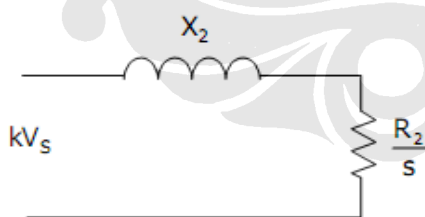


## BAB II

### DASAR TEORI

#### 2.1 Start Motor Induksi

Pada saat starting motor-motor besar, dapat menyebabkan gangguan besar pada motor dan beban lain yang terhubung dengan penyulang motor tersebut. Turunnya tegangan merupakan efek yang paling besar pada starting motor. Sistem tenaga yang lebih kecil biasanya memiliki kapasitas yang terbatas, yang umumnya memperbesar masalah jatuh tegangan pada saat start motor, terutama jika motor-motor besar dihubungkan pada satu bus yang sama. Jatuh tegangan dan naiknya arus yang sangat besar inilah yang kemudian membuat frekuensi pada sistem tenaga listrik di industri menurun. Pada sistem tenaga listrik di Industri, dengan adanya banyak motor induksi yang digunakan, kondisi start motor harus diperhatikan untuk menghindari pelepasan beban lainnya yang seharusnya tidak terjadi pada start motor. Untuk kebanyakan motor induksi, arus awal adalah 4-7 kali arus nominalnya dan hal ini tidak diizinkan karena akan mengganggu jaringan dan akan merusak motor itu sendiri, maka untuk mengatasi hal-hal yang tidak diinginkan arus start tersebut harus diturunkan. Naiknya arus inilah yang menyebabkan sistem kelebihan beban dan seolah-olah kekurangan pembangkitan dalam waktu sesaat.



Gambar 2.1 Rangkaian rotor ketika motor berputar

Arus rotor ketika motor berputar adalah :

$$I_r = \frac{skV_s}{\sqrt{R_2^2 + s^2 X_2^2}} = \frac{kV_s}{\sqrt{\frac{R_2^2}{s^2} + X_2^2}} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dari rumus diatas dapat kita lihat bahwa pada saat starting, awalnya  $s \sim 1$  ( rotor

diam ), arus sangat besar karena impedansi  $R_2+jX_2$  relatif rendah, pf sangat rendah atau juga dikatakan rangkaian bersifat induktif ( $R_2 \ll X_2$ ). Ketika rotor telah berputar, nilai s mengecil sehingga  $R_2/s$  membesar yang mengakibatkan arus rotor mengecil dan rangkaian bersifat makin resistif ditandai pf yang mendekati 1.

Untuk mendapatkan arus start motor induksi, dapat diketahui dari rating tegangan, daya nyata dengan satuan hp, dan kode huruf yang tercantum di nameplate motor tersebut.

Code Letter*	Kva per HP, with locked rotor	Code Letter*	Kva per HP, with locked rotor
A	0-3.14	L	9.0-9.99
B	3.15-3.54	M	10.0-11.19
C	3.55-3.99	N	11.2-12.49
D	4.0-4.49	P	12.5-13.99
E	4.5-4.99	R	14.0-15.99
F	5.0-5.59	S	16.0-17.99
G	5.6-6.29	T	18.0-19.99
H	6.3-7.09	U	20.0-22.39
J	7.1-7.99	V	22.4 and up
K	8.0-8.99		

\* NEC

Maka arus start motor induksi dapat diketahui dari persamaan berikut :

$$I_L = \frac{S_{start}}{\sqrt{3}V_T} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana  $S_{start}$  = (daya nyata dengan satuan hp)(kVA/hp yang dipilih sesuai kode huruf)

Secara praktis pendekatan, waktu start dari motor induksi dapat dihitung dengan persamaan :

$$t = \frac{100}{\Delta Tr} \times \frac{wk^2(2) \left( \frac{ns}{1000} \right)^2}{Kw} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana

t = waktu start (detik)

$\Delta Tr$  = Torsi akselerasi rata-rata (% dari torsi nominal motor)

$wk^2(2)$  = flywheel effect dari motor dan pompa ( $kg\ m^2$ )

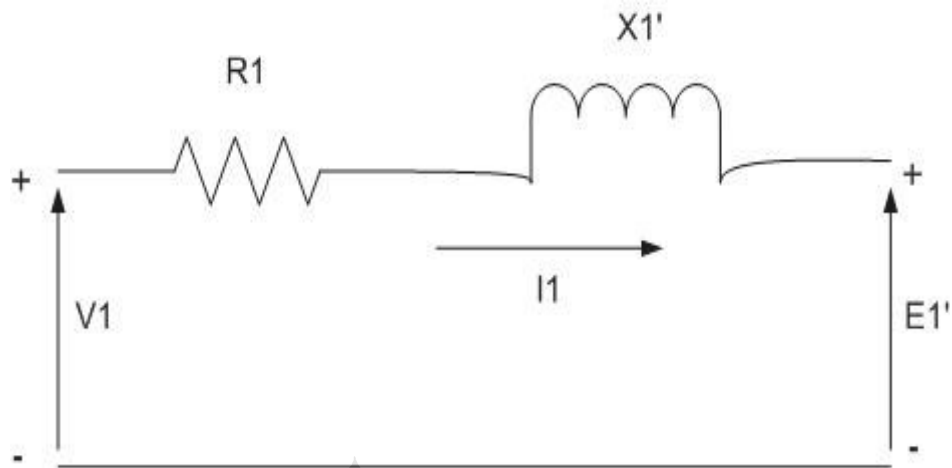
$n_s$  = putaran sinkron (rpm)

$K_w$  = daya motor

## 2.2 Peralihan Motor Induksi

Pada suatu keadaan dimana terjadi hubung singkat pada terminal-terminal mesin induksi yang berlaku baik sebagai motor atau generator, mesin akan memberikan arus yang tidak semestinya karena adanya gandengan fluks dengan rangkaian rotor. Arus ini pada saatnya akan mengecil menjadi nol. Disamping komponen arus bolak-balik, pada umumnya juga terdapat komponen arus searah yang semakin mengecil untuk menjaga hubungan fluks dengan fasa yang bersangkutan yang semula tetap besarnya.

Magnitudo awal dari komponen arus bolak-balik stator dapat ditentukan sebagai reaktansi peralihan  $X'$  serta tegangan  $E'_1$  di belakang reaktansi tersebut, dianggap sama dengan harga sebelum terjadi hubung singkat. Penurunan komponen arus bolak-balik dapat dinyatakan sebagai konstanta waktu hubung singkat peralihan  $T'$ . Karena arus di kumparan stator digerakkan oleh arus rotor DC yang mengecil, maka frekuensi arus stator ditentukan oleh kecepatan sudut rotor. Untuk slip yang rendah frekuensi tersebut merupakan frekuensi listrik serempak; untuk slip yang lebih tinggi besarnya frekuensi mengikuti slip tersebut. Pada umumnya dianggap bahwa kecepatan mesin tetap tak berubah selama peralihan hubung singkat karena peristiwa peralihan berlangsung dalam waktu yang sangat singkat. Rangkaian ekuivalen pada keadaan peralihan terhubung singkat motor induksi adalah sebagai berikut :



Gambar 2.2 Rangkaian ekivalen peralihan motor induksi

Besarnya arus peralihan terhubung singkat ( $I_1$ ) pada motor induksi adalah :

$$X' = X_1 + \frac{X_\varphi X_2}{X_\varphi + X_2}$$

$$T'_0 = \frac{X_2 + X_\varphi}{2\pi f R_2}$$

$$T' = T'_0 \cdot \frac{X'}{X_\varphi + X_1}$$

$$I_1 = \frac{E_1'}{X'} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

$X'$  : Reaktansi Peralihan

$X_\varphi$  : Reaktansi Magnetisasi

$X_1$  : Reaktansi bocor stator

$X_2$  : Reaktansi bocor rotor (acuan pada stator)

$R_1$  : Resistansi rangkaian stator

- $R_2$  : Resistansi rangkaian rotor (acuan pada stator)
- $T_0'$  : Konstanta waktu rangkaian terbuka
- $T'$  : Konstanta waktu terhubung singkat
- $E_1'$  : Tegangan di belakang reaktansi peralihan
- $I_1$  : Arus peralihan awal

Tegangan  $E_1'$  yang mengikuti reaktansi peralihan merupakan tegangan yang berbanding lurus dengan hubungan fluks. Tegangan tersebut berubah menurut besarnya hubungan fluks dan untuk rangkaian terhubung singkat 3 fasa, berkurang menjadi nol pada laju yang ditentukan oleh konstanta waktu  $T'$ .

## 2.3 Gangguan Hubung Singkat

### 2.3.1 Berdasarkan Tipe Gangguan

#### 2.3.1.1 Gangguan Simetris

Gangguan simetris merupakan gangguan dimana besar magnitude dari arus gangguan sama pada setiap fasa. Gangguan ini terjadi pada gangguan hubung singkat tiga fasa.

Secara umum besarnya arus gangguan dihitung menggunakan rumus :

$$I_{fault} : \frac{V_{source}}{Z_s + Z_L + Z_f} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana,

$I_{fault}$  : Arus gangguan

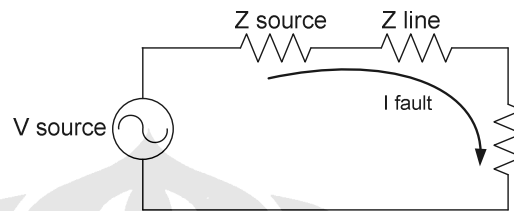
$V_{source}$  : tegangan sistem.

$Z_s$  : impedansi peralatan sistem.

$Z_L$  : impedansi saluran sistem.

$Z_f$  : impedansi gangguan misalnya : busur, tahanan tanah.

Titik di mana konduktor menyentuh tanah selama gangguan biasanya disertai dengan sebuah busur (*arc*). Busur ini bersifat resistif, namun resistansi busur besarnya sangat beragam. Resistansi gangguan besarnya tergantung resistansi busur serta tahanan tanah ketika terjadi gangguan ke tanah.



Gambar 2.3 rangkaian pada keadaan gangguan

Perhitungan arus gangguan menggunakan persamaan diatas, hanya saja ketika gangguan simetris terjadi, tidak terjadi busur dikarenakan konduktor tidak menyentuh tanah. Sehingga persamaannya menjadi :

$$I_{fault} = \frac{V_{source}}{Z_s + Z_L} \quad (2.6)$$

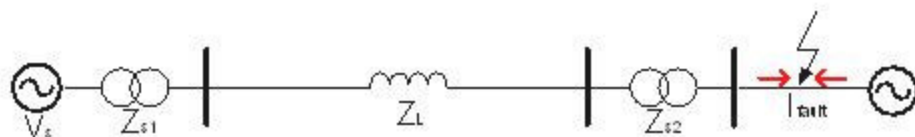
Dimana

$I_{fault}$  : Arus gangguan

$V_{source}$  : tegangan sistem.

$Z_s$  : impedansi peralatan sistem.

$Z_L$  : impedansi saluran sistem.



Gambar 2.4 Diagram garis tunggal sederhana

Pada gambar di atas jika kita ingin mencari besarnya gangguan pada  $I_{fault}$ , maka sesuai dengan persamaan besarnya arus gangguan hubung singkat tiga fasa adalah:

$$I_{fault} : \frac{V_s}{Z_{s1} + Z_L + Z_{s2}} \dots \dots \dots (2.7)$$

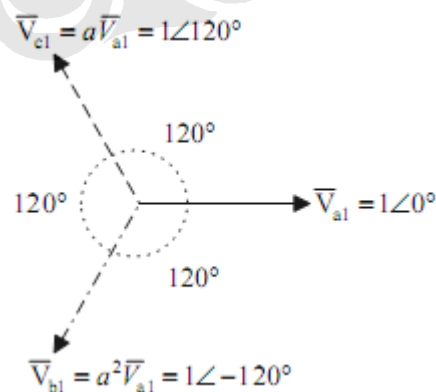
### 2.3.1.2 Gangguan Asimetris

Kebanyakan gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik adalah gangguan tidak simetris. Pada gangguan ini magnitude dari tegangan serta arus yang mengalir pada setiap fasa berbeda.

Komponen simetris merupakan metode yang dikembangkan *C.L. Fortescue* pada tahun 1918. Metode ini memperlakukan tiga fasa yang tidak seimbang pada sistem tenaga listrik seolah-olah sistem tersebut seimbang. Metode ini membuktikan bahwa sistem yang tidak simetris dapat dijabarkan menjadi tiga buah set komponen simetris. Ketiga komponen itu adalah :

#### 1. Komponen urutan positif.

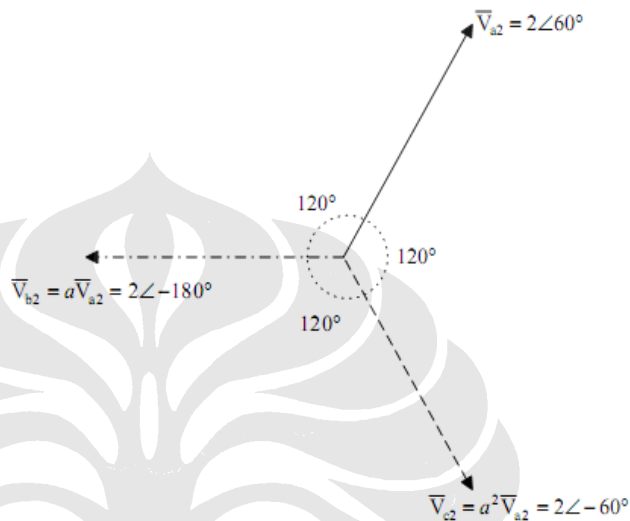
Komponen ini terdiri dari phasor yang besar magnitudenya sama dimana masing-masing berbeda sebesar  $120^\circ$ . Komponen ini memiliki fasa yang sama dengan fasa sistem. Komponen ini biasanya ditulis menggunakan indeks 1



Gambar 2.5 Komponen urutan positif

2. Komponen urutan negatif .

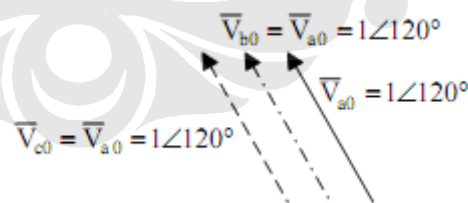
Komponen ini terdiri dari tiga fasor yang besar magnitudenya sama dimana masing-masing berbeda sebesar  $120^\circ$ . Komponen ini memiliki fasa yang berkebalikan dengan fasa sistem. Komponen ini biasanya ditulis menggunakan indeks 2



Gambar 2.6 Komponen urutan negatif

3. Komponen urutan nol.

Komponen ini terdiri dari tiga fasor yang memiliki magnitudo dan fasa yang sama. Komponen ini biasanya ditulis menggunakan indeks 0.



Gambar 2.7 Komponen urutan nol

Total arus maupun tegangan pada sistem tenaga listrik merupakan penjumlahan masing-masing komponen simetris. Seperti pada persamaan berikut :

$$V_A = V_{A1} + V_{A2} + V_{A0}$$

$$V_B = V_{B1} + V_{B2} + V_{B0}$$



$$V_C = V_{C1} + V_{C2} + V_{C0}$$

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0}$$

$$I_B = I_{B1} + I_{B2} + I_{B0}$$

$$I_C = I_{C1} + I_{C2} + I_{C0}$$

Ketika kita menggunakan komponen simetris pada sistem yang tidak seimbang, operasi penggeseran fasor adalah sebesar  $120^\circ$ . Operasi ini ekuivalen dengan mengalikan fasor dengan  $1\angle 120^\circ$ . Perkalian dengan  $1\angle 120^\circ$  akan terjadi berulang-ulang sehingga diperkenalkan dengan konstanta  $\alpha$ . Di mana :

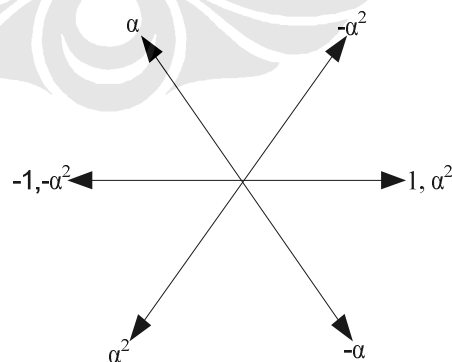
$$\alpha = 1\angle 120^\circ$$

Setiap operasi perkalian dengan  $\alpha$  akan merotasi fasor sebesar  $120^\circ$  tanpa merubah besar magnitudenya. Sehingga :

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

$$\alpha^2 = 1\angle 240^\circ$$

$$\alpha^3 = 1\angle 360^\circ$$



Gambar 2.8 konstanta  $\alpha$

Dengan menggunakan  $\alpha$  maka komponen simetris dapat direpresentasikan menjadi fungsi dari  $\alpha$ . Misalnya jika komponen positif mempunyai urutan abc,

yang berarti fasa akan memiliki urutan a, b, c sehingga hubungan urutan komponen positif menjadi :

$$V_{B1} = \alpha^2 V_{A1}$$

$$V_{C1} = \alpha V_{A1}$$

Sedangkan pada komponen urutan negatif berarti memiliki urutan fasa acb, akan mempunyai hubungan :

$$V_{B2} = \alpha V_{A2}$$

$$V_{C2} = \alpha^2 V_{A2}$$

Sedangkan pada komponen urutan nol, persamaan akan sama karena urutan ini sama besar dan arahnya sehingga :

$$V_{B0} = V_{A0}$$

$$V_{C0} = V_{A0}$$

Ketiga komponen yang pada persamaan di atas dapat dijadikan sebuah persamaan menjadi :

$$V_A = V_{A1} + V_{A2} + V_{A0}$$

$$V_B = \alpha^2 V_{A1} + \alpha V_{A2} + V_{A0}$$

$$V_C = \alpha V_{A1} + \alpha^2 V_{A2} + V_{A0}$$

Dengan menggunakan matriks maka persamaan menjadi :

$$\begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{A0} \\ V_{A1} \\ V_{A2} \end{pmatrix}$$

Jika didefinisikan :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{pmatrix}$$

maka akan didapatkan persamaan :

$$\begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} V_{A0} \\ V_{A1} \\ V_{A2} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} V_{A0} \\ V_{A1} \\ V_{A2} \end{pmatrix} = A^{-1} \begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{pmatrix}$$

karena

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{pmatrix}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{pmatrix}$$

Persamaan akan menjadi :

$$\begin{pmatrix} V_{A0} \\ V_{A1} \\ V_{A2} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{pmatrix}$$

Dari persamaan di atas, komponen simetris dari fasa A akan didapatkan sebagai berikut :

$$V_{A0} = \frac{1}{3}(V_A + V_B + V_C) \quad \text{urutan nol}$$

$$V_{A1} = \frac{1}{3}(V_A + \alpha V_B + \alpha^2 V_C) \quad \text{urutan positif}$$

$$V_{A2} = \frac{1}{3}(V_A + \alpha^2 V_B + \alpha V_C) \quad \text{urutan negatif}$$

Persamaan pada arus yang tidak seimbang memiliki bentuk yang sama dengan persamaan pada tegangan. Arus pada setiap fasa dapat direpresentasikan sebagai :

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0}$$

$$I_B = I_{B1} + I_{B2} + I_{B0}$$

$$I_C = I_{C1} + I_{C2} + I_{C0}$$

Substitusi hubungan antar fasa dengan komponen positif, negatif, dan nol akan menghasilkan :

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0}$$

$$I_B = \alpha^2 I_{A1} + \alpha I_{A2} + I_{A0}$$

$$I_C = \alpha I_{A1} + \alpha^2 I_{A2} + I_{A0}$$

sehingga komponen simetris dapat direpresentasikan sebagai fungsi dari setiap arus pada masing-masing fasa, yaitu :

$$I_{A0} = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C) \quad \text{urutan nol}$$

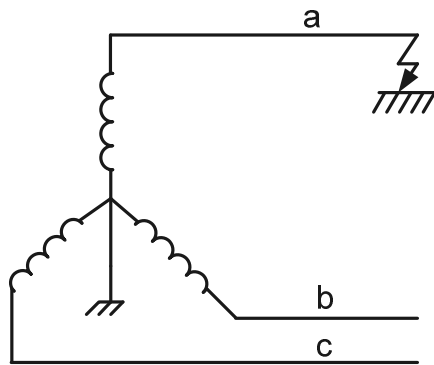
$$I_{A1} = \frac{1}{3}(I_A + \alpha I_B + \alpha^2 I_C) \quad \text{urutan positif}$$

$$I_{A2} = \frac{1}{3}(I_A + \alpha^2 I_B + \alpha I_C) \quad \text{urutan negatif}$$

## Perhitungan Arus dan Tegangan Pada Gangguan Asimetris

### Gangguan Satu Fasa ke Tanah.

Gangguan satu fasa ke tanah terjadi ketika sebuah fasa dari sistem tenaga listrik terhubung singkat dengan tanah.



Gambar 2.9 Gangguan satu fasa ke tanah

Persamaan ketika gangguan ini terjadi adalah :

$$V_A = 0$$

$$I_B = 0$$

$$I_C = 0$$

Didapatkan :

$$I_{A0} = \frac{1}{3}(I_A + 0 + 0)$$

$$I_{A1} = \frac{1}{3}(I_A + \alpha(0) + \alpha^2(0))$$

$$I_{A2} = \frac{1}{3}(I_A + \alpha^2(0) + \alpha(0))$$

$$I_{A0} = I_{A1} = I_{A2} = \frac{1}{3} I_A$$

Pada fasa generator (fasa A misalnya), jika kita mengaplikasikan hukum kirchoff akan berlaku:

$$V_{A1} = V_f - I_{A1} Z_1$$

$$V_{A2} = -I_{A2} Z_2$$

$$V_{A0} = -I_{A0}Z_0$$

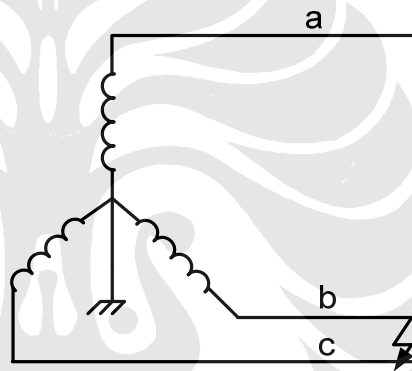
$$V_A = V_{A0} + V_{A1} + V_{A2} = -I_{A0}Z_0 + E_{A1} - I_{A1}Z_1 - I_{A2}Z_2 = 0$$

besarnya arus gangguan sebesar :

$$I_{A1} = \frac{V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad (2.8)$$

### Gangguan Dua Fasa Hubung Singkat

Gangguan dua fasa hubung singkat terjadi ketika dua buah fasa dari sistem tenaga listrik terhubung singkat.



Gambar 2.10 Gangguan dua fasa

Persamaan setiap fasa ketika gangguan ini terjadi adalah :

$$V_B = V_C$$

$$I_A = 0$$

$$I_B = -I_C$$

Sehingga didapat :

$$I_{A0} = \frac{1}{3}(0 - I_C + I_C)$$

$$I_{A1} = \frac{1}{3}(0 + \alpha(-I_C) + \alpha^2(I_C))$$

$$I_{A2} = \frac{1}{3}(0 + \alpha^2(-I_C) + \alpha(I_C))$$

Dari persamaan di atas :

$$I_{A0} = 0$$

$$I_{A1} = -I_{A2}$$

$$V_{A1} = V_f - I_{A1}Z_1$$

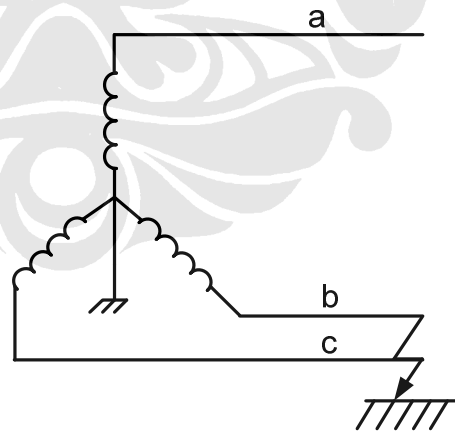
$$V_{A1} = I_{A1}Z_2$$

Sehingga :

$$I_{A1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2} \quad (2.9)$$

### Gangguan Dua Fasa Ke Tanah

Gangguan dua fasa ke tanah terjadi ketika dua buah fasa dari sistem tenaga listrik terhubung singkat dengan tanah.



Gambar 2.11 Gangguan dua fasa ke tanah

Persamaan setiap fasa ketika gangguan ini terjadi adalah :

$$V_B = 0$$

$$V_C = 0$$

$$I_A = 0$$

dengan persamaan komponen simetris didapatkan :

$$V_{A0} = \frac{1}{3}(V_A + 0 + 0) = \frac{1}{3}V_A$$

$$V_{A1} = \frac{1}{3}[V_A + a(0) + a^2(0)] = \frac{1}{3}V_A$$

$$V_{A2} = \frac{1}{3}[V_A + a^2(0) + a(0)] = \frac{1}{3}V_A$$

sehingga untuk gangguan dua fasa ke tanah, dari persamaan di atas didapatkan :

$$V_{A0} = V_{A1} = V_{A2}$$

pada gangguan ini, arus yang mengalir melalui fasa A dan B akan kembali ke netral sehingga

$$I_N = I_B + I_C$$

Dari persamaan komponen arus :

$$I_{A0} = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C)$$

$$I_N = I_A + I_B + I_C$$

$$I_N = 3I_{A0}$$

Substitusi dengan persamaan di atas :

$$I_N = I_B + I_C$$

$$3I_{A0} = (a^2I_{A1} + aI_{A2} + I_{A0}) + (aI_{A1} + a^2I_{A2} + I_{A0})$$

$$I_{A0} = (a^2 + a)I_{A1} + (a^2 + a)I_{A2}$$

$$I_{A0} = -I_{A1} - I_{A2}$$

Diketahui bahwa :



$$V_{A0} = V_{A1} = V_{A2}$$

$$V_{A1} = V_f - I_{A1}Z_1$$

$$V_{A2} = -I_{A2}Z_2$$

$$V_{A0} = -I_{A0}Z_0$$

Sehingga :

$$V_f - I_{A1}Z_1 = -I_{A2}Z_2$$

$$I_{A2} = \frac{I_{A1}Z_1 - V_f}{Z_2}$$

Serta :

$$V_f - I_{A1}Z_1 = -I_{A0}Z_0$$

$$I_{A0} = \frac{I_{A1}Z_1 - V_f}{Z_0}$$

Didapatkan:

$$I_{A0} = -I_{A1} - I_{A2}$$

$$\frac{I_{A1}Z_1 - V_f}{Z_0} = -I_{A1} - \frac{I_{A1}Z_1 - V_f}{Z_2}$$

$$I_{A1}Z_1Z_2 - V_fZ_2 = -I_{A1}Z_0Z_2 - (I_{A1}Z_0Z_1 - V_fZ_0)$$

$$I_{A1}Z_1Z_2 + I_{A1}Z_0Z_2 + I_{A1}Z_0Z_1 = V_fZ_2 + V_fZ_0$$

$$I_{A1} = \frac{V_f(Z_0 + Z_2)}{Z_1Z_2 + Z_0Z_2 + Z_0Z_1}$$

$$I_{A1} = \frac{V_f}{Z_1 + \frac{Z_0Z_2}{Z_0 + Z_2}} \quad (2.10)$$

## 2.3.2 Berdasarkan Metode Perhitungan

### 2.3.2.1 ANSI/IEEE

Arus hubung singkat dibagi menjadi 3 kondisi berdasarkan lamanya waktu gangguan yaitu setelah  $\frac{1}{2}$  cycle (momentary/subtransient network), 1.5-4 cycle (interrupting/transient network), dan 30 cycle (steadystate) gangguan terjadi. Ketiga kondisi tersebut dibedakan lagi berdasarkan reaktansi masing-masing mesin seperti dilihat pada tabel dibawah ini.

Tipe Mesin	1/2 cycle	1.5-4 cycles	30 cycles
Utility	$X''$	$X''$	$X''$
Motor Sinkron	$X_d''$	$1.5 X_d''$	Infinity
Motor Induksi			Infinity
>1000 hp @1800 rpm/less	$X_d''$	$1.5 X_d''$	
>250 hp @3600 rpm	$X_d''$	$1.5 X_d''$	
all other $\geq 50$ hp	$1.2 X_d''$	$3.0 X_d''$	
<50 hp	$1.67 X_d''$	Infinity	

Prosedur berikut digunakan untuk menghitung arus hubung singkat seketika :

1. Hitung nilai rms simetris dari hubung singkat seketika dengan rumus :

$$I_{mom,rms,symm} = \frac{V_{pre-fault}}{\sqrt{3} Z_{eq}} \quad (2.11)$$

Dimana  $Z_{eq}$  adalah impedansi ekivalen dari bus bar yang terganggu

2. Hitung nilai rms asimetris dari hubung singkat seketika dengan rumus :

$$I_{mom,rms,asymm} = MF_m I_{mom,rms,symm}$$

Dimana  $MF_m$  adalah faktor pengali seketika yang dihitung dari :

$$MF_m = \sqrt{1 + 2e^{\frac{2\pi}{X/R}}} \quad (2.12)$$

3. Hitung nilai *peak* dari arus hubung singkat seketika dengan rumus :

$$I_{mom,peak} = MF_p I_{mom,rms,symm}$$

Dimana  $MF_p$  adalah faktor pengali *peak* yang dihitung dari :

$$MF_p = \sqrt{2} \left( 1 + e^{\frac{\pi}{X/R}} \right) \quad (2.13)$$

Prosedur untuk menghitung arus hubung singkat transient dan steadystate sama seperti di atas namun bedanya terletak pada impedansi sistem yang digunakan.

### 2.3.2.2 IEC

Arus hubung singkat dibagi berdasarkan letak gangguan yang terjadi yaitu:

1. Gangguan hubung singkat yang terjadi jauh dari generator

$$I''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_k} \quad (2.14)$$

Dimana :

$cU_n/\sqrt{3}$  = sumber tegangan ekivalen

$R_k = R_{Qt} + R_T + R_L$  = jumlah resistansi sistem yang terkena arus hubung singkat

$X_k = X_{Qt} + X_T + X_L$  = jumlah reaktansi sistem yang terkena arus hubung singkat

$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$  = impedansi hubung singkat

$I_k''$  = arus hubung singkat subtransient

Sedangkan arus hubung singkat steadystate adalah  $I_k = I_b = I_k''$

Nilai faktor koreksi (c) pada beberapa tingkat tegangan dapat dilihat di table berikut.

		faktor tegangan c	
	SC maks		SC min
	cmaks		cmin
Tegangan Nominal Un			
Low voltage : 100-1000V			
230 V /400 V	1.00		0.95
other voltages	1.05		1.00
Medium voltage	1.10		1.00
High voltage	1.10		1.00

2. Gangguan hubung singkat yang terjadi dekat dengan generator

- 1)  $I_p$  (Peak) =  $\lambda \cdot I_k'' = f(X/R, I_k'')$

Dimana  $I_p$  adalah arus peak dari gangguan hubung singkat

- 2)  $I_b$  (Breaking) =  $\mu \cdot I_k'' = f(X/R, I_k'')$

Dimana  $I_b$  adalah arus pemutusan yang digunakan oleh circuit breaker apabila terjadi gangguan hubung singkat

- 3)  $I_k''$ (initial) =  $f(E_a, Z_{\text{fault}})$

Dimana  $I_k''$  adalah arus gangguan hubung singkat subtransient

$$4) I_{k\max} (\text{steady}) = \lambda_{\max} \cdot I_{RG}$$

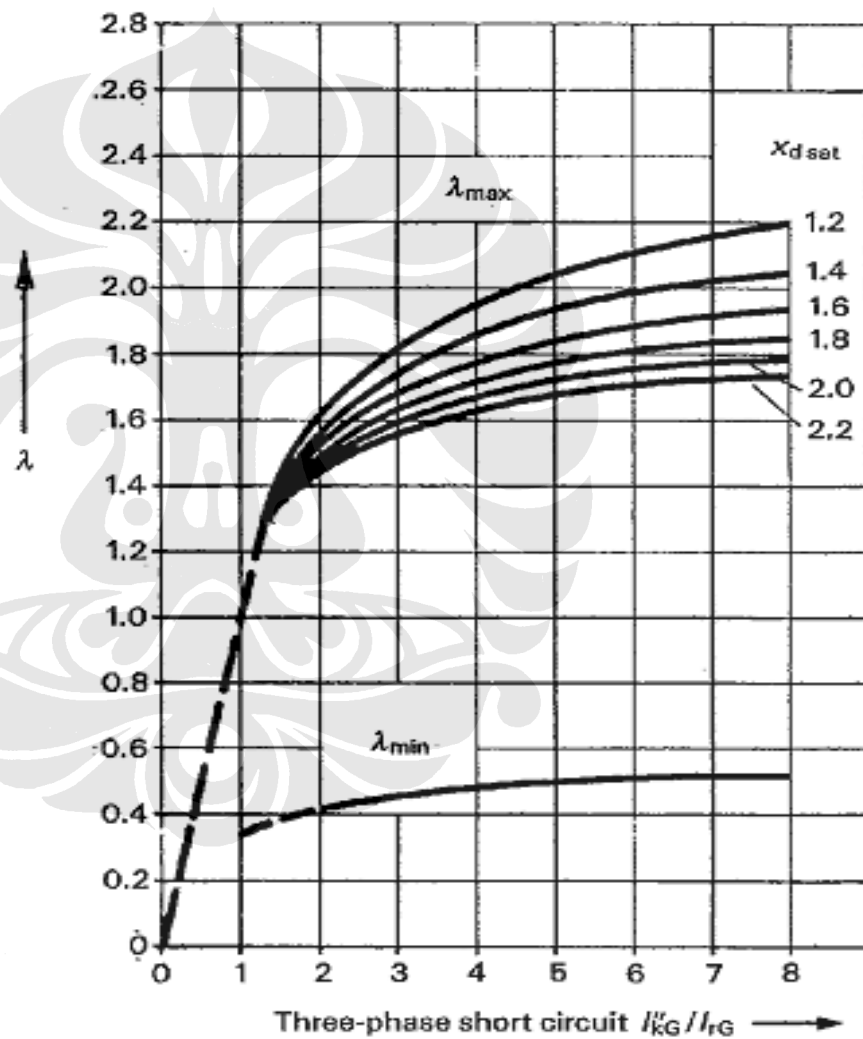
$$I_{k\min} (\text{steady}) = \lambda_{\min} \cdot I_{RG}$$

Dimana:

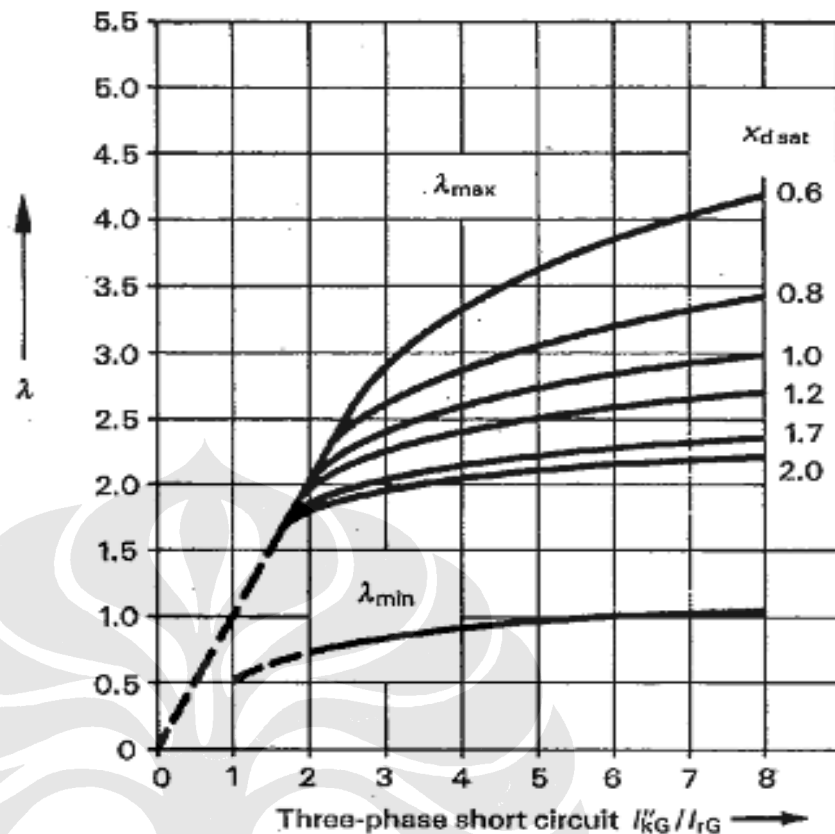
$I_k$  adalah arus hubung singkat steadystate

$I_{RG}$  adalah arus rating dari generator

$\lambda$  adalah ratio arus hubung singkat subtransient dengan arus rating generator yang didapat dari diagram berikut ini



Gambar 2.12 diagram pencari factor  $\lambda_{\max}$  untuk  $I_{k\max}$



Gambar 2.13 diagram pencari factor  $\lambda_{min}$  untuk  $I_{kmin}$

## 2.4 Pengaman Sistem Tenaga Listrik

### 2.4.1 Pengertian dasar dan persyaratan peralatan pengaman

Pengaman dibutuhkan untuk melindungi tiap elemen dari sistem serta mengamankan secepat mungkin dari gangguan yang sedang terjadi, sebab gangguan dapat membahayakan sistem, antara lain menyebabkan jatuhnya generator-generator dalam sistem. Bagi pihak konsumen akibatnya adalah terganggunya kerja dari alat-alat listrik, terutama didalam industri-industri yang mengakibatkan terganggunya produksi.

Tujuan dari pengaman terutama untuk mengamankan peralatan dan memadamkan gangguan yang telah terjadi serta melokalisirnya, dan membatasi pengaruh-pengaruhnya, biasanya dengan mengisolir bagian-bagian yang terganggu itu tanpa mengganggu bagian-bagian yang lain. Didalam sistem atau rangkaian yang konstruksinya cukup baik, proteksi yang ada padanya akan memperlihatkan fungsi-fungsinya dengan sangat memuaskan, dan bilamana

rangkaian diubah atau diperluas, maka proteksinya juga harus mengalami perubahan.

Pada umumnya sistem transmisi beroperasi dengan netral trafonya diketanahkan, baik secara langsung atau melalui suatu impedansi. Karena sebagian besar gangguan (70-80%) adalah gangguan tanah, maka rele gangguan tanah harus dipasang selain rele fasa untuk proteksi pada sistem distribusi. Arus residu atau arus urutan nol bersama-sama dengan tegangan urutan nol dipakai sebagai sumber penggerak dari rele tanah itu.

Untuk membangkitkan tenaga dan mengalirkan daya listrik ke pemakai diperlukan investasi yang sangat besar, terutama untuk pengadaan peralatan-peralatan listrik. Peralatan-peralatan ini dibuat untuk dapat bekerja pada kondisi normal, tetapi gangguan hubung singkat selalu mungkin terjadi, antara lain :

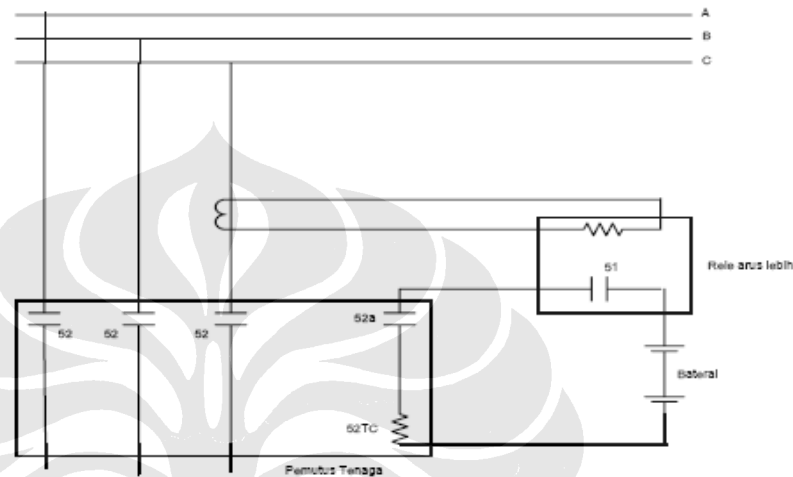
- Tegangan lebih karena proses putus-sambung pemutus tenaga
- Tegangan lebih sebagai akibat sambaran petir langsung dan tidak langsung
- Kerusakan mekanis dari peralatan

Arus hubung singkat ini dapat menyebabkan gangguan serius pada peralatan dan juga terhentinya pelayanan daya pada pemakai. Pada sistem tenaga listrik yang modern untuk mengurangi kerusakan pada peralatan terdapat dua alternatif dalam perencanaan, yakni yang pertama sistem dapat direncanakan sedemikian rupa sehingga gangguan tidak terjadi, yang kedua gangguan masih memungkinkan terjadi dan untuk itu dilakukan langkah-langkah untuk melokalisasi gangguan sehingga kerusakan yang ditimbulkan dapat ditekan walaupun ada kemungkinan untuk menghilangkan gangguan-gangguan yang terjadi di sistem dengan cara : perencanaan sistem yang baik, perhitungan koordinasi isolasi yang teliti, operasi dan pemilihan yang tertib dan lain-lain, namun hal ini tidak mungkin menjamin bahwa sistem bebas dari gangguan. Karena itu timbulnya gangguan dalam merupakan hal yang sudah harus diterima dan diperhitungkan.

Rele proteksi adalah suatu peralatan yang dapat mendeteksi kondisi tidak normal yang mungkin terjadi dalam sistem dengan cara mengukur perbedaan besaran listrik pada keadaan normal dan keadaan gangguan. Besaran listrik dasar

yang berubah harganya pada keadaan gangguan adalah tegangan, arus, sudut phasa dan frekuensi.

Jika gangguan telah dideteksi maka rele akan bekerja melepaskan bagian sistem yang terganggu dari sistem yang masih sehat melalui operasi pemutus daya (*Circuit Breaker*). Suatu contoh proteksi rele sederhana dapat dilihat pada gambar.



Gambar 2.14 Skema proteksi sederhana

Suatu perencanaan rele proteksi yang baik dan efisien harus mempunyai hal-hal sebagai berikut :

a. Kecepatan

rele proteksi harus dapat melepaskan bagian yang terganggu secepat mungkin. Kecepatan kerja rele proteksi diperlukan antara lain karena :

- Menjaga stabilitas sistem
- Mengurangi bagian-bagian peralatan yang rusak
- Mengurangi kerugian waktu gagal dari pemakai (*outage time*)
- Memungkinkan kecepatan penutupan kembali dari pemutus daya (*High speed recloser*) sehingga dapat memperbaiki pelayanan bagi pemakai.

Untuk memperkecil waktu yang diperlukan untuk memutuskan bagian yang terganggu dari sistem maka rele proteksi kecepatan tinggi harus dioperasikan bersama dengan pemutus daya kecepatan tinggi. Waktu kerja yang diperlukan dari mulai terjadi gangguan sampai bekerjanya

pemutus daya untuk mengisolasi daerah gangguan adalah seperti persamaan berikut :

$$T_{op} = t_p + t_{cb} \quad (2.15)$$

Dimana :

$T_{op}$  = waktu operasi rele mulai bergerak hingga pemutus daya mengisolir daerah gangguan

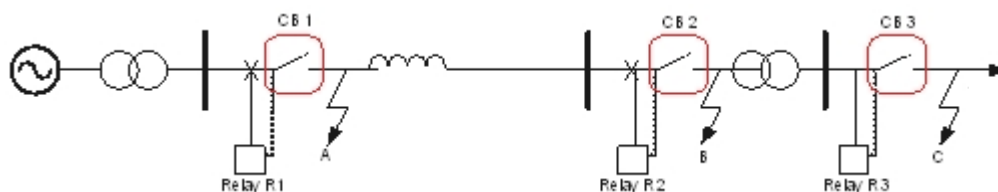
$t_p$  = waktu yang dibutuhkan rele mulai piringan bergerak hingga bekerjanya kontak rele

$t_{cb}$  = waktu yang dibutuhkan oleh sistem mekanis untuk menggerakkan pemutus daya

Waktu pemutusan dari CB adalah waktu mulai dari penutupan kontak pada rangkaian penggerak sampai dengan terputusnya arus gangguan (akibat membukanya CB). Rele proteksi saat ini mempunyai waktu operasi 1 sampai 2 *cycles*, atau 0,02 sampai 0,06 detik, sedangkan waktu pemutusan CB saat ini adalah 2,5 sampai 3 *cycles* atau 0,05 sampai 0,06 detik, dengan demikian waktu pembersihan gangguan (*clearing time*) adalah 0,07 sampai 0,10 detik.

b. Selektivitas

adalah kemampuan dari sistem proteksi untuk menentukan dimana gangguan terjadi dan memilih Pemutus Tenaga Terdekat mana yang akan bekerja yang mampu membebaskan sistem yang sehat dari gangguan dengan resiko sekecil mungkin.



Gambar 2.16 Diagram satu garis dari sistem yang menggambarkan selektivitas daerah proteksi.



Jika gangguan terjadi pada titik C (Gambar 2.16) maka Pemutus Tenaga CB 3 akan terbuka, jika gangguan terjadi pada titik B maka Pemutus Tenaga CB 2 akan terbuka, demikian seterusnya. Karena itu jika terjadi gangguan pada sistem, maka hanya Pemutus Tenaga yang terdekat yang akan bekerja. Hal ini menyebabkan perlunya membagi sistem menjadi beberapa bagian yang akan dapat melindungi sistem dari gangguan dengan menjaga agar sistem yang terbuka seminimum mungkin. Setiap gangguan pada daerah yang diamankan akan menyebabkan terbukanya Pemutus Tenaga pada daerah tersebut. Sistem akan dibagi menjadi beberapa daerah proteksi (*Protection Zone*) :

- Generator dan Trafo Generator unit
- Busbar
- Rangkaian distribusi (seperti pada gambar 4)
- Transformator
- Transmisi

c. Sensitivitas

adalah kemampuan dari rele untuk bekerja dengan baik sesuai dengan karakteristiknya dengan penyimpangan yang minimum. Kemungkinan terjadinya penyimpangan yang tidak sesuai dengan perencanaan dari cara kerja rele harus diperhitungkan. Proteksi yang diinginkan adalah proteksi yang sesensitif mungkin agar rele dapat bekerja sesuai dengan karakteristiknya. Sistem proteksi yang sensitif akan lebih kompleks dan memerlukan lebih banyak peralatan dan rangkaian karena itu akan lebih mahal. Proteksi seperti ini digunakan pada sistem dimana proteksi sederhana tidak dapat dipergunakan karena tingkat sensitivitasnya rendah. Sensitivitas ditentukan oleh faktor kepekaan ( $F_{sens}$ ). Untuk rele arus lebih dapat ditulis sebagai berikut :

$$F_{sens} = \frac{I_{fault}}{I_{pu}}$$

Dimana :  $F_{sens}$  = faktor sensitivitas

$I_{fault}$  = arus gangguan minimum

$I_{pu}$  = arus mula rele/arus minimum pick up

Pada umumnya faktor sensitivitas harus  $> 1.5$  karena kurva arus waktu rele arus lebih dimulai pada tap 1.5

d. Keandalan

berarti bahwa rele proteksi setiap saat harus dapat berfungsi dengan baik dan betul pada setiap kondisi gangguan yang telah direncanakan untuk rele tersebut.

Keandalan dapat dibagi menjadi 3 aspek yaitu sebagai berikut :

- **Dependability**  
Yaitu tingkat kepastian beroperasinya suatu peralatan proteksi. Pada prinsipnya peralatan proteksi harus dapat mendeteksi dan melepaskan bagian yang terganggu tidak boleh gagal bekerja. Dengan kata lain memiliki tingkat dependability yang sangat tinggi.
- **Security**  
Yaitu tingkat kepastian dari peralatan proteksi untuk tidak salah beroperasi. Salah beroperasi mengakibatkan pengaman bekerja (dari yang seharusnya tidak beroperasi).
- **Avaibility**  
Yaitu perbandingan antara waktu dimana pengaman dalam kondisi berfungsi atau siap beroperasi dengan waktu total dalam operasinya.

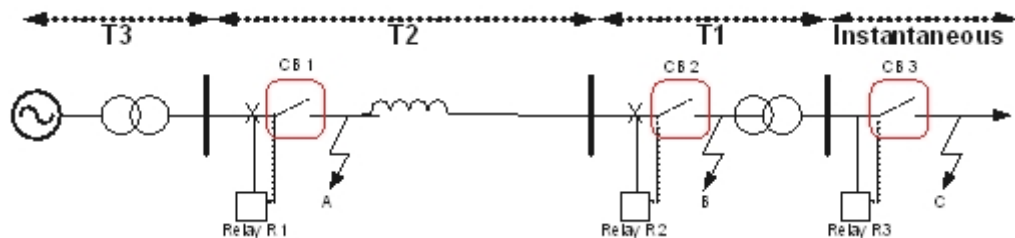
#### 2.4.2 Jenis - jenis Pengaman

Ada dua pengaman yang dikenal, yaitu sebagai berikut :

- *Primary protection* (Pengaman Utama)
- *Back – up protection* (Pengaman Cadangan)

Pengaman Utama adalah pertahanan terdepan dari sistem dimana gangguan di daerah proteksi dari suatu rele dapat diatasi secepat mungkin. Seperti disebutkan keandalan yang sempurna dari sistem proteksi, trafo arus, trafo tegangan dan pemutus tenaga tidak mungkin diperoleh, karena itu beberapa proteksi cadangan sangat diperlukan. Pengaman Cadangan akan bekerja jika proteksi utama gagal bekerja, selain itu juga melindungi daerah pengaman berikutnya. Rele cadangan mempunyai penundaan waktu yang cukup panjang sehingga memungkinkan proteksi utama bekerja terlebih dahulu.

Suatu contoh sederhana dari proteksi cadangan adalah dengan Rele tingkatan waktu seperti pada gambar 2.17.



Gambar 2.17. Diagram garis tunggal dengan skema proteksi rele tingkatan waktu

Gangguan pada C pada umumnya pertama-tama akan dideteksi oleh Rele R3 dan dipisahkan oleh Pemutus Tenaga di titik C. Jika terjadi kegagalan operasi dari Rele atau peralatan pada titik C maka gangguan akan dipisahkan dengan beroperasinya rele pada titik B. Hal ini dapat diperoleh dengan mengatur waktu pemutusan untuk masing-masing rele  $R_3 < R_2 < R_1$ . Pada ujung sistem di atas biasanya di set *instantaneous* (seketika) dan secara bertahap  $T_1 < T_2 < T_3$  dan seterusnya.

### 2.4.3 Macam Rele

Rele proteksi dapat dibagi tergantung pada proteksi dan prinsip kerjanya sebagai berikut :

- Rele elektromagnetik : yang bisa digerakkan dengan arus AC dan DC dengan prinsip pergerakan besi magnetik, besi jangkar dan lain-lain, untuk menggerakkan kontak.
- Rele induksi elektromagnetik atau Rele induksi sederhana ; yang pada prinsipnya menggunakan prinsip motor induksi pada operasinya. Rele jenis ini hanya digerakkan oleh Supply AC saja.
- Rele Elektrotermis
- Rele Elektrophisic ; contohnya adalah Rele Bucholz untuk trafo
- Rele Static ; menggunakan katup termis, transistor dan amplifier untuk mendapatkan karakteristik operasi.
- Rele Elektrodinamis ; mempunyai prinsip yang sama dengan peralatan penggerak (moving coil instrument).

Rele dapat Dibagi Menurut Penggunaannya sebagai berikut :

- i. Rele tegangan kurang, arus kurang dan daya kurang  
Dimana rele akan beroperasi jika terjadi penurunan tegangan, arus atau kehilangan daya melewati harga yang telah ditentukan.
- ii. Rele tegangan lebih, arus lebih atau daya lebih  
Dimana rele akan bekerja jika tegangan, arus dan daya telah melewati harga yang telah ditentukan.
- iii. Rele Arah atau Rele Arus Balik  
Dimana rele akan bekerja jika terjadi pergeseran sudut fasa dari arus terhadap tegangan sistem dengan kompensasi pada tegangan jatuh.
- iv. Rele Arah atau Rele Daya Balik  
Dimana rele akan beroperasi jika terjadi pergeseran sudut fasa dari arus dan tegangan kerja tanpa kompensasi dari tegangan.
- v. Rele Diferensial  
Dimana rele akan bekerja jika terjadinya perbedaan fasa atau amplituda antara dua harga besaran listrik.
- vi. Rele Jarak  
Dimana operasi rele tergantung pada perbandingan tegangan dan arus.
- vii. Rele Bucholz  
adalah suatu rele yang dioperasikan untuk mengamankan trafo dari timbulnya gas akibat adanya gangguan. Gangguan di dalam trafo akan menyebabkan timbulnya gas yang segera akan bergerak ke atas. Gas ini digunakan sebagai besaran ukur untuk menggerakkan rele. Jika terjadi gangguan di dalam trafo (seperti kerusakan isolasi antar gulungan, tembusnya isolasi, pemanasan inti, hubungan kontak yang kurang baik, salah sambung dan lain-lain) maka akan timbul gelembung gas yang bergerak ke atas ke permukaan minyak ke udara luar melalui rele Bucholz dimana aliran gas dideteksi oleh sebuah katup yang dapat memberikan alarm dan tripping dari Pemutus Tenaga. Rele ini dapat juga digunakan untuk mendeteksi tinggi minyak didalam trafo dan memberikan peringatan. Pipa yang menghubungkan trafo dengan rele harus sependek

mungkin dan harus mempunyai sudut kemiringan yang cukup kecil dengan horizontal.

#### 2.4.4 Rele Arus Lebih

Pada dasarnya rele arus lebih adalah suatu alat yang mendeteksi besaran arus yang melalui suatu jaringan dengan bantuan trafo arus, jika arus melebihi tetapan arus pada pengaturan rele maka rele akan mengirim sinyal trip pada pemutus tenaga. Harga atau besaran arus yang boleh dilewati disebut dengan *current setting*. Karakteristik dari rele arus lebih adalah sebagai berikut :

1. Rele arus lebih waktu seketika (*Instantaneous Relay*)

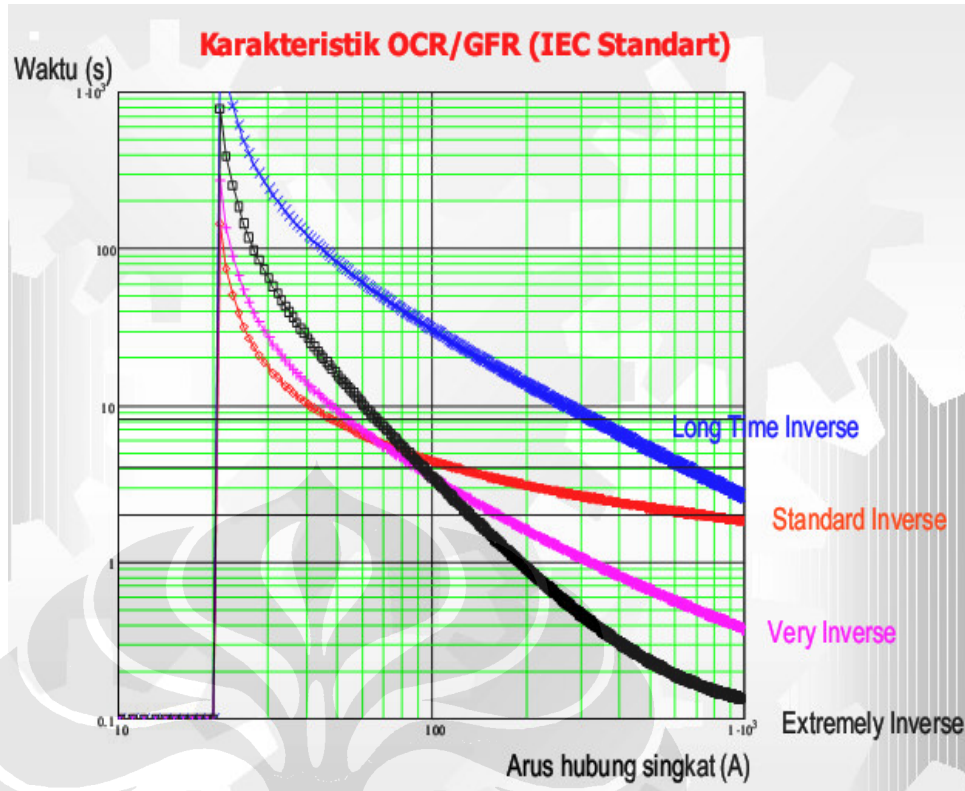
Dimana rele ini akan memberikan perintah buka kepada pemutus tenaga apabila arus gangguan yang mengalir melebihi setting arusnya dan jangka waktu kerja relai mulai dari pick up sampai rele bekerja sangat singkat tanpa adanya waktu tunda.

2. Rele arus lebih waktu tertentu (*Definite time-lag Relay*)

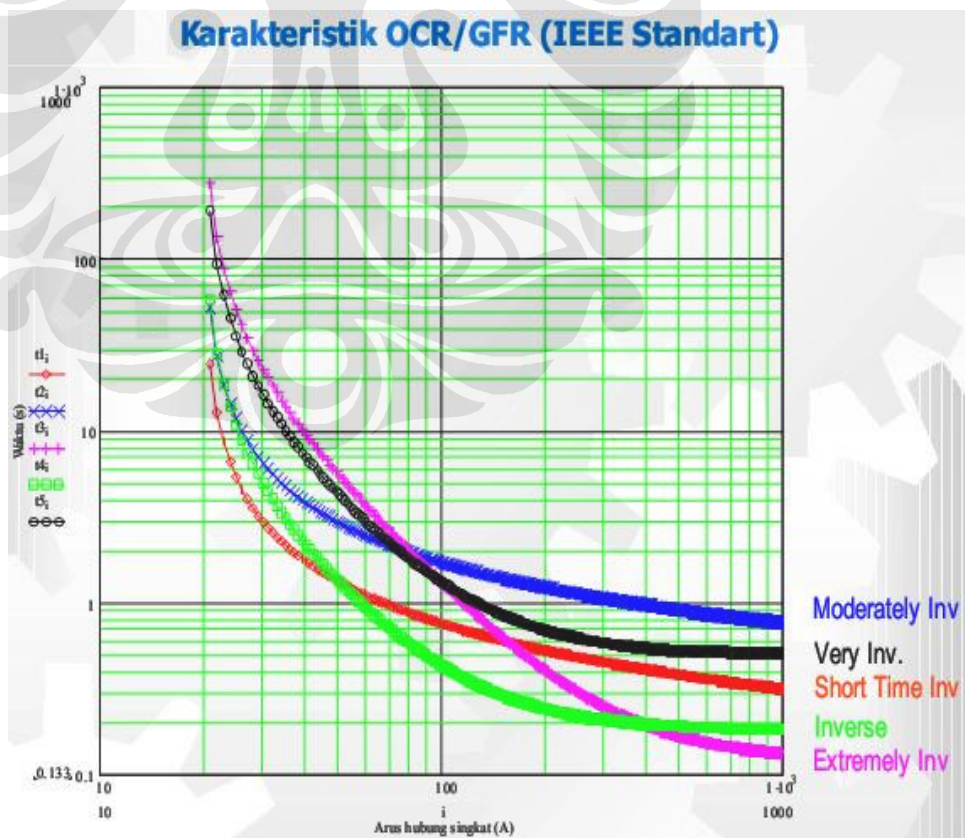
Dimana rele ini akan memberikan perintah buka kepada pemutus tenaga apabila arus gangguan yang mengalir melalui rele melampaui setting arusnya, dan jangka kerja waktu rele mulai dari pick up sampai kerja rele diperpanjang sampai waktu tertentu.

3. Rele arus lebih waktu terbalik (*Invers Time-lag Relay*)

Dimana waktu operasi rele berbanding terbalik terhadap besar arus atau besaran lain yang menyebabkan rele bekerja.



Gambar 2.18 Kurva karakteristik rele arus lebih inverse (standar IEC)



Gambar 2.19 Kurva karakteristik rele arus lebih inverse (standar IEEE/ANSI)

Karakteristik-karakteristik di atas memiliki perbedaan dalam hal aplikasi. Perbedaan tersebut adalah :

- Short Time Inverse  
Karakteristik ini digunakan untuk sistem yang membutuhkan waktu pemutusan gangguan yang cepat, dimana koordinasi dengan relai lain tidak diperlukan
- Standard inverse  
Karakteristik ini digunakan sebagai karakteristik standard untuk koordinasi antar rele dimana kapasitas hubung singkat di berbagai lokasi rele cukup signifikan
- Inverse  
Karakteristik ini lebih curam dibanding kurva standar inverse. Kurva ini biasanya dikoordinasikan dengan rele lain yang tidak menggunakan karakteristik standard IEC
- Very Inverse  
Karakteristik ini lebih curam dibanding kurva inverse. Karakteristik ini digunakan untuk koordinasi beberapa rele dan dimana terdapat perbedaan kapasitas hubung singkat di antara lokasi rele
- Extremely Inverse  
Karakteristik ini lebih curam dibanding kurva very inverse. Kurva jenis ini biasa digunakan untuk koordinasi dengan pengaman lebur atau fuse di sisi bawah rele
- Long Time Inverse  
Karakteristik jenis ini memiliki waktu kerja yang cukup lama pada setting arus yang sama di banding karakteristik jenis lain. Karakteristik jenis ini biasanya digunakan untuk pengamanan tahanan pentanahan trafo dan sebagai cadangan pengaman gangguan tanah.

Persamaan karakteristik-karakteristik di atas menurut standar IEC adalah :

$$t = \frac{KTMS}{\left(\frac{I_f}{I_s}\right)^\alpha - 1} \quad (2.16)$$

Dimana :

TMS (Time Multiplier Setting) adalah penyetelan waktu atau kurva yang digunakan yang dirumuskan sebagai berikut :

$$TMS = \frac{\text{Arus Primer}}{\text{Setting arus Primer}} = \frac{\text{Arus Primer}}{\text{Setting arus primer} * CT \text{ ratio}} \quad (2.17)$$

$I_f/I_s$  adalah perkalian dari arus primer terhadap setting arus (MTVC – Multiple of Tap Value current). Sedangkan konstanta K dan  $\alpha$  untuk masing-masing karakteristik di atas dapat dilihat pada table berikut :

Tabel 2.1 Konstanta karakteristik rele arus lebih waktu terbalik menurut standard IEC

Karakteristik	K	$\alpha$
Short Time Inverse	0,05	0,04
Standard Inverse	0,14	0,02
Inverse	9,4	0,7
Very Inverse	13,5	1
Exteremely Inverse	80	2
Long Time Inverse	120	1

Sedangkan Persamaan karakteristik-karakteristik di atas menurut standar ANSI/IEEE adalah :

$$t = \left( \frac{A}{M^p - 1} + B \right) \cdot TMS \quad (2.18)$$

M adalah perkalian dari arus primer terhadap setting arus (MTVC – Multiple of Tap Value current). Sedangkan untuk konstanta A, B dan p untuk masing-masing karakteristik di atas dapat dilihat pada table berikut :

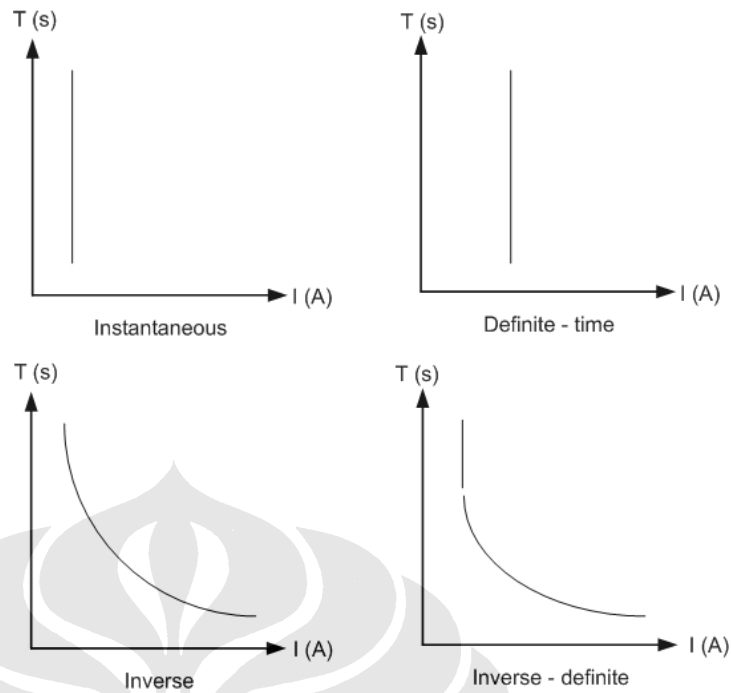
Tabel 2.2 Konstanta karakteristik rele arus lebih waktu terbalik menurut standard ANSI

Karakteristik	A	B	p
Short Time Inverse	0,019	0,113	0,04
Moderately Inverse	0,052	0,113	0,02
Inverse	8,93	0,179	2,09
Very Inverse	18,92	0,492	2
Exteremely Inverse	28,08	0,13	2
Long Time Inverse	5,61	2,18	2,09

#### 4. Rele arus lebih terbalik waktu tertentu minimum (*IDMT Relay*)

Dimana waktu kerja rele hampir terbalik dengan harga terkecil V dari arus atau besaran lain yang menyebabkan rele bekerja dan rele akan bekerja pada waktu minimum tergantung jika besaran listrik naik tanpa batas.





Gambar 2.20 kurva jenis - jenis rele arus lebih

#### 2.4.4.1 Penentuan setting rele arus lebih

Dalam penyetelan arus lebih ada beberapa hal yang perlu dipertimbangkan yaitu perhatian yang berlebihan pada peralatan akan menyebabkan tingkat operasional terganggu, sedangkan perhatian yang berlebihan pada kondisi operasional akan membahayakan peralatan. Penentuan setting arus rele arus lebih terbagi menjadi 2 yaitu :

##### 1. Pada gangguan fasa

Gangguan fasa yang dimaksud adalah gangguan hubung singkat 2 fasa dan 3 fasa. Lokasi transformator arus untuk rele gangguan fasa adalah dimasing-masing kawat fasa sehingga dibutuhkan 3 elemen rele arus lebih untuk sistem 3 fasa. Pada dasarnya rele gangguan fasa tidak boleh bekerja pada beban maksimum, namun diusahakan rele gangguan fasa dapat berfungsi sebagai pengaman beban lebih. Arus pick up sinonim dengan arus setting rele yang berarti nilai arus minimum rele yang mengakibatkan terbukanya kontak pemutus tenaga. Sehingga penyetelan arus pick up minimum adalah :

$$I_{set} = (1.1 \text{ s/d } 1.3) * I_{beban} \quad (2.19)$$

$I_{\text{beban}}$  (arus beban) biasanya ditentukan oleh kapasitas arus penghantar (current carrying capacity) atau harga pengenalan transformator arus.

Selain rele gangguan fasa berfungsi sebagai rele pengaman utama juga berfungsi sebagai pengaman cadangan untuk seksi berikutnya pada arus gangguan minimum. Dalam hal ini diambil gangguan 2 fasa pada saat pembangkitan minimum sehingga

$$I_{\text{setmaks}} = K_s * I_{\text{hs2fasa}} \quad (2.20)$$

Dimana :

$I_{\text{setmaks}}$  = penyetelan arus kerja maksimum

$K_s$  = factor keamanan dalam hal ini bernilai 0.8

$I_{\text{hs2fasa}}$  = arus gangguan 2 fasa pada pembangkitan minimum di seksi berikutnya

## 2. Pada gangguan tanah

Pengaman rele arus lebih gangguan tanah hanya dapat diterapkan pada sistem yang ditanahkan. Hal ini disebabkan pada sistem dengan pentanahan mengambang, besarnya impedansi urutan nol tak terhingga sehingga tidak ada arus gangguan satu fasa ke tanah yang dapat mengalir. Pada dasarnya rele gangguan tanah mendeteksi arus sisa (residual current) pada saluran. Dimana arus sisa adalah ;

$$I_{\text{residual}} = I_a + I_b + I_c$$

Mengingat rele gangguan tanah hanya bekerja jika terjadi gangguan tanah maka penyetelan arusnya dapat serendah mungkin, namun untuk sistem 3 fasa 4 kawat harus dipertimbangkan adanya arus ketidakseimbangan yang mungkin timbul. Pada umumnya penyetelan arus pick up minimum adalah :

$$I_{\text{set}} = (0.3 \text{ s/d } 0.5) * I_{\text{beban}} \quad (2.21)$$

$I_{\text{beban}}$  (arus beban) biasanya ditentukan oleh kapasitas arus penghantar (current carrying capacity) atau harga pengenalan transformator arus.

Penentuan setting waktu kerja rele arus lebih baik rele gangguan fasa maupun rele gangguan tanah yang letaknya paling ujung atau level tegangan terendah adalah secepat mungkin. Adapun untuk penyetelannya untuk arus lebih waktu tertentu ialah 0.2 sampai 0.3 detik, sedangkan rele arus lebih dengan waktu terbalik dipilih

TMS terkecil atau kurva yang terendah. Penentuan setting waktu kerja di seksi hulunya didasarkan bahwa rele yang berdekatan harus selektif. Dengan demikian harus ada beda waktu kerja atau grading time untuk rele yang berdekatan. Pada umumnya  $\Delta t$  diambil 0.4 sampai 0.5 detik didasarkan adanya :

- Kesalahan rele waktu pada kedua rele waktu yang berurutan 0.2-0.3 detik
- Overshoot 0.05 detik
- Waktu pembukaan pemutus tenaga maksimum 0.1 detik
- Factor keamanan 0.05 detik

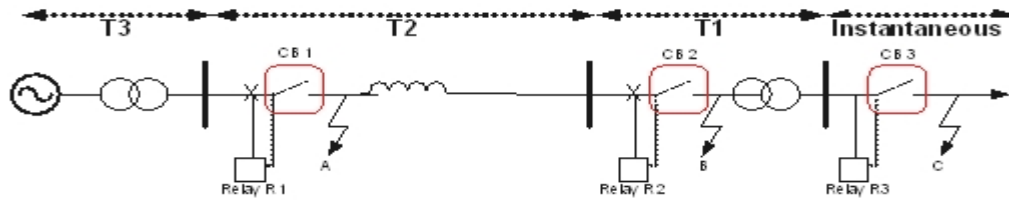
Penyetelan waktu berdasarkan pada pembangkitan maksimum dan kemudian diperiksa pada pembangkitan minimum apakah semua rele masih dapat berfungsi sebagai pengaman cadangan di seksi berikutnya. Bila ternyata untuk pembangkitan minimum tidak dapat sebagai pengaman cadangan seksi berikutnya, maka perlu ditinjau kembali penyetelan arusnya. Kalau peyetelan arusnya tidak dapat diturunkan karena rele akan salah kerja dengan adanya arus beban maksimum, maka harus dipilih rele jenis lain, misalnya rele arus lebih yang dikontrol tegangan.

#### **2.4.4.2 Koordinasi Rele Arus Lebih Dengan Diskriminasi waktu**

Koordinasi rele arus lebih memerlukan pengetahuan yang baik tentang arus hubung singkat yang mungkin terjadi pada setiap bagian dari sistem tenaga listrik. Karena tes dalam skala besar hampir tidak mungkin untuk dilakukan maka diperlukan analisa sistem tenaga listrik. Data yang dibutuhkan dalam studi koordinasi rele arus lebih antara lain :

- i. diagram garis tunggal dari sistem yang akan dipelajari termasuk didalamnya tipe serta rating dari rele yang digunakan serta karakteristik trafo arus yang digunakan.
- ii. Besarnya impedansi dari semua elemen sistem seperti trafo, mesin-mesin listrik, dan sirkuit penyulang.
- iii. Arus hubung singkat maksimum dan minimum yang mungkin terjadi pada pada setiap bagian sistem tenaga listrik.
- iv. Arus beban maksimum yang mungkin mengalir pada sistem.

Pada metode ini, waktu setting yang tepat diberikan pada masing-masing relay yang mengontrol pemutus tenaga. Hal ini untuk memastikan bahwa rele yang trip adalah rele yang paling dekat dengan gangguan.

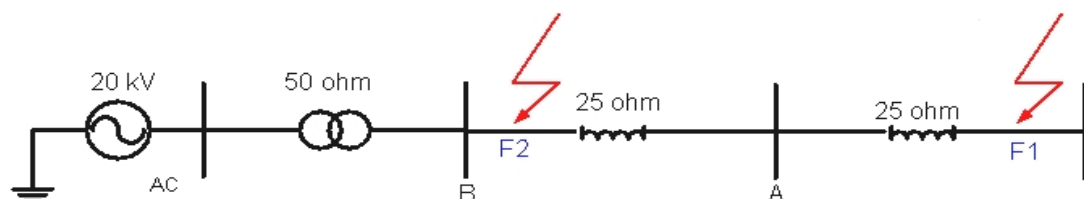


Gambar 2.21 Diagram garis tunggal dengan skema proteksi rele tingkatan waktu

Gambar di atas merupakan contoh sederhana dari sebuah sistem tenaga listrik. Proteksi terhadap arus lebih terdapat pada titik A, B, C. Masing-masing rele memiliki karakteristik definite-time. Jika terjadi Gangguan pada C pada umumnya pertama-tama akan dideteksi oleh Rele R3 dan dipisahkan oleh Pemutus Tenaga di titik C. Jika terjadi kegagalan operasi dari Rele atau peralatan pada titik C maka gangguan akan dipisahkan dengan beroperasinya rele pada titik B. Hal ini dapat diperoleh dengan mengatur waktu trip untuk masing-masing rele  $R3 < R2 < R1$ . Pada ujung sistem di atas biasanya di set *instantaneous* (seketika) dan secara bertahap  $T1 < T2 < T3$  dan seterusnya. Kelemahan dari metode ini adalah setting rele yang terdekat dengan pembangkit diatur agar bekerja paling lama. Hal ini akan membahayakan karena jika terjadi gangguan dengan pembangkit maka gangguan yang sangat besar akan terjadi dalam waktu yang lama.

#### 2.4.4.3 Koordinasi Rele Arus Lebih Dengan Diskriminasi Arus

Metode ini berdasarkan kepada fakta bahwa arus gangguan bervariasi pada setiap titik gangguan namun mengikuti pola bahwa semakin menuju hilir titik gangguan dari sumber pembangkit maka besar arusnya akan mengecil.



Gambar 2.22. Diagram garis tunggal dengan skema proteksi rele arus lebih tingkatan arus

Metode ini dilustrasikan oleh gambar di atas. Untuk gangguan pada F1 maka besarnya arus gangguan simetrisnya adalah sebesar :

$$I_{F1} = \frac{20000V}{\sqrt{3}x(50 + 25 + 25)}$$

$$I_{F1} = 115,5 \text{ A}$$

Sedangkan jika terjadi gangguan pada F2 maka besarnya arus gangguan :

$$I_{F2} = \frac{20000V}{\sqrt{3}x(50)}$$

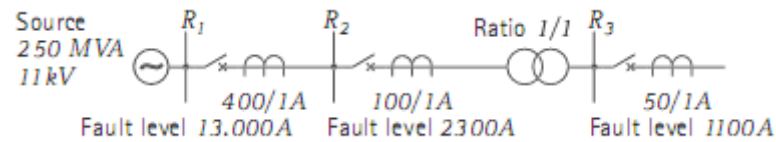
$$I_{F2} = 230.94 \text{ A}$$

Sehingga Rele pada bus A di set dengan arus pick-up sebesar 115.5 A sedangkan rele pada bus B di set dengan arus pick-up sebesar 230.94 A. Kelemahan dari metode ini adalah :

- i. Arus hubung singkat pada F1 dan F2 tidak terlalu jauh sehingga tidak dapat dibedakan dengan sangat teliti mengingat arus gangguan tersebut masih harus direplika menggunakan trafo arus.
- ii. Pada prakteknya, sumber pembangkitan selalu berubah-ubah seperti ketika pembangkitan maksimum dan pembangkitan minimum sehingga ketika pembangkitan minimum besarnya arus hubung singkat menjadi kecil dan tidak terdeteksi oleh rele arus lebih.

#### 2.4.4.4 Koordinasi Rele Arus Lebih Dengan Diskriminasi Arus dan Waktu

Masing-masing metode yang telah dijelaskan di atas memiliki kelemahan yang mendasar. Hal ini terjadi karena penggunaan diskriminasi waktu dan arus digunakan secara terpisah. Masalah ini dapat diatasi jika diskriminasi arus dan waktu digunakan secara bersama-sama. Rele dengan karakteristik *inverse* memanfaatkan diskriminasi arus dan waktu.



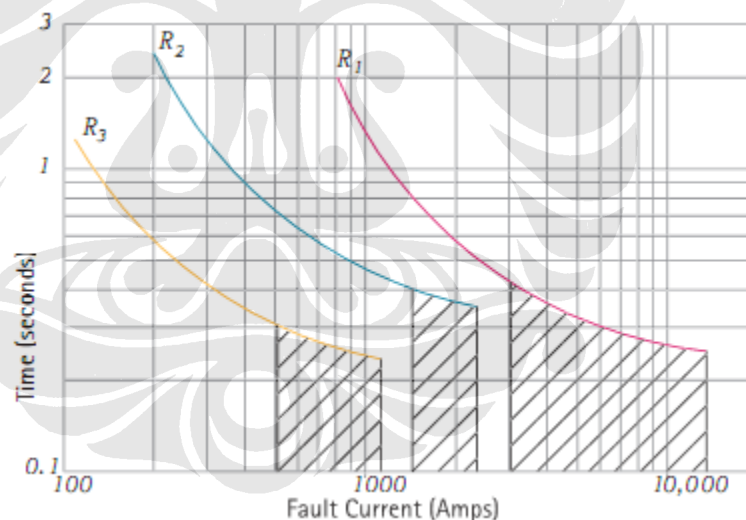
Gambar 2.23. Diagram garis tunggal untuk tingkat arus gangguan tertentu

Misalkan pada contoh gambar 2.23 pada seksi R1 besarnya arus gangguan adalah sebesar 13.000 A, pada seksi R2 besarnya arus gangguan adalah sebesar 23.000 A, sedangkan pada seksi R3 besarnya arus gangguan adalah sebesar 1.100 A. Maka jika digunakan rele dengan karakteristik *inverse*. Sehingga jika setting pada masing-masing seksi tersebut adalah :

R1 diset pada 500 A dengan TMS pada 0.125

R2 diset pada 125 A dengan TMS pada 0.15

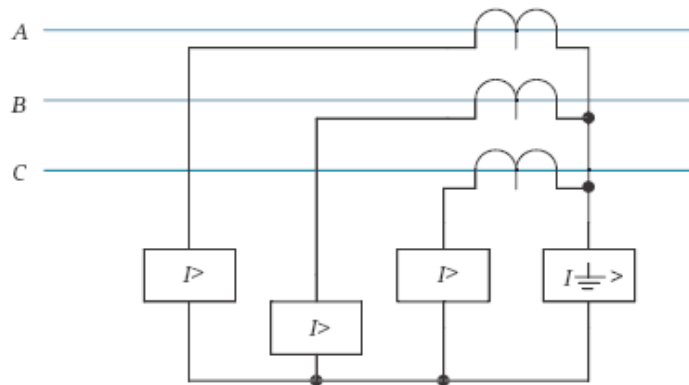
R3 diset pada 62.5 dengan TMS pada 0.10



Gambar 2.24. Kurva arus – waktu untuk masing-masing seksi

Dari gambar kurva di atas terlihat bahwa diskriminasi dengan arus maupun waktu terpenuhi. Pada saat arus gangguan kecil (jauh dari sumber) maka yang bekerja sebagai rele utama adalah R3 yang di back-up oleh R2 dan R3. Pada arus hubung singkat yang besarnya menengah maka R1 tidak lagi merasakan adanya gangguan dan yang bekerja sebagai pengaman utama (ditengah-tengah antara sumber dan ujung saluran) adalah R2 di back-up oleh R3. Sedangkan pada





Gambar 2.26.. Suatu bentuk skema proteksi dengan diperlengkapi dengan sebuah rele urutan nol agar lebih sensitif terhadap gangguan satu fasa dan 2 fasa ke tanah

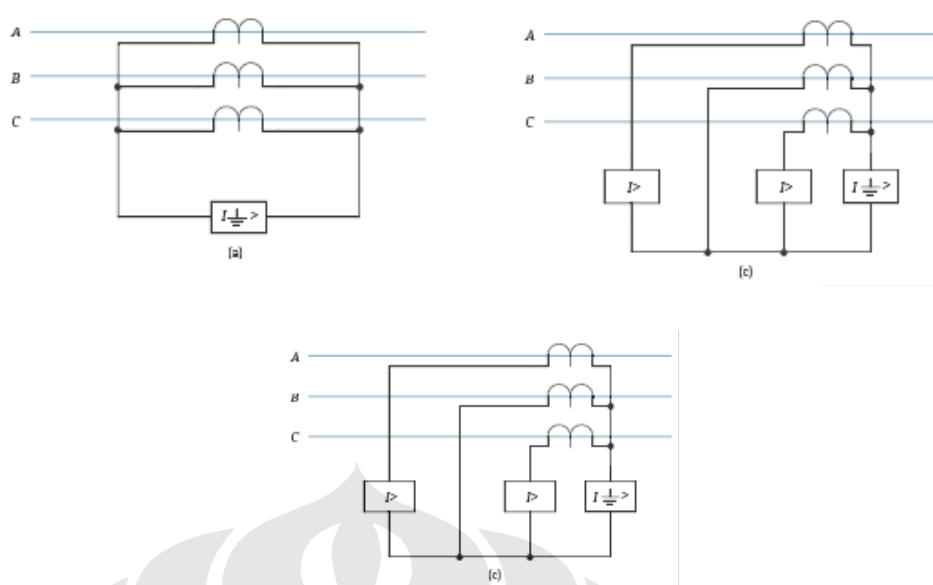
Skema proteksi pada gambar 2.25 dapat dipakai untuk proteksi semua jenis gangguan hubung singkat, tetapi untuk proteksi gangguan satu fasa ke tanah, sensitivitasnya kurang tinggi. Untuk gangguan tiga fasa yang terjadi pada titik  $K_1$  semua rele bekerja. Apabila terjadi gangguan fasa-fasa di titik  $K_2$  menyebabkan relay  $R_1$  dan  $R_2$  bekerja. Sedangkan gangguan dua fasa ke tanah dari fasa A dan B di titik  $K_4$  arus gangguan mengalir melalui trafo arus dalam fasa A yang menyebabkan bekerjanya rele dari fasa ini.

Agar proteksi terhadap gangguan satu fasa ke tanah lebih baik dan lebih sensitif, maka perlu diberikan rele tanah  $R_0$ , yang ditambahkan pada skema proteksi dari gambar 2.25, yang dipasang seperti pada gambar 2.26, untuk mengukur arus urutan nol dari gangguan tanah itu.

Tetapi bila khusus diinginkan proteksi terhadap gangguan satu fasa ke tanah saja, maka dapat digunakan filter arus urutan nol, dengan demikian rele akan mempunyai sensitivitas yang lebih tinggi terhadap gangguan itu.

Pada gangguan menuju tanah,. Jika terjadi pada sistem yang netralnya ditanahkan maka akan muncul arus yang menuju tanah yang disebut arus residu (*residual current*). Ada beberapa metode untuk mengukur besarnya arus residu (gambar 2.27)





Gambar 2.27 Metode untuk mengukur arus residu

Setting yang umum dari rele gangguan tanah adalah sebesar 30% - 40% dari arus beban maksimum atau arus minimum gangguan singkat ke tanah. Hal ini dikarenakan arus gangguan ke tanah mungkin sangat kecil dikarenakan impedansi yang tinggi pada tanah tempat konduktor jatuh sehingga arus terus-menerus mengalir dan tidak terdeteksi oleh rele jika rele diset dengan nilai yang tinggi seperti arus lebih. Pada rele gangguan tanah prosedur untuk melakukan koordinasi sama dengan prosedur yang ditempuh oleh rele arus lebih.

#### 2.4.5 Prosedur Koordinasi Pengaman

Prosedur koordinasi pengaman berdasarkan standard IEEE no.242 tahun 2001. Koordinasi rele arus lebih adalah prosedur coba-coba berbagai macam peralatan proteksi di kurva arus-waktu yang digambarkan pada kertas logaritmis sehingga didapatkan koordinasi yang selektif. Proses penyetelan rele arus lebih adalah hasil kompromi kontradiktif antara proteksi peralatan maksimum dan kontinuitas pelayanan maksimum sehingga selektivitas koordinasi yang sempurna mungkin tidak dapat diraih di semua sistem. Berikut adalah langkah-langkah yang dibutuhkan untuk menggambar koordinasi peralatan pengaman di suatu sistem tenaga listrik :

1. Pilih rangkaian yang akan dikoordinasikan

Pekerjaan dimulai pada beban di rangkaian (pada level tegangan terendah) lalu balik sampai ke generator. Setelah itu tentukanlah cabang rangkaian dengan setting arus arus terbesar. Biasanya cabang rangkaian ini adalah cabang yang ada motor dengan kapasitas daya terpasang terbesar karena adanya arus inrush terbesar saat start motor. Bagaimanapun, cabang penyulang rangkaian harus dipilih jika ia mempunyai setting arus yang besar.

2. Pilih skala arus yang tepat

Anggap suatu sistem yang besar dengan lebih dari satu trafo tegangan. Kurva karakteristik peralatan terkecil digambarkan sejauh mungkin pada bagian kiri kertas logaritmis jadi kertas logaritmis tidak penuh pada bagian kanan kertas. Lebih dari 4 atau 5 kurva karakteristik arus dan waktu pada suatu kertas logaritmis akan membingungkan, biasanya kurva itu overlap. Semua karakteristik rele harus digambarkan pada skala arus yang sama walaupun mereka pada level tegangan yang berbeda. Sebagai contoh, trafo dengan daya kompleks 750 kVA dengan tegangan primer 4160 V dan tegangan sekunder 480 V. Asumsikan trafo ini dilengkapi dengan pemutus tenaga di bagian primer dan pemutus tenaga di bagian sekunder yang menyuplai daya ke beberapa penyulang. Pada sistem ini, arus beban penuh dari sisi sekunder trafo adalah  $(750 \times 10^3)/(480 \times \sqrt{3}) = 902$  A. Ketika arus ini mengalir, maka di saat yang bersamaan arus yang mengalir pada sisi primer trafo nilainya merupakan rasio tegangan sekunder dengan tegangan primer trafo yang dikalikan dengan arus beban penuh pada sisi sekunder trafo. Dimana  $(480/4160) \times 902 = 104$  A. Jika arus beban penuh di definisikan pada 1 pu sehingga arus beban penuh 902 A pada tegangan 480 V sama dengan arus beban penuh 104 A pada tegangan 4160 V. Sehingga apabila digambarkan pada kertas logaritmis, setting arus pick up baik pada sisi tegangan primer maupun sekunder memiliki nilai yang sama dan juga gambar kurva karakteristik yang sama.

3. Gambarkan sebuah diagram satu garis yang kecil yang akan digambarkan diatas kurva yang akan digunakan sebagai referensi untuk kurva karakteristik yang akan di gambar dengan peralatan pada diagram

4. Pada kertas logaritmis, indikasikan point-point yang penting berikut :
  - a. Arus hubung singkat maksimum dan minimum yang mungkin melewati rele
  - b. Arus beban penuh trafo dan arus aliran daya yang signifikan
  - c. Kurva kerusakan  $I^2t$  untuk trafo, kabel, motor dan peralatan yang lainnya
  - d. Arus inrush trafo
  - e. Kurva start motor mengindikasikan arus rotor terkunci, arus beban penuh dan waktu start motor
5. Mulai menggambar kurva karakteristik peralatan pengaman dimulai pada level tegangan terendah dan beban terbesar. Kadang kala skala arus yang spesifik dipilih. Menghitung pengali yang tepat untuk beberapa level tegangan yang digunakan pada studi. Kurva karakteristik untuk peralatan pengaman dan kurva kerusakan akibat gangguan hubung singkat untuk peralatan bisa ditempatkan pada permukaan halus yang terang seperti kertas putih. Kurva untuk semua jenis setting dan rating peralatan yang telah dipelajari mungkin diuji atau diulang kembali.

Koordinasi peralatan proteksi yang selektif harus berdasarkan limit karakteristik peralatan yang digunakan secara seri, batas dari beberapa peralatan proteksi ditentukan oleh arus beban penuh, arus hubung singkat, arus start motor, kurva kerusakan thermal dan beberapa standar yang dapat dipakai atau persyaratan NEC.

#### **2.4.6 Pengaman Motor Induksi**

Motor listrik merupakan suatu peralatan yang luas sekali pemakaiannya sehingga pengaman dari motor listrik tergantung dari tipe motor listrik dan beban apa yang diberikan padanya. Banyak ciri khas dari motor listrik, sehingga ketika ingin merancang pengaman banyak sekali parameter yang harus diketahui. Sebagai contoh :

- Arus start, arus stall dan waktu percepatan motor harus diketahui ketika mensetting pengaman beban lebih (overload)

- Ketahanan thermal mesin ketika beban seimbang atau tidak seimbang harus di definisikan secara jelas

Pengaman motor ditentukan oleh 2 kategori yaitu kondisi internal dan eksternal. Yang membentuk kategori ini adalah ketidakseimbangan supply tegangan, tegangan kurang, satu fasa terbuka dan urutan fasa terbalik saat start. Kategori yang lain adalah kegagalan bearing, hubung singkat antar lilitan dan yang sering terjadi adalah gangguan tanah dan kelebihan beban. Walaupun pengaman motor tergantung dari ukuran motor dan beban dari motor tapi semua motor harus ada pengaman beban lebih (overload) dan ketidakseimbangan tegangan dan ini biasanya ada pada 1 rele.

#### **2.4.6.1 Pengaman beban lebih (overload)**

Kurva karakteristik motor tidak mungkin menggambarkan dengan baik semua type dan rating motor karena luasnya penggunaan dan desain motor. Sebagai contoh :

- a. Motor yang digunakan untuk beban yang berubah-ubah dimana jika motor rusak maka proses yang ada akan berhenti. Pada kasus ini mungkin secara bijak kita akan mensetting rele dengan setting arus yang tinggi agar motor bisa berputar selama mungkin agar proses bisa terus berjalan
- b. Motor yang digunakan untuk beban yang tetap. Pada kasus ini kita bisa mensetting peralatan pengaman jika terjadi gangguan bisa trip lebih cepat

Secara umum, tidak semua informasi yang dibutuhkan untuk menset rele kelebihan beban secara akurat tersedia pada masing-masing mesin oleh karena itu hanya mungkin mendesain pengaman yang mendekati karakteristik panas dari motor. Selain hal tersebut kita juga harus yakin bahwa rele menyediakan waktu operasi yang baik untuk memungkinkan motor start, hal ini dapat dilakukan dengan menset waktu kerja rele.

#### **2.4.6.2 Pengaman rotor terkunci**

Pengaman ini mempunyai fungsi untuk melindungi motor dari keadaan rotor terkunci atau tidak bisa start. Desain dari motor menunjukkan bahwa arus start dari motor adalah 6 kali arus beban penuh. Nilai arus ini akan cepat turun

menuju nilai kondisi tunak (steady state). Setting dari pengaman rotor terkunci berdasarkan nilai arus dan waktu start motor juga waktu maksimal yang bisa ditanggung motor menanggung arus start ini. Sebagai pengaman rotor terkunci, peralatan ini merupakan pengaman cadangan sedangkan pengaman utama adalah rele arus lebih dengan tunda waktu.

#### **2.4.6.3 Pengaman arus lebih**

IEEE std C37.96-2000 tentang pengaman motor AC memberikan pedoman untuk setting rele arus lebih waktu terbalik yaitu :

1. Untuk aplikasi dimana rele arus lebih waktu terbalik dikordinasikan dengan rele beban lebih maka arus pickup dapat diset diantara 150% sampai 175% arus beban
2. Motor yang digunakan untuk kondisi darurat seperti pompa pemadam kebakaran, keamanan ancaman nuklir atau proses kimia biasanya mempunyai sebuah rele arus lebih waktu terbalik yang ditambahkan dengan rele seketika (instantenous). Rele arus lebih waktu terbalik bisa diset pada 115% arus beban penuh dan rele seketika pada 125% sampai 200% arus beban penuh
3. Ketika digunakan untuk pengaman rotor terkunci yang berkepanjangan maka margin 2 detik digunakan untuk motor dengan waktu start diantara 5-10 detik dan margin 5 detik untuk motor dengan waktu start 40-50 detik
4. Ketika waktu tunda tidak bisa diset untuk mendapatkan margin yang diinginkan diatas arus start dan masih mengamankan motor maka kita harus mengawasi rele arus lebih dengan peralatan pengaman lainnya. Pada aplikasi ini pickup rele arus lebih dapat diset pada 175%-250% arus beban penuh motor

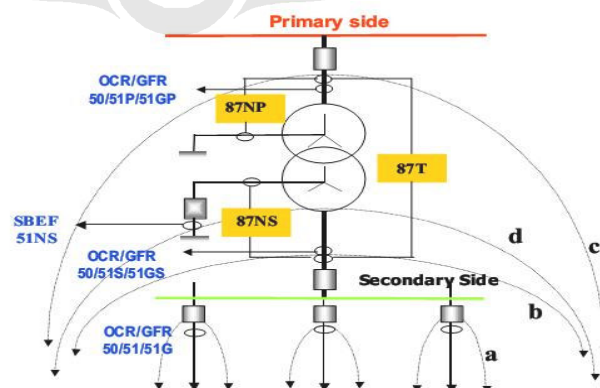
#### **2.4.7 Pengaman Trafo**

Trafo merupakan salah satu komponen terpenting dalam sistem tenaga listrik dan juga merupakan komponen termahal di sebuah gardu induk yang menjadikan alasan kenapa trafo dibutuhkan sebuah sistem proteksi untuk menjaga kontinuitas pelayanannya. Gangguan pada sebuah trafo tenaga berkapasitas daya

terpasang terbesar dapat menyebabkan pemadaman yang besar pula. Jika gangguan ini tidak diisolir dengan cepat, akan terjadi kerusakan yang parah yang juga mengganggu kestabilan sistem secara keseluruhan. Seperti halnya pengaman peralatan sistem tenaga listrik yang lain, pemilihan proteksi trafo juga mempertimbangkan aspek ekonomi. Pengaman trafo-trafo kecil (beberapa ratus kVA) cukup dengan pengaman lebur (fuse), tetapi trafo-trafo besar (beberapa ratus MVA) harus komprehensif seperti terlihat pada tabel. Proteksi pun terbagi menjadi 2 berdasarkan prioritas yaitu utama (primary) dan cadangan (back up) seperti terlihat pada tabel. Rele arus lebih pada sisi sekunder trafo distribusi merupakan cadangan dari rele arus lebih yang terletak pada penyulang beban seperti juga terlihat pada gambar daerah kerja proteksi trafo berikut.

Tabel 2.3 Jenis gangguan dengan pembagian fungsi pengaman

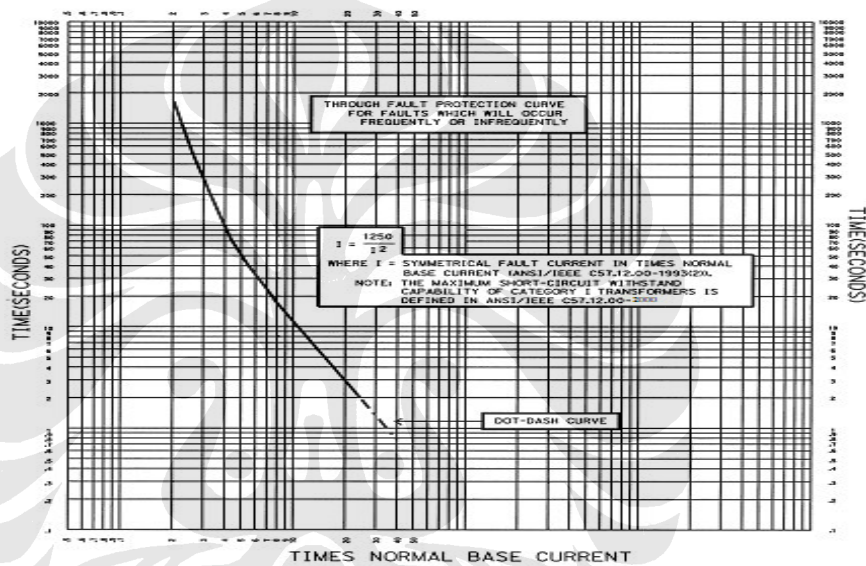
No	Jenis Gangguan	Proteksi		Akibat
		Utama	Back up	
1	Hubung singkat di dalam daerah pengamanan trafo	Diferensial REF Bucholz Tangki Tanah Tekanan lebih	OCR GFR	Kerusakan pada isolasi, kumparan atau inti Tangki mengembang
2	Hubung singkat di luar daerah pengamanan trafo	OCR GFR SBEF	OCR GFR	Kerusakan pada isolasi atau kumparan atau NGR
3	Beban lebih	Relai suhu	OCR	Kerusakan isolasi
4	Gangguan sistem pendingin	Relai suhu	-	Kerusakan isolasi
5	Gangguan pada OLTC	Jansen Tekanan lebih	-	Kerusakan OLTC
6	Tegangan lebih	OVR LA	-	Kerusakan isolasi



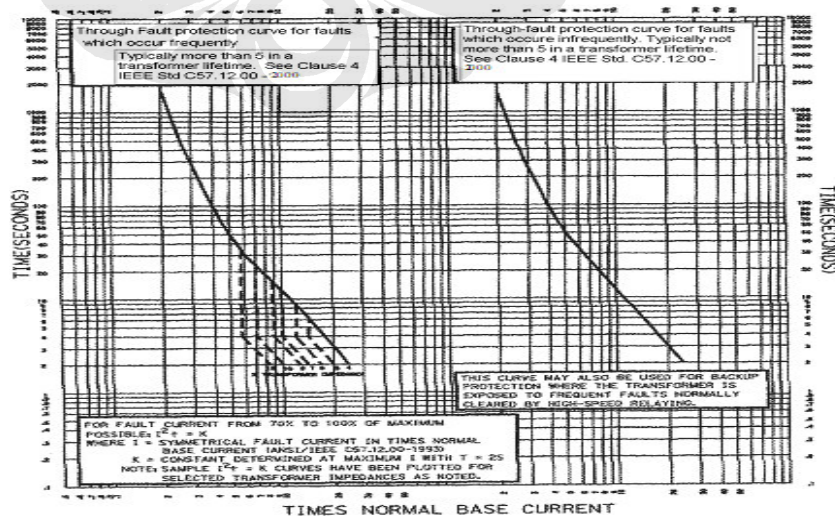
Gambar 2.28 Daerah pengaman trafo

### 2.4.7.1 Pengaman Arus Lebih

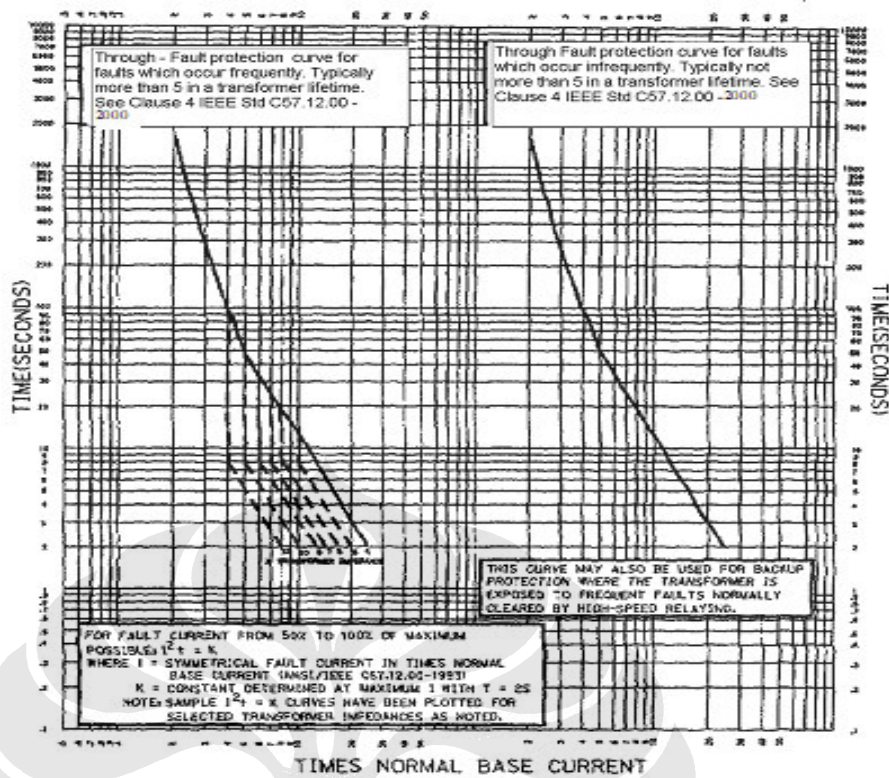
Pengaman arus lebih pada trafo umumnya digunakan pada saat gangguan hubung singkat fasa dan tanah. Pengaman arus lebih digunakan sebagai pengaman utama apabila rele differensial tidak bekerja (dalam hal ini khusus trafo kategori 1&2) dan juga sebagai pengaman cadangan apabila rele differensial bekerja (dalam hal ini khusus trafo kategori 3&4). Zona pengaman arus lebih dalam satu sistem tenaga listrik lebih luas daripada daerah kerja pengaman trafo sehingga proteksi arus lebih perlu dikoordinasikan satu sama lain.



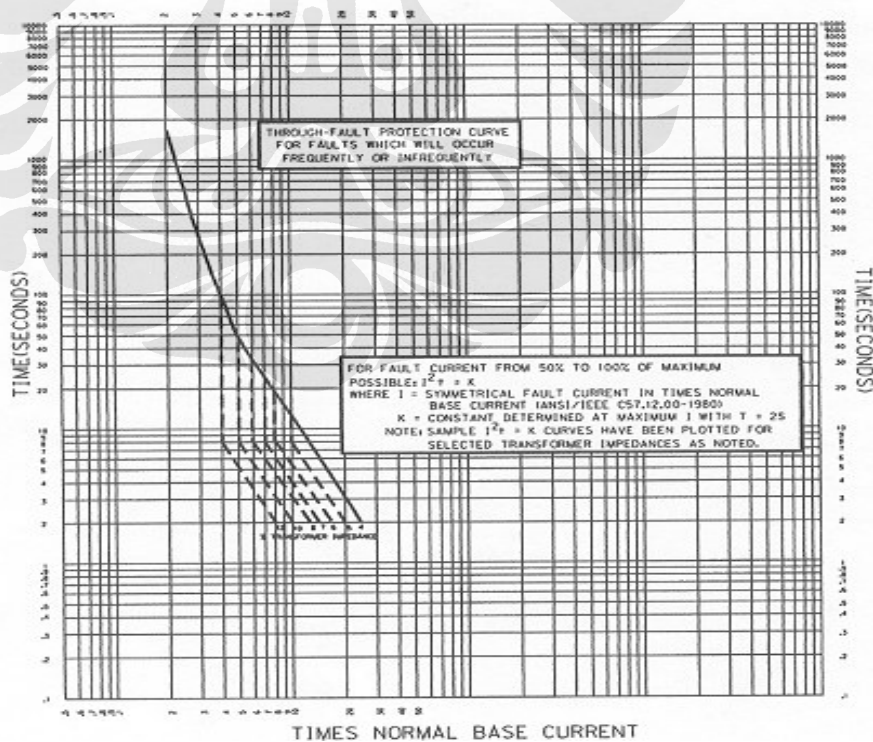
Gambar 2.29 Trafo kategori 1



Gambar 2.30 Trafo kategori 2



Gambar 2.31 Trafo kategori 3



Gambar 2.32 Trafo kategori 4



Pada dasarnya pengaman arus lebih pada trafo bertujuan membatasi arus gangguan sampai di bawah kapabilitas ketahanan gangguan yang melewati trafo. Gangguan hubung singkat dapat dibagi menjadi berdasarkan frekuensi gangguan yaitu gangguan yang sering (frequent) dan jarang (infrequent). Kita dapat melihat zona insiden yang membagi gangguan berdasarkan frequent dan infrequent yang terlihat pada gambar .Kapabilitas ketahanan gangguan pada trafo didefinisikan pada IEEE standar C57.91 – 1995 yang terlihat pada table berikut.

Tabel 2.4 Kapabilitas ketahanan gangguan hubung singkat pada trafo

Category	Transformer Rating – KVA		Use Curve	Frequent Faults	<sup>b</sup> Dotted Curves Apply From
	1 Phase	3 Phase			
I	5 – 500	15 – 500	a	-	$t = \frac{25 - 501}{60 I^2} = \frac{1250}{I^2}$ at 60 Hz, where
II	501 – 1,667	501- 5,000	a or a+b	10	70% – 100% of max possible fault where $I^2 t = K$ , $K$ is determined at max I; where $t = 2$
III	1668 – 10,000	5,001 – 30,000	a or a+c	5	50% – 100% of max possible fault where $I^2 t = K$ , $K$ is determined at max I; where $t = 2$
IV	> 10,000	> 30,000	a+c	-	As Above

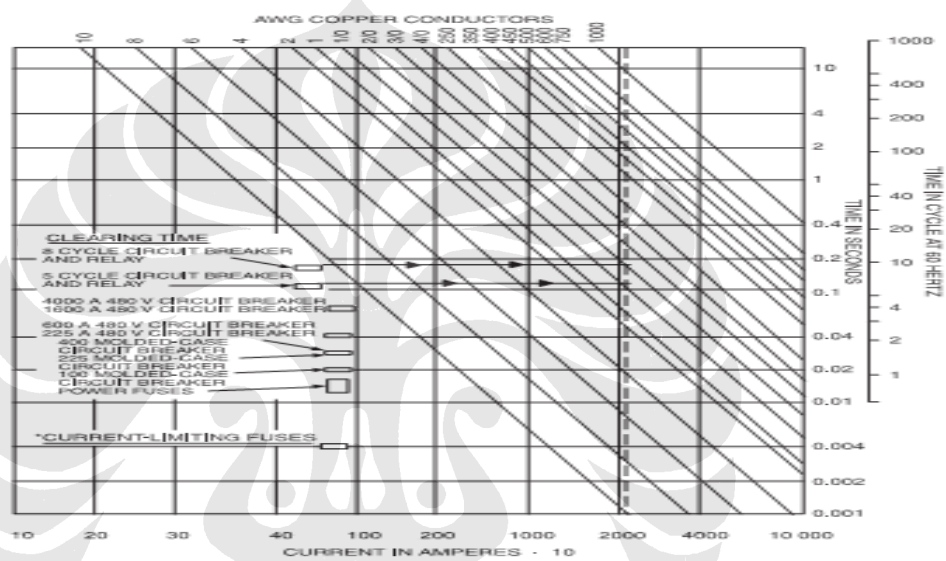
Prosedur koordinasi kurva pengaman gangguan trafo dengan rele arus lebih yang berada di luar zona proteksi trafo dengan menentukan rating ketahanan trafo terlebih dahulu adalah sebagai berikut :

1. Pilih kategori trafo berdasarkan kapasitas daya terpasang
2. Jika yang terpilih adalah trafo kategori 2 dan 3 maka dipilih lagi apakah termasuk sering (frequent) atau jarang (infrequent)
3. Pilih kurva untuk kategori trafo dengan pilihan sering (frequent) atau jarang (infrequent)
4. Plot kembali dengan menggunakan setting arus primer ataupun sekunder trafo, arus sekunder digunakan apabila berkoordinasi dengan proteksi di sisi hilir
5. Pilih parameter fuse atau rele seperti tap, time dial setting sehingga didapat koordinasi yang selektif dengan kurva ketahanan gangguan trafo

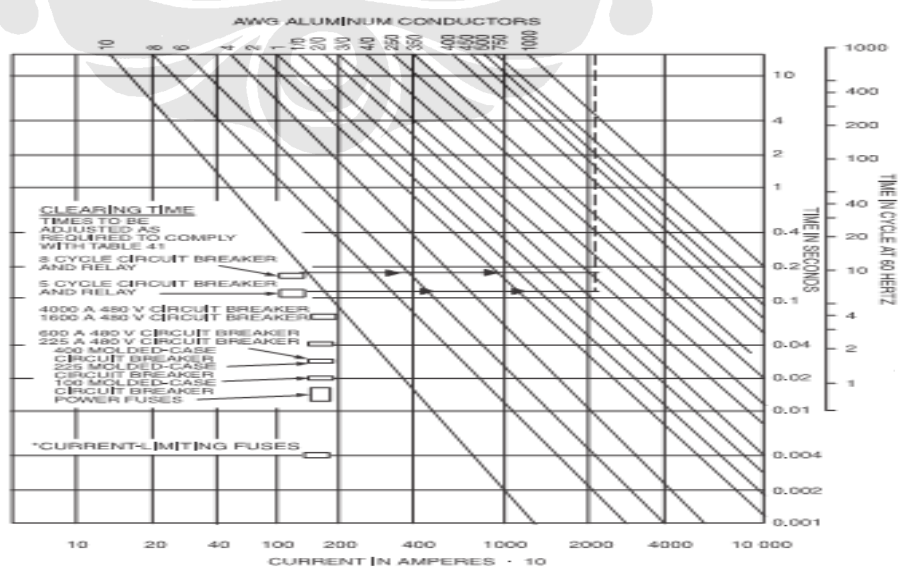
## 2.4.8 Pengaman Kabel

### 2.4.8.1 Pengaman Arus Hubung Singkat

Rele pengaman harus memenuhi pengaman maksimum dari bahaya kerusakan akibat arus gangguan hubung singkat terhadap kabel sehingga kurva arus-waktu di kertas logaritmis dari rele arus lebih cenderung di kiri bawah dari kurva arus hubung singkat maksimum baik untuk isolasi konduktor tembaga maupun aluminium seperti terlihat pada gambar berikut.



Gambar 2.33 arus hubung singkat maksimum untuk isolasi tembaga



Gambar 2.34 arus hubung singkat maksimum untuk isolasi aluminium

### 2.4.8.2 Prosedur Koordinasi

Rele pengaman seharusnya dikoordinasikan untuk memberikan cukup pengaman terhadap kabel dari arus hubung singkat. Proses ini mudah dilakukan dengan memplot kombinasi kurva arus-waktu dari rele dan kabel pada kertas logaritmis. Kurva arus-waktu dari rele pengaman seharusnya di bawah dan cenderung ke kiri dari kurva arus-waktu hubung singkat maksimum dari pengaman kabel. Langkah-langkah untuk mencapai itu semua adalah sebagai berikut :

1. Mencari nilai ekivalen arus gangguan lalu total waktu untuk membersihkan gangguan (total fault-clearing time)

Untuk mendapatkan waktu terjadinya gangguan hubung singkat dapat diketahui dari persamaan berikut untuk masing-masing jenis kabel:

- Tembaga

$$\left(\frac{I}{A}\right)^2 t = 0.0297 \log \left( \frac{T_2 + 234}{T_1 + 234} \right) \quad (2.22)$$

- Alumunium

$$\left(\frac{I}{A}\right)^2 t = 0.0125 \log \left( \frac{T_2 + 228}{T_1 + 228} \right) \quad (2.23)$$

Dimana :

A = ukuran konduktor

I = arus hubung singkat

t = waktu dari hubung singkat

T<sub>1</sub> = temperature operasi

T<sub>2</sub> = temperature pada saat arus hubung singkat maksimum

2. Mencari kapabilitas hubung singkat dari kabel
3. Gambar kurva batas thermal hubung singkat