

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Distribusi

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan suatu sistem jaringan yang menghubungkan gardu induk sampai saluran distribusi sekunder pada konsumen. Apabila saluran transmisi menyalurkan tenaga listrik bertegangan tinggi ke pusat-pusat beban dalam jumlah besar, maka saluran distribusi berfungsi membagikan tenaga listrik tersebut kepada pihak pemakai melalui saluran tegangan rendah.

Pada gardu Induk (GI). Tenaga listrik yang diterima kemudian dilepaskan menuju Trafo Distribusi (TD) dalam bentuk tegangan menengah 20 kV, melalui trafo distribusi yang tersebar diberbagai pusat-pusat beban. Tegangan distribusi primer ini diturunkan menjadi tegangan rendah 220/380 V yang akhirnya diterima pihak pemakai.

2.2 Jaringan Distribusi Primer

Jaringan distribusi primer adalah jaringan yang terletak antara gardu induk dengan transformator distribusi. Pada dasarnya ada 4 macam bentuk jaringan distribusi primer, yaitu:

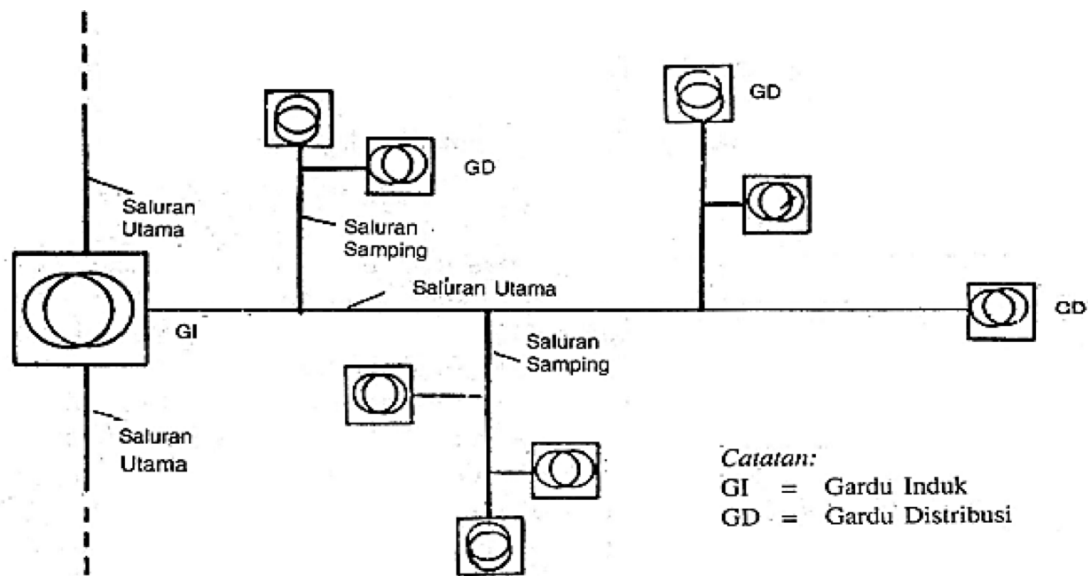
1. Jaringan Distribusi Primer Radial.
2. Jaringan distribusi primer tertutup (loop).
3. Jaringan distribusi primer jarring-jaring (Grid/Network).
4. Jaringan distribusi primer spindle

Oleh karena jaringan distribusi primer dari penyulang-penyulang yang disuplai dari gardu induk Kebonagung merupakan jaringan distribusi primer radial, maka berikut akan dijelaskan jaringan distribusi radial.

2.2.1 Jaringan Distribusi Primer Radial

Jaringan distribusi primer tipe radial adalah jaringan distribusi yang paling sederhana dan banyak dipakai. Jaringan ini terdiri atas feeder atau rangkaian sendiri, yang seolah-olah keluar dari suatu atau wilayah tertentu secara radial. Feeder itu dianggap mempunyai suatu bagian utama dari saluran samping atau lateral lain dan dihubungkan bersumber

transformator distribusi sebagaimana terlihat pada gambar 2.1 berikut ini.



Gambar 2.1 Skema saluran jaringan distribusi radial

Secara umum pengertian sistem proteksi ialah cara untuk mencegah atau membatasi kerusakan peralatan terhadap gangguan, sehingga kelangsungan penyaluran tenaga listrik dapat dipertahankan.

Sistem proteksi penyulang tegangan tinggi ialah pengamanan yang terdapat pada sel-sel tegangan tinggi di Gardu Induk dan pengamanan yang terdapat pada jaringan tegangan tinggi. Penyulang tegangan tinggi ialah penyulang tenaga listrik yang berfungsi untuk mendistribusikan tenaga listrik tegangan tinggi (20 kV – 150 kV), yang terdiri dari :

1. Saluran udara tegangan tinggi (SUTT).
2. Saluran kabel tegangan tinggi (SKTT).

2.3 Tujuan Sistem Proteksi

Gangguan pada sistem distribusi tenaga listrik hampir seluruhnya merupakan gangguan hubung singkat, yang akan menimbulkan arus yang cukup besar. Semakin besar sistemnya semakin besar gangguannya. Arus yang besar bila tidak segera dihilangkan akan merusak peralatan yang dilalui arus gangguan. Untuk melepaskan daerah yang terganggu itu maka diperlukan suatu sistem proteksi, yang pada dasarnya adalah alat pengamanan yang bertujuan untuk melepaskan atau membuka sistem yang terganggu, sehingga arus gangguan ini akan padam.

Adapun tujuan dari sistem proteksi antara lain :

1. Untuk menghindari atau mengurangi kerusakan akibat gangguan pada peralatan atau peralatan yang dilalui oleh arus gangguan.
2. Untuk melokalisir (mengisolir) daerah gangguan menjadi sekecil mungkin.
3. Untuk dapat memberikan pelayanan listrik dengan keandalan yang tinggi kepada konsumen. Serta memperkecil bahaya bagi manusia.

2.4 Fungsi Pengaman

Keberhasilan suatu sistem dapat diperhatikan dari kontinuitas pelayanannya. Kontinuitas pelayanannya baik jika adanya gangguan dapat diatasi sebaik mungkin dan tidak merusak peralatan pada sistem distribusi. Daerah gangguan dapat dilokalisir sekecil mungkin, sehingga pemutusan dapat ditekan sedikit mungkin. Oleh karena itu diperlukan sistem pengaman untuk sistem distribusi.

Fungsi sistem pengaman pada suatu sistem distribusi energi listrik adalah:

1. Untuk menghindari atau mengurangi kerusakan peralatan listrik akibat gangguan, semakin cepat reaksi perangkat sistem proteksi yang digunakan, maka semakin sedikit pengaruh gangguan terhadap kerusakan peralatan listrik yang ada pada jaringan tersebut.
2. Untuk melokalisir luas daerah yang terganggu, sehingga daerah yang terganggu sesempit mungkin.
3. Untuk Memberi Pelayanan Listrik dengan keandalan tinggi pada konsumen.
4. Untuk mengamankan manusia terhadap bahaya listrik.

2.5 Macam-Macam Pengaman Jaringan Distribusi

2.5.1 Circuit Breaker (Pemutus Tenaga)

Adalah peralatan yang dipasang di gardu induk yang berfungsi untuk menghubungkan dan memutuskan arus beban dan arus gangguan.

Macam-macam PMT:

- a. Berdasarkan media pemadam busur api:
 - PMT yang menggunakan minyak sebagai media pemadamnya
 - PMT yang menggunakan gas SF₆ sebagai media pemadamnya.
 - PMT yang menggunakan Udara Hembus sebagai media pemadamnya.
 - PMT yang menggunakan Sistem Vacuum sebagai media pemadamnya.

b. Berdasarkan jenis penggerak:

- PMT dengan penggerak Pegas
- PMT dengan penggerak Udara/Pneumatis
- PMT dengan penggerak Hidrolis

2.5.2 LBS (Load Break Switch)

LBS (*Load Break Switch*) merupakan saklar pemutus beban yang digunakan pada jaringan yang memerlukan pemadaman atau untuk menghubungkan jaringan satu dengan yang lain secara manual. Penggunaan LBS memungkinkan untuk mempersempit daerah yang mengalami pemadaman karena adanya gangguan atau perbaikan jaringan.

2.6 Rele Arus Lebih

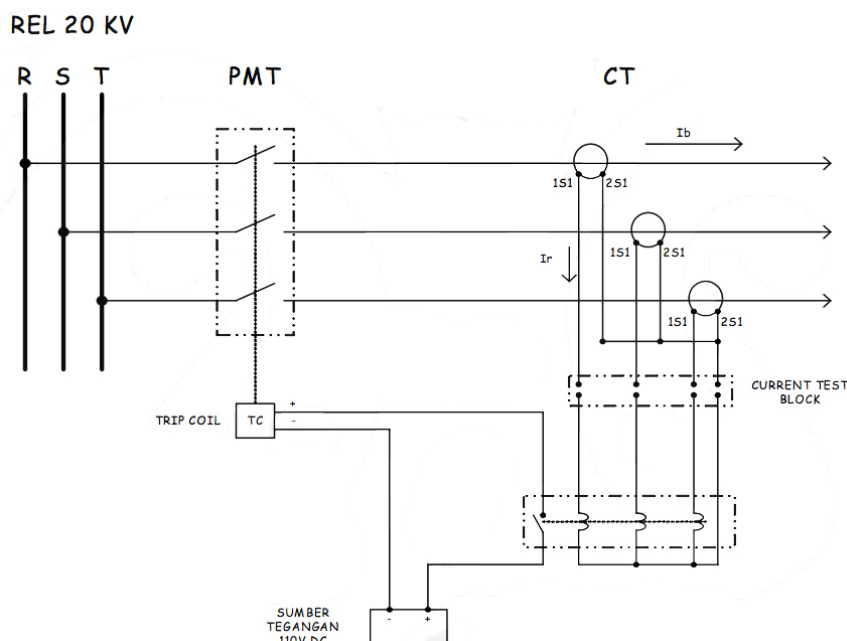
Rele arus lebih adalah suatu rele yang bekerja berdasarkan adanya kenaikan arus yang melebihi suatu penilaian pengaman. Agar peralatan yang ada tidak rusak apabila dilewati arus yang melebihi kemampuannya maka selain peralatan tersebut harus diamankan terhadap kenaikan arusnya juga pengaman harus dapat bekerja pada jangka waktu yang telah ditentukan. Rele arus lebih akan menutup kontak-kontaknya untuk menggerakkan rangkaian yang menyebabkan pemutusan tenaga membuka atau menutup saat arus mencapai suatu nilai yang telah ditentukan sebelumnya. Dengan demikian maka rele arus lebih terdapat kepekaan terhadap besar arus yang mengalir.

Pada transformator tenaga, rele arus lebih hanya berfungsi sebagai pengaman cadangan (*back up protection*) untuk gangguan eksternal atau sebagai back up bagi outgoing feeder. Rele arus lebih dapat dipasang pada sisi tegangan tinggi, atau pada sisi tegangan menengah, atau pada sisi tegangan tinggi dan tegangan menengah sekaligus. Selanjutnya Rele Arus Lebih dapat mentripkan PMT pada sisi dimana rele terpasang atau dapat mentripkan PMT di kedua sisi transformator tenaga. Rele Arus Lebih jenis definite time ataupun inverse time dapat dipakai untuk proteksi transformator terhadap arus lebih. Sebagai pengaman Transformator tenaga dan SUTT bertujuan untuk :

- Mencegah kerusakan Transformator tenaga atau SUTT dari gangguan hubung singkat.
- Membatasi luas daerah terganggu (pemadaman) sekecil mungkin.
- Hanya bekerja bila pengaman utama Transformator tenaga atau SUTT tidak bekerja.

2.6.1 Prinsip Kerja Rele Arus Lebih

Prinsip kerja Rele Arus Lebih adalah berdasarkan adanya arus lebih yang dirasakan rele, baik disebabkan adanya gangguan hubung singkat atau *overload* (beban lebih) untuk kemudian memberikan perintah *trip* ke PMT sesuai dengan karakteristik waktunya.



Gambar 2.2 Rangkaian pengawatan rele arus lebih

Cara kerjanya dapat diuraikan sebagai berikut :

- Pada kondisi normal arus beban (I_b) mengalir pada SUTM / SKTM dan oleh trafo arus besaran arus ini di transformasikan ke besaran sekunder (I_r). Arus (I_r) mengalir pada kumparan rele tetapi karena arus ini masih lebih kecil dari pada suatu harga yang ditetapkan (*setting*), maka relai tidak bekerja.
- Bila terjadi gangguan hubung singkat, arus (I_b) akan naik dan menyebabkan arus (I_r) naik pula, apabila arus (I_r) naik melebihi suatu harga yang telah ditetapkan (diatas *setting*), maka relai akan bekerja dan memberikan perintah trip pada tripping coil untuk bekerja dan membuka PMT, sehingga SUTM / SKTM yang terganggu dipisahkan dari jaringan.

2.6.2 Setting Rele Arus Lebih

- Arus Setting Rele Arus Lebih

Penyetelan rele arus lebih pada sisi primer dan sisi sekunder transformator tenaga terlebih dahulu harus dihitung arus nominal transformator tenaga. Arus setting untuk rele

arus lebih baik pada sisi primer maupun pada sisi sekunder transformator tenaga adalah:

$$I_{set(primer)} = 1,05 \times I_{nominal\ trafo} \dots\dots\dots (2-1)$$

Nilai tersebut adalah nilai primer, Untuk mendapatkan nilai setelan sekunder yang dapat disetkan pada relay OCR, maka harus dihitung dengan menggunakan ratio trafo arus (CT) yang terpasang pada sisi primer maupun sisi sekunder transformator tenaga.

$$I_{set(sekunder)} = I_{set(pri)} \times \frac{1}{Ratio\ CT} \dots\dots\dots (2-2)$$

- Setting Waktu (TMS)

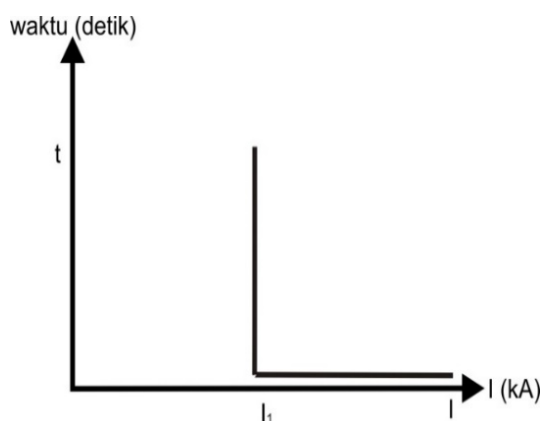
Hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat, selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai setelan waktu (TMS).

2.6.3 Karakteristik Rele Arus Lebih

Berdasarkan waktu kerjanya, rele arus lebih menjadi tiga jenis :

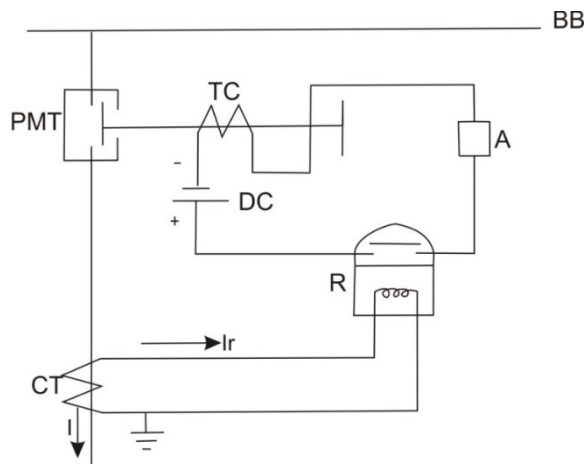
a. Rele Arus Lebih Waktu Seketika (Instan)

Rele arus lebih waktu seketika adalah jenis rele arus lebih yang paling sederhana dimana jangka waktu kerja rele yaitu mulai saat rele mengalami pick up sampai selesainya kerja rele sangat singkat, yaitu sekitar 20-100 milidetik tanpa adanya penundaan waktu (Ravindranath, 1976:51). Rele ini memiliki waktu kerja yang sangat cepat dibandingkan dengan rele lainnya. Pada setelan koordinasi proteksi di sistem distribusi tegangan menengah disebut setelan momen/instan/cepat (Sarimun, 2012). Karakteristik rele arus lebih seketika, bekerjanya didasarkan pada besarnya arus gangguan hubung singkat yang dipilih, ditunjukkan pada gambar 8.3 dibawah ini.



Gambar 2.3 Karakteristik rele arus lebih waktu seketika
Sumber: Setiyo (tanpa tahun,p.28).

Rangkaian rele arus lebih waktu seketika dapat dilihat pada gambar 2.4. bila nilai arus beban I naik melebihi harga yang diijinkan, maka harga I_r juga akan naik, maka rele arus seketika akan bekerja. Ketika rele arus lebih waktu seketika berkerja maka kontaktor akan bergerak dan menutup kontak. Dengan demikian, rangkaian pemutus akan tertutup.



Gambar 2.4 Rangkaian rele arus lebih waktu seketika
Sumber: Setiyo (tanpa tahun,p.27).

Pada kumparan pemutus akan dialiri arus searah yang selanjutnya akan memberikan perintah pada kontak pemutus untuk bekerja, sehingga bagian sistem yang harus diamankan terbuka. Pemasangan *alarm* akan memberitahukan jika rele arus lebih bekerja.

Dalam sistem pengaman suatu jaringan tenaga listrik biasanya rele arus lebih waktu *invers* dikombinasikan dengan rele arus lebih waktu instan karena rele arus lebih waktu *invers* kurang efektif dalam mengamankan gangguan oleh karena itu, penambahan rele arus lebih instan tanpa perlambatan waktu maka koordinasi antara satu dan seksi lainnya untuk mendapatkan selektifitas didasarkan tingkat beda arus (*current grading*). Penyetelan rele ini adalah:

a) Penyetelan Arus Pada Bagian Sekunder

Besarnya penyetelan arus pada bagian sekunder sebesar:

$$I_{\text{instan sekunder}} = \frac{I_{\text{instan}}}{I_{\text{set primer}}} \dots\dots\dots (2-3)$$

dengan :

$I_{\text{instan sekunder}}$ = Penyetelan arus instan pada bagian sekunder (Ampere)

I_{instan} = Penyetelan arus instan (Ampere)

$I_{\text{set primer}}$ = Penyetelan arus pada bagian primer (Ampere)

Dengan penyetelan arus instan sisi penyulang, dengan arus maksimum adalah:

$$\left. \begin{array}{l} \bullet \text{ Trafo kapasitas 10 MVA maksimum } 3,2 \times I_{n \text{ trafo}} \\ \bullet \text{ Trafo kapasitas 16 MVA maksimum } 3,0 \times I_{n \text{ trafo}} \\ \bullet \text{ Trafo kapasitas 20 MVA maksimum } 2,6 \times I_{n \text{ trafo}} \\ \bullet \text{ Trafo kapasitas 30 MVA maksimum } 2,4 \times I_{n \text{ trafo}} \\ \bullet \text{ Trafo kapasitas 50 MVA maksimum } 2,2 \times I_{n \text{ trafo}} \\ \bullet \text{ Trafo kapasitas 60 MVA maksimum } 2,0 \times I_{n \text{ trafo}} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (2-4)$$

Untuk penyetelan sisi masukan 20 kV sebesar:

$$I_{instan} = 4 \times I_{n \text{ trafo}} \dots\dots\dots (2-5)$$

dengan:

$I_{n \text{ trafo}}$ = Arus nominal transformator daya (Ampere)

Untuk menghitung arus nominal transformator daya menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$I_{n \text{ trafo}} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV_{L-L}} \dots\dots\dots (2-6)$$

b) Penyetelan arus pada bagian primer

Besarnya penyetelan arus pada bagian primer sebesar:

$$I_{instan \text{ primer}} = I_{instan \text{ sekunder}} \times I_{set \text{ primer}} \dots\dots\dots (2-7)$$

dengan:

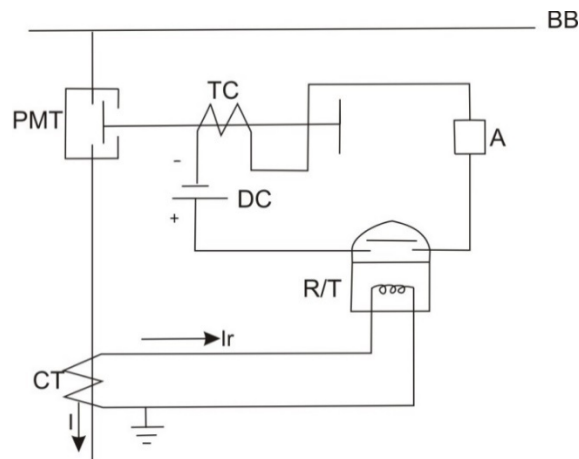
$I_{instan \text{ primer}}$ = Penyetelan arus instan pada bagian primer (Ampere)

Penyetelan waktu rele arus lebih seketika sisi penyulang berkisar antara 20 – 100 milidetik, sedangkan untuk sisi masukan 20 kV penyetelan waktunya lebih besar dari penyetelan waktu sisi penyulang.

b. Rele Arus Lebih Waktu Terbalik (Invers)

Rele arus lebih yang memiliki karakteristik waktu arus berbanding terbalik merupakan

rele arus lebih yang mana jangka waktu rele dari *pick up* sampai selesainya kerja rele tergantung dari besarnya arus yang mengalir di kumparan relenya. Rele arus lebih waktu terbalik mempunyai nilai arus dan waktu kerjanya yang bersifat terbalik. Di bawah ini merupakan rangkaian rele arus lebih terbalik ditunjukkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Rangkaian rele arus lebih waktu terbalik

Ada beberapa jenis perlindungan waktu invers yang dibedakan oleh gradient kurvanya. Berikut merupakan persamaan penyetelan waktu rele arus lebih:

Tabel 2.1

Karakteristik Operasi Waktu Jenis Relé *Inverse Time*

Tipe rele	Setelan Waktu
Standard Inverse	$t = \frac{0,14 \times TMS}{\left(\frac{I_f}{I_s}\right)^{0,02} - 1}$
Very Inverse	$t = \frac{13,5 \times TMS}{\left(\frac{I_f}{I_s}\right) - 1}$
Extremely Inverse	$t = \frac{80 \times TMS}{\left(\frac{I_f}{I_s}\right)^2 - 1}$
Long Time Earth Fault	$t = \frac{120 \times TMS}{\left(\frac{I_f}{I_s}\right) - 1}$

dengan:

TMS = *Time Multiple Setting*. Nilai ini yang disetkan ke rele sebagai konstanta (tanpa satuan)

T = Waktu beroperasinya rele (detik)

I_f = arus gangguan hubung singkat (Ampere), pada sistem distribusi tenaga listrik. Penyetelan rele arus lebih, I_f diambil arus gangguan tiga fasa atau antar fasa terbesar.

I_s = Arus penyetelan yang dimasukkan ke rele (Ampere)

Perhitungan untuk penyetelan arus pada rele arus lebih yang terpasang pada penyulang dihitung berdasarkan arus beban maksimum yang mengalir dipenyulang sedangkan rele arus lebih yang terpasang di masukan 20 kV dihitung berdasarkan arus nominal pada transformator daya.

Nilai penyetelan primer rele arus lebih jenis *invers* akan digunakan untuk menghitung waktu kerja rele arus lebih apabila terjadi gangguan pada saluran dan mengaktifkan PMT (Pemutus Tenaga).

Perhitungan nilai penyetelan arus sekunder rele arus lebih *invers* dihitung dengan menggunakan ratio transformator arus yang terpasang pada sisi masukan maupun sisi penyulang 20 kV. Sehingga persamaan bagian primer dan sekunder adalah:

$$I_{set\ primer} = 1,05 \text{ s/d } 1,3 \times I_{beban} \dots\dots\dots (2-8)$$

$$I_{set\ sekunder} = I_{set\ sekunder} \times \frac{1}{ratio\ CT} \dots\dots\dots (2-9)$$

dengan:

$I_{set\ primer}$ = penyetelan arus pada bagian primer (Ampere)

$I_{set\ sekunder}$ = penyetelan arus pada bagian sekunder (Ampere)

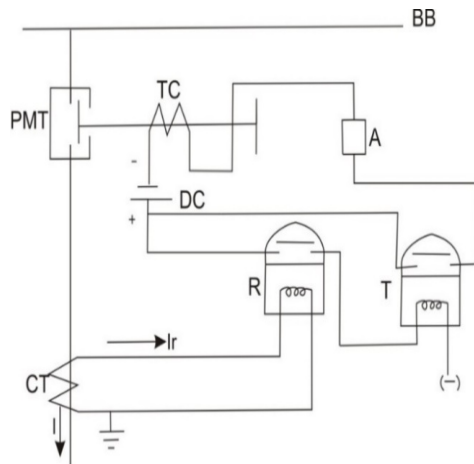
Nilai TMS pada rele arus lebih jenis *invers* dapat dicari dengan menggunakan persamaan :

$$TMS = \frac{\left[\left(\frac{I_f}{I_{set}} \right)^\alpha \right] - 1}{\beta} \times t \dots\dots\dots (2-10)$$

c. Rele Arus Lebih Waktu Tertentu (*Definite*)

Jangka rele arus lebih waktu tertentu dimana jangka waktu mulai *pick up* sampai

selesainya rele bekerja dapat diperpanjang dengan nilai tertentu dan tidak tergantung dari besarnya arus penyetelan, jika melebihi arus penyetelan maka waktu kerja rele ditentukan oleh waktu penyetelannya. Rangkaian dan karakteritiknya dari rele arus lebih waktu tertentu ditunjukkan pada gambar 2.6 dan 2.7.



Gambar 2.6 Rangkaian rele arus lebih waktu tertentu

Keterangan gambar 2.6:

BB	= Busbar
PMT	= Pemutus Tenaga
TC	= Kumparan Pemutus
DC	= Sumber Arus Searah
A	= Tanda Bahaya
T	= Rele Arus Lebih Waktu Tertentu (definite)
R	= Rele Arus Lebih Waktu Seketika (Instan)
CT	= Transformator Arus (<i>current transformer</i>)
I	= Arus Beban
I_r	= Arus yang mengalir pada kumparan rele

Pada gambar rangkaian rele arus lebih waktu tertentu, operasi rangkaian rele akan tergantung pada penyetelan waktu pada rele kelambatan waktunya T (*time lag relay*). Dengan pemasangan rele kelambatan waktu T (*time lag relay*), maka pengaman akan bekerja bila dipenuhi kondisi sebagai berikut:

$$t_{tr} = t_{mg} + t_{pr} + t_{pp} \dots\dots\dots (2-11)$$

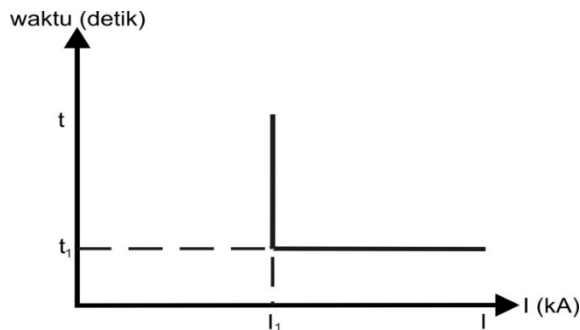
dengan:

t_{ir} = waktu total rele mulai terjadinya gangguan sampai dengan pemutus bekerja (detik)

t_{mg} = waktu mulai terjadinya gangguan sampai dengan rele *pick up* (detik)

t_{pr} = waktu penundaan kerja rele (detik)

t_{pp} = waktu yang dibutuhkan pemutus bekerja (detik)



Gambar 2.7 Karakteristik rele arus lebih waktu tertentu

Pada karakteristik rele arus lebih waktu tertentu dapat kita lihat bahwa waktu kerjanya, lebih lama dari waktu seketika. Keuntungan dari rele arus lebih waktu tertentu adalah (Sarimun, 2008):

- Koordinasinya mudah
- Waktu kerjanya tidak tergantung oleh perubahan kapasitas pembangkit

Dan kelemahannya adalah:

- Terjadi komulasi waktu pada rele di hulu, untuk sistem besar, akumulasi waktu tidak diinginkan.
- Bila diterapkan pada pengaman gangguan tanah jaringan distribusi radial, bisa menimbulkan masalah *simpatetik tripping*.

2.7 Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubungan singkat yang mungkin terjadi dalam jaringan (Sistem kelistrikan) yaitu :

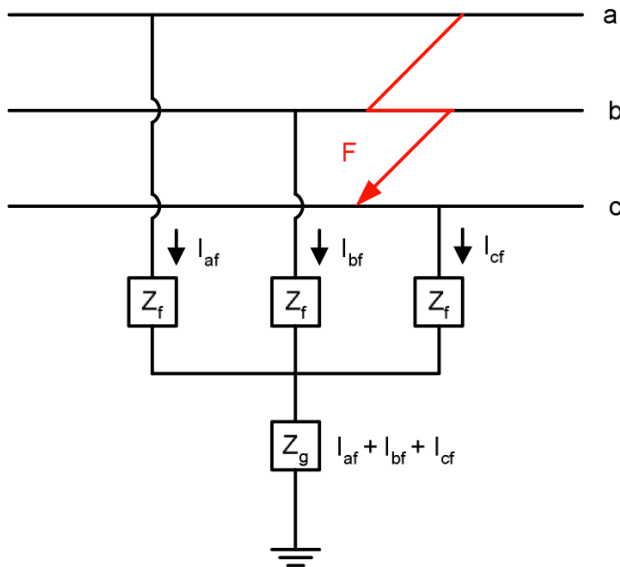
1. Gangguan hubung singkat 3 fasa
2. Gangguan hubung singkat 2 fasa
3. Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah

Semua gangguan hubungan singkat diatas, arus gangguannya dihitung dengan menggunakan rumus arus dasar yaitu (Stevenson, 1996: 29):

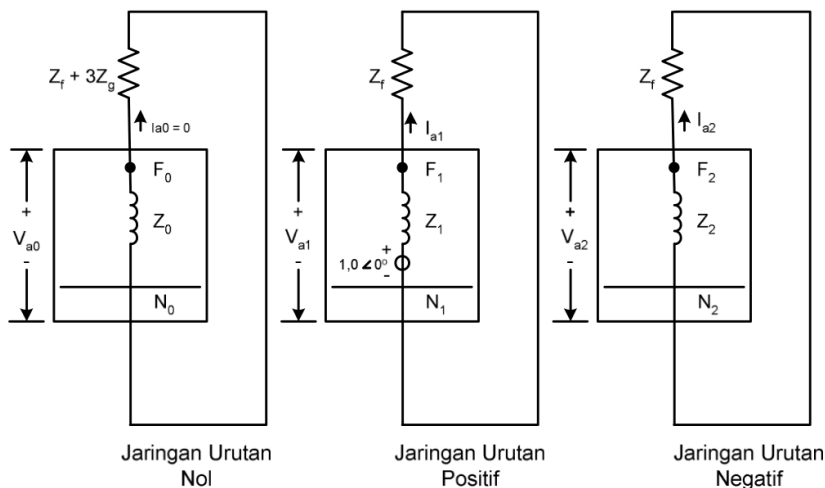
$$I_{dasar} = \frac{kVA_{3\phi} \text{ dasar}}{\sqrt{3} \times \text{tegangan dasar, } kV_{L-L}} \dots\dots\dots (2-12)$$

2.7.1 Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa

Gangguan hubung singkat tiga fasa diperlihatkan pada gambar 2.8 dibawah ini.



Gambar 2.8 Gangguan hubung singkat tiga fasa



Gambar 2.9 Rangkaian pengganti hubung singkat tiga fasa

Mesin sinkron membangkitkan tegangan internal tiga fasa dan direpresentasikan sebagai kelompok fasor urutan positif berikut :

$$E_{abc} \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} E_a \dots\dots\dots (2-13)$$

$$a = 1\angle 120^\circ = e^{j 120^\circ} \dots\dots\dots (2-14)$$

$$a^2 = 1\angle 240^\circ = e^{j 240^\circ} \dots\dots\dots (2-15)$$

Mesin menyuplai beban seimbang tiga fasa. Penerapan hukum Kirchhoff untuk tegangan pada setiap fasa menghasilkan :

$$V_a = E_a - Z_s I_a - Z_n I_n \dots\dots\dots (2-16)$$

$$V_b = E_b - Z_s I_b - Z_n I_n \dots\dots\dots (2-17)$$

$$V_c = E_c - Z_s I_c - Z_n I_n \dots\dots\dots (2-18)$$

Substitusi untuk $I_n = I_a + I_b + I_c$ dan penulisan persamaan (2-16), (2-17), (2-18) dalam bentuk matriks adalah :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_s + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_s + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_s + Z_n \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2-19)$$

$$V_{a0} = 0 - Z_0 I_{a0} \dots\dots\dots (2-20)$$

$$V_{a1} = E_a - Z_1 I_{a1} \dots\dots\dots (2-21)$$

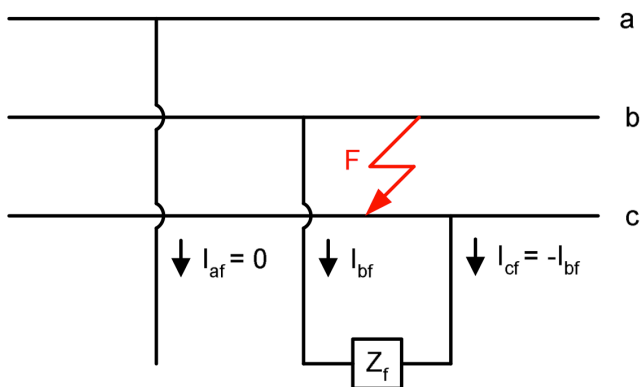
$$V_{a2} = 0 - Z_0 I_{a2} \dots\dots\dots (2-22)$$

maka, arus gangguan hubung singkat tiga fasa adalah (Stevenson, 1996: 23):

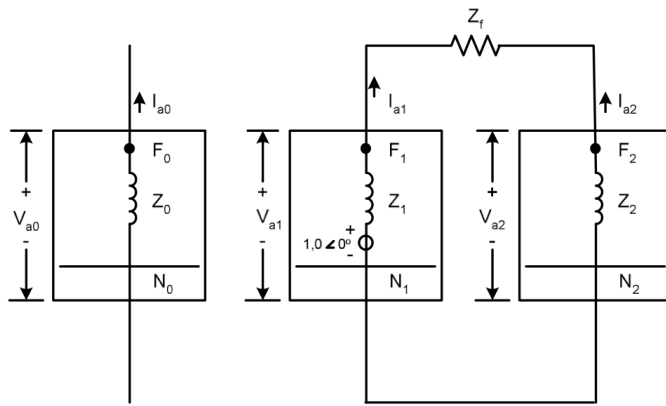
$$I_{hs3\phi} = \frac{E_a}{Z_{1total} + Z_f} \dots\dots\dots (2-23)$$

2.7.2 Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa

Gangguan terjadi pada fasa b dan c. Gangguan hubung singkat antar fasa diperlihatkan pada gambar 2.9 dibawah ini.



Gambar 2.10 Gangguan hubung singkat antar fasa

Jaringan Urutan
NolJaringan Urutan
PositifJaringan Urutan
Negatif

Gambar 2.11 Rangkaian pengganti hubung singkat antar fasa

Arus gangguan hubung singkat antar fasa adalah:

$$V_b - V_c = Z_f I_b \quad (2-24)$$

$$I_b + I_c = 0 \quad (2-25)$$

$$I_a = 0 \quad (2-26)$$

Dari komponen-komponen simetris (Turen Gonen, 1996,p.275) :

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (2-27)$$

$$= \frac{1}{3}(0 + -I_c + I_c) \quad (2-28)$$

$$I_{a0} = 0 \quad (2-29)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) \quad (2-30)$$

$$= \frac{1}{3}(0 + aI_b - a^2I_b) \quad (2-31)$$

$$= \frac{1}{3}(a - a^2)I_b \quad (2-32)$$

$$I_{a2} = I_a + a^2I_b + aI_c \quad (2-33)$$

$$= 0 + a^2I_b - aI_b \quad (2-34)$$

$$= \frac{1}{3}(a^2 - a)I_b \quad (2-35)$$

$$I_{a1} = -I_{a2} \quad (2-36)$$

$$V_b - V_c = I_b Z_1 \quad (2-37)$$

$$V_b - V_c = (a^2 - a)(V_{a1} - V_{a2}) \quad (2-38)$$

$$(a^2 - a)[E_a - (Z_1 + Z_2)I_{a1}] = Z_f I_b \quad (2-39)$$

$$E_a - (Z_1 + Z_2)I_{a1} = Z_f \frac{3a_1}{(a-a^2)(a^2-a)} \quad (2-40)$$

$$(a - a^2)(a^2 - a) = 3 \quad (2-41)$$

Maka, arus gangguan hubung singkat antar fasa adalah:

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \dots\dots\dots (2-42)$$

atau

$$I_{hs2\phi} = \frac{E_a}{Z_{1total} + Z_{2total} + Z_f} \dots\dots\dots (2-43)$$

dengan:

I_{hs} = Arus Gangguan Hubung Singkat (Ampere)

E_a = Tegangan Netral (pu)

Z_1 = Impedansi Urutan Positif (pu)

Z_2 = Impedansi Urutan Negatif (pu)

Z_f = Impedansi Gangguan Hubung Singkat (pu)

2.7.3 Gangguan Hubung Singkat 1 Fasa Ke Tanah

Gangguan satu fasa ke tanah atau yang biasa disebut dengan gangguan tak simetris umumnya disebabkan oleh kecerobohan dari operator. Gangguan satu fasa ke tanah memiliki kemungkinan gangguan terbesar. Oleh karena itu perancangan sistem proteksi terhadap gangguan satu fasa ke tanah harus memiliki tingkat keandalan yang tinggi.

Dari jenis gangguan hubung singkat diatas dapat digolongkan menjadi dua kelompok, yaitu:

a. Hubung Singkat Simetris

Merupakan gangguan yang terjadi pada semua fasanya sehingga arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi.

b. Hubung Singkat Tak Simetris (Asimetris)

Merupakan gangguan yang mengakibatkan tegangan dan arus yang mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang.

Gangguan hubung singkat yang termasuk ke dalam gangguan tak simetris (asimetris) adalah hubung singkat satu fasa maupun dua fasa, sedangkan gangguan simetris adalah hubung singkat tiga fasa. Hampir semua gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik merupakan gangguan tidak simetris. Gangguan-gangguan tak simetris akan menyebabkan mengalirnya arus tak seimbang dalam sistem sehingga untuk menganalisis gangguan yang terjadi digunakan metode komponen simetris untuk menentukan arus maupun tegangan di semua bagian sistem setelah terjadi gangguan. Gangguan ini akan mengakibatkan arus lebih pada fasa yang terganggu, kenaikan tegangan pada fasa yang tidak terganggu dan dapat juga menyebabkan arus yang jauh lebih besar dari arus

normalnya. Gangguan dapat diperkecil dengan cara pemeliharaannya. Bila gangguan hubung singkat dibiarkan berlangsung dengan lama pada suatu sistem daya, banyak pengaruh-pengaruh yang tidak diinginkan yang dapat terjadi:

- a. Berkurangnya batas-batas kestabilan untuk sistem daya.
- b. Rusaknya perlengkapan yang berada dekat dengan gangguan yang disebabkan oleh arus tak seimbang, atau tegangan rendah yang ditimbulkan oleh hubung singkat.
- c. Ledakan-ledakan yang mungkin terjadi pada peralatan yang mengandung minyak isolasi sewaktu terjadinya suatu hubung singkat, dan yang mungkin menimbulkan kebakaran sehingga dapat membahayakan orang yang menanganinya dan merusak peralatan-peralatan yang lain.
- d. Terpecah-pecahnya keseluruhan daerah pelayanan sistem daya itu oleh suatu rentetan tindakan pengamanan yang diambil oleh sistem-sistem pengamanan yang berbeda-beda, kejadian ini di kenal sebagai *cascading*.

2.8 Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat

Perhitungan arus gangguan hubung singkat adalah analisa suatu sistem tenaga listrik pada saat dalam keadaan gangguan hubung singkat, dimana nantinya akan diperoleh besar nilai besaran – besaran listrik yang dihasilkan sebagai akibat gangguan hubung singkat tersebut. Gangguan hubung singkat dapat didefinisikan sebagai gangguan yang terjadi akibat adanya penurunan kekuatan dasar isolasi (*basic insulation strength*) antara sesama kawat fasa, atau antara kawat fasa dengan tanah, yang menyebabkan kenaikan arus secara berlebihan atau biasa juga disebut gangguan arus lebih.

Perhitungan arus gangguan hubung singkat sangat penting untuk mempelajari sistem tenaga listrik baik pada waktu perencanaan maupun setelah beroperasi nantinya. Perhitungan arus hubung singkat dibutuhkan untuk :

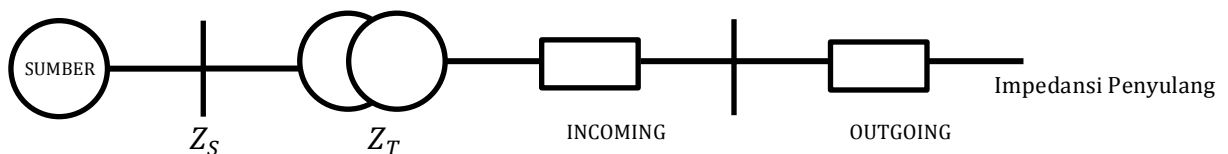
- *Setting* dan koordinasi peralatan proteksi.
- Menentukan kapasitas alat pemutus daya.
- Menentukan rating hubung singkat peralatan – peralatan yang digunakan.
- Menganalisa sistem jika ada hal hal yang tidak baik yang terjadi pada waktu sistem sedang beroperasi.

2.9. Perhitungan Impedansi

Dalam menghitung impedansi dikenal tiga macam impedansi urutan yaitu:

- impedansi urutan positif (Z_1), Impedansi urutan positif adalah rangkaian impedansi tiga fasa simetris yang didapat dengan memberikan tegangan urutan positif dan hanya mengalir arus urutan positif saja.
- Impedansi urutan negatif (Z_2), Impedansi urutan negatif adalah rangkaian impedansi tiga fasa simetris yang didapat dengan memberikan tegangan urutan positif, tetapi arus yang mengalir adalah arus urutan negatif.
- Impedansi urutan nol (Z_0), Impedansi urutan nol adalah rangkaian impedansi tiga fasa simetris yang didapat dengan memberikan tegangan urutan positif tetapi arus yang mengalir adalah arus urutan nol.

Sebelum melakukan perhitungan arus hubung singkat, maka kita harus memulai perhitungan pada rel daya tegangan primer di gardu induk untuk berbagai jenis gangguan, kemudian menghitung pada titik – titik lainnya yang letaknya semakin jauh dari gardu induk tersebut. Untuk itu diperlukan pengetahuan mengenai dasar impedansi urutan rel daya tegangan tinggi atau bisa juga disebut sebagai impedansi sumber, impedansi transformator, dan impedansi penyulang.



Gambar 2.12 Sketsa penyulang tegangan tinggi

dimana:

Z_s = Impedansi Sumber (Ω)

Z_T = Impedansi Transformator (Ω)

a) Impedansi Sumber

Untuk menghitung impedansi sumber di sisi bus 20 kV, maka harus dihitung dulu impedansi sumber di bus 150 kV. Impedansi sumber di bus 150 kV diperoleh dengan rumus (Stevenson, 1996: 139) :

$$Z_s = \frac{kV^2}{MVA} \dots\dots\dots (2-44)$$

dengan :

Z_s = Impedansi Sumber (ohm)

kV^2 = Tegangan sisi primer trafo tenaga (kV)

MVA = Data hubung singkat di bus 150 kV (MVA)

Arus gangguan hubung singkat di sisi 20 kV diperoleh dengan cara mengkonversikan dulu impedansi sumber di bus 150 kV ke sisi 20 kV. Untuk mengkonversikan Impedansi yang terletak di sisi 150 kV ke sisi 20 kV, dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$Z_s(\text{sisi 20 kV}) = \frac{20^2}{150^2} \times Z_s(\text{sisi 150 kV}) \dots\dots\dots (2-45)$$

Dimana untuk mendapatkan nilai MVA hubung singkat terlebih dahulu harus diketahui nilai arus hubung singkat pada busbar sisi tegangan tinggi (busbar primer transformator daya) yang mewakili semua unit pembangkit beroperasi. MVA hubung singkat dapat ditentukan melalui persamaan:

$$MVA_{hs3\phi} = \sqrt{3} \times kV_{L-L} \times I_{hs3\phi} \dots\dots\dots (2-46)$$

Jaringan distribusi yang dipasok dari tegangan tinggi dengan menggunakan transformator daya, untuk menentukan impedansi sumber maka harus diketahui MVA hubung singkat sisi tegangan tinggi. Impedansi sumber pada sisi tegangan tinggi dapat ditentukan melalui persamaan:

$$Z_s(\Omega) = \frac{(\text{Tegangan dasar, } kV_{L-L})^2}{MVA_{hs}} \dots\dots\dots (2-47)$$

Impedansi sumber mempengaruhi nilai impedansi total suatu jaringan yang dilakukan dalam perhitungan arus gangguan hubung singkat. Untuk mempermudah perhitungan arus gangguan hubung singkat, maka impedansi sumber dibuat dalam satuan per unit (pu) dengan menggunakan persamaan (2-19) sebagai berikut:

$$Z_{pu} = \frac{Z_s}{Z_{dasar}} \dots\dots\dots (2-48)$$

Untuk mengubah dari impedansi per unit (pu) menurut suatu dasar yang lama menjadi impedansi per unit (pu) menurut dasar yang baru dipakai persamaan berikut (Stevenson, 1996:29):

$$Z_{baru} \text{ (pu)} = Z_{lama} \text{ (pu)} \left(\frac{kV_{lama} \text{ dasar}}{kV_{baru} \text{ dasar}} \right)^2 \times \left(\frac{kVA_{baru} \text{ dasar}}{kVA_{lama} \text{ dasar}} \right) \dots\dots\dots (2-49)$$

b) Impedansi Transformator

Pada perhitungan impedansi suatu transformator yang diambil adalah harga reaktansinya, sedangkan tahananannya diabaikan karena harganya kecil. Untuk mencari nilai reaktansi trafo dalam Ohm dihitung dengan cara sebagai berikut

Langkah pertama mencari nilai ohm pada 100% untuk trafo pada 20 kV, yaitu dengan menggunakan rumus :

$$Z_T = \frac{kV^2}{MVA} \dots\dots\dots (2-50)$$

Dimana:

X_T = Impedansi Trafo Tenaga (Ω)

kV^2 = Tegangan sisi sekunder trafo tenaga (kV)

MVA = Kapasitas daya trafo tenaga (MVA)

Lalu tahap selanjutnya yaitu mencari nilai reaktansi tenaganya :

- Untuk menghitung reaktansi urutan positif dan negatif ($X_{1l} = X_{12}$) dihitung dengan menggunakan rumus :

$$X_T = \text{persen yang diketahui} \times X_T \text{ pada } 100\% \dots\dots\dots (2-51)$$

- Sebelum menghitung reaktansi urutan nol (X_{t0}) terlebih dahulu harus diketahui data trafo tenaga itu sendiri yaitu data dari kapasitas belitan delta yang ada dalam trafo :

- Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan ΔY dimana kapasitas belitan delta sama besar dengan kapasitas belitan Y, maka

$$Z_{0T} = X_{1T} \dots\dots\dots (2-52)$$

- Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan Yyd dimana kapasitas belitan delta (d) biasanya adalah sepertiga dari kapasitas belitan Y (belitan yang dipakai untuk menyalurkan daya, sedangkan belitan delta tetap ada di dalam tetapi tidak dikeluarkan kecuali satu terminal delta untuk ditanahkan), maka nilai

$$Z_{0T} = 3 \times Z_{1T} \dots\dots\dots (2-53)$$

- Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan YY dan tidak mempunyai belitan delta di dalamnya, maka untuk menghitung besarnya X_{t0} berkisar antara :

$$9 \text{ s/d } 14 \times Z_{1T} \dots\dots\dots (2-54)$$

c) Impedansi Penyulang

Untuk perhitungan impedansi penyulang, perhitungannya tergantung dari besarnya impedansi per km dari penyulang yang akan dihitung, dimana besar nilainya tergantung pada jenis penghantarnya, yaitu dari bahan apa penghantar tersebut dibuat dan juga tergantung dari besar kecilnya penampang dan panjang penghantarnya.

Disamping itu penghantar juga dipengaruhi perubahan temperatur dan konfigurasi dari penyulang juga sangat mempengaruhi besarnya impedansi penyulang tersebut. Contoh besarnya nilai impedansi suatu penyulang : $Z = (R + jX)$ (Sarimun, 2012), sehingga untuk impedansi penyulang dapat ditentukan dengan menggunakan rumus:

$$Z_{1\text{penyulang}} = Z_{2\text{penyulang}} = (R_1 + jX_1) \times L \dots\dots\dots (2-55)$$

$$Z_{0\text{penyulang}} = (R_0 + jX_0) \times L \dots\dots\dots (2-56)$$

dengan:

$Z_{1\text{penyulang}}$ = Impedansi penyulang urutan positif (Ω/km).

$Z_{2\text{penyulang}}$ = Impedansi penyulang urutan positif (Ω/km).

$Z_{0\text{penyulang}}$ = Impedansi penyulang urutan positif (Ω/km).

L = Panjang penyulang (km)

R_1 = Resistansi penyulang urutan positif (Ω)

X_1 = Reaktansi penyulang urutan positif (Ω)

R_0 = Reaktansi penyulang urutan nol (Ω)

X_0 = Reaktansi penyulang urutan nol (Ω)

d. Impedansi Total

Sistem distribusi memperoleh daya melalui jaringan transmisi berpola radial, yaitu generator pada pangkalnya, sehingga besar impedansi total diperoleh dengan menjumlahkan seluruh nilai impedansi urutan komponen yang ada dan impedansi sumbernya. Maka impedansi total untuk setiap urutan komponennya dapat dicari dengan persamaan:

$$Z_{1total} = Z_{2total} = Z_s + Z_{1T} + Z_{1penyulang} \dots\dots\dots (2-57)$$

$$Z_{0total} = Z_{0T} + 3 \times Z_n + Z_{0penyulang} \dots\dots\dots (2-58)$$

dengan:

Z_{1total} = Impedansi total urutan positif (pu)

Z_{2total} = Impedansi total urutan negatif (pu)

Z_{0total} = Impedansi total urutan nol (pu)

Z_{1T} = Impedansi transformator daya urutan positif (pu)

Z_{2T} = Impedansi transformator daya urutan negatif (pu)

Z_{0T} = Impedansi transformator daya urutan nol (pu)

Z_s = Impedansi sumber (pu)

Z_n = Impedansi pentanahan (pu)

$Z_{1penyulang}$ = Impedansi penyulang urutan positif (pu)

$Z_{2penyulang}$ = Impedansi penyulang urutan negatif (pu)

$Z_{0penyulang}$ = Impedansi penyulang urutan nol (pu)

2.10 Trafo Arus

Transformator arus dalam sistem tenaga listrik digunakan untuk keperluan pengukuran dan proteksi. Untuk pengukuran akurasi yang diperlukan sampai dengan 120% arus rating.

Spesifikasi akurasi dari trafo arus menurut IEC (*International electrotechnical Commision*) seperti contoh dibawah ini:

15 VA 10 P 20

Keterangan:

15VA = Rating beban CT sebesar 15 VA.

10P = Kelas Proteksi, Kesalahan 10 % pada rating batas akurasi.

20 = faktor batas akurasi CT sampai dengan 20 kali arus rating.

Nilai standar tipe CT menurut IEC (*International electrotechnical Commision*) dapat dilihat pada tabel 2.2. sebagai berikut:

Tabel 2.2
Nilai Standar CT

Parameter	Nilai
Kontinyu VA	2.5, 5, 10, 15 dan 30 VA
Kelas Akurasi	5% dan 10%
Faktor Batas Akurasi	5, 10, 15, 20 dan 30
Rating Arus Sekunder	1, 2, dan 5 Ampere

2.11 Fungsi dan Syarat Rele Proteksi

Proteksi dibutuhkan untuk melindungi setiap elemen dari sistem serta mengamankan secepat mungkin dari gangguan yang sedang terjadi, sebab gangguan dapat membahayakan sistem, antara lain menyebabkan rusaknya generator-generator dalam sistem. Bagi pihak konsumen akibatnya ialah terganggunya kerja dari alat-alat listrik, terutama di dalam industri-industri yang mengakibatkan terganggunya produksi.

Skema proteksi harus cocok dan sesuai dengan semua peralatan proteksi yang terpasang pada sistem itu. Pemutusan bagian-bagian yang terganggu harus selektif mungkin, jadi dibatasi hanya komponen yang terganggu saja. Jadi sistem proteksi harus sensitif, artinya harus dapat mendeteksi suatu kesalahan secara pasti. Untuk keadaan operasi dari sistem, peralatan proteksi harus dapat bekerja dengan cepat dan dapat diandalkan.

Pada umumnya sistem distribusi 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 kawat distribusi. Arus urutan nol bersama-sama dengan tegangan urutan nol, dipakai sebagai penggerak dari rele tanah itu. Pada operasi sistem dalam keadaan normal, tidak ada arus urutan nol, oleh sebab itu rele tanah dapat dibuat lebih sensitif dari rele fasa.

Tujuan dari proteksi terutama untuk mencegah terjadinya gangguan atau memadamkan gangguan yang telah terjadi serta melokalisirnya, dan membatasi pengaruh-pengaruhnya, biasanya melokalisir bagian-bagian yang terganggu itu tanpa mengganggu bagian-bagian yang lain. Fungsi rele pengamanan pada sistem tenaga listrik berfungsi untuk:

1. Merasakan, mengukur dan menentukan bagian sistem yang terganggu serta memisahkan secepatnya sehingga sistem yang lainnya tidak terganggu, dapat beroperasi secara normal.

2. Mengurangi kerusakan yang lebih parah dari peralatan yang terganggu.
3. Mengurangi pengaruh gangguan terhadap bagian sistem yang lain yang tidak terganggu di dalam sistem tersebut serta mencegah meluasnya gangguan.
4. Memperkecil bahaya bagi manusia.

Didalam sistem yang konstruksinya cukup baik, proteksi yang ada padanya akan memperlihatkan fungsi-fungsinya dengan sangat memuaskan, dan bilamana sistem diperluas, maka proteksi juga harus mengalami perubahan.

Rele merupakan salah satu bagian dari perangkat pengaman sistem tenaga listrik selain Circuit Breaker (CB), transformator arus (CT), transformator tegangan (PT), tripping coil (TC), kabel kontrol dan baterai. Apabila terjadi gangguan atau kondisi secara abnormal, maka rele akan merasakan gangguan tersebut dan segera melakukan pemutusan atau penutupan pelayanan penyaluran setiap elemen sistem tenaga listrik, sehingga peralatan pada sistem padat terlindungi dari kerusakan ataupun mengurangi kerusakan pada peralatan.

Syarat-syarat agar peralatan rele pengaman dapat dikatakan bekerja dengan baik dan benar adalah:

1. Cepat bereaksi

Rele harus cepat bereaksi atau bekerja bila sistem mengalami gangguan atau kerja abnormal. Kecepatan bereaksi dari rele saat rele mulai merasakan adanya gangguan sampai dengan pelepasan circuit breaker karena reaksi dari kerja rele. Waktu bereaksi ini harus diusahakan secepat mungkin sehingga dapat menghindarkan kerusakan pada alat serta membatasi daerah yang mengalami gangguan atau yang bekerja abnormal.

2. Selektif

Yang dimaksud dengan selektif adalah kecermatan pemilihan dalam mengadakan pengaman, hal ini menyangkut koordinasi pengaman dari sistem secara keseluruhan. Dengan demikian, segala tindakannya akan tepat dan akibatnya gangguan dapat dieliminir menjadi sekecil mungkin.

3. Peka atau sensitif

Rele harus bekerja dengan kepekaan yang tinggi, artinya harus cukup sensitif terhadap gangguan di daerahnya meskipun gangguan tersebut minimum, yang selanjutnya akan memberi respon.

4. Handal dan reliability

Dalam keadaan normal atau tidak ada gangguan, rele bekerja dalam jangka waktu yang lama mungkin berbulan-bulan atau bertahun-tahun. Tetapi bila pada saat terjadi

gangguan, rele harus bekerja dan tidak boleh gagal dalam mengatasi gangguan tersebut. Disamping itu rele tidak boleh salah kerja, yaitu yang seharusnya bekerja tetapi rele bekerja, sehingga timbul pemadaman yang seharusnya tidak perlu terjadi. Rele dikatakan andal apabila mempunyai nilai 90% - 99%.

Keandalan dapat dibagi dua yaitu rele harus dapat diandalkan setiap saat dan yang kedua rele tidak boleh salah kerja atau tidak boleh bekerja yang bukan seharusnya.

5. Sederhana dan Simplicity

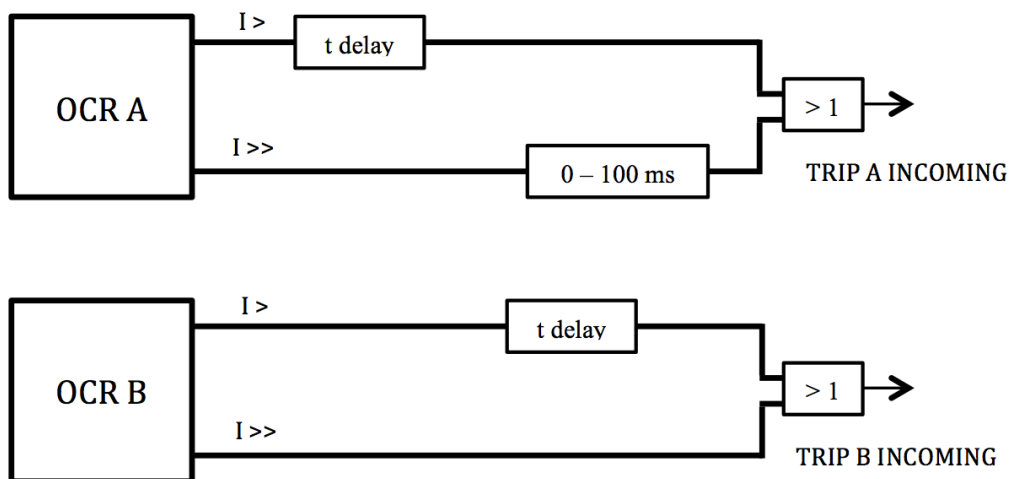
Makin sederhana rela sistem rele semakin baik, mengingat setiap peralatan atau komponen rele kemungkinan mengalami kerusakan. Jadi sederhana maksudnya kemungkinan terjadinya kerusakan kecil.

6. Murah dan ekonomis

Rele sebaiknya yang murah, tanpa meninggalkan persyaratan-persyaratan yang telah ditentukan.

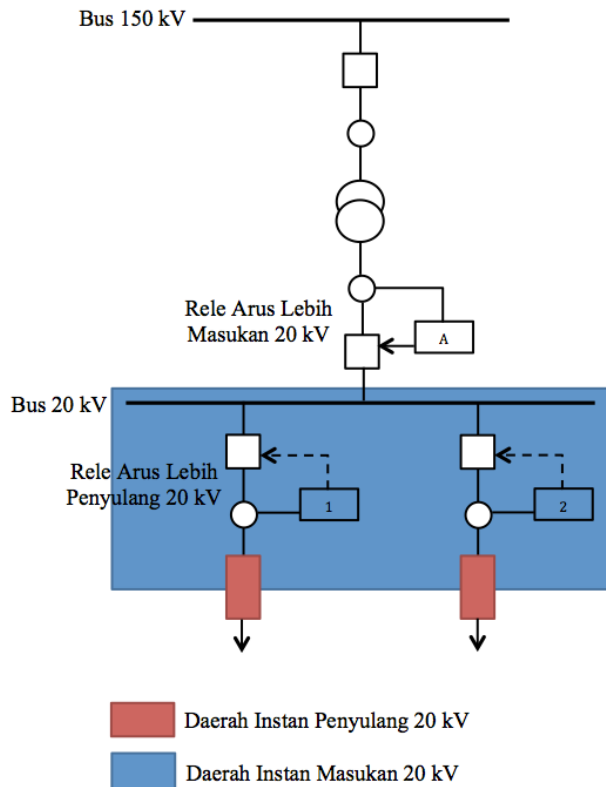
2.12 Sistem Proteksi Pola Kaskade

Pola pengaman kaskade yang digunakan sekarang ada kalanya tidak memberikan pengaman yang optimal terhadap trafo, terutama dalam selektifitas dan *clearing time*. Selektifitas baru dapat tercapai bila instantaneous rele sisi 20 kV trafo (*incoming*) di non-aktifkan.



Gambar 2.13 Tripping logic pola kaskade

Kondisi ini memberikan peluang kerusakan trafo oleh gangguan eksternal menjadi relative besar, karena gangguan pada rel 20 kV di-clearkan dalam waktu relatif lama (yang umumnya tidak dilengkapi dengan pengaman busbar).



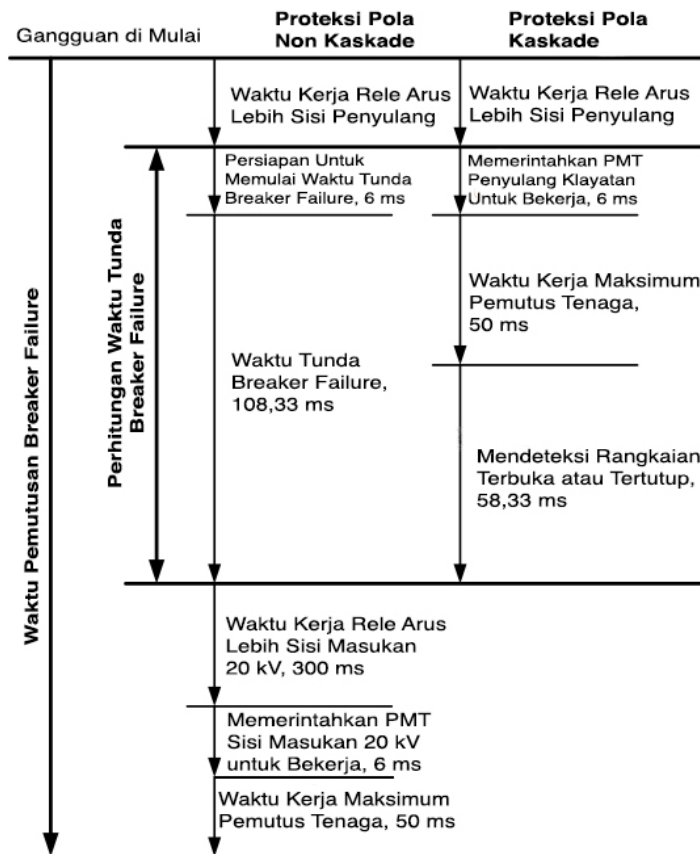
Gambar 2.14 Skema Pola Kaskade

2.13 Sistem Proteksi Pola Non Kaskade

Proteksi dengan sistem pola non kaskade adalah untuk melindungi bagian-bagian-bagian vital dan sekaligus menjaga kestabilan busbar. Sistem pola non kaskade adalah semacam pengaman cadangan jika harus terjadi kegagalan di pengaman utama, maka pengaman cadangan akan beroperasi seketika untuk mendapat selektifitas dan stabilitas.

Pada gambar 2.13 dibawah ini memperlihatkan skema pola non kaskade. Pola non kaskade adalah pola tanpa pentanahan. Pada pola ini rele-rele disisi penyulang 20 kV dapat dikomunikasikan dengan rele disisi hulunya (masukan 20k kV), dimana meskipun rele-rele instan disisi masukan dan penyulang 20 kV diterapkan, namun masih tetap diperoleh selektifitas baik.

Pada saat gangguan didaerah kerja rele instan sisi masukan 20 kV dan rele instan penyulang maka rele instan sisi masukan 20 kV akan di blok oleh keluaran dari rele instan sisi penyulang selama beberapa milidetik (sesuai penyetelan waktu bloknnya) sehingga memberi kesempatan rele instan sisi penyulang bekerja terlebih dahulu, jika selama waktu blok tersebut PMT penyulang tidak beroperasi maka barulah rele di sisi masukan 20 kV akan memerintahkan PMT sisi masukan 20 kV untuk beroperasi.



Gambar 2.15 Proses urutan *circuit breaker fault* dalam memutuskan gangguan
 Sumber : Edsel Atienza, (2011,p.3)

Berdasarkan gambar (2.13) *setting* waktu kerja untuk proteksi pola kaskade mulai dari gangguan terdeteksi sampai selesai memutuskan gangguan merupakan penjumlahan dari Waktu Kerja Rele Arus Lebih Sisi Penyulang, Memerintahkan PMT Penyulang Klayatan Untuk Bekerja selama 6 ms, Waktu Kerja Maksimum Pemutus Tenaga selama 50 ms, dan Mendeteksi Rangkaian Terbuka atau Tertutup selama 58,33 ms. Jadi, total waktu kerjanya selama 114,33 ms

Untuk waktu kerja untuk proteksi pola non kaskade mulai dari gangguan terdeteksi sampai selesai memutuskan gangguan merupakan penjumlahan dari Waktu Kerja Rele Arus Lebih Sisi Penyulang, Persiapan Untuk Memulai Waktu Tunda *Breaker Failure* selama 6 ms, Waktu Tunda *Breaker Failure* selama 108,33 ms, Waktu Kerja Rele Arus Lebih Sisi Masukan 20 kV, Memerintahkan PMT Sisi Masukan 20 kV untuk Bekerja selama 6 ms, dan Waktu Kerja Maksimum Pemutus Tenaga selama 50 ms. Jadi, total waktu kerjanya selama 170,33 ms.

Prinsip kerja pola non kaskade dapat dibagi menjadi beberapa kondisi sebagai berikut:

1. Pada saat gangguan busbar 20 kV diluar daerah instan rele arus lebih sisi masukan 20

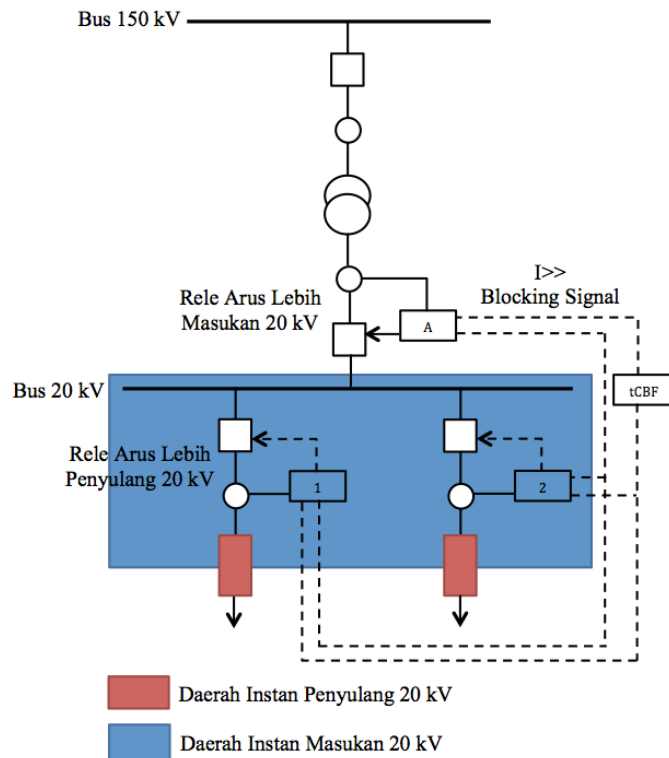
kV, maka rele arus lebih sisi masukan 20 kV akan bekerja sesuai dengan penyetelan invers.

2. Pada saat gangguan busbar 20 kV didalam daerah instan rele arus lebih sisi masukan 20 kV, maka rele arus lebih sisi masukan 20 kV akan bekerja sesuai dengan penyetelan instan.
3. Pada saat gangguan penyulang dan PMT penyulang bekerja normal maka rele arus lebih penyulang akan bekerja sesuai dengan penyetelan invers, dan apabila gangguan tersebut termasuk dalam daerah instan rele arus lebih penyulang maka rele arus lebih penyulang akan bekerja sesuai dengan penyetelan instan.
4. Pada saat gangguan penyulang dan PMT penyulang gagal bekerja maka tCBF akan mengirim sinyal pemutusan ke rele arus lebih masukan 20 kV untuk segera bekerja dengan waktu tunda 300 ms.

Agar pola non kaskade berhasil maka perlu diperhatikan bahwa (ibid, hal 54):

1. Waktu blok harus lebih besar dari waktu kerja rele instan sisi penyulang
2. Penyetelan rele instan di penyulang maksimal 80% dari penyetelan rele instan di sisi masukan 20 kV. Hal ini karena untuk arus gangguan yang mendekati penyetelan instan, waktu kerja lebih lama dan tipikal setelah 125% arus penyetelan instan, rele akan bekerja seketika.

Penyetelan rele pada penyulang juga turut menentukan proses kerja dari pola non kaskade sehingga terjadi koordinasi dengan baik. Rele yang disetel harus disesuaikan dengan setelan dari rele hulu (dalam hal ini pertimbangan dari segi kecepatan dan ketepatan waktu) supaya daerah pengisolasian pada rele hulu melingkupi daerah penyulang seperti pada gambar 2.13 terlihat bahwa adanya daerah irisan yang menempati daerah proteksi rele penyulang berada di dalam daerah rele di hulu.



Gambar 2.16 Skema pola non kaskade

Sumber: PT. PLN (Persero) P3b Jawa-Bali (1998)

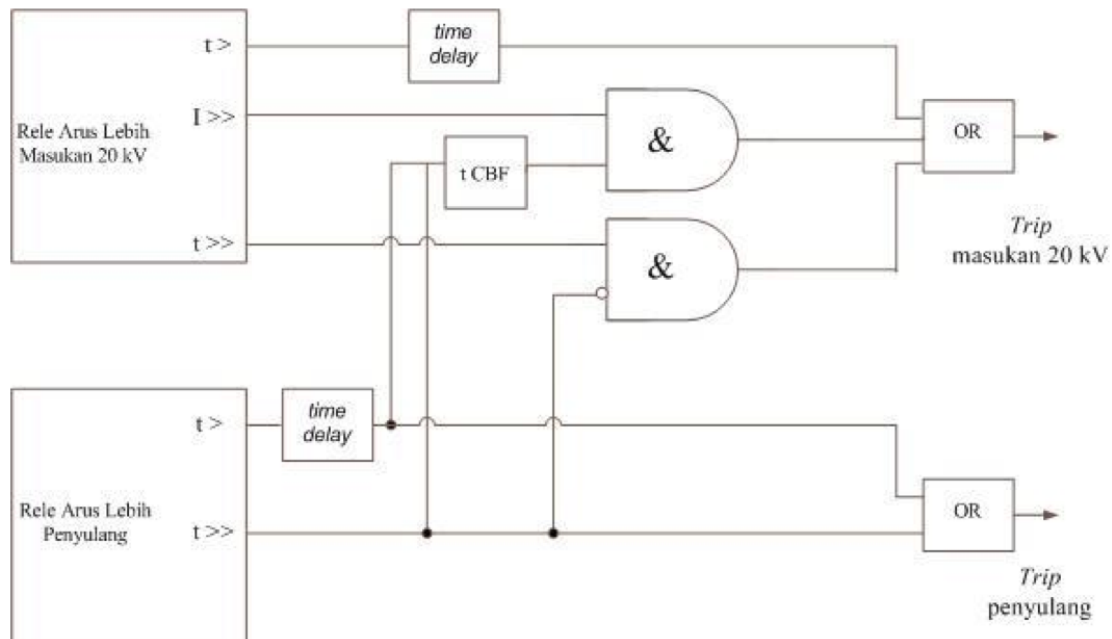
Penyetelan rele harus dimulai dengan rele penyulang terlebih dahulu untuk mendapatkan setelan rele yang selektif dan baik. Rele juga harus disetel dengan dasar arus hubung singkat maksimum agar bekerja bila terjadi gangguan hubung singkat pada rele seksi berikutnya. Rele disetel dengan arus hubung singkat minimum agar rele tidak bekerja pada saat beban maksimum dan rele yang berada di hilir mempunyai penyetelan arus sama atau lebih kecil dari rele yang di hulu, dengan demikian arus primer yang diperlukan untuk mengerjakan rele di hilir sama atau lebih kecil dari rele hulu.

2.14 Rele Arus Lebih Pola Non Kaskade

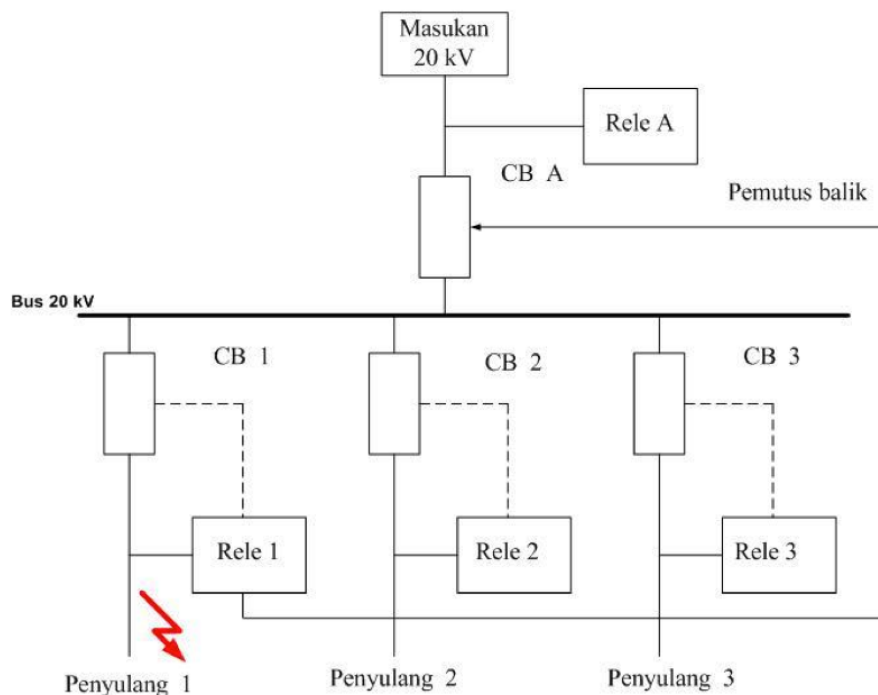
Ketika rele di hilir tidak dapat merespon gangguan yang terjadi, maka pada saat bersamaan pula setelan waktu rele instan pada rele arus lebih hulu sama-sama merasakan gangguan sehingga rele arus lebih hilir memberikan sinyal pemutusan menuju rele arus lebih hulu dengan komponen tCBF yang memberikan respon sinyal bersama-sama sinyal rele arus lebih hulu dengan logika gerbang AND artinya bahwa pemutusan bisa berlangsung apabila ada respon dari komponen tCBF dan adanya respon rele arus lebih hulu yang diakibatkan gangguan yang diterima oleh rele arus lebih hulu tersebut untuk memutuskan rangkaian masukan 20 kV.

Dengan waktu yang dapat diatur pada tCBF tersebut maka kerja dari pemutusan itu juga dapat diatur tergantung dari setelan waktu dari kedua rele arus lebih tersebut.

Sehingga karakteristik setiap rele dipenyulang harus sama dan bisa berkoordinasi dengan rele hulu. Logika pemutusan pola non kaskade ditunjukkan pada gambar 2.13 dibawah ini.



Gambar 2.17 Logika pemutusan pola non kaskade
Sumber : Sumber: PT.PLN P3B Jawa-Bali, 2012:16



Gambar 2.18 Pemutusan balik pengisolasian gangguan
Sumber: IEEE Guide, (2006,p.27)

Sistem proteksi ini memberikan keutamaan pada rele untuk memutuskan *circuit breaker* (CB) yang berada di seksi sebelumnya (hulu), apabila kondisi rangkaian pemutus merasakan gangguan gagal memutuskan di daerah yang bersangkutan, dapat diaktifkan

dari kedua operasi rele atau pemutusan luar. Dari gambar 2.14 dapat ditunjukkan bahwa metode khusus pemutusan balik yang khusus untuk gangguan dipenyulang 1 yang harus diisolasi oleh rele 1 dan CB 1. Apabila CB 1 gagal untuk mengisolasi gangguan, hal ini akan diisolasikan dengan cara hubungan pemutusan balik dengan rele 1 dengan pemutusan CB A.

Pada gambar 2.14, rele A mempunyai karakteristik *standart inverse* untuk $I >$, tetapi reaksi yang cepat $I >>$ dasar (waktu tunda secara khusus 100 milidetik) yang diblok oleh rele yang berada di hilir pada gangguan penyulang. Daerah pemutusan untuk CB A juga melingkupi daerah CB 1 sehingga apabila terjadi gangguan pada daerah CB 1 namun rele 1 dan CB 1 gagal beroperasi maka CB A yang akan beroperasi melalui tCBF dengan $I >>$ pada rele 1.