

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. TINJAUAN PUSTAKA

Julda Faisal Baiq (2016) melakukan penelitian tentang analisis perencanaan koordinasi sistem proteksi *relay* arus lebih pada jaringan distribusi tenaga listrik di pusdiklat migas Cepu. Di dalam penelitiannya penulis melakukan perencanaan pemasangan *relay* proteksi dengan menyimulasikan diagram tunggal sistem kelistrikan di pusdiklat migas Cepu, kemudian membagi zona proteksi dari yang terjauh hingga terdekat dengan sumber listrik (dalam hal ini generator) sehingga dapat diperhitungkan setting *relay* proteksi agar antara *relay* utama dan *relay* cadangan dapat bekerja tanpa tumpang tindih sesuai pengaturan waktu berdasarkan IEEE 242-1986.

Yoyok Triyono (2013) melakukan penelitian tentang Analisis Studi Rele Pengaman (*Over Current Relay* Dan *Ground Fault Relay*) pada Pemakaian Distribusi Daya Sendiri dari PLTU Rembang. Dalam penelitiannya membahas studi terhadap koordinasi rele pengaman yang terpasang yang dimana pada hasil penelitian ditemukan kesalahan koordinasi yang terdapat pada nilai *pickup* dan *time delay*.

Rizky Cahya Anugrerah Haebibi (2012) melakukan penelitian tentang studi koordinasi rele pengaman pada sistem kelistrikan di PT. Energi Mega Persada Unit Bisnis EMP Malacca Straits SA. Di dalam penelitiannya membahas tentang koordnasi rele pengamannya khususnya

relay arus lebih dari beberapa tipikal proteksi (zona proteksi) dengan menggunakan software simulasi ETAP 7.0 dimana terdapat beberapa kesalahan koordinasi pengaturan nilai *pickup*, *time dial*, dan *time delay* sehingga dilakukan *resetting* pada *relay* proteksi.

Zulkarnaini, Eko Saputra H. (2012) melakukan penelitian tentang evaluasi koordinasi *relay* proteksi pada *feeder* distribusi tenaga listrik (GH Tanjung Ampalu Sijunjung). Pada penelitiannya penulis melakukan evaluasi koordinasi *relay* proteksi seperti *relay* arus lebih (*over current relay*) dan *relay* pentanahan (*ground fault relay*), dimana hasil penelitiannya ditemukan bahwa salah satu yang menyebabkan sisi *incoming trip* karena adanya arus kapasitif pada masing-masing penyulang (*feeder*) maka perlunya dilakukan *setting* arus dan waktu pada masing-masing *relay*.

2.2. LANDASAN TEORI

2.2.1. Proteksi Sistem Tenaga Listrik

2.2.1.1. Pengertian Proteksi Sistem Tenaga Listrik

Proteksi sistem tenaga listrik adalah sistem proteksi yang meliputi peralatan-peralatan listrik yang terpasang pada suatu sistem tenaga misalnya generator, transformator jaringan, motor-motor listrik dan lain sebagainya, terhadap kondisi abnormal/gangguan operasi sistem itu sendiri.

Kondisi abnormal itu dapat berupa antara lain: hubung singkat, tegangan lebih, beban lebih, frekuensi sistem rendah, asinkron dan lain sebagainya.

Kondisi abnormal ini dapat menyebabkan kerusakan peralatan ataupun sistem itu sendiri jika tidak dilakukan preventif dengan memasang sistem proteksi pada sistem tenaga listrik tersebut.

2.2.1.2. Tujuan Proteksi Sistem Tenaga Listrik

Tujuan adanya proteksi pada sistem tenaga listrik secara umum adalah untuk mengisolasi daerah/zona yang mengalami gangguan pada sistem tenaga listrik agar gangguan tersebut tidak menyebar ke daerah/zona lain yang dapat mengganggu kinerja sistem lainnya. Selain itu bertujuan untuk melindungi kerusakan pada peralatan sistem tenaga listrik. Sehingga proteksi ini harus sanggup menangani gangguan agar tujuan dari proteksi dapat terpenuhi.

2.2.1.3. Persyaratan Kualitas Proteksi Sistem Tenaga Listrik

Terdapat beberapa persyaratan yang sangat perlu diperhatikan dalam suatu perencanaan sistem proteksi yang efektif yaitu:

1. Selektivitas dan Diskriminasi

Efektivitas suatu sistem proteksi dapat dilihat dari kesanggupan mengisolir bagian yang terkena gangguan dan tidak. Sehingga daerah/zona yang diisolir sesuai keadaan yang

terdapat gangguan saja, agar pada daerah/zona lain tetap dapat beroperasi normal.

2. Stabilitas

Sifat ini menunjukkan bahwa daerah/zona yang tidak mengalami gangguan tetap dapat beroperasi dengan baik/stabil.

3. Kecepatan Operasi

Ketika terjadi gangguan, waktu lama gangguan dan besar arus gangguan dapat memengaruhi keadaan peralatan listrik, sehingga pentingnya kecepatan waktu operasi *relay* dalam mendeteksi dan memutuskan *circuit breaker* (CB) untuk bekerja dan yang paling penting adalah perlunya membuka bagian-bagian yang terganggu sebelum peralatan sistem tenaga listrik ikut terganggu ataupun rusak.

4. Sensitivitas (kepekaan)

Yaitu besarnya arus gangguan agar alat proteksi dapat bekerja. Nilai sensitivitas ini dapat dinyatakan dengan besarnya arus dalam jaringan aktual (arus primer) atau sebagai presentase dari arus sekunder (trafo arus).

5. Pertimbangan ekonomis

Hal ini juga perlu dipertimbangkan mengingat banyaknya jumlah peralatan yang akan diproteksi, harapannya dengan harga yang ekonomis dapat memberikan proteksi yang semaksimal mungkin agar keberlangsungan sistem tenaga listrik dapat terjaga.

6. Realiabilitas (keandalan)

Suatu peralatan proteksi harus dapat bekerja dengan baik ketika dibutuhkan. Walaupun tidak setiap saat terjadi gangguan yang menyebabkan peralatan proteksi bekerja tetapi saat dibutuhkan harus secara maksimal bekerja, sehingga perlu menggunakan peralatan berkualitas tinggi dan rutin dilakukan pengecekan terhadap peralatan proteksi.

7. Proteksi Cadangan

Proteksi cadangan (*back up*) merupakan proteksi yang terpisah dan bekerja untuk mengamankan bagian yang terganggu jika proteksi utama tidak bekerja. Sistem pendukung bekerja mandiri sama seperti proteksi utama, memiliki trafo dan *relay* tersendiri. Setiap sistem proteksi utama melindungi suatu daerah/zona sistem daya tertentu. Terdapat kemungkinan suatu daerah di antara zona-zona yang berdekatan misalnya antara trafo arus dan *circuit breaker* tidak terlindungi, sehingga perlu adanya proteksi cadangan.

2.2.2. Transformator Tenaga

2.2.2.1. Pengertian Transformator Tenaga

Transformator tenaga adalah suatu peralatan tenaga listrik yang digunakan untuk mengubah tegangan AC menjadi lebih tinggi atau lebih rendah tergantung kebutuhan dan digunakan untuk memindahkan energi listrik dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian lainnya tanpa mengubah frekuensi. Transformator merupakan peralatan tenaga listrik yang statis karena tidak ada bagian yang bergerak atau berputar seperti generator atau motor. Rangkaian transformator yang sederhana terdiri atas dua kumparan dan satu induktansi mutual. Dua kumparan transformator tersebut terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder. Kumparan primer adalah kumparan yang menerima daya listrik dengan kata lain dapat dikatakan sebagai terminal masukan dan kumparan sekunder adalah kumparan yang mengeluarkan daya listrik dan dengan kata lain disebut terminal keluaran. Kedua kumparan tersebut dililitkan pada suatu inti besi yang terdiri atas material magnetik yang terlapisi.



Gambar 2.1: Transformator Tenaga
(Sumber: Dokumen Pribadi)

2.2.2.2. Bagian Utama Transformator Tenaga

1. Inti Besi

Inti besi (*electromagnetic circuit*) merupakan media untuk fluks mengalir yang timbul akibat induksi arus AC pada kumparan yang mengelilingi inti besi sehingga fluks ini dapat menginduksi ke kumparan lainnya. Inti besi terbentuk dari lempengan besi tipis berisolasi yang disusun sedemikian rupa.

2. Kumparan Transformator

Kumparan transformator merupakan kumparan atau gulungan yang berasal dari lilitan kawat berisolasi yang mengelilingi inti besi. Kumparan tersebut terbagi dua yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder yang memiliki perbandingan jumlah lilitan tertentu. Dimana kumparan tersebut diisolasi baik terhadap inti besi maupun antar

kumparan dengan isolasi. Kumparan tersebut menjadi media transformasi tegangan dan arus pada transformator.

3. Minyak Transformator

Minyak transformator berfungsi sebagai pendingin dan isolasi komponen di dalam transformator. Komponen di dalam transformator ketika dalam keadaan bekerja tentu akan membangkitkan energi panas (termal) yang jika menimbulkan panas berlebihan tentu akan merusak komponen transformator tersebut. Oleh karena itu, minyak transformator diperlukan untuk pendingin pada kumparan dan inti transformator.

Minyak transformator memiliki fungsi ganda, yaitu sebagai pendingin dan isolasi. Perlu dikatakan bahwa minyak transformator harus memiliki mutu yang tinggi dan harus dalam keadaan bersih. Panas dari aktivitas transformator dapat menyebabkan bagian inti maupun kumparan, suhu minyak transformator akan naik. Hal ini dapat menyebabkan terjadi perubahan pada kondisi minyak transformator.

4. *Bushing*

Bushing merupakan komponen penting yang ada pada transformator dan terletak di bagian luar transformator. Fungsi *bushing* ialah sebagai penghubung antara kumparan transformator dengan jaringan yang ada di luar transformator. *Bushing* tersusun dari sebuah konduktor yang terhubung dengan kumparan yang ada di dalam transformator dan

konduktor diselubungi oleh isolator. Isolator tersebut berfungsi sebagai media isolasi antara konduktor *bushing* dan badan tangki utama transformator. Secara umum, *bushing* terdiri dari empat bagian utama, yakni isolator, klem koneksi, konduktor dan aksesoris.

5. Tangki Konservator

Ketika terjadi kenaikan suhu operasi pada transformator, minyak isolasi akan mengalami pemuaian sehingga volume minyak bertambah/naik dan ketika terjadi penurunan suhu operasi, maka minyak isolasi akan menyusut dan volume minyak akan berkurang/turun. Oleh karena itu, tangki konservator digunakan untuk menampung minyak berlebih pada saat transformator mengalami kenaikan suhu. Dengan naik-turunnya volume minyak pada konservator akibat pemuaian dan penyusutan minyak, volume udara di dalam konservator pun akan bertambah dan berkurang.

Ketika melakukan penambahan ataupun pembuangan udara yang terdapat pada konservator maka hal tersebut akan berhubungan dengan udara luar, agar minyak isolasi tidak terkontaminasi oleh kelembaban dan oksigen dari luar, maka udara yang akan masuk ke dalam konservator akan diberi filter menggunakan *silica gel*. Untuk menghindari minyak trafo berhubungan langsung dengan udara luar, maka konservator harus menggunakan lapisan berupa *rubber bag*, yakni, sejenis balon karet yang dipasang di dalam tangki konservator.

2.2.2.3. Gangguan pada Transformator Tenaga

1. Gangguan Internal

Gangguan internal (*internal faults*) merupakan gangguan yang terjadi di dalam bagian transformator tersebut, beberapa contoh gangguan tersebut antara lain:

- a. Terjadi gangguan pada sistem pendingin transformator, dimana umumnya transformator daya menggunakan minyak transformator sebagai isolasi serta sebagai bahan pendingin pada transformator. Jika terjadi suatu gangguan atau kerusakan di dalam transformator, maka dalam minyak isolasi tersebut akan terbentuk sejumlah gas.
- b. Terjadi busur api yang kecil dan pemanasan lokal yang bisa disebabkan oleh kerusakan isolasi antara inti baut, cara penyambungan konduktor yang tidak baik ataupun kontak-kontak listrik yang tidak terisolasi dengan baik
- c. Gangguan hubung singkat
- d. Arus sirkulasi yang ada pada transformator yang bekerja paralel

Pada gangguan hubung singkat ini akan terdeteksi arus maupun tegangan yang abnormal/tidak seimbang. Jenis gangguan tersebut antara lain:

-) Kerusakan pada isolator transformator
-) Hubung singkat antara kumparan dengan tanah
-) Hubung singkat dua fasa

2. Gangguan Eksternal

Gangguan eksternal adalah gangguan yang terjadi di luar bagian transformator, berikut terdapat dua jenis gangguan eksternal yaitu:

a. Hubung Singkat Luar

Hubung singkat luar terjadi di bagian luar transformator daya, seperti: terjadi hubung singkat di *feeder*, hubung singkat di *bus* maupun gangguan hubung singkat di sistem yang merupakan sumber bagi transformator tersebut. Gangguan ini dapat terdeteksi karena kemunculan nilai arus yang sangat besar, mencapai beberapa ratus kali dibanding arus nominalnya (FLA).

b. Beban luar (*Overload*)

Transformator dapat beroperasi secara kontinu pada arus beban nominalnya. Apabila beban yang dilayani melebihi batas maksimalnya (di atas 100%), maka transformator akan mengalami *overheat* (pemanasan berlebih). Kondisi ini memungkinkan tidak secara langsung mengakibatkan kerusakan pada transformator, tetapi apabila kondisi tersebut berlangsung secara terus-menerus maka akan mengakibatkan umur isolasi bertambah pendek atau bahkan kerusakan pada peralatan listrik.

Keadaan ketika beban lebih berbeda dengan keadaan arus berlebih. Pada beban lebih, besar arus yang mengalir kurang lebih hanya 10 % di atas arus nominal dan dapat diputuskan setelah berlangsung beberapa puluh menit. Sedangkan pada keadaan arus lebih, besar arus mencapai beberapa kali arus nominal dan harus secepat mungkin putus hubung daerah gangguan agar terisolir.

2.2.3. Macam-macam Gangguan pada Sistem Tenaga Listrik

2.2.3.1. Gangguan Beban Lebih (*Overload*)

Gangguan beban lebih ini tidak secara langsung akan mengakibatkan kerusakan pada peralatan sistem tenaga listrik, akan tetapi bila dibiarkan berlangsung secara berkelanjutan tentu dapat merusak peralatan sistem tenaga listrik yang dialiri arus tersebut. Pada saat gangguan beban lebih terjadi, arus yang mengalir melebihi dari kapasitas peralatan listrik.

2.2.3.2. Gangguan Hubung Singkat

Macam gangguan hubung singkat antara lain satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, dua fasa serta yang paling besar nilai arus gangguannya adalah gangguan tiga fasa atau tiga fasa ke tanah. Gangguan hubung singkat ini sendiri terbagi menjadi dua yakni gangguan hubung singkat simetris dan gangguan hubung singkat tak simetris (asimetris). Gangguan yang termasuk dalam hubung singkat simetris adalah gangguan hubung

singkat tiga fasa, selain gangguan hubung singkat tiga fasa merupakan gangguan hubung singkat tak simetris (asimetris). Gangguan dapat menyebabkan adanya arus lebih pada fasa yang terganggu dan juga dapat mengakibatkan kenaikan tegangan pada fasa yang tidak terganggu.

Umumnya gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik adalah gangguan tidak simetris. Gangguan-gangguan tidak simetris dapat menyebabkan mengalirnya arus tak seimbang dalam sistem sehingga untuk menganalisis gangguan digunakan metode komponen simetris untuk menentukan arus maupun tegangan di semua bagian sistem setelah terjadi gangguan.

Berikut akibat-akibat yang dapat oleh gangguan hubung singkat tersebut antara lain:

1. Daya stabilitas sistem berkurang.
2. Rusaknya peralatan listrik yang berada dekat dengan gangguan yang disebabkan arus tak seimbang, arus yang besar, dan tegangan rendah.
3. Kontinuitas pelayanan listrik terhenti kepada konsumen bila terjadi gangguan hubung singkat dan mengakibatkan *relay* memerintahkan *circuit breaker* untuk membuka sehingga terjadi pemadaman listrik.

2.2.3.3. Gangguan Tegangan Lebih

Gangguan tegangan lebih umumnya diakibatkan karena terdapat keadaan abnormal pada sistem. Contoh gangguannya antara lain:

1. Gangguan surja petir
2. Gangguan surja hubung, contohnya adalah penutupan kembali saluran dengan cepat, penutupan saluran tak serempak pada pemutus tiga fasa, penutupan saluran yang semula tidak masuk sistem menjadi masuk ke sistem, dilakukan pelepasan beban akibat gangguan, dan lain sebagainya.

2.2.4. Macam-macam Peralatan Proteksi

2.2.4.1. Trafo Instrumen

1. *Current Transformer* (CT)/ Trafo Arus

Current Transformer (CT) adalah suatu peralatan listrik yang berfungsi mengonversi dari arus yang bernilai besar menjadi arus dengan ukuran nilai yang lebih kecil sesuai pengaturan *relay*. Hal tersebut dilakukan karena peralatan pengaman listrik seperti *relay* dan *circuit breaker* memiliki kemampuan membaca arus yang kecil sehingga perlu dikonversi. CT digunakan karena dalam pengukuran arus tidak mungkin dilakukan langsung pada arus beban atau arus gangguan, karena arus tersebut sangat besar dan bertegangan sangat tinggi. CT memiliki karakteristik berupa nilai perbandingan yang ditandai oleh *Current Transformer Ratio* (CTR) dimana CTR merupakan perbandingan antara

arus yang dilewatkan pada sisi primer dengan arus yang dilewatkan pada sisi sekunder.

2. *Potential Transformer* (PT)/ Trafo Tegangan

Potential Transformer (PT) adalah suatu peralatan listrik yang berfungsi untuk menurunkan tegangan tinggi menjadi tegangan yang lebih rendah yang sesuai dengan pengaturan *relay*. Perlakuan tersebut sama halnya seperti yang dijelaskan pada bagian *current transformer*. Trafo ini juga memiliki angka perbandingan antara tegangan primer dan sekunder yang menunjukkan klasifikasi kelasnya.

2.2.4.2. *Relay*

Relay merupakan peralatan elektromagnetik yang berfungsi untuk menggerakkan kontaktor (saklar) dimana ketika sebuah koil dialiri oleh arus lemah, dan koil ini menarik *armature* untuk menutup kontak. *Relay* layaknya otak dari proteksi sistem tenaga listrik, sehingga saat ini *relay* menjadi peralatan yang kompleks. *Relay* terbagi menjadi dua kelompok yakni:

1. *Auxiliary relay*: *Relay* ini dirancang untuk digunakan di *auxiliary circuit* yang dikontrol oleh *relay* komparator, dan berfungsi untuk membuka atau menutup kontak-kontak lain (umumnya berarus kuat).
2. Komparator: Mendeteksi dan mengukur kondisi abnormal/gangguan, dan membuka atau menutup kontak.

2.2.4.3. *Circuit Breaker (CB)*

Circuit Breaker (CB) adalah salah satu peralatan eksekutor pemutus daya yang berfungsi untuk memutuskan dan menghubungkan rangkaian listrik dalam kondisi terhubung ke beban secara langsung dan aman, pada kondisi normal maupun pada saat terdapat gangguan. Berdasarkan media pemutus listrik, terdapat empat jenis CB yaitu:

1. *Oil Circuit Breaker (OCB)*, menggunakan media minyak.
2. *Gas Circuit Breaker (GCB)*, menggunakan media berupa gas SF₆.
3. *Air Circuit Breaker (ACB)*, menggunakan media berupa udara.
4. *Vaccum Circuit Breaker (VCB)*, menggunakan media berupa keadaan vakum.

2.2.4.4. *DC System Power Supply*

DC system power supply merupakan catu daya cadangan yang terdiri dari baterai, sebagai peralatan yang mengubah tegangan AC ke DC. Sebagai peralatan proteksi, *DC system power supply* menjadi peralatan yang sangat penting karena jika terjadi gangguan dan kontak telah terhubung, maka *DC system power supply* akan bekerja dan mengakibatkan CB membuka. *Charger* pada *DC system power supply* merupakan sumber utama dari *DC power supply*, dimana *charger* dapat merubah tegangan AC menjadi tegangan DC (*rectifier*).

2.2.5. Proteksi *Relay* Arus Lebih (*Over Current Relay*)

2.2.5.1. Pengertian *Relay* Arus Lebih (*Over Current Relay*)

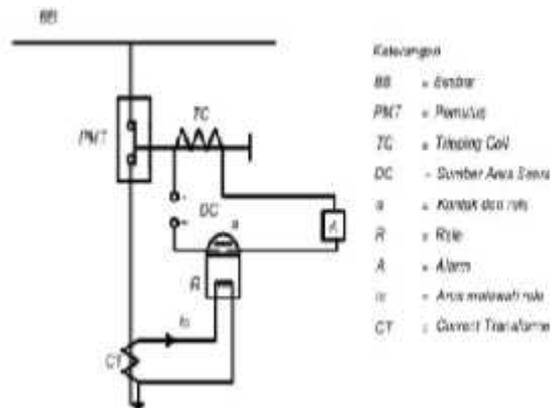
Relay arus lebih bekerja berdasarkan besar arus yang mengalir pada daerah pengamanan, jika nilai arus lebih besar daripada nilai *setting* (nilai arus *pickup*) maka akan dideteksi sebagai gangguan.

Relay arus lebih pada gangguan hubung singkat pada gangguan arus lebih, *relay* arus lebih menjadi pengaman cadangan pada transformator daya, generator, dan saluran transmisi sedangkan menjadi pengaman utama pada jaringan distribusi dan sub-transmisi pada sistem radial.

2.2.5.2. Prinsip Kerja dan Karakteristik *Relay* Arus Lebih (*Over Current Relay*)

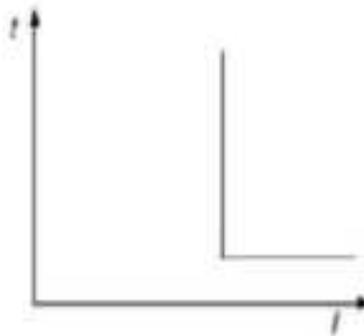
1. *Relay* Arus Lebih Seketika (*Instantaneous*)

Relay arus lebih seketika adalah jenis *relay* arus lebih dimana ketika *relay* mulai *pickup* hingga *circuit breaker* membuka terjadi tanpa penundaan waktu (*instantaneous*). *Relay* arus ini digunakan sebagai pengaman arus hubung singkat maksimum (*high set*) sehingga waktu trip pada arus gangguan yang besar *relay* akan bekerja seketika (tanpa waktu tunda).



Gambar 2.2: *Relay Arus Lebih Seketika*

(Sumber: <http://dunia-listrik.blogspot.co.id/2009/07/relay-arus-lebih.html>)



Gambar 2.3: Karakteristik *Relay Arus Lebih Seketika*

(Sumber: <http://dunia-listrik.blogspot.co.id/2009/07/relay-arus-lebih.html>)

Pada gambar 2.3. terlihat jika kenaikan arus melebihi harga operasi dari *relay* (nilai *pickup*) maka *relay* akan bekerja untuk memerintahkan *circuit breaker* atau *PMT* untuk membuka. Rentang waktu kerja *relay* sangat singkat yaitu sekitar 20 -100 mili detik.

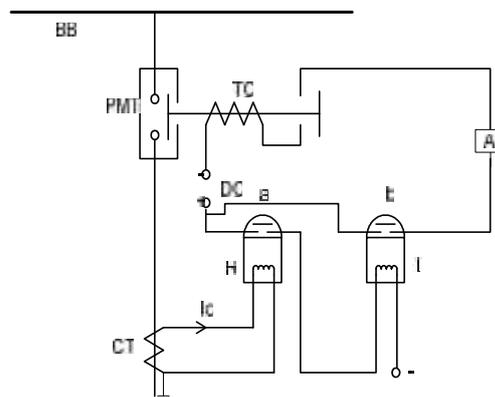
2. *Relay Arus Lebih Tertentu (Definite Time)*

Relay arus lebih tertentu adalah jenis *relay* arus lebih dimana ketika *relay* mulai bekerja dari *pickup* hingga memerintahkan *circuit breaker*

membuka dapat diperpanjang dengan nilai tertentu dan tidak tergantung dari besarnya arus gangguan tetapi bergantung dari besarnya arus *setting*, sehingga waktu kerja *relay* ditentukan oleh waktu *setting*. Umumnya rentang *setting* untuk *relay definite time* adalah 0,9 – 1,8 dari arus nominalnya sedangkan untuk waktu operasinya berkisar dari 0,1 detik sampai 4 detik.

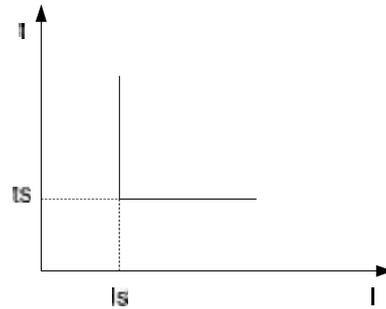
Setting tersebut sudah memenuhi beberapa pertimbangan seperti memberikan *back up protection* untuk *outgoing feeder*, tidak mendeteksi keadaan beban lebih (*overload*) serta nilai *drop off/ pickup ratio* dari *relay* tersebut.

Berikut gambar rangkaian *definite time relay* serta karakteristik dari *relay definite time* yang ditunjukkan pada gambar 2.4 dan 2.5



Gambar 2.4: *Relay* Arus Lebih Waktu Tertentu

(Sumber: <http://dunia-listrik.blogspot.co.id/2009/07/relay-arus-lebih.html>)



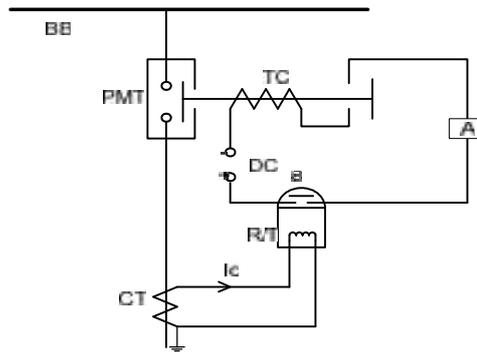
Gambar 2.5: Karakteristik *Relay* Arus Lebih Waktu Tertentu

(Sumber: <http://dunia-listrik.blogspot.co.id/2009/07/relay-arus-lebih.html>)

3. *Relay* Arus Lebih Berbanding Terbalik (*Inverse*)

Relay arus lebih yang memiliki karakteristik berbanding terbalik (*inverse*) adalah jenis *relay* arus lebih yang jangka waktu *relay* mulai dari *pickup* hingga memerintahkan *circuit breaker* membuka tergantung dari besarnya arus yang melewati kumparan *relay*. Dengan kata lain semakin besar arus yang melewati kumparan maka semakin singkat waktu operasi *relay* untuk pengamanan. Besar arus berbanding terbalik dengan waktu operasi *relay* (*inverse*).

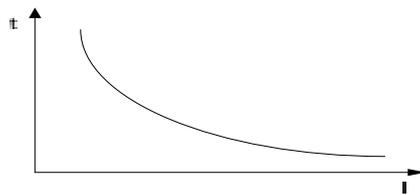
Berikut ditampilkan gambar rangkaian *relay* arus lebih dengan karakteristik berbanding terbalik (*inverse*) yang ditunjukkan pada gambar 2.6 seperti di bawah ini.



Gambar 2.6. *Relay Arus Lebih Berbanding Terbalik*

(Sumber: <http://dunia-listrik.blogspot.co.id/2009/07/relay-arus-lebih.html>)

Selanjutnya, ditampilkan karakteristik dari *relay* arus lebih berbanding terbalik seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7 di bawah ini.



Gambar 2.7. Karakteristik *Relay Arus Lebih Berbanding Terbalik*

(Sumber: <http://dunia-listrik.blogspot.co.id/2009/07/relay-arus-lebih.html>)

2.2.5.3. Jenis Kurva *Relay Arus Lebih (Over Current Relay)*

Terdapat banyak jenis kurva yang dapat digunakan pada *relay* arus lebih ini tergantung standar yang digunakan dan kebutuhan pengguna *relay* tersebut. Berikut ini ditampilkan beberapa jenis kurva sesuai tabel di bawah ini:

Tabel 2.1 Jenis Kurva *Relay Arus Lebih*

IEEE	IEC	GE TYPE IAC
IEEE <i>Extremely Inverse</i>	IEC <i>Curve A</i> (BS142)	IAC <i>Extremely Inverse</i>
IEEE <i>Very Inverse</i>	IEC <i>Curve B</i> (BS142)	IAC <i>Very Inverse</i>
IEEE <i>Moderately</i>	IEC <i>Curve C</i> (BS142)	IAC <i>Inverse</i>
	IEC <i>Short Inverse</i>	IAC <i>Short Inverse</i>

LAINNYA
I^2t
<i>FlexCurves</i> tm A, B, C, and D
<i>Recloser Curves</i>
<i>Definite Time</i>

(Sumber: *GE Digital Energy*, 2014)

1. Kurva IEEE

Bentuk kurva arus lebih waktu IEEE sesuai dengan standar industri dan klasifikasi kurva IEEE C37.112-1996 untuk pembalikan ekstrim, tinggi, dan sedang. Berikut persamaan untuk Kurva IEEE:

$$T = \text{TDM} \times \left[\frac{A}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^p - 1} + B \right] \quad (2.1)$$

$$T_{\text{reset}} = \text{TDM} \times \left[\frac{t_r}{1 - \left(\frac{I}{I_p}\right)^2} \right] \quad (2.2)$$

dengan:

T	= waktu operasi (dalam detik)
TDM	= pengaturan <i>Multiplier</i>
I	= arus input
I_{pickup}	= pengaturan <i>Pick-up Current</i>
A, B, p	= konstanta

T_{RESET} = waktu reset dalam detik (asumsi kapasitas energi 100% dan **RESET** adalah "Timed")
 T_r = konstanta karakteristik

Tabel 2.2. Konstanta Waktu Terbalik IEEE

IEEE Curve Shape	A	B	P	T_r
Extremely Inverse	28.2	0.1217	2	29.1
Very Inverse	19.61	0.491	2	21.6
Moderately Inverse	0.0515	0.1140	0.02	4.85

(Sumber: *GE Digital Energy*, 2014)

2. Kurva IEC

Untuk aplikasi di Eropa, *relay* menawarkan tiga kurva standar yang ditentukan dalam IEC 255-4 dan standar Inggris BS142. Kurva ini disebut sebagai kurva A IEC, kurva B IEC, kurva C IEC. Persamaan untuk kurva ini adalah:

$$T = \text{TDM} \times \left[\frac{K}{\left(\frac{I}{I_{\text{pick}}} \right)^E - 1} \right] \quad (2.3)$$

$$T_{\text{reset}} = \text{TDM} \times \left[\frac{t_r}{1 - \left(\frac{I}{I_{\text{pick}}} \right)^2} \right] \quad (2.4)$$

dengan:

T = waktu operasi (dalam detik)
 TDM = pengaturan *Multiplier*
 I = arus input
 I_{pick} = pengaturan *Pick-up Current*
 K, E = konstanta
 T_{RESET} = waktu reset dalam detik (asumsi kapasitas energi 100% dan **RESET** adalah "Timed")
 T_r = konstanta karakteristik

Tabel 2.3. Konstanta Kurva Waktu Terbalik IEC (BS)

Bentuk Kurva IEC (BS)	K	E	T _R
IEC Curve A	0.14	0.02	9.7
IEC Curve B	13.5	1	43.2
IEC Curve C	80	2	58.2
IEC Short Inverse	0.05	0.04	0.5

(Sumber: GE Digital Energy, 2014)

3. Kurva IAC

Kurva untuk rangkaian jenis *relay* IAC *General Electric* diambil dari rumus:

$$T = \text{TDM} \times \left(A + \frac{E}{\left(\frac{I}{I_{\text{pick}}}\right)^{-C}} + \frac{D}{\left(\left(\frac{I}{I_{\text{pick}}}\right)^{-C}\right)^2} + \frac{E}{\left(\left(\frac{I}{I_{\text{pick}}}\right)^{-C}\right)^3} \right) \quad (2.5)$$

$$T_{\text{reset}} = \text{TDM} \times \left[\frac{t_r}{1 - \left(\frac{I}{I_{\text{pick}}}\right)^{-C}} \right] \quad (2.6)$$

dengan:

T = waktu operasi (dalam detik)

TDM = pengaturan *Multiplier*

I = arus Input

I_{pickup} = pengaturan *Pickup Current*

A-E = konstanta

Tr = konstanta karakteristik

TRESET = waktu reset dalam detik (asumsi kapasitas energi 100% dan RESET adalah "*Timed*")

Tabel 2.4 Konstanta Kurva Waktu Terbalik IAC Jenis GE

Bentuk Kurva IAC	A	B	C	D	E	T _R
IAC Extreme Inverse	0.0040	0.6379	0.6200	1.7872	0.2461	6.008
IAC Very Inverse	0.0900	0.7955	0.1000	-1.2885	7.9586	4.678
IAC Inverse	0.2078	0.8630	0.8000	-0.4180	0.1947	0.990
IAC Short Inverse	0.0428	0.0609	0.6200	-0.0010	0.0221	0.222

(Sumber: GE Digital Energy, 2014)

2.2.5.4. Penghitungan Nilai *Pickup Low Set*

Nilai *pickup lowset* digunakan untuk menentukan nilai arus (I_{set}) yang dimana merupakan batas minimal (tepat akan bekerja) sebuah *circuit breaker* atau PMT akan bekerja. Sesuai standar British BS142-1983 untuk *setting* Iset adalah 1.05 - 1.03 kali dari arus nominal. Mengacu sesuai standar diatas maka penghitungannya dapat dilihat sebagai berikut:

$$I_{set} \text{ (primer)} = 1.05-1.3 \times I_{nominal} \quad (2.10)$$

$$I_{set} \text{ (sekunder)} = I_{set} \text{ (primer)} \times r_{CT} \quad (2.11)$$

dimana:

$$I_{set} \text{ (primer)} = \text{Arus } \textit{pick up low set} \text{ primer (A)}$$

$$I_{set} \text{ (sekunder)} = \text{Arus } \textit{pick up low set} \text{ primer (A)}$$

$$r_{CT} = \text{Ratio Current Transformer}$$

2.2.5.5. Penghitungan Nilai *Pick Up High Set Seketika (Instantaneous)*

Sebuah *relay* arus lebih juga dilengkapi dengan elemen setelan seketika. Penggunaan *relay* ini dapat menanggulangi gangguan yang cepat dan dapat membantu dalam mengurangi resiko kerusakan peralatan. Berikut ini adalah cara perhitungan untuk mendapatkan nilai arus pickup pada *relay* seketika:

) Pada pengaman utama (terdekat dengan beban)

$$I_{set} = 6 \times I_{nominal} \times r_{CT} \quad (2.12)$$

) Pada pengaman *backup*

$$I_{set} = 4 \times I_{nominal} \times r_{CT} \quad (2.13)$$

) Pada Sumber

$$I_{set} = 1.25 \times \frac{P}{\sqrt{3} \times V} \times \frac{V}{V} \times r_{CT} \quad (2.14)$$

dimana:

I_{set}	= Arus <i>pickup high set</i> (A)
$I_{nominal}$	= Arus beban penuh (A)
r_{CT}	= Ratio <i>Current Transformer</i>
P_{sc}	= <i>Daya Short Circuit</i> (MVA _{sc})
V_p	= Tegangan kerja sisi Primer Trafo (V)
V_s	= Tegangan kerja sisi sekunder Trafo (V)

2.2.6. Sekilas tentang *Relay Diferensial*

Relay diferensial adalah salah satu *relay* pengaman utama sistem tenaga listrik yang bekerja seketika tanpa koordinasi *relay* disekitarnya sehingga waktu kerja dapat dibuat secepat mungkin. Daerah pengamanannya dibatasi oleh pasangan trafo arus dimana *relay diferensial* dipasang, sehingga *relay diferensial* tidak dapat dijadikan sebagai pengaman cadangan untuk daerah berikutnya. Proteksi *relay diferensial* bekerja dengan prinsip keseimbangan arus (*current balance*).

Prinsip ini berdasarkan hukum *kirchhoff* yaitu membandingkan jumlah arus masuk ke primer (I_p) sama dengan jumlah arus yang keluar dari sekunder (I_s).

$$I_{diferensial} (I_d) = I_p + I_s$$

Dimana,

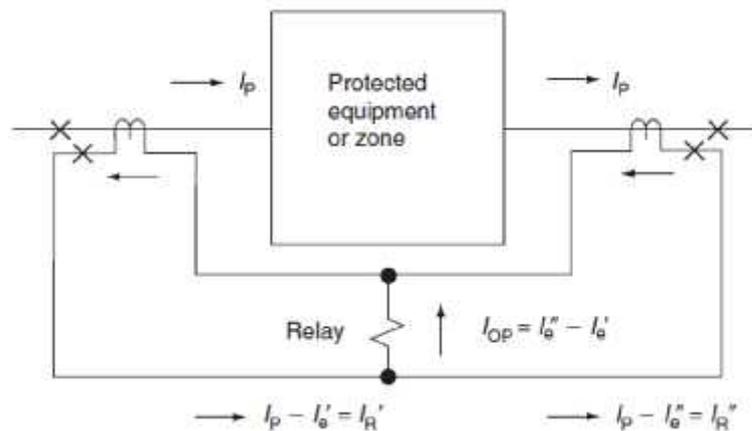
I_d = Arus Diferensial (A)

I_p = Arus Sisi Masuk (A)

I_s = Arus Sisi Keluar (A)

2.2.6.1. Prinsip Kerja Rele Diferensial

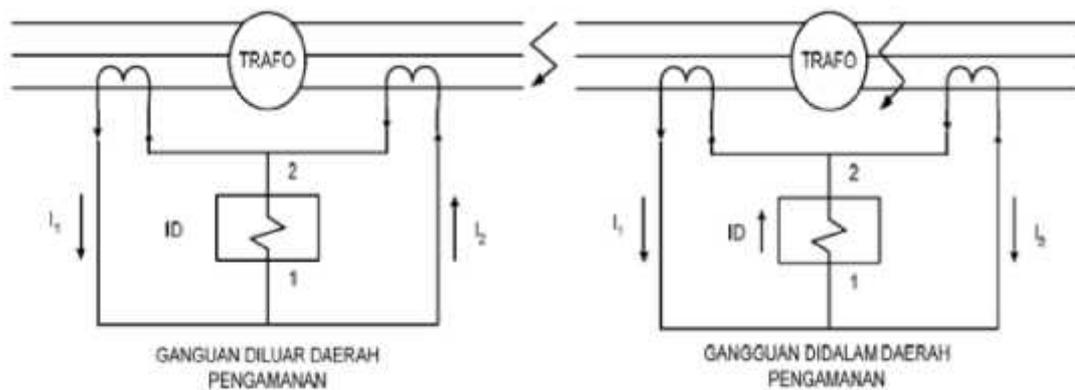
Dalam kondisi normal, arus mengalir melalui peralatan listrik yang diamankan (generator, transformator dan lain-lainnya). Arus-arus sekunder transformator arus, yaitu I1 dan I2 bersirkulasi melalui jalur IA. Jika *relay* pengaman dipasang antara terminal 1 dan 2, maka dalam kondisi normal tidak akan ada arus yang mengalir melaluinya. Dapat dilihat pada dibawah ini:



Gambar 2.8. Daerah Pengamanan *Relay* Diferensial

Jika terjadi gangguan di luar peralatan listrik peralatan listrik yang diamankan (*external fault*), maka arus yang mengalir akan bertambah besar, akan tetapi sirkulasinya akan tetap sama dengan pada kondisi normal, sehingga *relay* pengaman tidak akan bekerja untuk gangguan luar tersebut. Jika gangguan terjadi didalam (*internal fault*), maka arah sirkulasi arus disalah satu sisi akan terbalik, menyebabkan keseimbangan pada kondisi normal terganggu, akibatnya arus ID akan mengalir melalui *relay* pengaman

dari terminal 1 menuju ke terminal 2. Selama arus-arus sekunder transformator arus sama besar, maka tidak akan ada arus yang mengalir melalui kumparan kerja (*operating coil*) relay pengaman, tetapi setiap gangguan (antar fasa atau ke tanah) yang mengakibatkan sistem keseimbangan terganggu, akan menyebabkan arus mengalir melalui *operating coil relay* pengaman, maka *relay* pengaman akan bekerja dan memberikan perintah putus (*tripping*) kepada *circuit breaker* (CB). Dapat diilustrasikan seperti gambar di bawah ini.



Gambar 2.9. Kerja *Relay* Diferensial berdasarkan Daerah Gangguan