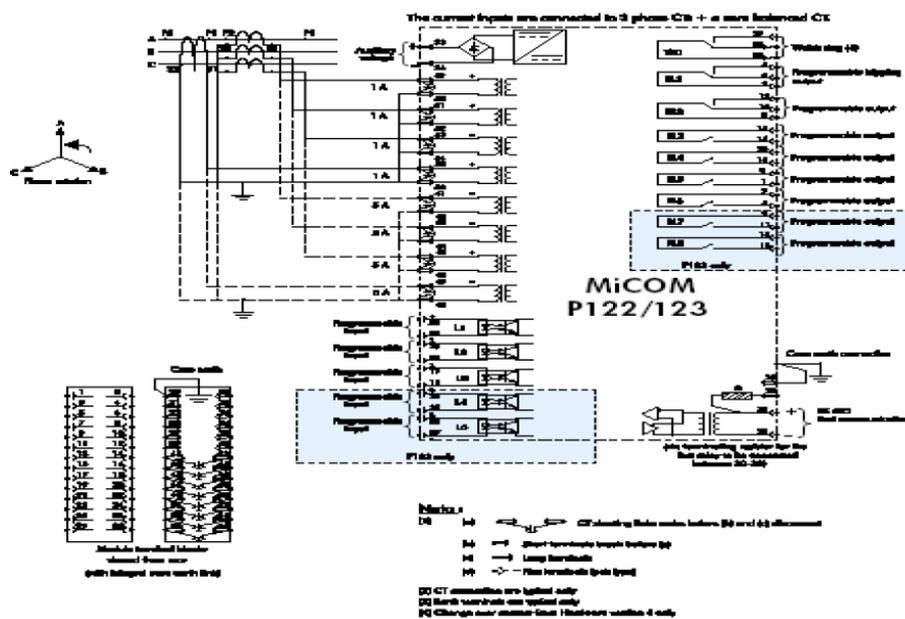


Gambar 2.32 relai *inverse* (merk “ALSTHOM” / “AREVA” )



Gambar 2.33 karakteristik *inverse*

2.8.3 Komponen Relai Invers

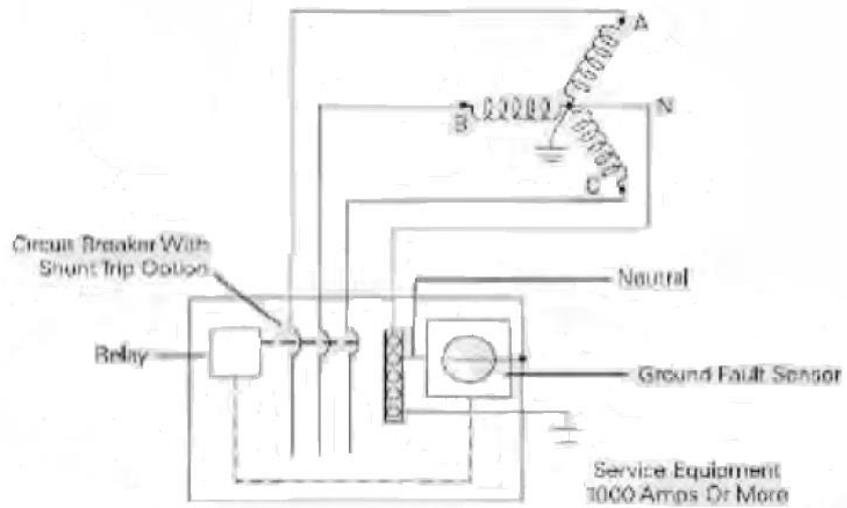


Gambar 2.34 Komponen relai invers *Type AREVA P122*

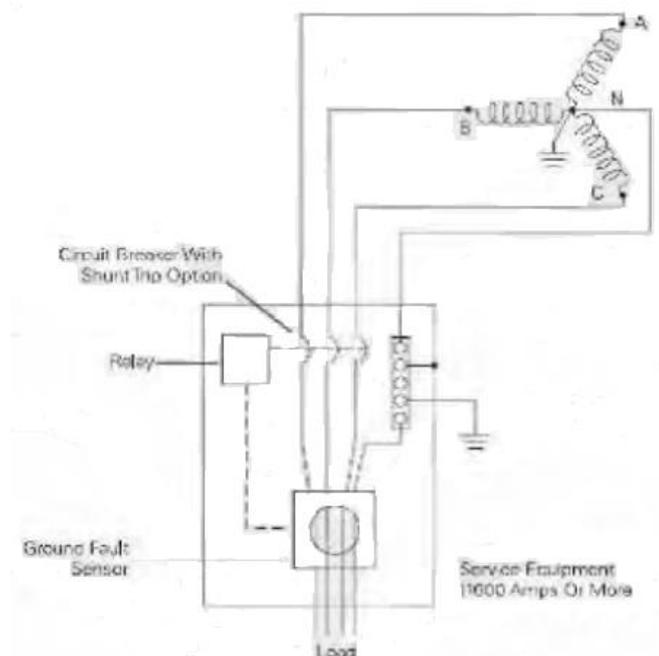
2.9 Relai *Ground Fault*

Relai *ground fault* bekerja dengan 3 metode yaitu :

1. *Direct method* : ketika terjadi ketidak seimbangan arus dari gangguan fasa tanah, arus akan mengalir dari ground ke netral. Ketika arus melampaui dari groundfault sensor, maka sensor memberi perintah ke breaker untuk membuka.

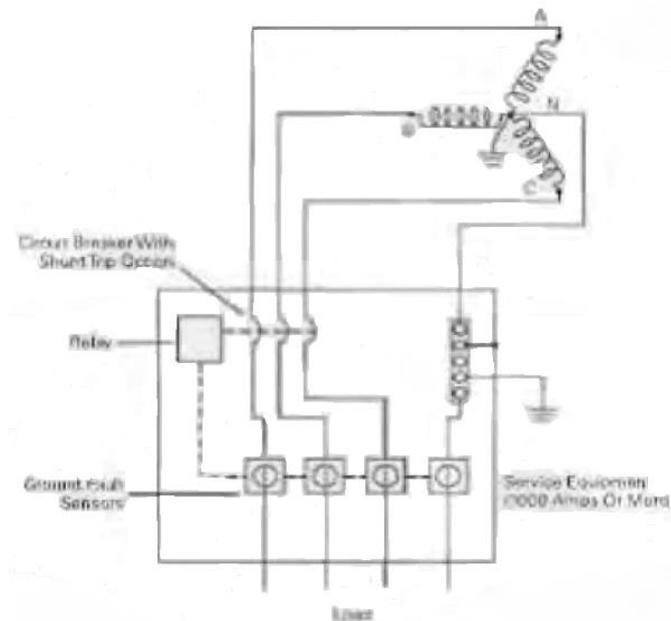
Gambar 2.35 *Direct method GFR*

2. *Zero Sequencing method* : sebuah ground fault protektor akan bekerja dengan sensor yang terpasang diseluruh sirkuit konduktor, termasuk netral pada sistem 4 kabel disebut zero sequencing. Selama arus normal mengalir, jumlah dari seluruh arus dideteksi dengan sensor sebagai nol. Meskipun sebuah gangguan groundfault akan menyebabkan ketidak seimbangan arus yang mengalir pada individual konduktor. Ketika arus mencapai seting maka breaker akan terbuka.

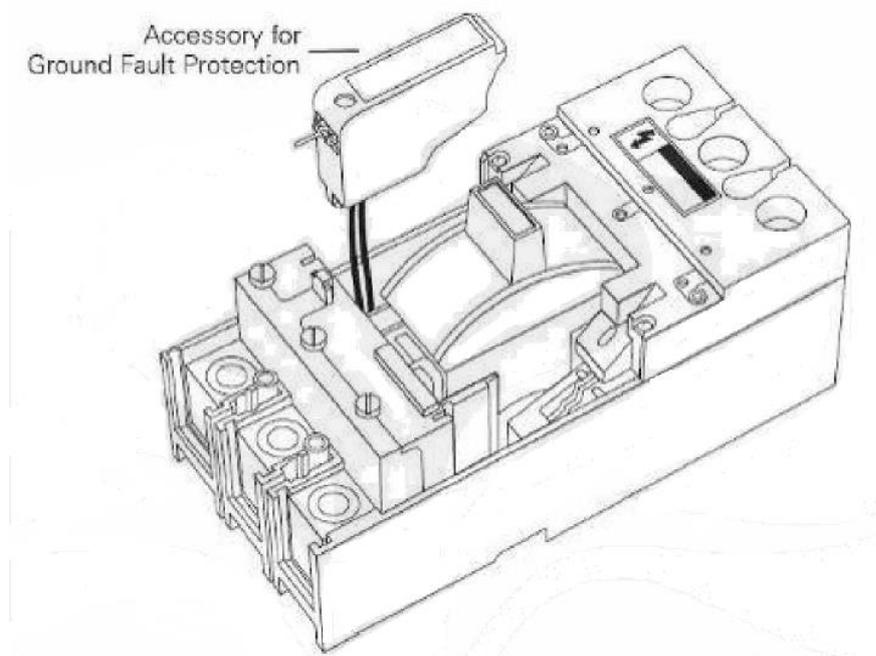
Gambar 2.36 *Zero Sequencing method GFR*



3. *Residual method* : sensor yang terpasang terpisah memonitor arus pada setiap fasanya. Jika jumlah vektorial dari arus terdapat pada sekunder sensor tidak sama dengan nol maka breaker akan terbuka.



Gambar 2.37 *Residual method* GFR



Gambar 2.38 GFR