

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Distribusi¹

Bagian dari sistem tenaga listrik yang paling dekat dengan pelanggan adalah sistem distribusi. Sistem distribusi adalah bagian sistem tenaga listrik yang paling banyak mengalami gangguan, sehingga masalah utama dalam operasi sistem distribusi adalah mengatasi gangguan.

Sistem distribusi kebanyakan merupakan jaringan yang diisi dari sebuah Gardu Induk. Jaringan distribusi yang diisi dari sebuah Gardu Induk pada umumnya tidak dihubungkan secara listrik dengan jaringan distribusi yang diisi dari Gardu Induk yang lain, sehingga masing-masing jaringan distribusi beroperasi secara terpisah satu sama lain.

Sistem distribusi terdiri dari Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan Jaringan Tegangan Rendah (JTR). Baik Jaringan Tegangan Menengah maupun Jaringan Tegangan Rendah pada umumnya beroperasi secara radial. Dalam sistem yang perkembangannya masih baru, bebannya relatif masih rendah sehingga tidak diperlukan sistem transmisi (penyaluran).

Dalam pengoperasian sistem distribusi, masalah yang utama adalah mengatasi gangguan karena jumlah gangguan dalam sistem distribusi adalah relatif banyak dibandingkan jumlah gangguan pada bagian sistem yang lain. Di samping itu masalah tegangan, bagian-bagian instalasi yang berbeban lebih dan rugi-rugi daya dalam jaringan merupakan masalah yang perlu dicatat dan dianalisa secara terus menerus, untuk dijadikan masukan bagi perencanaan pengembangan sistem dan juga untuk melakukan tindakan-tindakan penyempurnaan pemeliharaan dan penyempurnaan operasi sistem distribusi.

¹ Sumber : Operasi Sistem Tenaga Listrik. Djiteng Marsudi. 2006

2.2. Sistem Proteksi Distribusi Tenaga Listrik²

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan salah satu bagian dari suatu sistem tenaga listrik yang dimulai dari PMT incoming di Gardu Induk sampai dengan Alat Penghitung dan Pembatas (APP) di instalasi konsumen yang berfungsi untuk menyalurkan dan mendistribusikan tenaga listrik dari Gardu Induk sebagai pusat beban ke pelanggan-pelanggan secara langsung atau melalui gardu-gardu distribusi (gardu trafo) dengan mutu yang memadai sesuai standar pelayanan yang berlaku. Sehingga sistem distribusi ini menjadi suatu sistem tersendiri karena unit distribusi ini memiliki komponen peralatan yang saling berkaitan dalam operasinya untuk menyalurkan tenaga listrik.

Dilihat dari tegangannya sistem distribusi pada saat ini dapat dibedakan dalam 2 macam, yaitu :

1. Distribusi Primer, yaitu jaringan tenaga listrik yang keluar dari Gardu Induk baik itu berupa saluran kabel tanah, saluran kabel udara atau saluran kawat terbuka yang menggunakan standard tegangan menengah dikatakan sebagai Sistem Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dengan tegangan operasi nominal 20 kV/11,6 kV
2. Distribusi Sekunder, yaitu jaringan tenaga listrik yang disalurkan dari JTM yang diturunkan tegangannya menggunakan transformator distribusi menjadi tegangan rendah dengan tegangan standard 380/220 volt

2.2.1. Pengertian sistem proteksi³

Untuk mengamankan sistem tenaga listrik dari gangguan seperti arus lebih atau hubung singkat, turun dan naiknya tegangan, turun dan naiknya frekuensi dan kegagalan isolasi atau melemahnya isolasi pada sistem tenaga listrik dilakukan dengan memasang alat pengaman atau pelindung, sedangkan untuk menghilangkan gangguan dengan cepat diperlukan sistem operasi yang tepat dan

² Sumber : Modul Perkuliahan Sistem Proteksi Distribusi Tenaga Listrik. Abdul Halim. 2010

³ Sumber : Modul Praktikum Sistem Proteksi. Carlos RS,Rumiasih. 2012

benar. Oleh karena itu suatu sistem proteksi haruslah mempunyai sifat-sifat dan kriteria operasi yang handal, selektif, dan sederhana.

Gangguan pada sistem tenaga listrik merupakan suatu besaran (seperti arus, tegangan, frekuensi, daya dan impedansi) yang telah melampaui batas keadaan normal. Keadaan ini dapat mengganggu dan merusak peralatan sistem listrik. Maka dari itu diperlukan sebuah sistem proteksi untuk memonitor besaran gangguan tersebut.

2.2.2. Tujuan sistem proteksi⁴

Secara umum relai proteksi harus bekerja sesuai dengan yang diharapkan dengan waktu yang cepat sehingga tidak akan mengakibatkan kerusakan, ataupun kalau suatu peralatan terjadi kerusakan secara dini telah diketahui, atau walaupun terjadi gangguan tidak menimbulkan pemadaman bagi konsumen.

Tugas rele proteksi juga berfungsi menunjukkan lokasi dan macam gangguannya. Dengan data tersebut memudahkan analisa dari gangguannya. Dalam beberapa hal relai hanya memberi tanda adanya gangguan atau kerusakan, jika dipandang gangguan atau kerusakan tersebut tidak segera membahayakan. Dari uraian di atas maka relai proteksi pada sistem tenaga listrik berfungsi untuk :

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. Mengurangi pengaruh gangguan terhadap bagian sistem yang lain yang tidak terganggu di dalam sistem tersebut serta mencegah meluasnya gangguan.
4. Memperkecil bahaya bagi manusia.

⁴ Sumber : Dasar-Dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik. Ir.H.Hazairin Samaulah, M.Eng.,Ph.D.

2.3. Persyaratan Sistem Proteksi

Tujuan utama sistem proteksi adalah :

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

Persyaratan terpenting dari sistem proteksi yaitu :

1. Keandalan (*reliability*)

Keandalan mempunyai dua 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 beroperasi dengan salah

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 ini 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.

3. Kecepatan operasi (*speed of operation*)

Kenyataan bahwa suatu sistem proteksi harus mampu bekerja mengisolir area yang mengalami gangguan secepat mungkin. Pada suatu sistem tegangan menengah, dimana koordinasi antara relai sangat dibutuhkan dengan waktu relai sedikit lebih lambat. Tipe operasi relai untuk tegangan menengah antara 0,2 detik sampai 1,5 detik. Jadi kecepatan itu penting, tapi tidak selalu dibutuhkan. Tapi pada sistem pembangkitan dan tegangan tinggi diperlukan proses pelepasan yang sangat cepat.

4. Kesederhanaan (*simplicity*)

Sistem proteksi harus disusun sederhana mungkin dan tetap mampu bekerja sesuai dengan tujuannya. Penambahan unit atau komponen yang mungkin meningkatkan proteksi namun tidak terlalu penting dalam sistem harus dipertimbangkan dengan seksama. Setiap tambahan akan menambah sumber masalah dan tambahan pemeliharaan. Peningkatan *solid state* dan teknologi digital dalam sistem proteksi menghasilkan kemungkinan yang lebih baik dalam peningkatan keunggulan sistem.

5. Ekonomis (*economic*)

Sangat penting untuk menghasilkan suatu sistem proteksi yang memiliki perlindungan maksimum dengan biaya minimum. Harga rendah tidak menjamin sistem tersebut handal atau sebaliknya. Investasi awal yang rendah dari sistem ini menyebabkan kesulitan dalam instalasi dan operasi serta memerlukan biaya perawatan yang mahal. Sistem proteksi pertimbangannya adalah besar biaya dari peralatan sistem yang dilindungi dan biaya harus dikeluarkan atau hilang akibat gangguan, maka sistem proteksi akan lebih murah.

2.4. Gangguan Hubung Singkat⁵

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

1. Gangguan hubungan singkat tiga fasa
2. Gangguan hubungan singkat dua fasa
3. Gangguan hubungan singkat satu fasa ke tanah

Semua gangguan hubung singkat di atas, arus gangguannya dihitung dengan menggunakan rumus dasar yaitu :

$$I = \frac{V}{Z} \dots\dots\dots(2.1.)$$

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 :

$$\begin{aligned} Z \text{ untuk gangguan tiga fasa, } & Z = Z_1 \\ Z \text{ untuk gangguan dua fasa, } & Z = Z_1 + Z_2 \\ Z \text{ untuk gangguan satu fasa, } & Z = Z_1 + Z_2 + Z_0 \dots\dots\dots(2.2.) \end{aligned}$$

Dimana:

Z1 = Impedansi urutan positif (ohm)

Z2 = Impedansi urutan negatif (ohm)

Z0 = Impedansi urutan nol. (ohm)

⁵ Sumber : Modul “Analisa Setting Relai Arus Lebih....”.Irfan Affandi. 2006

2.4.1. Perhitungan arus gangguan hubung singkat⁶

Dalam proteksi sistem tenaga listrik, sangat penting untuk mengetahui distribusi arus dan tegangan di berbagai tempat sebagai akibat timbulnya gangguan. Karakteristik kerja relai proteksi dipengaruhi oleh besaran energi yang dimonitor oleh relai seperti arus atau tegangan. Dengan mengetahui distribusi arus dan tegangan di berbagai tempat maka dapat menentukan setting untuk relai proteksi dan rating dari pemutus tenaga/circuit breaker (CB) yang akan digunakan. 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. 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 :

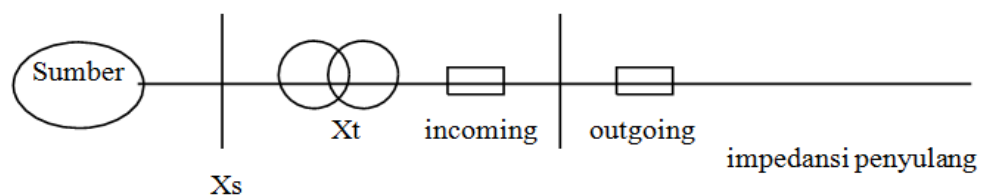
⁶ Sumber : “Studi Perencanaan Koordinasi...”. Adrial Mardensyah. 2008

2.4.1.1. menghitung impedansi⁷

Dalam menghitung impedansi dikenal tiga macam impedansi urutan, yaitu :

- Impedansi urutan positif (Z_1), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan positif
- Impedansi urutan negatif (Z_2), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan negatif.
- Impedansi urutan nol (Z_0), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh 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 2.1. Sketsa Penyulang Tegangan Menengah

Dimana :

X_s = Impedansi sumber (ohm)

X_t = Impedansi transformator (ohm)

⁷ Sumber : Perhitungan Setting dan Koordinasi Proteksi Sistem Distribusi. PT.PLN. 2007

a. Impedansi sumber

Untuk menghitung sumber di sisi bus 20 kV, maka harus dihitung dulu impedansi sumber di bus 70 kV. Impedansi sumber di bus 150 kV diperoleh dengan rumus :

$$X_s = \frac{kV^2}{MVA} \dots \dots \dots (2.3.)$$

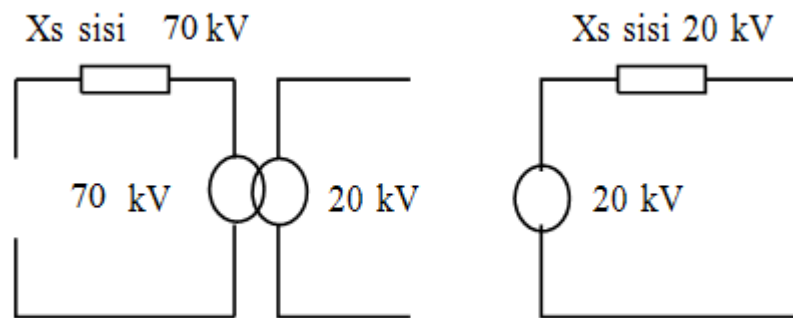
Dimana :

X_s = Impedansi sumber (ohm)

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

MVA = Data hubung singkat di bus 70 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 70 kV ke sisi 20 kV dapat dihitung dengan menggunakan rumus :



Gambar 2.2. Konversi X_s dari 70 kV ke 20 kV

$$X_s (\text{sisi } 20 \text{ kV}) = \frac{20^2}{70^2} \times X_s (\text{sisi } 70 \text{ kV}) \dots \dots \dots (2.4.)$$

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 :

$$X_t \text{ (pada 100\%)} = \frac{kV^2}{MVA} \dots\dots\dots(2.5.)$$

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 :

1. Untuk menghitung reaktansi urutan positif dan negatif ($X_{t1}=X_{t2}$), dihitung dengan menggunakan rumus :

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

2. Sebelum menghitung reaktansi urutan nol (X_{t0}) terlebih dahulu diketahui data transformator tenaga itu sendiri, yaitu data dari kapasitas belitan delta yang ada dalam transformator :

- Untuk transformator tenaga dengan hubungan belitan ΔY dimana kapasitas belitan delta sama besar dengan kapasitas belitan Y, maka $X_{t0} = X_{t1}$
- Untuk transformator tenaga dengan hubungan belitan Yd 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 ditanahkan, maka nilai $X_{t0} = 3 \cdot X_{t1}$

- Untuk transformator tenaga dengan hubungan belitan YY dan tidak mempunyai belitan delta di dalamnya, maka untuk menghitung besarnya X_{t0} berkisar antara 9 sampai dengan 14 kali X_{t1}(2.6.)

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

$$Z_1 = Z_2 = \% \text{ panjang} \times \text{panjang penyulang (km)} \times Z_1/Z_2 \dots\dots\dots(2.7.)$$

Dimana :

$$Z_1 = \text{Impedansi urutan positif (ohm)}$$

$$Z_2 = \text{Impedansi urutan negatif (ohm)}$$

2. Urutan nol

$$Z_0 = \% \text{ panjang} \times \text{panjang penyulang (km)} \times Z_0 \dots\dots\dots(2.8.)$$

Dimana :

$$Z_0 = \text{Impedansi urutan nol (ohm)}$$

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 Z_1eq dan Z_2eq dapat langsung dengan cara menjumlahkan impedansi tersebut, sedangkan untuk perhitungan Z_0eq dimulai dari titik gangguan sampai ke transformator tenaga yang netralnya ditanahkan. Akan tetapi untuk menghitung impedansi Z_0eq ini, harus diketahui dulu hubungan belitan transformatornya. Sehingga untuk impedansi ekivalen jaringan dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

1. Urutan positif dan urutan negatif ($Z_1eq = Z_2eq$)

$$Z_1eq = Z_2eq = Z_{s1} + Z_{t1} + Z_1 \text{ penyulang} \dots \dots \dots (2.9.)$$

Dimana :

Z_1eq = Impedansi ekivalen jaringan urutan positif (ohm)

Z_2eq = Impedansi ekivalen jaringan urutan negatif (ohm)

Z_{s1} = Impedansi sumber sisi 20 kV (ohm)

Z_{t1} = Impedansi transformator tenaga urutan positif dan negatif
(ohm)

Z_1 = Impedansi urutan positif dan negatif (ohm)

2. Urutan nol

$$Z_0eq = Z_{t0} + 3RN + Z_0 \text{ penyulang} \dots \dots \dots (2.10.)$$

Dimana :

Z_0eq = Impedansi ekivalen jaringan nol (ohm)

Z_{t0} = Impedansi transformator tenaga urutan nol (ohm)

RN = Tahanan tanah transformator tenaga (ohm)

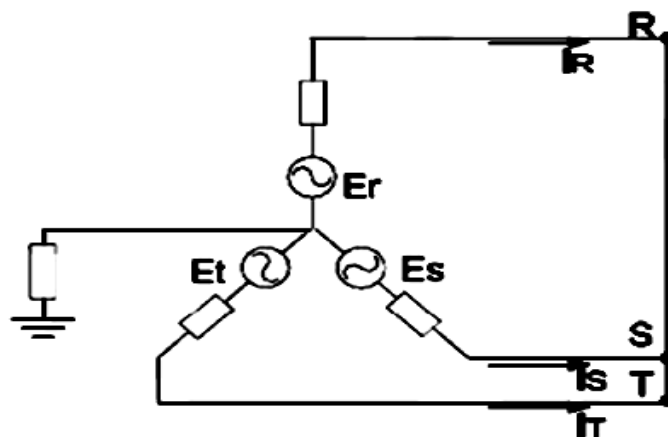
Z_0 = Impedansi urutan nol (ohm)

2.4.1.2. 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 :

a. 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 :

$$I = \frac{V}{Z} \dots \dots \dots (2.11.)$$

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

$$I_{3 \text{ fasa}} = \frac{V_{ph}}{Z_{1eq}} \dots \dots \dots (2.12.)$$

Dimana :

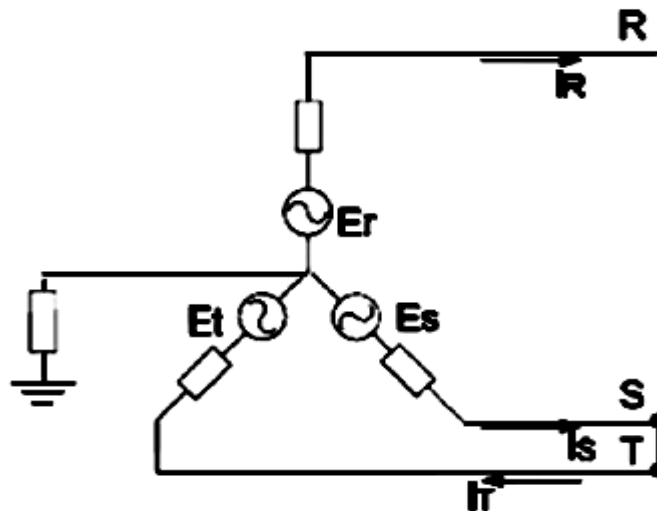
$I_{3\text{ fasa}}$ = Arus gangguan hubung singkat 3 fasa (A)

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

Z_{1eq} = Impedansi ekivalen urutan positif (ohm)

b. Perhitungan Arus Hubung Singkat Dua Fasa

Gangguan hubung singkat dua fasa pada saluran tenaga dengan hubungan transformator YY dengan netral ditanahkan melalui RNDR, ditunjukkan dengan gambar di bawah ini :



Gambar 2.4. Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa

Persamaan pada gangguan hubung singkat dua fasa ini adalah:

$$V_S = V_T$$

$$I_R = 0$$

$$I_S = -I_T$$

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

$$I = \frac{V}{Z} \dots \dots \dots (2.13.)$$

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

$$I_{2 \text{ fasa}} = \frac{V_{ph-ph}}{Z_{1eq} + Z_{2eq}} \dots \dots \dots (2.14.)$$

Karena $Z_{1eq} = Z_{2eq}$, maka :

$$I_{2 \text{ fasa}} = \frac{V_{ph-ph}}{2 \cdot Z_{1eq}} \dots \dots \dots (2.15.)$$

Dimana :

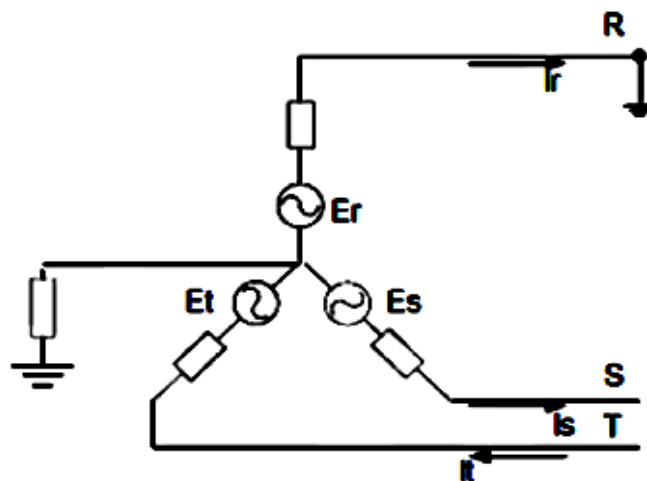
$I_{2 \text{ fasa}}$ = Arus gangguan hubung singkat 2 fasa (A)

V_{ph-ph} = Tegangan fasa-fasa sistem 20 kV = 20.000 V

Z_{1eq} = Impedansi ekivalen urutan positif (ohm)

c. Perhitungan Arus Hubung Singkat Satu Fasa

Gangguan hubung singkat satu fasa pada saluran tenaga dengan hubungan transformator YY dengan netral ditanahkan melalui RNGR, ditunjukkan dengan gambar di bawah ini :



Gambar 2.5. Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa

Persamaan pada gangguan hubung singkat dua fasa ini adalah:

$$V_T = 0$$

$$I_S = 0$$

$$I_T = 0$$

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

$$I = \frac{V}{Z} \dots \dots \dots (2.16.)$$

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

$$I_{1 \text{ fasa}} = \frac{3.V_{ph}}{Z_1eq + Z_2eq + Z_0eq} \dots \dots \dots (2.17.)$$

Karena $Z_1eq = Z_2eq$, maka :

$$I_{1 \text{ fasa}} = \frac{3.V_{ph}}{2.Z_1eq + Z_0eq} \dots \dots \dots (2.18.)$$

Dimana :

$I_{1 \text{ fasa}}$ = Arus gangguan hubung singkat 1 fasa (A)

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

Z_1eq = Impedansi ekivalen urutan positif (ohm)

Z_0eq = Impedansi ekivalen urutan nol (ohm)

2.5. Relai Arus Lebih⁸

2.5.1. 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

Adapun pertimbangan dalam kalkulasi setting relai arus lebih antara lain :

1. Data hubung singkat 3 fasa berdasarkan perhitungan kantor induk P3B Sumatera
2. Dalam perhitungan koordinasi setting relai arus lebih dipakai acuan hubung singkat 3 fasa maksimum

⁸ Sumber : Pedoman Operasi dan Pemeliharaan (O&M) Peralatan Proteksi. P3B Sumatera. 2007

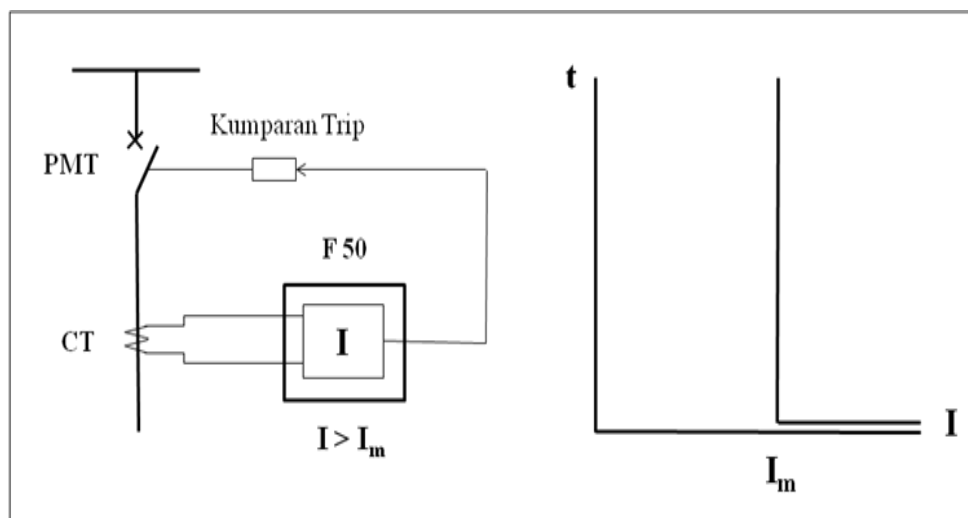
3. Untuk mendapatkan koordinasi relai yang baik dan agar tidak terjadi akumulasi waktu kerja relai yang terlalu lama maka setting waktu relai arus lebih harus menggunakan karakteristik *Inverse Time*.
4. Pemilihan *setting* arus kerja :
Setting arus kerja berdasarkan kemampuan nominal (CCC) peralatan instalasi yang paling kecil (konduktor, CT, PMT, PMS, *jumperan*, *wave trap*).

2.5.2. 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 *setting*nya, relai akan bekerja dalam waktu beberapa mili detik (10 – 20 ms).

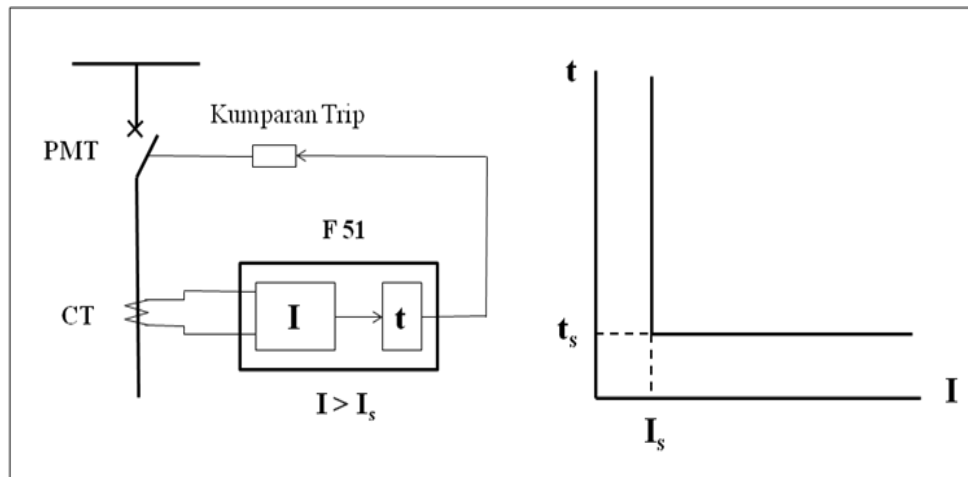
Dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.6. Karakteristik Relai Waktu Seketika

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

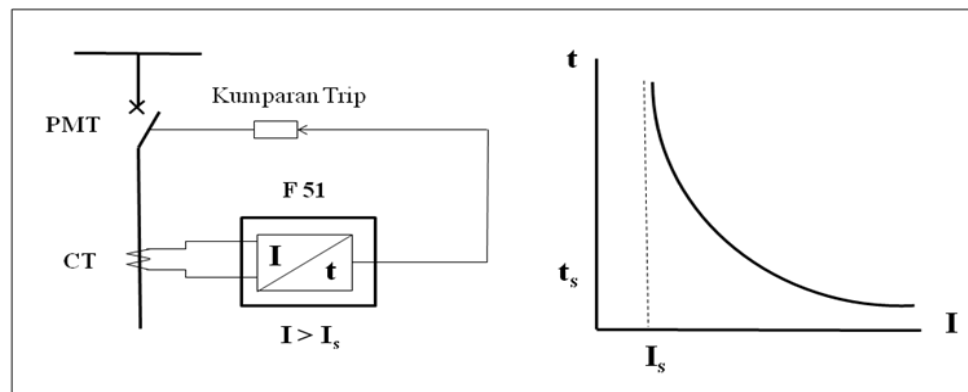
Relai ini akan memberikan perintah pada PMT pada saat terjadi gangguan hubung singkat dan besarnya arus gangguan melampaui *settingnya* (I_s), dan jangka waktu kerja relai mulai pick up sampai kerja relai diperpanjang dengan waktu tertentu tidak tergantung besarnya arus yang mengerjakan relai, dapat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



Gambar 2.7. 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 2.8. Karakteristik Relai Arus Lebih Waktu Terbalik

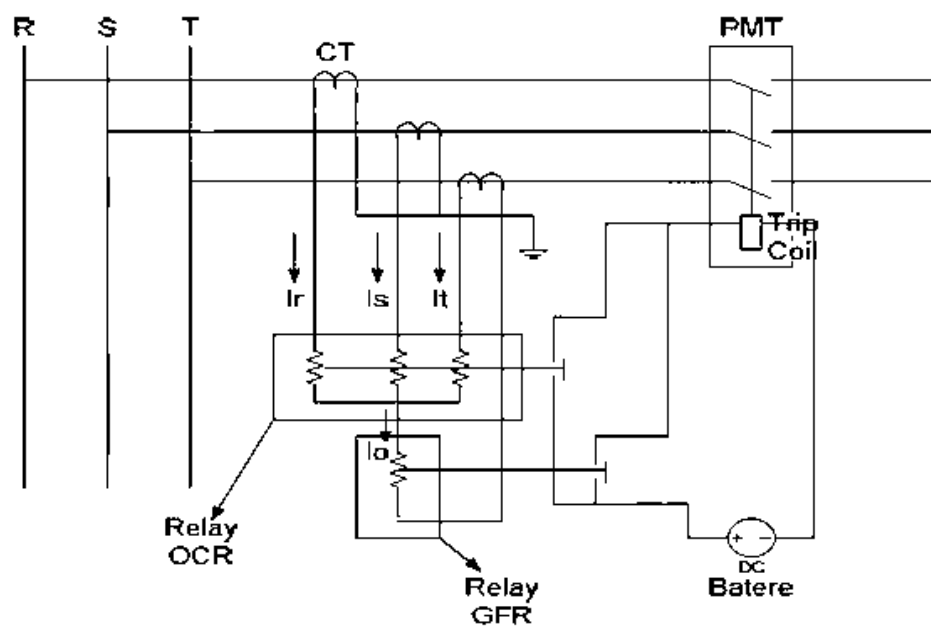
Karakteristik waktu relai ini dibedakan dalam tiga kelompok, yaitu :

- a. Standar inverse
- b. Very inverse
- c. Long inverse
- d. Extremely inverse

2.5.3. 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 2.9. Rangkaian Pengawatan Relai Arus Lebih

Cara kerja dari relai arus lebih berdasarkan gambar 2.9. 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.

2.5.4. *Setting* relai arus lebih

2.5.4.1. *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 :

$$I_{set}(\text{prim}) = 1,05 \times I_n \text{ transformator} \dots \dots \dots (2.19.)$$

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.

$$I_{set}(\text{sek}) = I_{set}(\text{prim}) \times \frac{1}{\text{ratio CT}} \dots \dots \dots (2.20.)$$

2.5.4.2. *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.

Tabel 2.1. Karakteristik Setelan Waktu Relai Arus Lebih

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