

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Energi menempati peringkat yang sangat penting sebagai kebutuhan umat manusia. Salah satu bentuk energi yang sangat diperlukan dan digunakan adalah listrik. Energi listrik yang dihasilkan di pusat pembangkit listrik akan disalurkan transmisi kemudian melalui saluran distribusi akan sampai ke konsumen. Proses tersebut dilakukan dalam sebuah kegiatan yang disebut dengan sistem tenaga listrik (*Electric Power Sistem*). Sistem tenaga listrik adalah sistem penyediaan tenaga listrik yang terdiri dari beberapa pembangkit atau pusat listrik terhubung satu dengan lainnya oleh jaringan transmisi dengan pusat beban atau jaringan distribusi.

Sistem tenaga listrik terdiri atas 3 Sub-sistem :

2.1.1 Sub-Sistem Pembangkitan

Sistem pembangkitan tenaga listrik berfungsi membangkitkan energi listrik melalui berbagai macam pembangkit tenaga listrik (PLTA, PLTU, PLTD, PLTP, PLTG, dsb). Pada pembangkit tenaga listrik ini sumber-sumber energi alam dirubah oleh penggerak mula menjadi energi mekanis yang berupa kecepatan atau putaran, selanjutnya energi mekanis tersebut dirubah menjadi energi listrik oleh generator.

2.1.2 Sub-Sistem Transmisi

Sub-sistem transmisi berfungsi menyalurkan tenaga listrik dari pusat pembangkit ke pusat beban melalui saluran transmisi. Agar rugi-rugi energi listrik (*losses*) berkurang, maka energi listrik tersebut ditransmisikan dengan saluran transmisi tegangan tinggi (150 kV) maupun tegangan ekstra tinggi (500 kV). Untuk itu sebelum ditransmisikan, tegangan listrik terlebih dahulu dinaikkan pada trafo penaik tegangan (*step-up transformer*). Saluran transmisi tegangan tinggi di PLN kebanyakan mempunyai tegangan 66 kV, 150 kV dan 500 kV (SUTET). Saluran transmisi ada yang berupa saluran udara dan ada yang berupa kabel tanah, atau kabel laut.

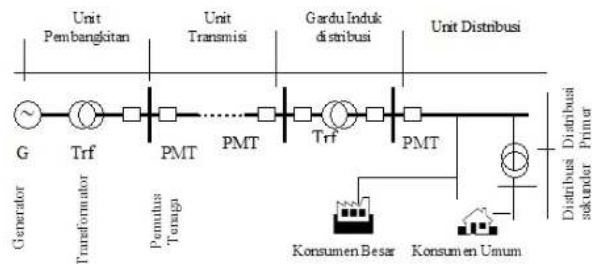
2.1.3 Sub-Sistem Distribusi

Sub-sistem distribusi berfungsi mendistribusikan tenaga listrik ke konsumen (pabrik, industri, perumahan dan sebagainya). Listrik yang berasal dari saluran transmisi dengan tegangan Tinggi atau Ekstra Tinggi, pada pada gardu induk diubah menjadi tegangan menengah atau tegangan distribusi primer, yang selanjutnya diturunkan lagi menjadi tegangan rendah untuk konsumen. Tegangan distribusi primer yang dipakai PLN adalah 20kV. Sedangkan tegangan rendah adalah 380/220V.

Jaringan antara pusat listrik dengan Gardu Induk (GI) disebut jaringan transmisi. Sedangkan setelah keluar dari GI biasa disebut jaringan distribusi. Jaringan distribusi dari GI biasanya juga akan

melalui gardu-gardu Hubung. Listrik yang disalurkan melalui jaringan distribusi primer maka kemudian tenaga listrik diturunkan tegangannya dalam gardu-gardu distribusi menjadi tegangan rendah 380/220 Volt , kemudian disalurkan ke rumah-rumah pelanggan (konsumen) PLN melalui sambungan rumah.

Namun untuk pelanggan-pelanggan dengan daya besar seperti pabrik-pabrik, listrik tidak disalurkan lewat jaringan tegangan rendah, melainkan disambung langsung pada jaringan tegangan menengah, bahkan ada pula yang disambung pada jaringan transmisi tegangan tinggi, untuk daya yang lebih besar (Zulkairnaini dan Saputra, 2012).



Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik

(Sumber : <https://distribusitenaga.blogspot.com>)

2.2 Gardu Induk

Gardu Induk merupakan suatu instalasi yang terdiri dari sekumpulan peralatan listrik yang disusun menurut pola tertentu dengan pertimbangan

teknis, ekonomis serta keindahan. Fungsi dari Gardu Induk adalah sebagai berikut.

- a. Mentransformasikan tenaga listrik tegangan tinggi yang satu ketegangan yang lainnya atau tegangan menengah.
- b. Pengukuran pengawasan operasi serta pengaturan pengamanan dari sistem tenaga listrik.
- c. Pengaturan daya ke gardu-gardu lainnya melalui tegangan tinggi dan gardu distribusi melalui penyulang tegangan menengah.

Pada dasarnya gardu induk terdiri dari saluran masuk dan dilengkapi dengan transformator daya, peralatan ukur, peralatan penghubung dan lainnya yang saling menunjang.

Gardu Induk dapat diklasifikasikan menjadi beberapa macam, yaitu :

2.2.1 Menurut Tegangan

Berdasarkan tegangan, gardu induk dapat dibedakan menjadi

2 macam yaitu :

1. Gardu Induk Transmisi

Gardu induk transmisi adalah gardu induk yang mendapat daya dari saluran transmisi untuk kemudian menyalurkannya ke daerah beban (industri, kota, dan sebagainya). Gardu induk transmisi yang ada di PLN adalah tegangan tinggi 150 kV dan tegangan tinggi 70 kV.

2. Gardu Distribusi

Gardu distribusi adalah gardu induk yang menerima tenaga dari gardu induk transmisi dengan menurunkan tegangannya melalui transformator daya menjadi tegangan menengah (20kV, 12 kV atau 6 kV) untuk kemudian tegangan tersebut diturunkan kembali menjadi tegangan rendah 220/380 V sesuai dengan kebutuhan (Zulkairnaini dan Saputra, 2012).

2.3 Peralatan-Peralatan pada Gardu Induk

Agar gardu induk dapat menjalankan fungsi dan tujuannya, maka gardu dilengkapi dengan peralatan serta fasilitas. Secara garis besar, peralatan-peralatan pada gardu induk tersebut adalah sebagai berikut :

2.3.1 Transformator Daya

a. Transformator Daya

Transformator daya berfungsi untuk mentransformasikan daya listrik, dengan merubah besaran tegangannya sedangkan frekuensinya tetap. Transformator daya juga berfungsi sebagai pengatur tegangan. Trafo daya dilengkapi oleh pentanahan trafo yang berfungsi untuk mendapatkan titik netral dari trafo daya. Pentanahan trafo yaitu *Neutral Grounding Resistance* (NGR) (Zulkairnaini dan Saputra, 2012).



Gambar 2. 2 Transformator Daya

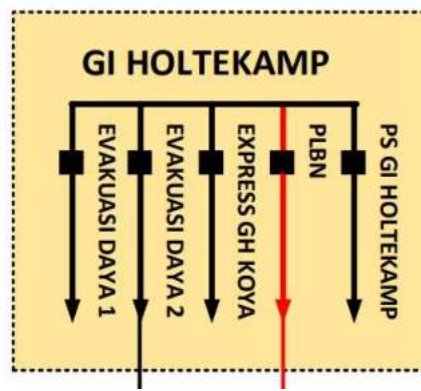
(Sumber : <https://mandornya.blogspot.com/>)

2.4 Gardu Hubung

Gardu Hubung disingkat GH atau *Switching Substation* adalah gardu yang berfungsi sebagai sarana manuver pengendali beban listrik jika terjadi gangguan aliran listrik, program pelaksanaan pemeliharaan atau untuk maksud mempertahankan kontinuitas pelayanan. Isi dari instalasi Gardu Hubung adalah pemutus tenaga yang terhubung paralel. Konstruksi Gardu Hubung sama dengan gardu distribusi tipe beton. Pada ruang dalam Gardu Hubung dapat dilengkapi dengan ruang untuk gardu distribusi yang terpisah dan ruang untuk sarana pelayanan kontrol jarak jauh. Ruang untuk sarana pelayanan kontrol jarak jauh dapat berada pada ruang yang sama dengan ruang Gardu Hubung, namun terpisah dengan ruang Gardu Distribusinya. (Zulkairnaini, Saputra, 2012)

2.5 Penyulang Tegangan Menengah

Penyulang tegangan menengah adalah jaringan penghubung tegangan 20 kV keluaran dari Gardu Hubung atau Gardu Induk akan diteruskan ke pelanggan melalui jaringan distribusi. Pada gambar 2.3 dapat dilihat bahwa terdapat 4 penyulang jaringan tegangan menengah yang mensuplai beban pada gardu Induk Holtekamp, diantaranya yaitu penyulang Evakuasi 1, penyulang Evakuasi 2, Penyulang PLBN, dan penyulang Express Koya. Penyulang-penyulang yang terdapat pada gardu Induk Holtekamp disuplai PLTU dan PLTMG yang berlokasi di holtekamp.



Gambar 2. 3 Penyulang-penyulang pada GI Holtekamp

(Sumber : PLN Area Jayapura)

Konstruksi yang digunakan pada penyulang-penyulang jaringan tegangan menengah sangat berpengaruh terhadap kehandalan sistem tenaga listrik. Pada jaringan tegangan menengah dapat dikelompokkan menjadi 3 macam konstruksi sebagai berikut.

2.5.1 Saluran Udara Tegangan Menengah

Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) adalah sebagai konstruksi termurah untuk penyaluran tenaga listrik pada daya yang sama. Konstruksi ini terbanyak digunakan untuk konsumen jaringan tegangan menengah yang digunakan di Indonesia. Ciri utama jaringan ini adalah penggunaan penghantar telanjang (AAAC) yang ditopang dengan isolator pada tiang besi/beton.

Dalam melakukan perhitungan setelan *relai*, perlu dilakukan perhitungan impedansi dari sumber hingga ujung jaringan maka dari itu nilai dari impedansi penghantar perlu diketahui. Berikut adalah impedansi dari penghantar AAAC sebagai berikut.

Tabel 2. 1 Impedansi Penghantar AAAC
(Sumber : SPLN 64:1985)

Penampang nominal (mm ²)	Jari-jari (mm)	Urut	Impedansi urutan positif (Ω/km)	Impedansi urutan nol (Ω/km)
16	2,2563	7	$2,0161 + j 0,4036$	$2,1641 + j 1,6911$
25	2,8203	7	$1,2903 + j 0,3895$	$1,4384 + j 1,677$
35	3,3371	7	$0,9217 + j 0,3790$	$1,0697 + j 1,6665$
50	3,9886	7	$0,6452 + j 0,3678$	$0,7932 + j 1,6553$
70	4,7193	7	$0,4608 + j 0,3572$	$0,6088 + j 1,6447$
95	5,4979	19	$0,3096 + j 0,3449$	$0,4876 + j 1,6324$
120	6,1791	19	$0,2688 + j 0,3376$	$0,4168 + j 1,6324$
150	6,9084	19	$0,2162 + j 0,3305$	$0,3631 + j 1,6180$
185	7,6722	19	$0,1744 + j 0,3239$	$0,3224 + j 1,6114$
240	8,7386	19	$0,1344 + j 0,3158$	$0,2824 + j 1,6034$

2.5.2 Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah

Untuk lebih meningkatkan keamanan dan keandalan penyaluran tenaga listrik, penggunaan penghantar telanjang atau penghantar berisolasi setengah pada konstruksi jaringan Saluran Udara Tegangan Menengah 20 kV, dapat juga digantikan dengan konstruksi penghantar berisolasi penuh yang dipilin. Isolasi penghantar tiap phasa tidak perlu dilindungi dengan pelindung mekanis. Berat kabel pilin menjadi pertimbangan terhadap pemilihan kekuatan beban kerja tiang beton penopangnya.



Gambar 2. 4 Kabel Udara Tegangan Menengah

(Sumber : Buku 5 PLN)

2.5.3 Saluran Kabel Tegangan Menengah

Konstruksi SKTM ini adalah konstruksi yang aman dan andal untuk mendistribusikan tenaga listrik Tegangan Menengah, tetapi relatif lebih mahal untuk penyaluran daya yang sama. Keadaan ini dimungkinkan dengan konstruksi isolasi penghantar per Fase dan pelindung mekanis yang dipersyaratkan. Pada rentang biaya yang diperlukan, konstruksi ditanam langsung adalah termurah bila

dibandingkan dengan penggunaan konduit atau bahkan tunneling (terowongan beton).

Penggunaan Saluran Kabel bawah tanah Tegangan Menengah (SKTM) sebagai jaringan utama pendistribusian tenaga listrik adalah sebagai upaya utama peningkatan kualitas pendistribusian. Dibandingkan dengan SUTM, penggunaan SKTM akan memperkecil resiko kegagalan operasi akibat faktor eksternal / meningkatkan keamanan ketenagalistrikan. Secara garis besar, termasuk dalam kelompok SKTM adalah :

1. SKTM bawah tanah – underground MV Cable.
2. SKTM laut – Submarine MV Cable



Gambar 2. 5 Saluran Kabel Tegangan Menengah

(Sumber : <http://kursrupiah.net>)

2.6 Sistem Proteksi

Sistem proteksi adalah sistem pengaman yang dipasang pada peralatan-peralatan listrik suatu sistem tenaga listrik, misalnya generator, transformator, jaringan distribusi dan lain-lain terhadap kondisi abnormal operasi sistem itu sendiri.

1. Tujuan sistem proteksi

Tujuan dasar dari suatu sistem proteksi adalah untuk mengatasi masalah atau memisahkan daerah yang mengalami gangguan dengan daerah yang tidak terjadi gangguan sehingga daerah yang tidak mengalami gangguan tetap dilayani.

2. Manfaat sistem proteksi

- a. Mendeteksi adanya gangguan atau keadaan abnormal pada bagian sistem yang diamankan
- b. Mengurangi kerusakan yang lebih parah dari peralatan yang terganggu
- c. Mengurangi pengaruh gangguan terhadap bagian sistem yang lain dan mencegah meluasnya gangguan
- d. Memperkecil bahaya bagi manusia

Dalam menjalankan suatu sistem proteksi maka kita harus memperhatikan faktor-faktor yang dibutuhkan agar suatu sistem proteksi dapat bekerja dengan baik (Hidayat, Hakim dan Despa, 2013). Faktor-faktor yang harus diperhatikan dalam suatu sistem proteksi adalah :

1. Keandalan (*reliability*)

Keandalan mempunyai dua aspek, yakni :

- a. *Dependability*, yang diartikan sebagai derajat kepastian bahwa *relai* atau sistem *relai* akan beroperasi dengan benar. Dengan kata lain,

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

- b. *Security*, yang diartikan sebagai derajat kepastian bahwa *relai* atau sistem *relai* tidak beroperasi dengan salah. Kesalahan operasi dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu :

- 1. Kesalahan desain.
- 2. Kesalahan instalasi.

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 hal ini disebut *Time graded system*.

3. Kecepatan operasi (*speed of operation*)

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 jika berfungsi sebagai pengaman cadangan.

4. Kesederhanaan (*simplicity*)

Relai 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.

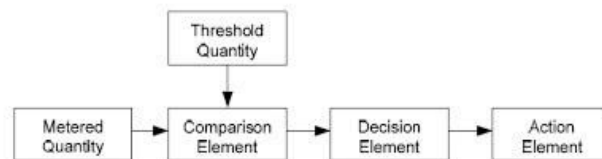
5. Ekonomis (*economic*)

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. (Hidayat, Hakim dan Despa, 2013)

2.7 Komponen-Komponen *Relai* proteksi

Relai proteksi pada umumnya terdiri dari beberapa komponen yang dirancang untuk mengidentifikasi kondisi sistem tenaga listrik dan bekerja berdasarkan informasi yang diperoleh dari sistem tersebut seperti arus, tegangan atau sudut fasa antara keduanya. Informasi yang diperoleh dari sistem tenaga listrik akan digunakan untuk membandingkan besarnya

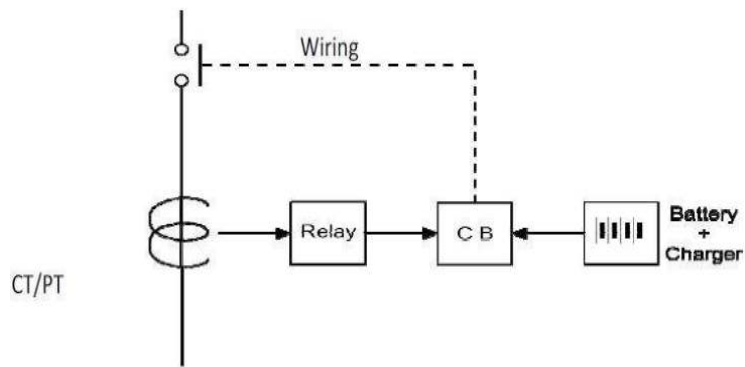
dengan besaran ambang-batas (*threshold setting*) pada peralatan proteksi. Apabila besaran yang diperoleh dari sistem melebihi setting ambang-batas peralatan proteksi, maka sistem proteksi akan bekerja untuk mengamankan kondisi tersebut. Peralatan proteksi pada umumnya terdiri dari beberapa elemen yang dirancang untuk mengamati kondisi sistem dan melakukan suatu tindakan berdasarkan kondisi sistem yang diamatinya.



Gambar 2. 6 Blok Diagram Proteksi Pada Relai Proteksi Sistem Tenaga listrik
(<http://blog.unnes.ac.id/>)

Waktu pemutusan gangguan merupakan salah satu faktor yang sangat penting dalam menentukan suatu skema proteksi. Hal ini dikarenakan suatu peralatan proteksi harus dikoordinasikan waktunya dengan peralatan proteksi yang lain agar hanya peralatan proteksi yang paling dekat dengan gangguan saja yang bekerja (prinsip selektivitas).

Berikut adalah gambar sistematis dari komponen-komponen proteksi tenaga listrik.



Gambar 2. 7 Komponen Proteksi Sistem Tenaga Listrik
(<http://blog.unnes.ac.id/>)

1. Trafo Arus / *Current Transformer*

Current Transformer (CT) adalah suatu perangkat listrik yang berfungsi menurunkan arus yang besar menjadi arus dengan ukuran yang lebih kecil. CT digunakan karena dalam pengukuran arus tidak mungkin dilakukan langsung pada arus beban atau arus gangguan, hal ini disebabkan arus sangat besar dan bertegangan sangat tinggi. Karakteristik CT ditandai oleh *Current Transformer Ratio* yang merupakan perbandingan antara arus yang dilewatkan oleh sisi primer dengan arus yang dilewatkan oleh sisi sekunder.

2. *Relai*

Relai berasal dari teknik telegrafi, dimana sebuah coil di-energize oleh arus lemah, dan coil ini menarik armature untuk menutup kontak. Rele merupakan jantung dari proteksi

sistem tenaga listrik, dan telah berkembang menjadi peralatan yang rumit. *Relai* dibedakan dalam dua kelompok:

- Komparator: mendeteksi dan mengukur kondisi abnormal, dan membuka atau menutup kontak (*trip*).
- *Auxiliary Relais*: dirancang untuk dipakai di *auxiliary circuit* yang dikontrol oleh *relai* komparator, dan membuka / menutup kontak-kontak lain (yang umumnya berarus kuat).

3. *Circuit Breaker (CB)*

Circuit Breaker (CB) adalah salah satu peralatan pemutus daya yang berguna untuk memutuskan dan menghubungkan rangkaian listrik dalam kondisi terhubung ke beban secara langsung dan aman, baik pada kondisi normal maupun saat terdapat gangguan.

4. *DC System Power Supply*

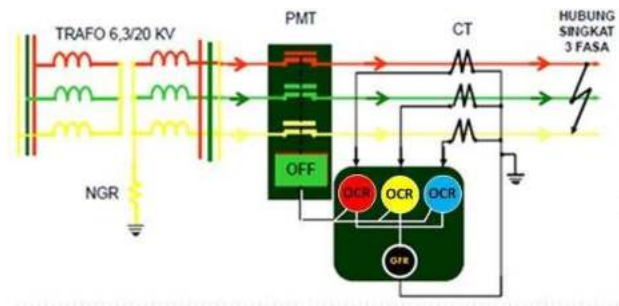
DC System Power Supply merupakan pencatu daya cadangan yang terdiri dari *Battery Charger*, sebagai peralatan yang mengubah tegangan AC ke DC dan *Battery*, sebagai penyimpan daya cadangan. Sebagai peralatan proteksi, *DC System Power Supply* merupakan peralatan yang sangat vital karena jika terjadi gangguan dan kontak telah terhubung,

maka *DC System Power Supply* akan bekerja yang menyebabkan CB membuka. (Suprianto, 2015)

2.8 Relai Arus Lebih

Relai arus lebih atau biasa disebut OCR adalah *relai* yang bekerja berdasarkan adanya kenaikan arus yang melebihi suatu nilai pengaman tertentu dan jangka waktu tertentu. Fungsi utama dari *relai* arus lebih ini adalah untuk merasakan adanya arus lebih kemudian memberikan perintah kepada pemutus beban (PMT) untuk membuka. (Sarimun, 2016)

Pada dasarnya *relai* arus lebih adalah suatu alat yang mendeteksi besaran arus yang melalui suatu jaringan dengan bantuan transformator arus. Harga atau besaran yang boleh melewatinya disebut dengan *setting*.



Gambar 2. 8 Diagram Satu Garis Relai Arus Lebih

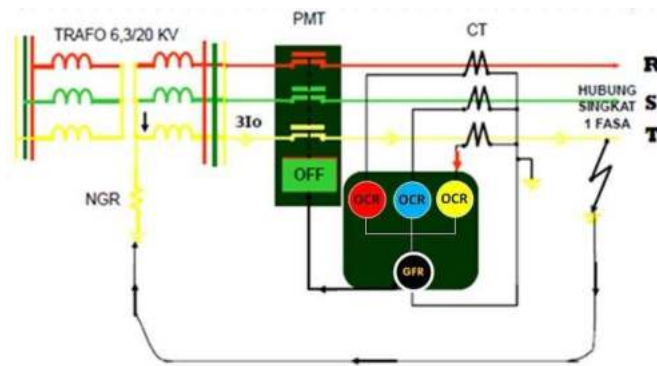
(Sumber : www.ejurnal.its.ac.id)

Prinsip kerja *relai* arus lebih adalah ketika terjadi gangguan arus hubung singkat maka otomatis gangguan akan menuju pada sumber melalui

CT maka *relai* akan mendeteksi jika ada arus gangguan sehingga memerintahkan PMT untuk bekerja.

2.9 Relai Gangguan Tanah

Relai gangguan tanah yang lebih dikenal dengan GFR (ground fault relai) pada dasarnya mempunyai prinsip kerja sama dengan relai arus lebih, namun memiliki perbedaan dalam kegunaannya. Bila relai arus lebih mendeteksi adanya hubung singkat antara fasa, maka relai gangguan tanah mendeteksi adanya hubung singkat ke tanah. (Sarimun, 2016)



Gambar 2. 9 Diagram Satu Garis Relai Gangguan Tanah

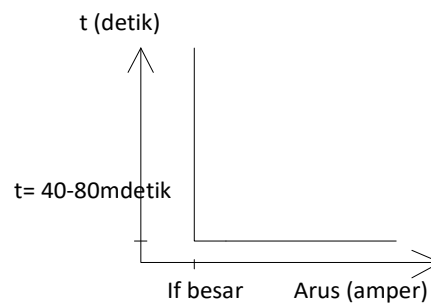
(Sumber : [www. ejurnal.its.ac.id](http://www.ejurnal.its.ac.id))

Prinsip kerja *relai* gangguan tanah adalah ketika terjadi gangguan hubung singkat ke tanah maka arus gangguan akan terbaca oleh *relai* melalui CT sehingga memerintahkan PMT untuk bekerja.

2.10 Jenis *Relai* Berdasarkan Karakteristik Waktu

1. *Relai* Waktu Seketika (*Instantaneous*)

Setelannya tanpa waktu tunda, tapi masih bekerja dengan waktu sebesar 50 sampai 100 mili detik, dengan karakteristik sesuai gambar dibawah, bekerjanya didasarkan besarnya arus gangguan yang dipilih. (Hidayat, Gusmedi dan Hakim, 2013).

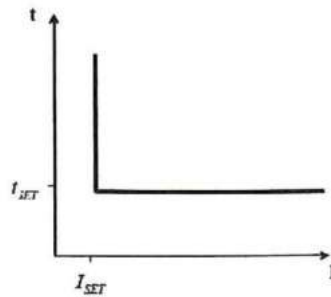


Gambar 2. 10 Karakteristik Waktu Seketika (*Instantaneous*)

(Sumber : www.ejurnal.its.ac.id)

2. *Relai* Arus Lebih *Definite* (*Definite Time*)

Relai ini akan memberikan perintah pada PMT pada saat terjadi gangguan hubung singkat dan besarnya arus gangguan melampaui setelannya (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 pada gambar di bawah ini. (Hidayat, Gusmedi dan Hakim, 2013).

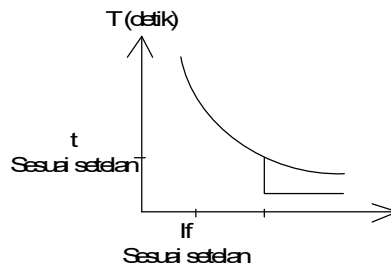


Gambar 2. 11 Karakteristik Waktu Tertentu (Definite)

(Sumber : www.ejurnal.its.ac.id)

3. *Relai Arus Lebih Inverse (Inverse Time)*

Adalah *relai* dimana waktu tundanya mempunyai karakteristik tergantung pada besarnya arus gangguan. Jadi semakin besar arus gangguan maka waktu kerja *relai* akan semakin cepat, arus gangguan berbanding terbalik dengan waktu kerja *relai*. (Hidayat, Gusmedi dan Hakim, 2013).



Gambar 2. 12 Karakteristik Waktu Terbalik (Inverse)

(Sumber : www.ejurnal.its.ac.id)

Pada *relai* jenis ini karakteristik kecuraman waktu arus dikelompokkan menjadi :

- *Standard Inverse*
- *Very Inverse*
- *Long Inverse*
- *Extremly Inverse* (Hidayat, Gusmedi dan Hakim, 2013).

2.11 Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat dapat terjadi tiga fasa, dua fasa dan satu fasa ke tanah. Gangguan yang terjadi ketika fasa terhubung ke tanah dapat digolongkan menjadi dua kelompok yaitu gangguan hubung singkat simetri dan gangguan hubung singkat tak simetri (asimetri). Gangguan simetri adalah gangguan yang terjadi pada semua fasanya sehingga arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. (asimetri). Gangguan ini akan mengakibatkan arus lebih pada fasa yang terganggu mengakibatkan tegangan dan arus yang mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang. (Sarimun, 2016)

Gangguan hubung singkat yang mungkin terjadi di dalam jaringan (sistem kelistrikan) ada 3, yaitu:

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

Yang membedakan antara gangguan hubung singkat tiga fasa, dua fasa, dan satu fasa ketanah ialah impedansi yang terbentuk sesuai dengan macam gangguan itu sendiri, dan tegangan yang memasok arus ke titik gangguan.

Untuk membuat suatu setelan koordinasi proteksi di Gardu Induk diperlukan hasil perhitungan arus gangguan berdasarkan panjang penyulang. Berikut yang perlu diperhatikan jika melakukan perhitungan arus gangguan hubung singkat pada gardu Induk.

Arus gangguan hubung singkat yang diperlukan untuk menghitung setelan OCR (*over current Relai*) diambil arus gangguan hubung singkat 3 fasa dilokasi 1% di depan Gardu Induk. Sedangkan untuk setelan GFR (*ground fault relai*) diambil arus gangguan 1 fasa ke tanah di lokasi 1% depan Gardu Induk dan 100% depan Gardu Induk (di ujung jaringan). (Sarimun, 2016).

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

2.11.1 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.
3. Impedansi urutan nol (Z_0), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh urutan nol.

Sebelum melakukan perhitungan arus hubung singkat, harus terlebih dahulu melakukan perhitungan Impedansi Sumber, Impedansi Transformator, dan Impedansi Penyulang pada GI sampai Ujung Jaringan.

a. Impedansi Sumber (X_s)

Untuk menghitung besar nilai impedansi sumber (X_s) terlebih dahulu kita harus mencari (MVA_{SC}) menggunakan persamaan rumus sebagai berikut. (sumber : ...)

$$MVA_{SC} = \sqrt{3} \times I_{SC(20kV)} \times V_{ph(70kV)} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

MVA_{SC} = Data hubung singkat di sisi 70 kV (MVA)

I_{SC} = Arus hubung singkat di sisi 20 kV (kA)

$V_{ph(70kV)}$ = Tegangan (Phase-Phase) di sisi 70 kV (kV)

Pada perhitungan impedansi sumber di sisi bus 20 kV, maka harus dihitung dulu impedansi sumber di bus 70 kV. Impedansi sumber di bus 70 kV diperoleh dengan rumus sebagai berikut.

$$X_s \text{ (sisi 70 kV)} = \frac{kV \text{ (sisi primer)}^2}{MVA_{SC}} \dots\dots\dots (2.2)$$

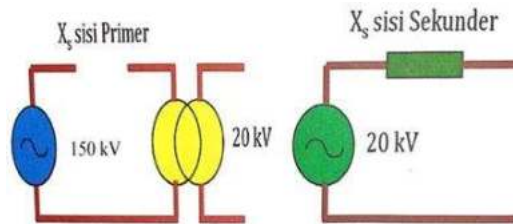
Dimana :

X_s (sisi 70 kV) = Impedansi sumber di bus 70 kV (Ω)

kV = Tegangan sisi primer trafo tenaga (kV)

Arus gangguan hubung singkat di sisi 20 kV diperoleh dengan cara mengkonversikan dulu impedansi sumber di bus 70 kV ke sisi 20 kV. Untuk mengkonversikan impedansi yang terletak di sisi 70 kV ke sisi 20 kV, dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut.

$$X_s (\text{sisi } 20 \text{ kV}) = \frac{kV (\text{sisi sekunder})^2}{kV (\text{sisi primer})^2} \times X_s (\text{sisi } 70 \text{ kV}) \dots\dots\dots (2.3)$$



Gambar 2. 13 konversi X_s dari 70 kV ke 20 kV

(Sumber : <https://distribusitenaga.blogspot.com>)

b. Impedansi Transformator

Pada perhitungan impedansi suatu transformator yang diambil adalah nilai reaktansinya, sedangkan tahanannya diabaikan karena nilainya kecil. Untuk mencari nilai reaktansi trafo dalam Ohm dihitung dengan cara sebagai berikut. Langkah pertama yaitu mencari nilai impedansi pada 100% untuk trafo pada 20 kV, yaitu dengan menggunakan rumus sebagai berikut.

$$X_T (\text{pada } 100\%) = \frac{kV^2 (\text{sisi sekunder})}{MVA} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

X_T = Impedansi trafo tenaga (Ω)

kV = Tegangan sisi sekunder trafo tenaga (Volt)

MVA = Kapasitas daya trafo tenaga (MVA)

Lalu tahap selanjutnya yaitu mencari nilai reaktansi tenaganya :

1. Untuk menghitung reaktansi urutan positif dan negatif

Nilai dari ($X_{t1} = X_{t2}$) dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut.

$$X_{t1} = Z(\%) \text{ yang diketahui} \times X_t \text{ (pada 100\%)} \dots\dots\dots (2.5)$$

2. 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 :

- a. Untuk trafo tenaga dengan Indukan belitan DY dimana kapasitas belitan delta sama besar dengan kapasitas belitan Y, maka $X_{t0} = X_{t1}$

- b. Untuk trafo tenaga dengan Indukan 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 $X_{t0} = 3 \times X_{t1}$.

- c. Untuk trafo tenaga dengan Indukan belitan YY dan tidak mempunyai belitan delta di dalamnya, maka untuk menghitung besarnya X_{t0} berkisar antara 9 s/d 14 x X_{t1} .
(Sarimun, 2016)

c. Impedansi Penyulang

Perhitungan impedansi penyulang tergantung dari besarnya impedansi per jaraknya (dalam satuan 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 adalah $Z = (R + jX)$, sehingga untuk impedansi penyulang dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut.

1. Urutan positif dan urutan negatif ($Z_1 = Z_2$)

$$Z_1 = Z_2 = Z_{L1} \times (\% \text{ panjang saluran}) \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana:

Z_1 = Impedansi urutan positif (Ω)

Z_2 = Impedansi urutan negatif (Ω)

Z_{L1} = Impedansi Penghantar urutan negatif (Ω/km)

2. Urutan nol (Z_0)

$$Z_0 = Z_{L0} \times (\% \text{ panjang saluran}) \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana:

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

$$Z_{L0} = \text{Impedansi Penghantar urutan nol } (\Omega/\text{km})$$

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 sejak sumber ke titik gangguan impedansi yang terbentuk adalah tersambung seri maka perhitungan Z_{1eq} dan Z_{2eq} dapat langsung dengan cara menjumlahkan impedansi tersebut.

1. Urutan positif dan urutan negatif ($Z_{1eq} = Z_{2eq}$)

Dalam perhitungan impedansi jaringan urutan positif dan negatif dari penyulang pada Gardu Induk sampai ujung jaringan. Berikut cara menghitung impedansi ekivalen jaringan urutan positif dan negatif dari GI sampai ujung jaringan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$Z_{1eq} = Z_{2eq} = X_S (\text{sisi } 20 \text{ kV}) + X_{tl} + Z_1 \text{ penyulang} \dots\dots (2.8)$$

Dimana:

$$Z_1 \text{ penyulang} = \text{Impedansi urutan positif dan negatif dengan Penyulang}$$

X_s (sisi 20 kV) = Impendansi sumber sisi 20 kV (Ω)

X_{t1} = Impendansi trafo tenaga urutan positif dan negatif (Ω)

Sedangkan untuk perhitungan Z_{0eq} dimulai dari titik gangguan sampai ke trafo tenaga yang netralnya ditanahkan. Akan tetapi untuk menghitung impedansi Z_{0eq} ini, harus diketahui dulu hubungan belitan trafonya. Berikut adalah cara menghitung nilai dari impedansi urutan nol.

2. Urutan nol (Z_{0eq})

Untuk perhitungan impedansi jaringan urutan nol dari Gardu Induk sampai ujung jaringan, perlu menambahkan nilai impedansi urutan nol dengan panjang jaringan 100% dari penyulang pada GI tersebut. Berikut cara menghitung impedansi ekivalen jaringan urutan nol dari Gardu Induk sampai ujung jaringan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$Z_{0eq} = X_{t0} + 3.R_N + Z_0 \text{ penyulang} \dots \dots \dots (2.9)$$

Dimana:

Z_0 penyulang = Impedansi urutan nol penyulang (Ω)

R_N = Tahanan pentanahan trafo tenaga (Ω)

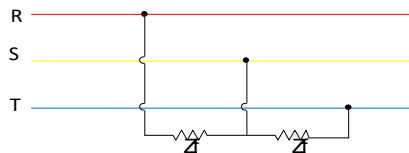
$$X_{t0} = \text{Impedansi trafo tenaga urutan nol } (\Omega)$$

2.11.2 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.

a. Gangguan hubung singkat tiga fasa.

Gangguan hubung singkat tiga fasa bisa saja terjadi akibat jatuhnya ketiga penghantar pada jaringan ke tanah. Kemungkinan terjadinya memang sangat kecil, tetapi hal ini tetap harus diperhitungkan. Kemungkinan lain adalah akibat pohon yang cukup tinggi berayun sewaktu angin bertiup kencang, kemudian menyentuh ketiga penghantar distribusi.



Gambar 2. 14 Gangguan hubung Singkat Tiga Fasa

(Sumber : www.eprints.polsri.ac.id)

Berdasarkan gambar di atas, gangguan hubung singkat tiga fasa adalah gangguan hubung singkat yang berupa hubungan pendek antara ketiga fasanya. Dengan persamaan sebagai berikut.

$$I_{f\ 3\text{fasa}} = \frac{V_{ph}}{Z_{1eq}} \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana:

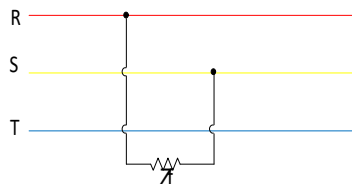
$I_{f\ 3\text{fasa}}$ = Arus gangguan hubung singkat 3 fasa (A)

V_{ph} = Tegangan fasa netral sistem ($\frac{20.000}{\sqrt{3}}$) (volt)

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

b. Gangguan hubung singkat dua fasa.

Kemungkinan terjadinya gangguan dua fasa, bisa disebabkan oleh putusnya salah satu fasa yang ada pada jaringan distribusi. Gangguan seperti ini biasanya mengakibatkan gangguan dua fasa ke tanah atau bisa juga diakibatkan *back flashover* antara tiang dan dua kawat fasa sekaligus.



Gambar 2. 15 Gangguan hubung Singkat Dua Fasa

(Sumber : www.eprints.polsri.ac.id)

Berdasarkan gambar di atas apabila hubung singkat terjadi antara fasa a dan b akan mendapat persamaan di bawah ini :

$$I_{f\ 2\ fasa} = \frac{V_{ph-ph}}{Z_{1eq}+Z_{2eq}} \text{ (Ampere) } \dots\dots\dots(2.11)$$

Oleh karena $Z_{1eq}=Z_{2eq}$, maka :

$$I_{f\ 2\ fasa} = \frac{V_{ph-ph}}{2 \times Z_{1eq}} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana :

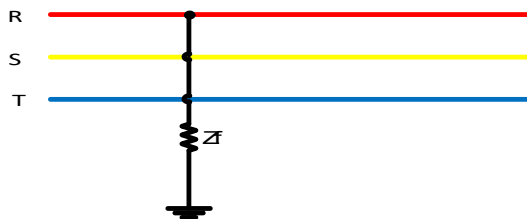
$I_{f\ 2\ fasa}$ = Arus gangguan hubung singkat 2 fasa (A)

V_{ph} = Tegangan fasa-fasa sistem (20.000) (V)

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

c. Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.

Terjadinya gangguan satu fasa ke tanah disebabkan oleh jatuhnya salah satu penghantar kabel udara ke tanah, ini biasanya disebabkan oleh rusaknya penyangga kabel pada tiang hingga kabel jatuh ke tanah.



Gambar 2. 16 Gangguan hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

(Sumber : www.eprints.polsri.ac.id)

Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah memiliki nilai gangguan arus yang kecil. Sistem pembumian melalui tahanan, tahanan pembumian netral sistem itu juga akan membatasi arus

gangguan satu fasa ke tanah (Sarimun, 2016). Apabila hubung singkat terjadi di fasa akan didapatkan persamaan seperti di bawah ini.

$$I_{f1 \text{ fasa}} = \frac{3 \times V_{ph}}{Z_{1eq} + Z_{2eq} + Z_0} \dots\dots\dots(2.13)$$

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

$$I_{f1 \text{ fasa}} = \frac{3 \times V_{ph}}{2 \times Z_{1eq} + Z_{0eq}} \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana :

$I_{f1 \text{ fasa}}$ = arus hubung singkat 1 fasa ke tanah (A)

V_{ph} = Tegangan fasa netral system $\frac{20.000}{\sqrt{3}}$ (Volt)

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

Z_{2eq} = Impedansi ekivalen urutan negatif (Ω)

Z_{0eq} = Impedansi ekivalen urutan nol (Ω)

2.12 Perhitungan Koordinasi *Relai*

Pada tahap selanjutnya, hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat, dipergunakan untuk nilai setelan arus lebih, terutama nilai setelan TMS (*Time Multiplier Setting*) dari *relai* arus lebih dengan karakteristik jenis *Standard Inverse*. Disamping itu setelah nilai setelan *relai* diperoleh, nilai arus gangguan hubung singkat pada setiap lokasi gangguan yang diasumsikan, dipakai untuk memeriksa *relai* arus lebih itu, apakah masih dapat dinilai selektif atau nilai setelan harus dirubah ke nilai lain yang memberikan kerja *relai* yang lebih selektif, atau didapatkan kerja selektifitas yang optimum (*relai* bekerja tidak bekerja terlalu lama tetapi menghasilkan

selektifitas yang baik). Sedangkan setelan arus dari *relai* arus lebih dihitung berdasarkan arus beban yang mengalir di penyulang atau tersebut, artinya:

- a) Untuk *relai* arus lebih yang terpasang di *Outgoing Feeder* dihitung berdasarkan arus beban maksimum (beban puncak) yang mengalir di penyulang tersebut.
- b) Untuk *relai* arus lebih yang terpasang dipenyulang masuk (*incoming feeder*) dihitung berdasarkan arus nominal transformator tenaga.

Sesuai british standard untuk :

- *Relai inverse* biasa diset sebesar 1,05 s/d 1,3 x I_{Beban} ,
- Sedangkan *relai definite* diset sebesar 1,2 s/d 1,3 x I_{Beban} .

Persyaratan lain yang harus dipenuhi adalah penyetelan waktu minimum dari *relai* arus lebih (terutama di penyulang) tidak lebih kecil dari 0,3 detik. Pertimbangan ini diambil agar *relai* tidak sampai *trip* lagi akibat arus *inrush* dari trafo distribusi yang memang sudah tersambung di jaringan distribusi, sewaktu PMT penyulang tersebut dioperasikan. (Sarimun, 2016)

2.13 Perhitungan Setelan *Relai* Arus Lebih (OCR)

- a. Arus setelan OCR pada penyulang

Untuk menghitung nilai setelan arus lebih dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut.

$$I_{set(primer)} = (1,05 \sim 1,3) \times I_{Beban} \dots\dots\dots(2.15)$$

Nilai setelan tersebut adalah nilai primer. Untuk mendapatkan nilai setelan pada arus sekunder yang dapat disetel pada *relai* arus

lebih (OCR), maka dihitung dengan menggunakan data ratio transformator arus yang terpasang di penyulang yaitu sebagai berikut. (Sarimun, 2016)

$$I_{set}(\text{sekunder}) = I_{set}(\text{primer}) \times \frac{1}{\text{Ratio CT}} \dots\dots\dots (2.16)$$

- b. Setelan waktu / *time multiplier setting* (TMS) pada penyulang

Setelan waktu *standard inverse* dihitung dengan menggunakan rumus kurva waktu terhadap arus. Rumus ini bermacam-macam sesuai desain pabrik pembuat *relai*, dalam hal ini diambil rumus kurva waktu terhadap arus dari *standard British*, sebagai berikut. (Sarimun, 2016)

$$t = \frac{\beta \times Tms}{\left(\frac{I_f \text{ fasa}}{I_{set}(\text{primer})} \right)^{\alpha} - 1} \dots\dots\dots (2.17)$$

Untuk menentukan nilai TMS yang akan disetkan pada *relai* OCR *sisi incoming* dan *sisi outgoing* Gardu Induk diambil arus hubung singkat 3 fasa terbesar. (Sarimun, 2016)

$$TMS = \frac{t \times \left[\left(\frac{I_{f3 \text{ fasa}}}{I_{set}(\text{primer})} \right)^{\alpha} - 1 \right]}{\beta} \dots\dots\dots (2.18)$$

Dimana :

t = waktu setting *Over Current Relai* (OCR) penyulang + waktu koordinasi

Nilai setting TMS yang di dapat masih harus diuji lagi dengan arus gangguan yang lain seperti arus gangguan hubung singkat untuk lokasi gangguan 3 fasa yang terjadi di lokasi lain misalnya pada 1%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% dan 100% panjang

penyulang. Demikian juga untuk jenis gangguan hubung singkat 2 fasa yang besar arus gangguannya juga sudah dihitung.

Tabel 2. 2 Faktor α dan β tergantung pada kurva arus dan waktu

Nama Kurva	A	B
<i>Standard Inverse</i>	0,02	0,14
<i>Very Inverse</i>	1	13,2
<i>Extremely Inverse</i>	2	80
<i>Long Inverse</i>	1	120

2.14 Perhitungan Setelan *Relai* Gangguan Tanah (GFR)

a. Arus setelan GFR pada penyulang

Arus setting untuk *relai* gangguan tanah baik pada sisi primer maupun pada sisi sekunder penyulang adalah sebagai berikut.

$$I_{set}(\text{primer}) = 6\% \text{ s/d } 12\% \times I_{f1} \text{ fasa (terkecil)} \dots\dots\dots (2.19)$$

Nilai tersebut adalah nilai sisi primer, untuk mendapatkan nilai sisi sekunder yang dapat disetkan pada *relai* GFR, maka harus dihitung dengan menggunakan rasio trafo CT yang terpasang pada sisi primer maupun sisi sekunder di kubikel penyulang. (Sarimun, 2016)

$$I_{set}(\text{sekunder}) = I_{set}(\text{primer}) \times \frac{1}{\text{Rasio CT}} \dots\dots\dots (2.20)$$

b. Setelan waktu / *time multiplier setting* (TMS) pada penyulang

Hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat, selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai setelan waktu kerja *relai* TMS. Sama halnya dengan *relai* OCR, *Relai* GFR menggunakan rumus penyetelan yang sama dengan *relai* OCR. Tetapi waktu kerja *relai* yang diinginkan berbeda. *Relai* GFR cenderung lebih sensitif dari pada *relai* OCR.

Untuk menentukan nilai TMS yang akan disetkan pada *relai* GFR *sisi incoming* dan *sisi outgoing* Gardu Induk diambil arus hubung singkat 1 phasa ke tanah. (Sarimun, 2016)

$$TMS = \frac{t \times \left[\left[\frac{I_{f1 \text{ fasa}}}{I_{set(\text{primer})}} \right]^\alpha - 1 \right]}{\beta} \dots\dots\dots (2.21)$$

Dimana :

t = waktu setting *Ground Fault Relai* (GFR) penyulang + waktu koordinasi.