

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 State of The Art

State of the art diambil dari beberapa penelitian terdahulu sebagai referensi atau pendukung untuk analisis pembahasan yang akan dilakukan pada penelitian ini. Beberapa pembandingan yang diambil berupa jurnal mengenai koordinasi pada sistem proteksi terkhusus pada OCR (*Overcurrent Relay*) dengan menggunakan bantuan simulasi *softwarer* ETAP. Salah satu jurnal tersebut berjudul Evaluasi Koordinasi Setting Relay Proteksi OCR Pada Jaringan Tegangan Menengah 20 KV PT Apac Inti Corpora Semarang Dengan ETAP 12.6.0 karya Faisal Oktavian Suryaadmaja, Susatyo Handoko, Bambang Winardi dari Departemen Teknik Elektro Universitas Diponegoro Semarang pada tahun 2016 yang menjelaskan bahwa setelah melakukan analisis dengan bantuan ETAP sistem koordinasi pada objek penelitian PT Apac Inti Corpora tidak sesuai dengan IEEE Standart 242-1986, yaitu 0,2–0,4 detik. Dalam jurnal ini menyebutkan, pentingnya koordinasi antar relay untuk menentukan keandalan suatu sistem tenaga listrik sehingga diperlukan perbaikan terus menerus. Dalam hal ini evaluasi koordinasi dapat membantu sistem energi listrik untuk menyalurkan ke jaringan menuju konsumen selalu terpenuhi. Sehingga koordinasi dari hasil analisis ETAP yang belum sesuai dengan standar dapat dilakukan penyetelan ulang. Setelah dilakukan penyetelan ulang untuk koordinasi relay OCR dengan ETAP 12.6.0 di PT. AIC berjalan sesuai dengan peran masing-masing relay, di mana CB *trip* dimulai dari yang terdekat

dengan gangguan diikuti *CB back up* nya. Dengan mengacu pada standar IEEE Standar 242-1986 jeda waktu kerja antar relay sudah sesuai.

Jurnal Karya Ladislaus Risangpajar, Yuningtyastuti, dan Agung Nugroho dari Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro Jl. Prof. Sudharto, Tembalang, Semarang, Indonesia yang berjudul Evaluasi Koordinasi *Setting* Rele Proteksi OCR Pada Jaringan Distribusi Daya Pemakaian Sendiri Di PT. Indonesia Power Unit Pembangkitan Semarang Tambak Lorok Blok I membahas bahwa sistem proteksi juga hal terpenting dalam pembangkit untuk mendeteksi ketika adanya gangguan sehingga dapat mencegah dan meminimalisir kerusakan akibat gangguan. Koordinasi sistem proteksi yang baik akan mencegah pemadaman di daerah lain dan mengisolasi daerah gangguan. Studi terhadap koordinasi ini menghasilkan sebuah evaluasi koordinasi di mana hasil jeda waktu atau *grading time* setelah penyetelan ulang/ *resetting* sudah sesuai dengan standar IEEE 242-1986, yaitu 0,2 detik -0,4 detik dan urutan koordinasi kinerja relay sudah sesuai dengan peran relaynya masing-masing, yaitu mulai dari CB terdekat dengan gangguan dilanjutkan dengan *CB back up*. Sehingga pentingnya dalam meningkatkan kualitas proteksi terhadap koordinasi pengamanan yang terpasang.

Evaluasi koordinasi OCR juga dibahas pada jurnal Adhi Warsito, Mochammad Facta, and Karnoto yang berjudul Analisis Evaluasi *Setting* Relay OCR Sebagai Proteksi Pada Jaringan Distribusi Dengan Pembangkitan Terdistribusi, sebuah studi kasus yang menjelaskan tentang perubahan nilai arus gangguan yang mungkin terjadi akibat adanya pemasangan pembangkit terdistribusi dan dapat berpengaruh pada koordinasi *setting* proteksi dari relay arus lebih pada sebuah jaringan distribusi 20 kV. Dalam studi kasus, PT turut

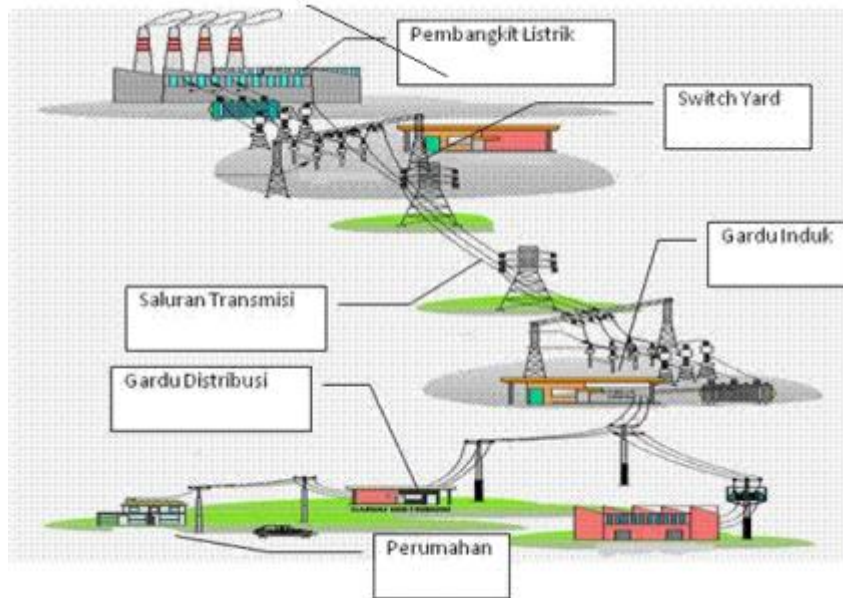
memberikan suplai arus gangguan ketika terjadi gangguan sehingga dilakukannya penyetelan ulang relay untuk menjaga kestabilan koordinasi sistem proteksi yang terpasang.

Jurnal-jurnal yang berkaitan dengan penelitian analisis koordinasi sistem prtoteksi OCR diatas memiliki kesamaan dalam mengevaluasi koordinasi dengan melakukan *resetting relay* menggunakan bantuan *software* ETAP. Kesimpulan lain yang didapat adalah evaluasi koordinasi sistem proteksi merupakan hal penting dalam meningkatkan keandalan sistem, dan *software* ETAP dapat digunakan dalam penelitian yang berkaitan dengan simulasi sistem tenaga listrik terkhusus simulasi sistem koordinasi OCR. Pada penelitian yang akan penulis lakukan memiliki perbedaan dengan jurnal-jurnal terkait yaitu pada objek penelitian dan kasus kegagalan koordinasinya. Yang dimaksud sebagai kasus kegagalan yaitu seperti salah satu contoh jurnal diatas yang disebabkan karena pengaruh penambahan Pembangkit Terdistribusi (PT) dan pengaruh letak PT terhadap jaringan, dan jurnal lainnya terdapat kasus tidak standarnya waktu jeda yang dimiliki sebuah relay sehingga dibutuhkan penyetelan ulang untuk waktu jeda (*grading time*) tersebut. Dan jenis gangguan yang berbeda sehingga perhitungan untuk *resetting relay* berbeda. Dalam penelitian ini sesuai dengan riwayat padam listrik akibat sambaran petir yang menyebabkan kabel SUTM putus, dan mendeteksi bahwa adanya kasus kegagalan koordinasi dilapangan pada Penyulang Tamansari maka penulis mensimulasikan sistem dengan gangguan maksimal.

2.2 Sistem Tenaga Listrik

Suatu sistem tenaga listrik pada dasarnya memiliki proses penyaluran yang terdiri dari pembangkit, transmisi, dan jaringan distribusi yang saling terhubung

satu sama lain untuk membangkitkan, mentransmisikan, dan mendistribusikan tenaga listrik tersebut sehingga dapat dimanfaatkan oleh para pelanggan (Pandjaitan, 2012).



Gambar II. 1 Skema Sistem Tenaga Listrik

(Suripto, 2016)

Fungsi komponen sistem tenaga listrik sebagai berikut (Suripto, 2016):

1. Pembangkitan merupakan komponen untuk mengubah energi yang digunakan sebagai sumber energi dapat berasal dari sumber energi lain misalnya: minyak bum, panas bumi, air, batu bara dan sumber lainya yang dapat diubah menjadi energi listrik.
2. Transmisi merupakan sistem yang dilengkapi dengan komponen untuk menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkitan menuju distribusi ke beban.
3. Distribusi merupakan komponen untuk mendistribusikan energi atau daya ke lokasi konsumen energi listrik.

4. Beban adalah peralatan listrik pada lokasi konsumen yang memanfaatkan energi listrik.

Adapun ketentuan dasar sistem tenaga listrik sebagai berikut (Drs. F.J. Tasiam, 2017) :

1. Menyediakan energi listrik setiap waktu untuk keperluan konsumen
2. Menjaga kestabilan nilai tegangan untuk mendukung penyediaan energi yang kontinyu, di mana tidak lebih toleransi $\pm 10\%$
3. Menjaga kestabilan frekuensi, di mana tidak lebih toleransi $\pm 0,1$ Hz
4. Harga yang tidak mahal (efisien).
5. Standar keamanan (*safety*).
6. Respek terhadap lingkungan.

2.3 Pengertian Gangguan dan Klasifikasi Gangguan

Gangguan adalah suatu hal yang menyebabkan ketidaknormalan dan ketidaklancaran. Dalam ketenagalistikan gangguan pada sistem tenaga listrik merupakan suatu keadaan jaringan listrik tidak normal dan dapat mengakibatkan mengalirnya arus yang tidak seimbang dalam suatu sistem serta dapat mengganggu kontinuitas dari pelayanan tenaga listrik. Disaat sistem sedang beroperasi dan adanya gangguan, maka gangguan ini berperan menjadi penghalang sehingga menyebabkan aliran arus listrik dapat keluar dari saluran seharusnya (menyimpang dari keadaan normal).

Berdasarkan SPLN 52-3: 1983 pasal empat tentang empat pola pengamanan sistem distribusi menjelaskan bahwa macam gangguan (*fault*) pada sistem distribusi

di atas tanah (saluran udara) dapat dibagi atas dua kelompok diantaranya gangguan yang bersifat temporer dan gangguan yang bersifat permanen (SPLN No.52-3, 1983).

Berikut ini adalah klasifikasi gangguan:

a. Berdasarkan lama terjadinya gangguan

- 1) Gangguan transient (*temporer*), gangguan ini dapat hilang namun jika tidak segera diperbaiki, maka gangguan ini dapat berubah menjadi gangguan permanen, dan gangguan ini dapat membaik dengan sendirinya jika pemutus tenaga terbuka dari saluran untuk sementara dan setelah itu dihubungkan kembali, atau bisa diperbaiki dengan hanya memutuskan beberapa bagian yang terganggu saja.
- 2) Gangguan permanen, gangguan yang membutuhkan beberapa tindakan perbaikan lebih lanjut, gangguan ini tetap ada apabila pemutus tenaga terbuka untuk waktu yang singkat dan setelah itu dihubungkan kembali.

b. Berdasarkan kesimetrisannya

- 1) Gangguan asimetris, merupakan gangguan yang menyebabkan besar magnitude dari arus gangguan yang mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang (berbeda). Gangguan ini terdiri dari:
 - Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah, yakni gangguan yang disebabkan karena salah satu fasa terhubung singkat ke tanah atau *ground*.
 - Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa, yakni gangguan yang disebabkan karena antar kedua fasa (fasa-fasa) terhubung singkat dan tidak terhubung ke tanah.

- Gangguan Hubung Singkat Dua fasa ke Tanah, yakni gangguan yang terjadi ketika kedua fasa terhubung singkat ke tanah.
- 2) Gangguan simetris, merupakan gangguan yang terjadi pada semua fasanya di mana magnitudo dari arus gangguan setiap fasanya sama.

Gangguan ini terjadi dari:

- Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa, yakni gangguan yang terjadi ketika tiga fasa saling terhubung singkat.
- Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah, yakni gangguan yang terjadi ketika ketiga fasa terhubung singkat ke tanah.

Pentingnya melakukan analisis gangguan adalah untuk penyelidikan proteksi dalam menentukan kapasitas rating maksimum yang juga memerlukan nilai distribusi arus gangguan dan tingkat tegangan sistem saat adanya gangguan. (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017).

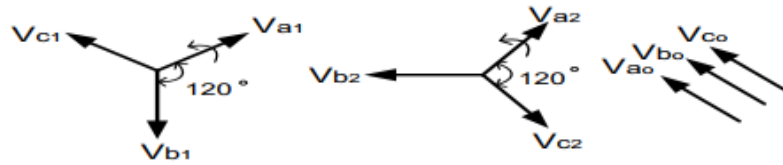
2.4 Metode Komponen Simetris Untuk Gangguan Hubung Singkat

Metode komponen simetris untuk gangguan hubung singkat digunakan untuk memahami dan menganalisis operasi sistem tenaga listrik pada keadaan tidak seimbang, seperti misalnya pada waktu gangguan beban tidak seimbang, kawat fasa dalam keadaan putus, dan lain sebagainya.

Pada tahun 1918, C.L Fortesque menemukan suatu metode yang dapat digunakan untuk menganalisa sistem tiga fasa yang tidak seimbang. Fortesque membuktikan bahwa suatu sistem yang tidak seimbang memiliki tegangan atau arus yang tidak seimbang antar fasanya sehingga dapat dipecah menjadi tiga komponen simetris dari sistem tiga fasa yang seimbang. Tiga komponen simetris tersebut

adalah komponen urutan positif, komponen urutan negatif, dan komponen urutan nol (Tenaga et al., 2012).

Gambar ketiga himpunan komponen simetris adalah sebagai berikut:



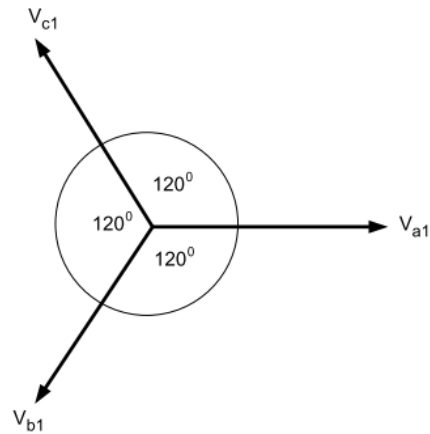
Gambar II. 2 Komponen - Komponen Simetris

Sumber : (Seminar et al., 2019)

Beban tak seimbang mengakibatkan dalam munculnya komponen urutan negatif dan nol. Komponen negatif akan mengakibatkan panas yang berlebihan, sedangkan komponen urutan nol dapat menyebabkan meningkatnya rugi – rugi pada saluran, dan berpengaruh pada kinerja sistem proteksi.

2.4.1 Komponen Urutan Positif (Positive Sequence Components)

Merupakan komponen yang terdiri dari tiga fasor yang besarnya sama, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar 120° , dan memiliki urutan fasa yang sama seperti fasor aslinya. Komponen urutan positif terdiri dari tiga arus dan tegangan fasa ke netral yang seimbang yang dibangkitkan oleh sistem pembangkit tenaga listrik. Saat sistem berada dalam kondisi normal, hanya terdapat tegangan dan arus urutan positif saja, sehingga impedansi sistem pada kondisi normal adalah impedansi urutan positif (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017) .

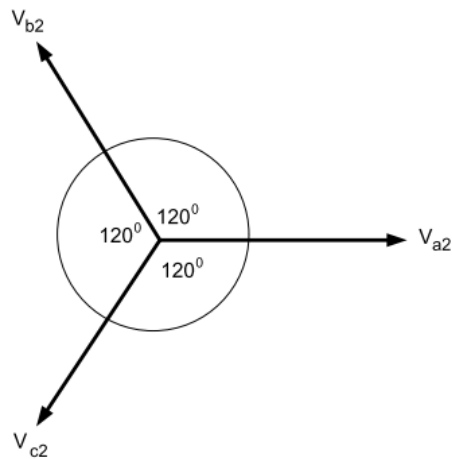


Gambar II. 3 Komponen Urutan Positif

(Step-up & Step-down, n.d.)

2.4.2 Komponen Urutan Negatif (Negative Sequence Components)

Merupakan komponen yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan fasor aslinya, jika pada kondisi normal hanya terdapat komponen urutan positif, maka komponen urutan negatif hanya ada pada saat terjadinya gangguan. Komponen urutan negatif ini hanya berbeda arah putaran dengan komponen urutan positif. Jadi misal urutan positif berputar dengan urutan a, b, c maka urutan negatif menjadi a, c, b. Z_2 merupakan impedansi urutan negatif dan pada umumnya sama dengan impedansi urutan positif (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017).

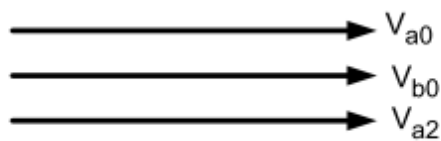


Gambar II. 4 Komponen Urutan Negatif

(Step-up & Step-down, n.d.)

2.4.3 Komponen Urutan Nol (Nol Sequence Components)

Merupakan komponen yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan tidak ada pergeseran fasa antara fasor yang satu dengan yang lain (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017). Arus dan tegangan pada komponen urutan nol adalah sefasa, oleh karena itu arus urutan nol untuk dapat mengalir di sistem memerlukan jalan balik melalui pentanahan netral sistem.



Gambar II. 5 Komponen Urutan Nol

(Step-up & Step-down, n.d.)

2.5 Gangguan Hubung Singkat (Saadat, n.d.)

Gangguan hubung singkat akan mengakibatkan arus hubung singkat yang cukup besar, yang akan mempengaruhi kestabilan dari keseluruhan sistem, oleh

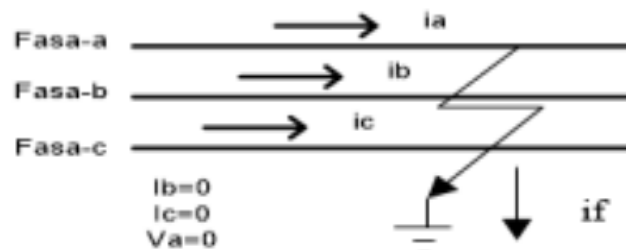
sebab itu sangat penting mengetahui karakteristik kerja rele proteksi yang dimonitor oleh rele seperti arus atau tegangan, kerja dari rele ini dipengaruhi oleh setelan (*setting*) untuk rating dari pemutus tenaga atau *circuit breaker* yang akan digunakan. Ketika arus gangguan hubung singkat dibiarkan akan menyebabkan kerusakan sistem tenaga listrik secara keseluruhan (Amira & Effendi, 2014).

Gangguan hubung singkat dapat diklasifikasi menjadi empat jenis, yaitu (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017):

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

2.5.1 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah (M. Anderson, n.d.)

Gangguan hubung singkat satu fasa ketanah adalah gangguan yang disebabkan karena salah satu fasa terhubung singkat ke tanah atau *ground*. Gangguan hubung singkat satu fasa ketanah kemungkinan terjadinya disebabkan karena terjadinya hubung singkat antar tiang kesalah satu kawat transmisi atau distribusi.



Gambar II. 6 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Sumber : (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017)

$$I_{a1} = \frac{3 \times V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad (2.1)$$

Keterangan:

V_f = Tegangan di titik gangguan sesaat sebelum terjadinya gangguan.

Z_0 = Impedansi urutan nol dilihat dari titik gangguan.

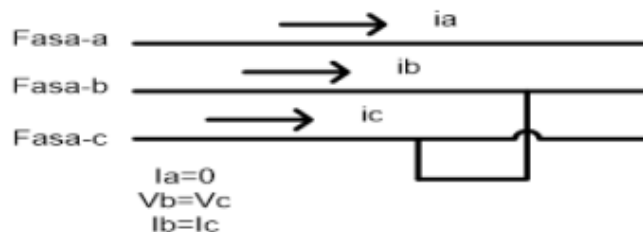
Z_1 = Impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan.

Z_2 = Impedansi urutan negatif dilihat dari titik gangguan

2.5.2 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa (M. Anderson, n.d.)

Pada gangguan hubung singkat dua fasa atau fasa ke fasa, arus saluran tidak mengandung komponen urutan nol dikarenakan tidak ada gangguan yang terhubung ke tanah.

Dalam gangguan hubung singkat dua fasa terdapat dua impedansi urutan (urutan positif, urutan negatif) yang terhubung seri.



Gambar II. 7 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa

Sumber : (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017)

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2} \quad (2.2)$$

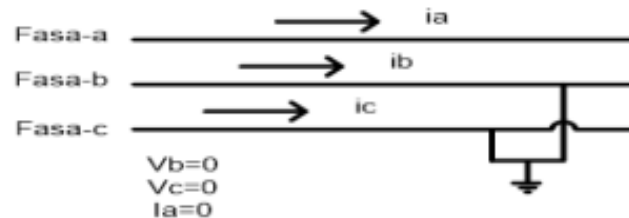
Keterangan:

V_f = Tegangan di titik gangguan sesaat sebelum terjadinya gangguan.

Z_1 = Impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan.

Z_2 = Impedansi urutan negatif dilihat dari titik gangguan.

2.5.3 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah (M. Anderson, n.d.)



Gambar II. 8 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah

Sumber : (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017)

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + \frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0}} \quad (2.3)$$

Keterangan:

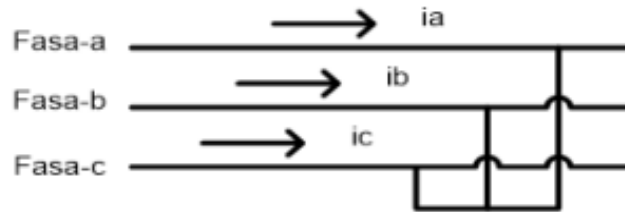
V_f = Tegangan di titik gangguan sesaat sebelum terjadinya gangguan.

Z_0 = Impedansi urutan nol dilihat dari titik gangguan.

Z_1 = Impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan.

Z_2 = Impedansi urutan negatif dilihat dari titik gangguan.

2.5.4 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa



Gambar II. 9 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Sumber : (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017)

Gangguan hubung singkat tiga fasa termasuk dalam klasifikasi gangguan simetris, di mana arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Sehingga pada sistem seperti ini dapat dianalisa hanya dengan menggunakan komponen urutan positif saja (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017).

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1} \quad (2.4)$$

Keterangan:

V_f = Tegangan di titik gangguan sesaat sebelum terjadinya gangguan.

Z_1 = Impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan.

2.6 Dasar Proteksi Sistem Tenaga Listrik (Aplikasi, n.d.)

Proteksi sistem tenaga listrik adalah proteksi yang dipasang pada peralatan-peralatan listrik pada suatu penyaluran tenaga listrik, sehingga saluran distribusi listrik diproses dengan aman. Pada proteksi sistem tenaga listrik ini, sistem merasakan gangguan tersebut namun dalam waktu yang sangat singkat dapat diatasi oleh proteksi yang dipasang dan ditentukan pada suatu sistem.

Dalam penyediaan dan pemberian pelayanan listrik kepada konsumsen membutuhkan tingkat keandalan yang tinggi untuk dapat meminimalisir timbulnya bahaya yang ditimbulkan oleh listrik itu sendiri. Oleh sebab itu pentingnya fungsi dari sistem proteksi untuk mencegah bahkan menghindari ataupun meminimalisir kerusakan peralatan-peralatan akibat gangguan, dan dibutuhkannya reaksi kerja perangkat proteksi yang cepat dan tepat, untuk dapat melokalisir luas daerah terganggu menjadi sekecil mungkin. (Drs. F.J. Tasiyam, 2017).

Beberapa persyaratan keandalan (*reliability*) rele proteksi sebagai komponen yang penting sistem proteksi tenaga listrik untuk mengidentifikasi arus hubung singkat yaitu:

1. Sensitivitas

Merupakan kemampuan pada sistem proteksi untuk mengidentifikasi terjadinya ketidaknormalan atau gangguan yang terjadi pada daerah yang diproteksinya. Suatu rele dikatakan sensitif ketika parameter operasi utamanya rendah. Artinya semakin rendah besaran parameter maka perangkat tersebut dikatakan semakin sensitif.

2. Selektivitas

Koordinasi pada sistem proteksi, ketika terjadi hubung singkat rele hanya membuka pemutus tenaga yang diperlukan saja (tidak menyebabkan pemutus / pemadaman jaringan yang lebih luas). Proteksi disusun mencakup keseluruhan sistem tenaga elektrik tanpa terkecuali dalam zona operasi tertentu, sehingga tidak ada daerah yang tidak terlindungi. Bila terjadi gangguan, sistem proteksi dibutuhkan untuk memilih dan memutuskan

Pemutus Tenaga yang terdekat dengan titik gangguan (Hendra Marta Yudha, 2008).

Selektivitas suatu sistem proteksi jaringan tenaga adalah kemampuan rele proteksi untuk melakukan tripping secara tepat sesuai rencana yang telah ditentukan pada waktu mendesain sistem proteksi tersebut.

3. Keamanan

Kemampuan sistem proteksi untuk menjamin peralatan proteksi akan beroperasi jika terjadi suatu gangguan dan tidak beroperasi jika tidak terjadi gangguan.

4. Kecepatan

Ketika terjadi gangguan, komponen pada proteksi haruslah dapat mengirimkan respon serta reaksi waktu yang cukup tepat, sesuai dengan setting koordinasi yang telah diinginkan.

5. Stabilitas

Stabilitas sistem proteksi dapat didefinisikan sebagai kemampuan untuk tetap konsisten bekerja pada daerah proteksi yang dirancang tanpa terpengaruh oleh parameter luar yang tidak perlu diperhitungkan.

Pentingnya koordinasi pada setiap proteksi yang terpasang sebagai wujud untuk memenuhi standar keandalan yaitu menerapkan prinsip *selectivity*, dengan adanya koordinasi yang baik dan sesuai standar relay yang berkerja adalah relay yang hanya terdeteksi gangguan saja. Sehingga pemutus yang berapa pada sistem tenaga listrik membuka saat diperlukan. (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017).

Untuk memastikan zona backup bekerja ketika zona primer tidak bekerja dan untuk menghindari terjadinya trip secara serentak maka berdasarkan standar

IEEE 242 1986 mengenai koordinasi proteksi *overcurrent relay*, *relay* analog pada umumnya akan bekerja dengan waktu 0,3-0,4 detik, sedangkan untuk relay digital berbasis mikroprosesor bekerja dengan waktu 0,2-0,3 detik. Penentuan *setting* waktu kerja berdasarkan *grading time* antar peralatan proteksi sesuai dengan IEC 60255 sebesar 0,2-0,5 detik.

2.7 Komponen Proteksi Sistem Tenaga Listrik

Komponen proteksi sistem tenaga listrik adalah komponen yang dirancang menjadi sebuah sistem untuk mengidentifikasi kondisi sistem tenaga listrik dan bekerja berdasarkan informasi seperti arus, tegangan atau sudut fasa. Informasi yang diperoleh dari sistem akan digunakan untuk membandingkan besarnya dengan besar ambang batas pada peralatan proteksi. Besar ambang batas ini menjadi tolak ukur aksi pada setiap komponen yang digunakan. Peralatan proteksi pada umumnya terdiri dari beberapa elemen yang dirancang untuk mengamati kondisi sistem dan melakukan suatu tindakan berdasarkan sistem yang diamatinya (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017).

2.7.1 Transformator

Transformator merupakan suatu peralatan yang digunakan untuk memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lainnya. Prinsip kerja transformator dilihat dari kumparan yang ada yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder yang bersifat induktif. Secara elektrik kedua kumparan ini terpisah, namun secara magnetis saling berhubungan. Apabila kumparan primer dialiri arus listrik atau dihubungkan dengan sumber tegangan bolak balik maka fluks bolak balik akan muncul di dalam inti, dan kumparan tersebut membentuk sebuah loop tertutup maka mengalirlah aliran arus

primer, akibatnya dalam kumparan primer terjadi induksi (*self induction*) dan mengakibatkan pula kumparan sekunder mengalami induksi (*mutual induction*) yang menyebabkan adanya fluks magnet di kumparan sekunder, jika rangkaian sekunder diberikan sebuah beban maka mengalirlah arus sekunder sehingga energi listrik dapat tersalurkan secara keseluruhan (No et al., 2019).

2.7.1.1 Impedansi Transformator

Dalam menghitung arus gangguan hubung singkat dibutuhkan perhitungan impedansi transformator. Dalam perhitungan impedansi transformator yang dibutuhkan adalah nilai reaktansinya, sedangkan nilai tahanannya diabaikan karena harganya kecil

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

Keterangan

X_t = Impedansi transformator (ohm)

kV = Tegangan sisi sekunder trafo tenaga (kV)

MVA = Kapasitas daya transformator (MVA)

2.7.1.2 Reaktansi Transformator

Untuk menghitung reaktansi transformator dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$X_{t1} = X_t \times \frac{MVA_2}{MVA_1} \quad (2.6)$$

2.7.2 Current Transformer

Current Transformer merupakan suatu peralatan yang digunakan untuk mentransformasikan suatu bentuk nilai ke level lebih rendah dalam mengambil *sample* atau masukan arus sistem untuk peralatan-peralatan proteksi. Trafo arus mempunyai beberapa fungsi yaitu:

1. Memperkecil besaran arus listrik (ampere) pada sistem tenaga listrik menjadi besaran arus untuk sistem pengukuran dan proteksi.
2. Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer, yaitu memisahkan instalasi pengukuran dan proteksi rasio primer tegangan tinggi (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017).

2.7.3 Rele Proteksi

Rele proteksi adalah alat yang dapat bekerja secara otomatis untuk mengatur masukan berupa indikasi suatu keadaan abnormal suatu rangkaian listrik akibat adanya perubahan lain. Perubahan ini berupa perbedaan besaran – besaran yang terdeteksi pada saat keadaan tidak normal. Ketika kontak rele tertutup maka pemutus yang terkait pada kontak segera trip, dan kontak *breaker* membuka untuk mengisolasi daerah yang terkena gangguan.

Rele proteksi dapat diklasifikasi berdasarkan fungsi atau kegunaannya. Berikut ini adalah klasifikasi rele berdasarkan fungsi atau kegunaannya (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017):

1. *Overcurrent Relay*.

Rele ini bekerja apabila arus yang dirasakan oleh rele lebih besar dari setelan nilai ambang batas arusnya. Prinsipnya mendeteksi arus lebih pada sebuah sistem atau komponen yang sudah memiliki ambang batas.

2. *Differential Relay.*

Rele ini di khususkan untuk mendeteksi perbedaan antara arus yang masuk dalam daerah atau zona yang diberi proteksinya dengan arus yang keluar. Pada rele ini berlaku arus masuk sama dengan arus keluar. Sehingga rele ini akan bekerja apabila arus yang masuk tidak *sinkron* dengan arus yang keluar

3. *Directional Relay.*

Rele yang di rancang untuk mengidentifikasi perbedaan fasa antara arus dan tegangan yang satu dengan yang lain. Rele ini dapat membedakan apakah gangguan yang terjadi berada di belakang (*reverse fault*) atau di depan (*forward fault*)

4. *Distance Relay.*

Rele ini biasa digunakan untuk proteksi pada saluran transmisi kerana rele jarak dapat mengukur impedansi untuk mencapai titik tertentu. *Distance Relay* dapat bekerja untuk mendeteksi gangguan hubung singkat yang terjadi antara lokasi rele dan batas jangkauan yang telah ditentukan.

5. *Ground Fault Relay.*

Rele ini bekerja untuk mendeteksi gangguan ke tanah, dengan mengukur besarnya arus residu yang mengalir ke tanah sehingga ketika arus lebih besar dari ambang batas yang sudah ditentukan, rele ini langsung bekerja.

2.7.4 Pemutus Tenaga

Pemutus tenaga atau sering disebut dengan PMT adalah suatu alat yang dipasang untuk memutus dan menghubungkan suatu arus ketika terdeteksinya suatu gangguan atau keadaan tidak normal.

PMT dengan *relay* OCR harus memiliki sinkronisasi dengan menyediakan jumlah dan waktu yang tepat, dan OCR mengarahkan pelaksanaan PMT untuk menghasilkan suatu tindakan dengan mengimbangi dan menjaga koordinasi antar komponen dengan keselarasan yang semestinya pada sistem.

Pada semua kondisi, yaitu pada kondisi normal ataupun gangguan dibutuhkannya tugas pokok dari pemutus tenaga ini. Secara singkat tugas pokok pemutus tenaga adalah (Drs. F.J. Tasiem, 2017):

1. Keadaan normal, membuka/menutup rangkaian listrik.
2. Keadaan tidak normal, dengan bantuan *relay*, PMT mendapat sinyal dan dapat merespon dengan membuka sehingga gangguan dapat dihilangkan.

2.7.5 Penutup Balik Otomatis (PBO) / *Recloser*

Recloser adalah suatu alat otomatis yang berfungsi sebagai pemutus arus bila terdeteksi adanya gangguan untuk memperkecil pemadaman agar dapat membatasi atau melokalisir daerah yang mengalami gangguan. PBO ini berperan sebagai peralatan pengatur kerja yang dapat mengenali sifat gangguan, jika pemutus arus tidak sampai terkunci maka sifat gangguan yang terjadi bersifat temporer atau sementara, sedangkan bila pemutus arus terkunci maka gangguan bersifat permanen.

2.8 Sistem Per Unit

Sistem Per Unit merupakan cara penyederhanaan dan memudahkan suatu nilai perhitungan yang sangat bermanfaat dalam analisa sistem tenaga listrik, yang dengan menyatakan suatu nilai tertentu seperti daya, tegangan, arus, impedansi maupun admitansi. Biasanya sistem ini digunakan untuk memudahkan dalam perhitungan terutama pada sistem berbeda – beda level tegangannya maupun kesulitan – kesulitan karena berbagai ukuran sistem – sistem mulai dari pembangkit hingga konsumen.

Ada dua simbol untuk menyatakan kuantitas per unit dari suatu besaran pada peralatan/ komponen tenaga listrik, yaitu (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017):

1. Per Unit atau PU

Per unit merupakan harga perbandingan antara harga / kualitas sebenarnya dengan suatu besaran dasar yang telah dipilih, atau bisa dinyatakan:

$$\text{Harga Per Unit (pu)} = \frac{\text{harga sebenarnya}}{\text{harga dasar (base)}} \quad (2.7)$$

2. Persen (%)

Persen adalah harga per unit dikalikan seratus atau dapat dinyatakan:

$$\text{Harga Persen} = \frac{\text{harga sebenarnya}}{\text{harga dasar (base)}} \times 100\% \quad (2.8)$$

Harga dasar (*base*) yang dipilih / ditentukan tidak perlu secara keseluruhan untuk daya, tegangan, arus, atau impedansi, tetapi cukup ditentukan untuk *base* (MVA) dan tegangan (kV) sebagai relasi untuk mencari harga – harga dasar lainnya. Sedangkan untuk basenya yang lain dapat dicari dari kedua *base* tersebut, yaitu (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017) :

$$\text{Base Arus (KAmpere)} = \frac{\text{base daya (MVA)}}{\sqrt{3} \times \text{base tegangan (kV)}} \quad (2.9)$$

$$\text{Base Impedansi (ohm)} = \frac{[\text{base tegangan (kV)}]^2}{\text{base daya (MVA)}} \quad (2.10)$$

Sedangkan harga per unit dari masing – masing besaran dapat dicari dengan cara sebagai berikut:

$$\text{Per Unit Tegangan} = \frac{\text{harga tegangan sebenarnya}}{\text{harga base tegangan}} \quad (2.11)$$

$$\text{Per Unit Arus} = \frac{\text{harga arus sebenarnya}}{\text{harga base arus}} \quad (2.12)$$

$$\text{Per Unit Impedansi} = \frac{\text{harga impedansi sebenarnya}}{\text{harga base impedansi}} \quad (2.13)$$

Hal penting yang perlu diperhatikan dalam perhitungan perunit adalah sebagai berikut:

- a. KV dasar (*base tegangan*) dan kVA dasar (*base daya*) dipilih pada suatu bagian sistem (hanya satu). Nilai-nilai dasar (*base*) untuk suatu sistem tiga fasa diartikan sebagai kiloVolt antar saluran dan MVA.
- b. KiloVolt dasar (*base tegangan*) untuk bagian-bagian lain dari sistem ditentukan oleh angka perbandingan pada transformator, sedang kVA dasar (*base daya*) adalah tetap untuk semua bagian sistem.
- c. Untuk tiga buah transformator fasa tunggal yang dihubungkan sebagai transformator 3 fasa, maka *rating* tiga fasanya ditentukan dari rating fasa tunggal masing-masing tranformator. Impedansi dalam persen untuk satuan tiga fasa adalah sama tanpa perlu memperhatikan jenis hubungan trafo, dengan impedansi dalam persen untuk masing-masing tranformator.

2.9 Perhitungan Impedansi

2.9.1 Impedansi Sumber

$$X_s = \frac{\text{Tegangan dasar}(kV)}{MVA_{hs}} \quad (2.14)$$

Untuk mendapatkan nilai MVA_{hs} perlu adanya nilai hubung singkat pada busbar sisi tegangan tinggi yang mewakili dari nilai seluruh unit yang beroperasi.

MVA_{hs} dapat diketahui dari persamaan sebagai berikut:

$$MVA_{hs} = \sqrt{3} \times kV_{L-L} \times I_{hs} \quad (2.15)$$

Keterangan:

I_{hs} = Arus hubung singkat

kV_{L-L} = Tegangan fasa ke fasa

2.9.2 Impedansi Penyulang

Perhitungan impedansi penyulang bergantung pada besar impedansi per km dari penyulang dan luas penampang penghantar serta jenis penghantar penampang.

$$Z = (R + jX) \times \text{panjang penyulang} \quad (2.16)$$

2.9.3 Impedansi Beban

$$Z = (R + jX) \quad (2.17)$$

$$R = \frac{(V_{pu})^2 \times S_B \times P}{P^2 + Q^2} \quad (2.18)$$

$$X = \frac{(V_{pu})^2 \times S_B \times Q}{P^2 + Q^2} \quad (2.19)$$

Keterangan:

Z = Impedansi beban (Ohm)

R = Resistansi/hambatan (Ohm)

X = Beban Reaktansi (Ohm)

P = Daya nyata (Watt)

Q = Daya beban reaktif

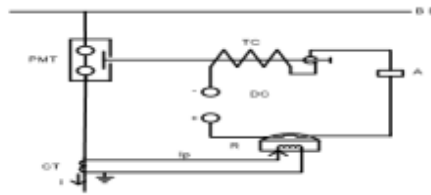
2.10 Rele Arus Lebih

Rele arus lebih atau yang lebih dikenal dengan OCR (*Over Current Relay*) 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. Prinsip kerja relai arus lebih adalah berdasarkan adanya arus lebih yang dirasakan relai, baik disebabkan adanya gangguan hubung singkat atau *overload* untuk kemudian memberikan perintah trip ke pemutus tenaga sesuai karakteristik waktunya (Yusmartato, 2016). Relay arus lebih atau OCR memproteksi sistem kelistrikan terhadap gangguan antar fasa.

2.10.1 Karakteristik Relay Arus Lebih (OCR)

1. Relay Arus Lebih Seketika (*moment-instantaneous*).

Rele ini adalah jenis rele arus lebih yang paling sederhana di mana jangka waktu kerja rele yaitu mulai saat rele mengalami *pick-up* sampai selesainya kerja rele sangat singkat yakni sekitar 20-100 mili detik tanpa adanya penundaan waktu (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017).



Gambar II. 10 Karakteristik OCR Tipe Seketika

Sumber : (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017)

Keterangan:

BB : Busbar

PMT : Pemutus (CB)

TC : *Tripping Coil* (kumparan pemutus)

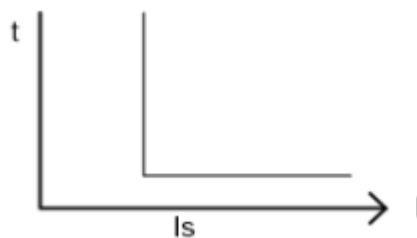
DC : Sumber Arus Searah

R : Rele Arus Lebih Seketika

CT : *Curent Transformer* (transformer arus)

I_R : Arus yang melewati kumparan rele

I : Arus Beban.

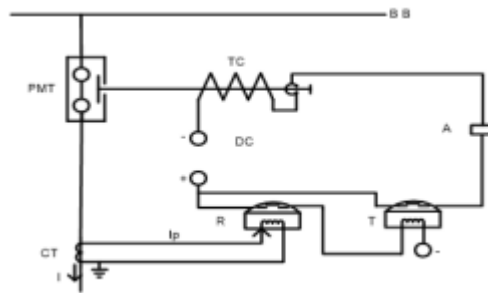


Gambar II. 11 Karakteristik Rele Arus Lebih Seketika

Sumber : (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017)

2. Relay Arus Lebih Waktu Tertentu (*definite time*).

Rele ini adalah jenis rele arus lebih di mana jangka waktu rele mulai *pick-up* sampai selesainya kerja relaynya dapat diperpanjang dengan nilai tertentu dan tidak tergantung dari besarnya arus yang mengerjakannya (tergantung dari besarnya arus setting, waktu kerja rele ditentukan oleh waktu settingnya) (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017).



Gambar II. 12 Karakteristik OCR Tipe Waktu Tertentu

Sumber : (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017)

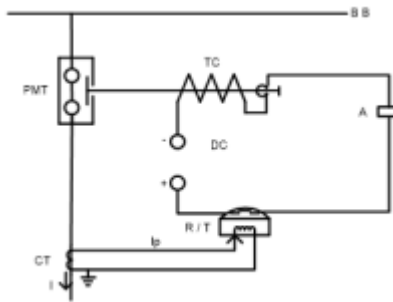


Gambar II. 13 Karakteristik Rele Arus Lebih Tertentu

Sumber : (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017)

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

Rele ini adalah jenis rele arus lebih di mana jangka waktu rele mulai *pick-up* sampai selesainya kerja rele tergantung dari besarnya arus yang melewati kumparan relenya, sehingga rele tersebut mempunyai sifat terbalik untuk nilai arus dan waktu bekerjanya.

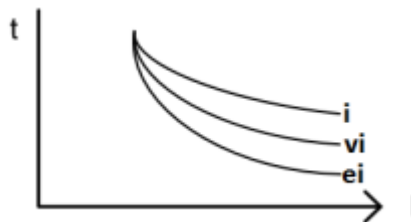


Gambar II. 14 Karakteristik OCR Tipe Berbanding Terbalik

Sumber : (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017)

Bentuk sifat keterbalikan antara arus dan waktu kerja ini bermacam – macam, digolongkan menjadi 3 golongan, yaitu:

- a. Berbanding terbalik biasa (*inverse*)
- b. Sangat berbanding terbalik (*very inverse*)
- c. Sangat berbanding terbalik sekali (*extremey inverse*)

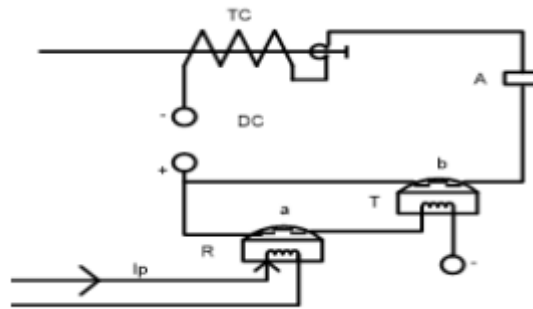


Gambar II. 15 Karakteristik Rele Arus Lebih Berbanding Terbalik

Sumber : (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017)

4. Arus Kerja (*pick-up*) dan Arus Kembali (*drop-off*).

Untuk menjelaskan apa yang dimaksud dengan arus *pick-up* dan arus *drop-off* pada rele arus lebih, dengan melihat gambar II.16 dan gambar II.17 akan lebih memperjelas permasalahannya.



Gambar II. 16 Arus Kerja (Pick-up) dan Arus Kembali (Drop-off)

Sumber : (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017)

Keterangan :

TC : *Tripping Coil*

AL : Alarm

DC : Sumber Arus Searah

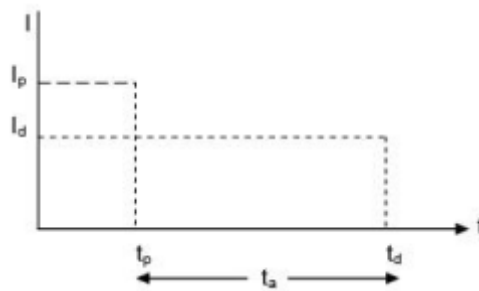
T : *Relay definite time*

B : Kontraktor *relay definite time*

R : *Relay Over Current*

A : Kontraktor *relay over current*

I_R : Arus sekunder transformator arus



Gambar II. 17 Karakteristik Operasi Arus Pick-up dan Drop-off

Sumber : (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017)

Keterangan :

I_p : Arus *pick-up*

I_d : Arus *drop-off*

t_p : Nilai waktu yang dibutuhkan untuk *pick-up*

t_d : Nilai waktu yang dibutuhkan untuk *drop-off*

t_a : Selisih waktu yang dibutuhkan untuk *drop-off* dan *pick-up*

t_s : Nilai setting dari pengaman

I_p adalah nilai arus di mana rele arus lebih akan bekerja menutup kontak, sehingga rangkaian kumparan *relay definite* tertutup (rele waktu bekerja). Sedangkan I_d adalah nilai arus di mana rele arus lebih berhenti bekerja, yakni setelah pemutus bekerja memutuskan aliran listrik. Bila nilai t_a lebih kecil dari nilai t_s , maka rele tidak bekerja, sedangkan bila t_a lebih besar dari t_s maka rele dinyatakan bekerja. Harga perbandingan antara nilai arus *dropoff* dan arus *pick-up* dinyatakan dengan K_d dan arus nominal dapat dituliskan:

$$I_n = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times KV} \quad (2.20)$$

$I_n = I_{base}$ = Arus nominal

$$I_p = \frac{K_f}{K_d} \times I_n \quad (2.21)$$

K_f : (Faktor keamanan) untuk *define relay* = 1,1; *inverse relay* = 1,2

K_d : (Faktor arus kembali) untuk *define relay* = 0,7 – 0,9; *inverse relay* = 1,0

2.11 Penyetelan Rele Arus Lebih

Penyetelan rele arus lebih merupakan salah satu cara untuk menentukan nilai setelan arus lebih yang berguna sebagai tolak ukur pada saat bekerjanya rele. Dalam penyetelan rele arus lebih ada dua hal utama dalam *setting* yaitu menghitung ulang *pick-up* dan nilai *time multipliernya*.

Pick-up didefinisikan sebagai nilai arus minimum yang menyebabkan rele bekerja. Untuk menentukan setelan *pick-up*, harus dipertimbangkan besarnya arus nominal maksimum atau *Full Load Ampere* yang mengalir. Setelan *pick-up* harus lebih besar dari pada arus nominal maksimum yang mungkin mengalir, sehingga rele tidak langsung memerintahkan *circuit breaker* untuk *trip* ketika arus yang mengalir mencapai batas penyetelan nilai maksimum. Adapun untuk menentukan besarnya tap yang digunakan dapat menggunakan persamaan sebagai berikut (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017):

$$I_s = I_p \times \frac{1}{rasio CT} \quad (2.22)$$

Keterangan:

I_s = Arus *setting* sekunder.

I_p = Arus *setting* primer.

Sedangkan untuk menentukan nilai *setting* TMS dan *Time Dial* dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$TMS = \frac{[\left(\frac{I}{I_{set}}\right)^\alpha - 1}{k} \times t_{op} \quad (2.23)$$

$$T_d = \frac{k \times TMS}{[\left(\frac{I}{I_{set}}\right)^\alpha - 1} \quad (2.24)$$

Keterangan:

T_d = Waktu operasi (detik).

t = *Time dial*.

I = Nilai arus (Ampere).

I_{set} = Arus *pick-up* (Ampere).

k = Koefisien *invers* 1 (lihat tabel 2.1).

α = Koefisien *invers* 2 (lihat tabel 2.1).

t_{op} = Waktu kerja

Tabel II. 1 Koefisien Invers Time Dial

Sumber : (Rachmad Hidayat Mastian Noor, 2017)

	Koefisien
--	------------------

Tipe Kurva	α	K
Inverse		
<i>Standard Inverse</i>	0,02	0,14
<i>Very Inverse</i>	1,00	13,50
<i>Extremely</i> <i>Inverse</i>	2,00	80,00

