



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Proteksi Distribusi Tenaga Listrik

2.1.1. Pengertian Sistem Proteksi

Sistem proteksi tenaga listrik merupakan sistem pengamanan pada peralatan-peralatan yang terpasang pada sistem tenaga listrik, seperti generator, busbar, transformator, saluran udara tegangan tinggi, saluran kabel bawah tanah, dan lain sebagainya terhadap kondisi abnormal operasi sistem tenaga listrik tersebut.

Sistem proteksi penyulang tegangan menengah ialah pengamanan yang terdapat pada sel-sel tegangan menengah di Gardu Induk dan pengamanan yang terdapat pada jaringan tegangan menengah. Penyulang tegangan menengah adalah penyulang tenaga listrik yang berfungsi untuk mendistribusikan tenaga listrik tegangan menengah (6 kV-20 kV), yang terdiri dari :

- a. Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)
- b. Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM) (Affandi, Irfan, 2009, hal.15)

2.1.2. 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 maka akan 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. Merasakan, mengukur dan menentukan bagian sistem yang terganggu serta memisahkan secepatnya sehingga sistem lain yang tidak terganggu dapat beroperasi secara normal
2. Mengurangi kerusakan yang lebih parah dari peralatan yang terganggu.
3. Menugrangi pengaruh gangguan terhadap bagian sistem yang lain yang tidak terganggu di dalam sistem tersebut serta mencegah meluasnya gangguan.
4. Memperkecil bahaya bagi manusia. (Hazairin Samaulah, 2004, Hal.3)

2.2. Persyaratan Sistem Proteksi

Tujuan utama sistem proteksi adalah :

1. Mendeteksi kondisi abnormal (gangguan)
2. Mengisolir peralatan yang terganggu dari system

Persyaratan terpenting dari sistem proteksi yaitu :

1. Keandalan (*reliability*)

Keandalan mempunyai tiga aspek, yakni :

- a. *Dependability*, yang diartikan sebagai derajat kepastian bahwa relai atau sistem relai akan beroperasi dengan benar.
- b. *Security*, yang diartikan sebagai derajat kepastian bahwa relai atau sistem relai tidak salah kerja.
- c. *Availability*, yang diartikan sebagai perbandingan antara waktu dimana pengaman dalam keadaan siap kerja dan waktu total operasinya. (Sarimun, Wahyudi, Ir. 2014. Hal.11)

Dengan kata lain, dependability menunjukkan kemampuan sistem untuk tidak beroperasi saat kondisi normal atau gangguan di luar zona operasinya.



Kesalahan operasi dapat diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu :

1. Kesalahan desain
2. Kesalahan instalasi
3. *Deterioration in service*

2. Selektivitas (*selectivity*)

Selektivitas yang juga dikenal sebagai koordinasi relai adalah proses penggunaan dan penyetelan relai proteksi yang bekerja *over-reach* terhadap relai lain, sehingga relai harus beroperasi secepat mungkin pada zona utama, tapi harus menunda operasinya di daerah cadangan operasi. Sifat penundaan dapat dicapai dengan metode :

1. *Time graded system*
2. *Unit system*

Hal ini diperlukan agar relai utama dapat beroperasi pada daerah cadangan atau *over-reach*. Kedua adalah tidak benar dan tidak diperkenankan kecuali proteksi utama dari daerah tersebut tidak beroperasi. Jadi selektivitas sangatlah penting untuk menjamin kelangsungan pelayanan maksimum dengan pemutusan minimum.

Jadi relai harus dapat membedakan apakah gangguan terletak di kawasan pengamanan utamanya dimana ia harus bekerja cepat atau terletak di seksi berikutnya dimana ia harus bekerja dengan waktu tunda harus tidak bekerja sama sekali karena gangguannya diluar daerah pengamannya atau sama sekali tidak ada gangguan.

3. Kecepatan operasi (*speed of operation*)

Untuk memperkecil kerugian / kerusakan akibat gangguan, dengan arus besar, maka bagian yang terganggu harus dipisahkan secepat mungkin dari sumbernya. Untuk menciptakan selektivitas yang baik, mungkin saja suatu pengamanan terpaksa diberi waktu tunda (*time delay*). Antara pengamanan yang



terpasang namun waktu tunda itu harus secepat mungkin, setelah waktu minimum yang di setkan ke relai untuk menghindari thermal stress adalah

$$t_{\text{total}} = t_{\text{start}} + t_{\text{CT}} + t_{\text{PMT}}$$

Dimana,

t_{total} = Waktu total pembebasan gangguan

t_{start} = Waktu start relai (Waktu Kerja Tanpa Waktu Tunda)

t_{CT} = Waktu CT menerima arus besar

t_{PMT} = Waktu pemutusan arus gangguan PMT

Dengan peralatan proteksi yang terpasang pada sistem tegangan menengah kondisi saat ini yang mempunyai

$$t_{\text{start}} = 20 \text{ s/d } 30 \text{ milidetik}$$

$$t_{\text{CT}} = 10 \text{ milidetik}$$

$$t_{\text{PMT}} = 40 \text{ s/d } 60 \text{ milidetik}$$

maka t_{total} pengaman utama dengan waktu, bias kurang 100 milidetik. Setelah ini adalah setelan untuk pengaman dengan waktu instan (cepat), yang di setkan untuk pengaman listrik bila terjadi gangguan listrik dengan arus besar. (Sarimun, Wahyudi, Ir. 2014. Hal.12)

4. Kepekaan (*sensitivity*)

Pada prinsipnya relai harus cukup peka sehingga dapat mendeteksi gangguan di kawasan pengamannya, termasuk kawasan pengaman cadangan-jauhnya, meskipun dalam kondisi yang memberikan deviasi yang minimum.

Untuk relai arus lebih hubung singkat yang bertugas pula sebagai pengaman cadangan jauh bagi seksi berikutnya dalam kondisi pembangkitan minimum. Sebagai mengaman peralatan seperti motor, generator atau trafo, relai yang peka dapat mendeteksi gangguan pada tingkatan yang masih dini sehingga dapat membatasi kerusakan. Bagi peralatan tersebut hal ini sangat penting karena jika gangguan itu sampai merusak besi laminasi stator atau inti trafo, maka perbaikannya akan sangat sukar dan mahal. (Affandi, Irfan. 2009. hal.16)



5. Ekonomis (*economic*)

Dalam sistem distribusi aspek ekonomis hampir mengatasi aspek teknis, oleh karena jumlah feeder, trafo dan sebagainya yang begitu banyak, asal saja persyaratan keamanan yang pokok dipenuhi. Dalam suatu sistem transmisi justru aspek teknis yang penting. Proteksi relatif mahal, namun demikian pula sistem atau peralatan yang dilindungi dan jaminan terhadap kelangsungan peralatan sistem adalah vital. Biasanya digunakan dua sistem proteksi yang terpisah, yaitu proteksi primer atau proteksi utama dan proteksi pendukung (*back up*) (dasar-dasar-sistem-proteksi.2008.)

2.3. Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubungan singkat yang mungkin terjadi dalam jaringan (Sistem Kelistrikan) yaitu [1] :

2.3.1. Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat

Perhitungan arus gangguan hubung singkat adalah analisa suatu sistem tenaga listrik pada saat dalam keadaan hubung singkat, dimana nantinya akan diperoleh besar nilai besaran-besaran listrik sebagai akibat gangguan hubung singkat tersebut [1]. 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 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 :

1. Setting dan koordinasi peralatan proteksi
2. Menentukan kapasitas alat pemutus daya
3. Menentukan rating hubung singkat peralatan yang digunakan

4. Menganalisa sistem jika ada hal-hal yang tidak baik yang terjadi pada waktu sistem sedang beroperasi.

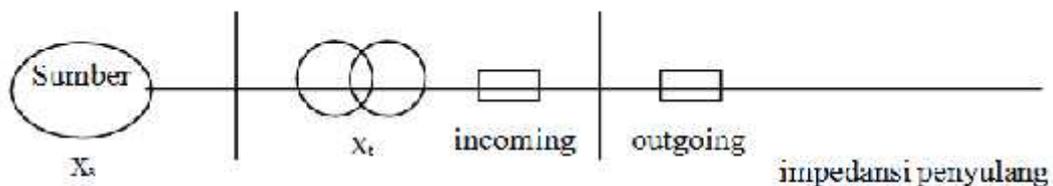
Untuk menghitung arus gangguan hubung singkat pada sistem seperti di atas dilakukan beberapa tahap perhitungan, yaitu sebagai berikut :

2.3.2. Menghitung Impedansi

Dalam menghitung impedansi dikenal tiga macam impedansi urutan, yaitu :

1. Impedansi urutan positif (Z_1), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan positif
2. Impedansi urutan negatif (Z_2), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan negatif.

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 2.1. Sketsa Penyulang Tegangan Menengah

Dimana :

X_s = Impedansi sumber (ohm)



X_t = Impedansi transformator (ohm)

A. Impedansi sumber

Untuk menghitung 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 :

$$X_s = \frac{kV^2}{MVA} \dots\dots\dots(2.1)$$

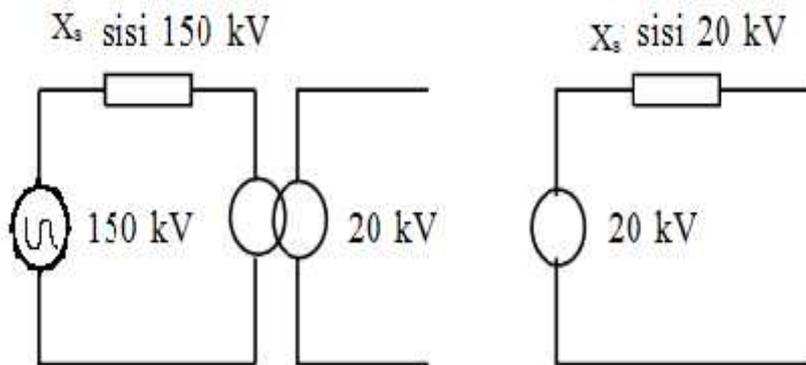
Dimana :

X_s = Impedansi sumber (ohm)

kV^2 = Tegangan sisi primer transformator 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 10 kV ke sisi 20 kV. Untuk mengkonversikan impedansi yang terletak di sisi 150 kV ke sisi 20 kV dapat dihitung dengan menggunakan rumus :



Gambar 2.2. Konversi X_s dari 150 kV ke 20 kV

$$X_s \text{ (sisi 20kV)} = \frac{20^2}{150} \times X_s \text{ (sisi 150 kV)} \dots\dots\dots(2.2)$$



B. Impedansi transformator

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

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

$$X_t \text{ (pada 100\%)} = \frac{kV^2}{MVA} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana :

X_t = Impedansi transformator (ohm)

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

MVA = Kapasitas daya transformator tenaga (MVA)

Lalu tahap selanjutnya yaitu mencari nilai reaktansi tenaganya :

Untuk menghitung reaktansi urutan positif dan negatif ($X_{11} = X_{22}$), dihitung dengan menggunakan rumus :

$$X_t = \% \text{ yang diketahui} \times X_t \text{ (pada 100\%)} \dots\dots\dots(2.4)$$

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. Di samping itu penghantar juga dipengaruhi perubahan temperature dan konfigurasi dari penyulang tersebut, sehingga sangat mempengaruhi besarnya impedansi penyulang. Contoh besarnya nilai impedansi suatu penyulang :

$$Z = (R+jX)$$



Sehingga untuk impedansi penyulang dapat ditentukan dengan menggunakan rumus :

- 1. Urutan positif dan urutan negatif

Z1 = Z2 = % panjang x panjang penyulang (km) x Z1/Z2(2.5)

Dimana :

Z1 = Impedansi urutan positif (ohm)

Z2 = Impedansi urutan negatif (ohm)

D. Impedansi ekivalen jaringan

Perhitungan yang akan dilakukan di sini adalah perhitungan besarnya nilai impedansi ekivalen positif, negatif, dan nol dari titik gangguan sampai ke sumber. Karena dari sumber ke titik gangguan impedansi yang terbentuk adalah tersambung seri maka perhitungan Z1eq dan Z2eq dapat langsung dengan cara menjumlahkan impedansi tersebut, sedangkan untuk perhitungan Z0eq dimulai dari titik gangguan sampai ke transformator tenaga yang netralnya ditanahkan. Akan tetapi untuk menghitung impedansi Z0eq ini, harus diketahui dulu hubungan belitan transformatornya. Sehingga untuk impedansi ekivalen jaringan dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

Urutan positif dan urutan negatif (Z1eq = Z2eq)

Z1eq = Z2eq = Zs1 + Zt1 + Z1 penyulang.....(2.6)

Dimana :

Z1eq = Impedansi ekivalen jaringan urutan positif (ohm)

Z2eq = Impedansi ekivalen jaringan urutan negatif (ohm)

Zs1 = Impedansi sumber sisi 20 kV (ohm)

Zt1 = Impedansi transformator tenaga urutan positif dan negatif (ohm)

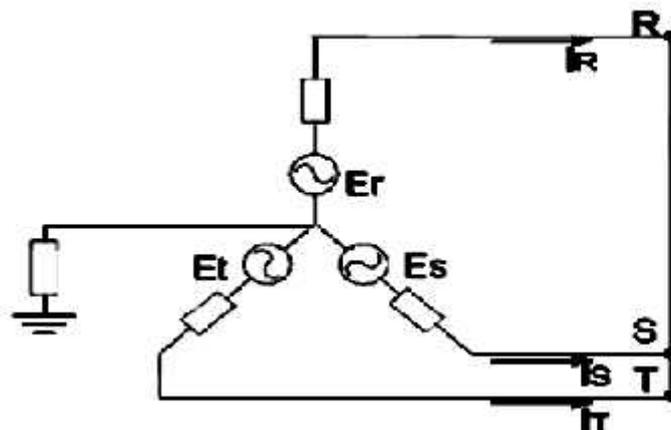
Z1 = Impedansi urutan positif dan negatif (ohm)

2.3.3. Menghitung Arus Gangguan Hubung Singkat

Perhitungan arus gangguan hubung singkat dapat dihitung dengan menggunakan rumus dasar, impedansi ekivalen mana yang dimasukkan ke dalam rumus dasar tersebut adalah jenis gangguan hubung singkat tiga fasa, dua fasa, atau satu fasa ke tanah. Sehingga formula yang digunakan untuk perhitungan arus hubung singkat tiga fasa, dua fasa, dan satu fasa ke tanah berbeda, yaitu :

1. Arus Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Rangkaian gangguan tiga fasa pada suatu jaringan dengan hubungan transformator tenaga YY dengan netral ditanahkan melalui suatu tahanan. Ditunjukkan pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.3. Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Rumus dasar yang digunakan untuk menghitung besarnya arus gangguan hubung singkat tiga fasa adalah :

$$I = \frac{V}{Z} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana :

I = Arus yang mengalir pada hambatan Z (A)

V= Tegangan sumber (V)

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



Yang membedakan antara gangguan hubungan singkat tiga fasa, dua fasa, dan satu fasa ke tanah adalah impedansi yang terbentuk sesuai dengan macam gangguan itu sendiri, dan tegangan yang memasok arus ke titik gangguan. Impedansi yang terbentuk dapat ditunjukkan seperti berikut ini :

$$Z \text{ untuk gangguan tiga fasa, } Z = Z_1$$

Dimana:

Z_1 = Impedansi urutan positif (ohm)

Z_2 = Impedansi urutan negatif (ohm) (Sarimun, Wahyudi, Ir. 2014. Hal.156)

Sehingga arus hubung singkat tiga fasa dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$I_{3 \text{ fasa}} = \frac{V_{ph}}{Z_{1eq}} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana :

$I_{3 \text{ fasa}}$ = Arus gangguan hubung singkat 3 fasa (A)

$$V_{ph} = \text{Tegangan fasa-netral sistem } 20 \text{ kV} = \frac{20.000}{\sqrt{3}} \text{ V}$$

Z_{1eq} = Impedansi ekivalen urutan positif (ohm) (Affandi, Irfan. 2009. hal.20-25)

2.4. Relai Arus Lebih

2.4.1. Pengertian Relai Arus Lebih

Relai arus lebih atau yang lebih dikenal dengan *Over Current Relay* (OCR) merupakan peralatan yang mensinyalir adanya arus lebih, baik yang disebabkan oleh adanya gangguan hubung singkat atau *overload* yang dapat merusak peralatan sistem tenaga yang berada dalam wilayah proteksinya. Relai arus lebih ini digunakan hampir pada seluruh pola pengamanan sistem tenaga listrik, lebih lanjut relai ini dapat digunakan sebagai pengaman utama ataupun cadangan.



Pada transformator tenaga, relai arus lebih hanya berfungsi sebagai pengaman cadangan (*back up protection*) untuk gangguan eksternal atau sebagai back up bagi *outgoing feeder*. Relai arus lebih dapat dipasang pada sisi tegangan tinggi saja, atau pada sisi tegangan menengah saja, atau pada sisi tegangan tinggi dan tegangan menengah sekaligus. Selanjutnya relai arus lebih dapat menjatuhkan PMT pada sisi dimana relai terpasang atau dapat menjatuhkan PMT di kedua sisi transformator tenaga. Relai arus lebih jenis *definite time* ataupun *inverse time* dapat dipakai untuk proteksi transformator terhadap arus lebih.

Sebagai pengaman transformator tenaga dan Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) bertujuan untuk :

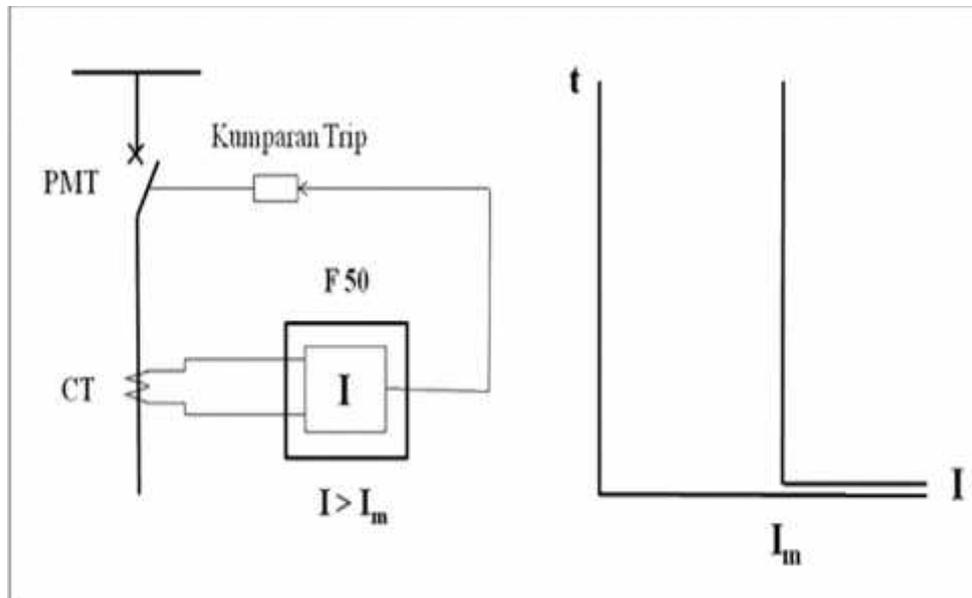
1. Mencegah kerusakan transformator tenaga atau Saluran Udara Tegangan Tinggi dari gangguan hubung singkat
2. Membatasi luas daerah terganggu (pemadaman) sekecil mungkin
3. Hanya bekerja bila pengaman utama transformator tenaga atau Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) tidak bekerja.

Jenis Relai Berdasarkan Karakteristik Waktu :

1. Relai Arus Lebih Sesaat (*Instantaneous Relay*)

Relai yang bekerja seketika (tanpa waktu tunda) ketika arus yang mengalir melebihi nilai settingnya, relai akan bekerja dalam waktu beberapa mili detik (10 – 20 ms).

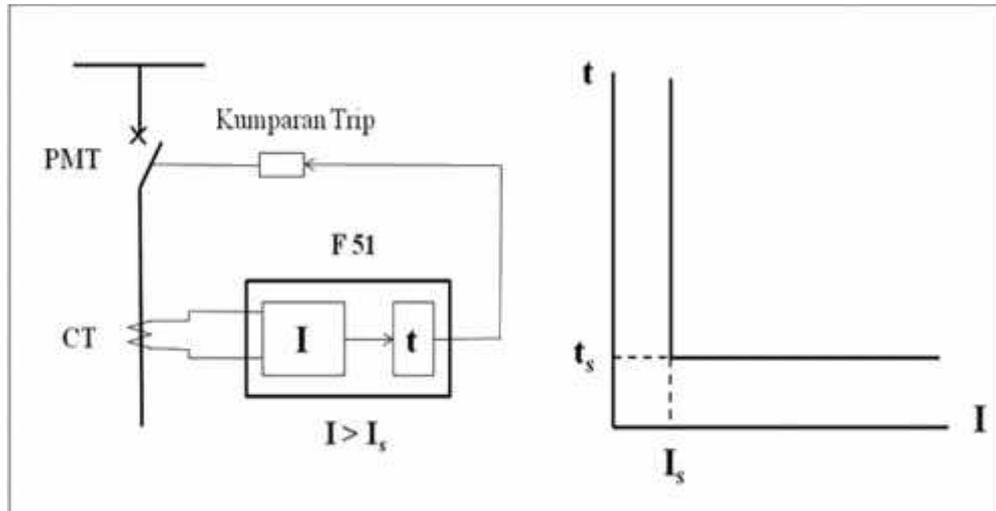
Dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.4. Karakteristik Relai Waktu Seketika

2. Relai Arus Lebih Waktu Tertentu (*Definite Time Relay*)

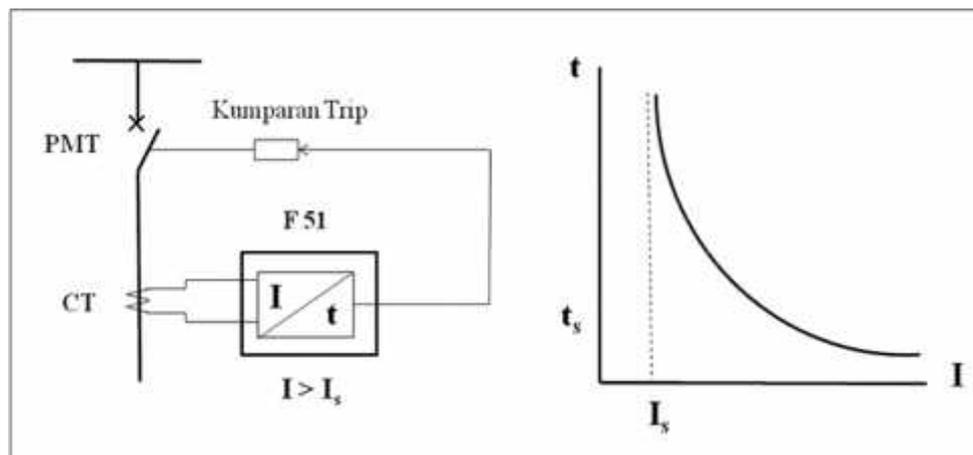
Relai ini akan memberikan perintah pada PMT pada saat terjadi gangguan hubung singkat dan besarnya arus gangguan melampaui settingnya (I_s), dan jangka waktu kerja relai mulai pick up sampai kerja relay diperpanjang dengan waktu tertentu tidak tergantung besarnya arus yang mengerjakan relay, dapat dilihat gambar di bawah ini :



Gambar 2.5. Karakteristik Relai Arus Lebih Waktu Tertentu

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

Relai ini akan bekerja dengan waktu tunda yang tergantung dari besarnya arus secara terbalik (*inverse time*), makin besar arus makin kecil waktu tundanya. Karakteristik ini bermacam-macam dan setiap pabrik dapat membuat karakteristik yang berbeda-beda.



Gambar 2.6. Karakteristik Relai Arus Lebih Waktu Terbalik

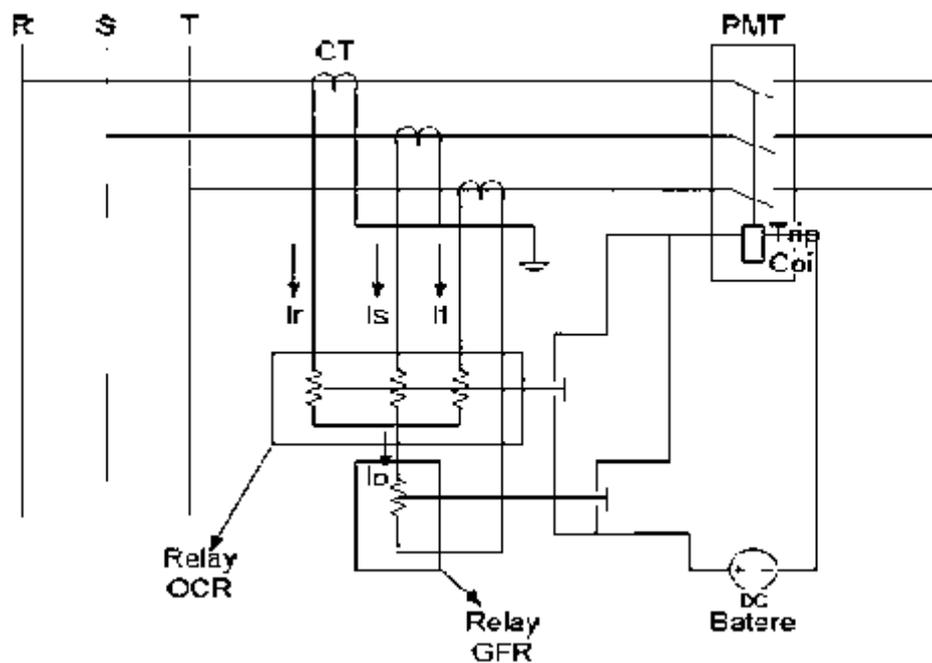
Karakteristik waktu relai ini dibedakan dalam tiga kelompok, yaitu :

- a. *Standar inverse*
- b. *Very inverse*
- c. *Long inverse*
- d. *Extreemely inverse*

2.4.2. Prinsip Kerja Relai Arus Lebih

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

Adapun dapat dilihat gambar di bawah ini :



Gambar 2.7. Rangkaian Pengawatan Relai Arus Lebih



Cara kerja dari relai arus lebih berdasarkan gambar 2.7. adalah :

1. Pada kondisi normal arus beban (I_b) mengalir pada Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) / Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM) dan oleh transformator arus besaran arus ini ditransformasikan ke besaran sekunder (I_r). Arus (I_r) mengalir pada kumparan relai tetapi karena arus ini masih lebih kecil daripada suatu harga yang ditetapkan (setting), maka relai tidak bekerja.
2. 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 (di atas setting), maka relai akan bekerja dan memberikan perintah trip pada tripping coil untuk bekerja dan membuka PMT, sehingga Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)/ Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM) yang terganggu dipisahkan dari jaringan.

2.4.3. Setting Relai Arus Lebih

2.4.3.1 Setting Arus Relai Arus Lebih

Penyetelan relai arus lebih pada sisi primer dan sisi sekunder transformator tenaga terlebih dahulu harus dihitung arus nominal transformator tenaga. Arus setting untuk relai arus lebih baik pada sisi primer maupun pada sisi sekunder transformator tenaga adalah :

$$\begin{aligned}
 I_{\text{beban}} &= I_n \text{ (sisi 20 kV)} \\
 &= \frac{\text{Kapasitas daya trafo (kVA)}}{\sqrt{3} \times \text{Tegangan sisi primer trafo (kV)}} \dots\dots\dots(2.8)
 \end{aligned}$$

$$I_{\text{set (primer)}} = 1,05 \times I_n \text{ transformator} \dots\dots\dots(2.9)$$

Nilai tersebut adalah nilai primer, untuk mendapatkan nilai setelan sekunder yang dapat diterapkan pada relai arus lebih, maka harus dihitung



dengan menggunakan rasio transformator arus (CT) yang terpasang pada sisi primer maupun sisi sekunder transformator tenaga.

$$I_{set (sek)} = I_{set (primer)} \times \frac{1}{\text{ratio CT}} \dots\dots\dots(2.10)$$

2.4.3.2 Setting Waktu Relai Arus Lebih (TMS)

Hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai setelan waktu (TMS). Rumus untuk menentukan nilai setelan waktu bermacam-macam sesuai dengan pembuat relai. Dalam hal ini diambil rumus dengan relai merk Schneider. (Affandi, Irfan. 2009. hal.29-34)

Tabel 2.1. Karakteristik Setelan Waktu Relai Arus Lebih

No	Karakteristik	Rumus
1	Standard Inverse	$t = \frac{0,14}{I^{0,02}-1}$ tms.....(2.11)
2	Very Inverse	$t = \frac{13,5}{I-1}$ tms
3	Extreemely Inverse	$t = \frac{80}{I^2-1}$ tms
4	Long Time Inverse	$t = \frac{120}{I-1}$ tms