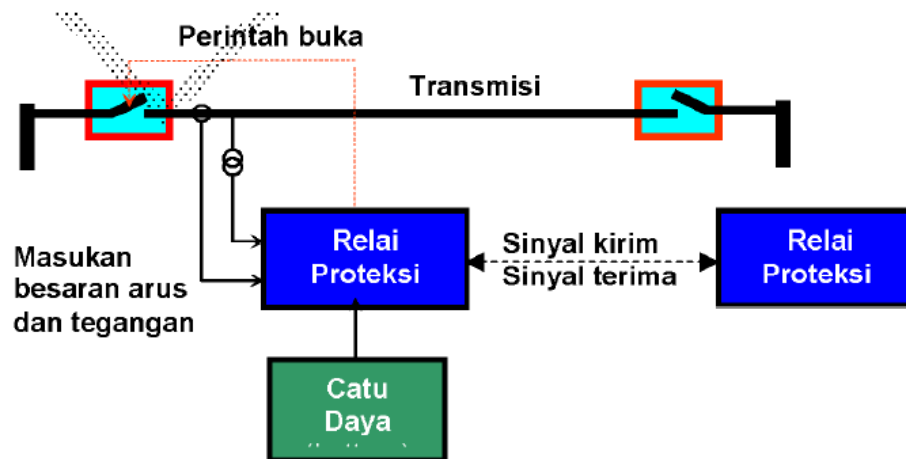


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Peralatan Sistem Proteksi¹

Sistem proteksi terdiri dari peralatan Trafo Arus (Current Transformer = CT), Trafo Tegangan Kapasitor (Capacitive Voltage Transformer = CVT), Pemutus Tenaga (PMT), Catu daya AC/DC, Relai proteksi dan teleproteksi yang diintegrasikan dalam suatu rangkaian pengawatan. Selain itu diperlukan juga peralatan pendukung untuk kemudahan operasi dan evaluasi seperti sistem recorder, sistem scada dan indikasi rele.



Gambar 2.1 Gambar Sistem Proteksi

2.2 Sistem Pengamanan²

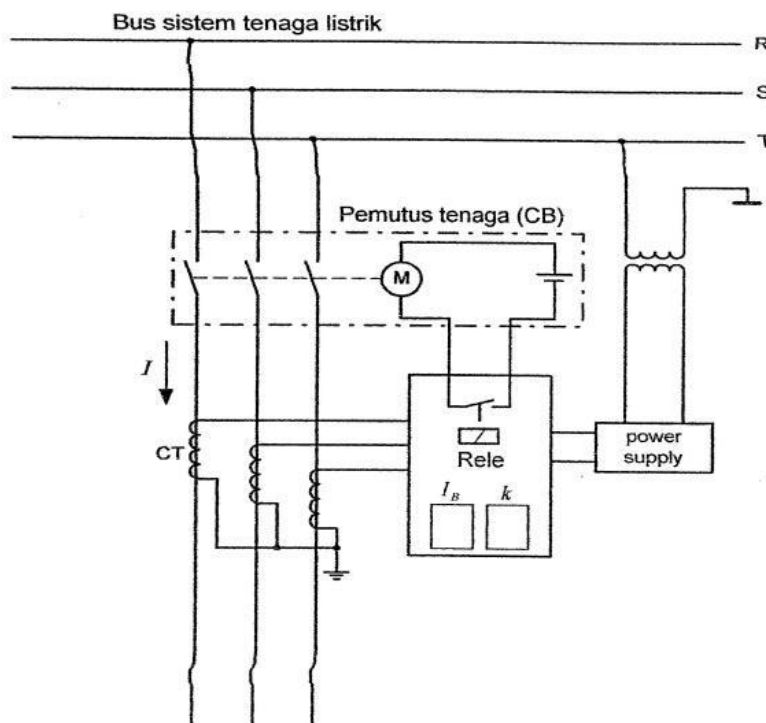
Untuk mengamankan sistem tenaga listrik dari gangguan seperti arus lebih atau hubung singkat, turun dan naiknya tegangan, turun dan naiknya frekuensi dan kegagalan isolasi atau melemahnya isolasi pada sistem tenaga listrik dilakukan dengan memasang alat pengaman atau pelindung, sedangkan untuk menghilangkan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

¹ PT. PLN (Persero) Pola Proteksi Sistem Transmisi. 1010. SPLN T5.002-1: 2010. Bagian 1 : Tegangan Tinggi 66 kV dan 150 kV

² RS, Carlos dan Rumiasih. 2010. "Praktikum Sistem Proteksi". Palembang: Laboratorium Teknik Listrik Politeknik Negeri Sriwijaya.

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

Suatu sistem pengaman terdiri dari alat-alat utama yaitu pemutus tenaga atau CB, peralatan ukur atau transformator ukur terdiri dari transformator arus (CT) dan transformator tegangan (PT) dan rele untuk memonitori besaran gangguan. Gangguan pada sistem tenaga listrik merupakan suatu besaran seperti arus yang telah melampaui batas keadaan normal. Keadaan ini dapat mengganggu dan merusakkan peralatan sistem tenaga listrik. Untuk mengatasi persoalan tersebut, sebelum dilakukan pemisahan bagian yang terganggu oleh pemutus tenaga (CB), besaran gangguan harus dapat terdeteksi atau dimonitori oleh suatu peralatan. Peralatan yang dapat memonitori besaran gangguan atau terjadinya pada saat yang sama memberikan daya pada rangkaian trip pada pemutus tenaga (CB) agar pemutus tenaga pembuka kontakannya adalah rele.



Gambar 2.2 Gambar Peralatan dan Hubungan Sistem Pengaman.

Naiknya arus atau naik/turunnya tegangan yang disebabkan oleh gangguan dapat digunakan sebagai tanda terjadinya suatu gangguan pada sistem tenaga listrik.

Gangguan tersebut akan diatasi oleh rele. Rele yang bekerja dengan sangat cepat untuk memerintahkan pemutus tenaga (CB) untuk trip.

2.3 Rele Proteksi³

Rele proteksi adalah susunan peralatan yang direncanakan untuk dapat merasakan atau mengukur adanya gangguan atau mulai merasakan adanya ketidaknormalan pada peralatan atau bagian system tenaga listrik dan secara otomatis memberi perintah untuk membuka pemutus tenaga (PMT) untuk memisahkan peralatan atau bagian dari system yang terganggu dan memberi isyarat berupa lampu dan bel. Secara umum rele proteksi arus bekerja sesuai dengan yang diharapkan dengan waktu yang cepat sehingga tidak akan mengakibatkan kerusakan, ataupun kalau suatu peralatan terjadi kerusakan secara dini telah diketahui, atau walaupun terjadi gangguan tidak menimbulkan pemadaman bagi konsumen.

Rele proteksi juga dapat merasakan atau melihat adanya gangguan pada peralatan yang diamankan dengan mengukur atau membandingkan besaran-besaran yang diterimanya, misalnya arus, tegangan, daya, sudut fase, frekuensi, impedansi dan sebagainya, dengan besaran yang telah ditentukan, kemudian mengambil keputusan untuk seketika atau dengan perlambatan waktu membuka pemutus tenaga. Pemutus tenaga umumnya dipasang pada generator, transformator daya, saluran transmisi, saluran distribusi dan sebagainya supaya masing-masing bagian sistem dapat dipisahkan sedemikian rupa sehingga sistem lainnya tetap dapat beroperasi secara normal.

2.3.1 Fungsi Rele Proteksi

Maksud dan tujuan pemasangan Rele proteksi adalah untuk menunjukkan lokasi dan macam gangguannya. Dengan data tersebut memudahkan Analisa dari gangguannya. Dalam beberapa hal rele hanya memberi tanda adanya gangguan atau

³ Samaulah, Hazairin. *Dasar-dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. (Palembang: Penerbit Unsri, 2004), Hal. 3 – 4.

kerusakan, jika dipandang gangguan atau kerusakan tersebut tidak segera membahayakan. Adapun fungsi dari rele proteksi :

- a) Merasakan, mengukur, dan menentukan bagian system yang terganggu serta memisahkan secepatnya sehingga system lain yang tidak terganggu dapat beroperasi secara normal.
- b) Mengurangi kerusakan yang lebih parah dari peralatan yang terganggu.
- c) Mengurangi pengaruh gangguan terhadap bagian system yang lain tidak terganggu di dalam sistem tersebut serta mencegah meluasnya gangguan.
- d) Memperkecil bahaya bagi manusia.

2.3.2 Persyaratan Kualitas Proteksi⁴

Ada beberapa persyaratan yang sangat perlu diperhatikan dalam suatu perencanaan system proteksi yang efektif, yaitu :

a. Selektivitas dan Diskriminasi

Efektivitas suatu sistem proteksi dapat dilihat dari kesanggupan system dalam mengisolir bagian yang mengalami gangguan saja

b. Stabilitas

Sifat yang tetap tidak operasi apabila gangguan-gangguan terjadi diluar zona yang melindungi (gangguan luar).

c. Kecepatan Operasi

Sifat ini lebih jelas, semakin lama arus gangguan terus mengalir, semakin besar kerusakan peralatan. Hal yang paling penting adalah perlunya membuka bagian-bagian yang terganggu sebelum generator-generator yang dihubungkan sinkron kehilangan sinkronisasi dengan system selebihnya.

d. Sensitivitas (kepekaan)

Yaitu besarnya arus gangguan agar alat bekerja. Harga ini dapat dinyatakan dengan besarnya arus dalam jaringan aktual (arus primer) atau sebagai prosentase dari arus sekunder (trafo arus).

e. Pertimbangan Ekonomis

⁴ Tasiem, F.J., Proteksi Sistem Tenaga Listrik, (Yogyakarta: Teknosain, 2017), hlm 15-17.

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

f. Reabilitas (Keandalan)

Sifat ini jelas, penyebab utama dari “*outage*” rangkaian adalah tidak bekerjanya proteksi sebagaimana mestinya (*mal operation*).

g. Proteksi Pendukung

Proteksi pendukung (*back up*) merupakan susunan yang sepenuhnya terpisah dan bekerja untuk mengeluarkan bagian yang terganggu apabila proteksi utama tidak bekerja (*fail*). Sistem pendukung ini sedapat mungkin indenpenden seperti halnya proteksi utama, memiliki trafo-trafo dan rele-rele tersendiri. Seringkali hanya tripping CB dan trafo-trafo tegangan yang dimiliki bersama oleh keduanya.

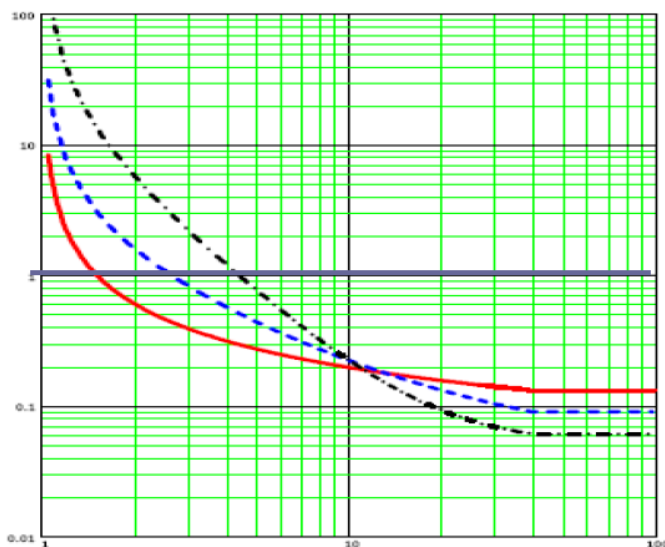
2.4 Rele Arus Lebih / Over Current Relay (OCR)

Rele Arus Lebih / *Over Current Relay* (OCR) adalah suatu rele yang bekerjanya didasarkan adanya kenaikan arus yang melebihi suatu nilai pengaman tertentu dan dalam jangka waktu tertentu, sehingga rele ini dapat dipakai sebagai pola pengamanan arus lebih.

Keuntungan dari penggunaan proteksi Rele arus lebih ini antara lain :

- a) Sederhana dan murah
- b) Mudah penyetelannya
- c) Merupakan rele pengaman utama dan cadangan.
- d) Mengamankan gangguan hubung singkat antar fasa maupun hubung singkat satu fasa ke tanah dan dalam beberapa hal dapat digunakan sebagai pengaman beban lebih (*overload*).
- e) Pengaman utama pada jaringan distribusi dan sub transmisi.

f) Pengamanan cadangan untuk generator, trafo tenaga, dan saluran transmisi.



Gambar 2.3 Gambar Karakteristik Rele Arus Lebih

Karakteristik Waktu Kerja terdiri dari :

- Definite —————
- Normal / Standard Inverse —————
- Very Inverse - - - - -
- Long time Inverse - . - . -

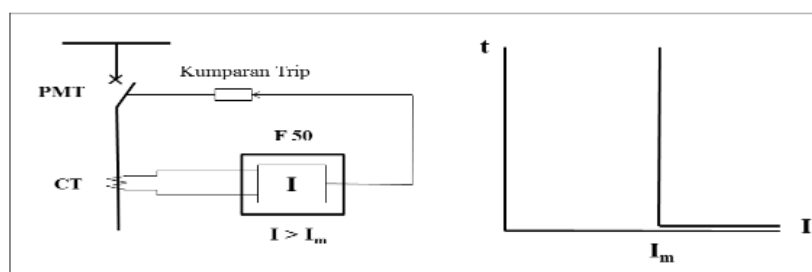
Rele ini digunakan untuk mendeteksi gangguan fasa-fasa, mempunyai karakteristik inverse (waktu kerja Rele akan semakin cepat apabila arus gangguan yang dirasakannya semakin besar) atau definite (waktu kerja tetap untuk setiap besaran gangguan). Selain itu pada Rele arus lebih tersedia fungsi high set yang bekerja seketika (moment/instantaneous). Untuk karakteristik inverse mengacu kepada standar IEC atau ANSI/IEEE. Rele ini digunakan sebagai proteksi cadangan karena tidak dapat menentukan titik gangguan secara tepat, dan juga ditujukan untuk keamanan peralatan apabila proteksi utama gagal kerja. Agar dapat dikoordinasikan dengan baik terhadap Rele arus lebih disisi yang lain (bukan Rele arus lebih yang terpasang di penghantar), maka karakteristik untuk proteksi penghantar yang dipilih adalah kurva yang sama yaitu standard inverse (IEC) / normal inverse (ANSI/IEEE).

2.4.1 Karakteristik Waktu Kerjanya

Berdasarkan karakteristik dari waktu kerjanya reel arus lebih dapat dibedakan menjadi :

a) Rele Arus Lebih Seketika / Momen (*Instantaneous Overcurrent Relay*)

Rele arus lebih dengan karakteristik waktu kerja seketika (moment) ialah jika jangka waktu rele mulai saat rele arusnya pick up sampai selesainya kerja rele sangat singkat (20-100 ms), yaitu tanpa penundaan waktu. Rele ini umumnya dikombinasikan dengan rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu (*definite time*) atau waktu terbalik (*inverse time*) dan hanya dalam beberapa hal berdiri sendiri secara khusus.

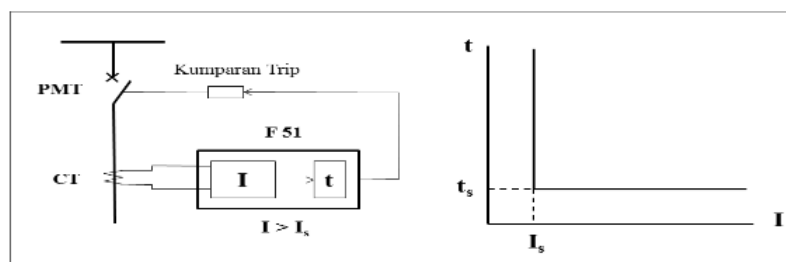


Gambar 2.4 Gambar Karakteristik Rele Arus Lebih Sesaat / Momen

b) Rele Arus Lebih Dengan Waktu Tunda (*Time Delay Overcurrent*)

• Rele Arus Lebih dengan Waktu Tetentu (*definite Time*)

Rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu ialah jika jangka waktu mulai rele arus pick up sampai selesainya kerja rele diperpanjang dengan nilai tertentu dan tidak tergantung dari besarnya arus yang menggerakkan.



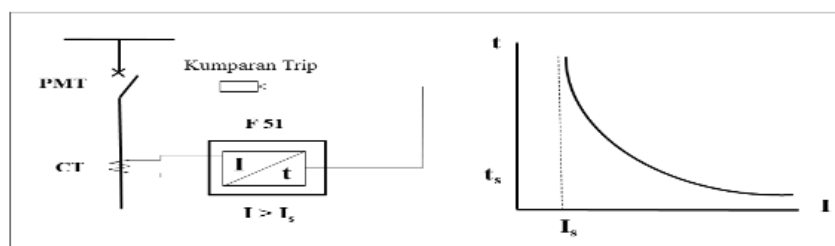
Gambar 2.5 Gambar Karakteristik Rele Arus Lebih Definite Time

- **Rele Arus Lebih Waktu Terbalik (*Inverse Time Overcurrent Relay*)**

Rele arus lebih dengan karakteristik waktu terbalik adalah jika jangka waktu mulainya Rele pick up sampai selesainya kerja Rele diperpanjang dengan besar relay yang besarnya berbanding terbalik dengan arus yang menggerakkannya.

Bentuk perbandingan terbalik dari waktu arus ini sangat bermacam – macam :

- 1) Berbanding terbalik (*Inverse*)
- 2) Sangat berbanding terbalik (*Very Inverse*)
- 3) Sangat berbanding terbalik sekali (*Extremely Inverse*)



Gambar 2.6 Gambar Karakteristik Rele Arus Lebih Inverse Time

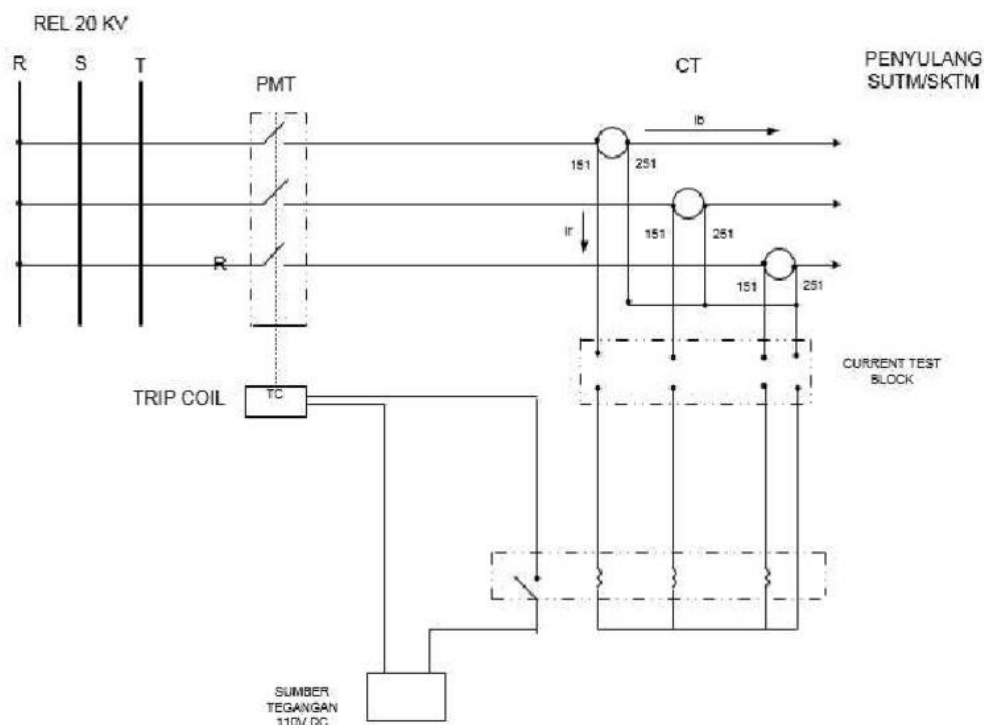
- **Rele Arus Lebih Terbalik dan Terbatas Waktu Minimum (*inverse definite minimum time / IDMT*)**

Rele arus lebih dengan karakteristik inverse definite minimum time (IDMT) ialah jika jangka waktu rele arus mulai pick up sampai selesainya kerja rele mempunyai sifat waktu terbalik untuk nilai arus yang kecil setelah pick up dan kemudian mempunyai sifat waktu tertentu untuk nilai arus yang lebih besar.

2.4.2 Prinsip Kerja Rele Arus Lebih

Prinsip kerja relai arus lebih adalah berdasarkan pengukuran arus, yaitu relai akan bekerja apabila merasakan arus diatas nilai settingnya. OCR dirancang sebagai pengaman cadangan Trafo jika terjadi gangguan hubung singkat baik dalam trafo (internal fault) maupun gangguan eksternal (external fault). Oleh karena itu, setting

arus OCR harus lebih besar dari kemampuan arus nominal trafo yang diamankan (110 – 120% dari nominal), sehingga tidak bekerja pada saat trafo dibebani nominal, akan tetapi harus dipastikan bahwa setting arus relai masih tetap bekerja pada arus hubung singkat fasa-fasa minimum.



Gambar 2.7 Gambar Rangkaian Pengawatan OCR

2.4.3 Setting Rele Arus Lebih

Rele OCR harus di setting sedemikian rupa sehingga dapat bekerja secepat mungkin dan meminimalkan bagian dari system yang harus padam. Hal ini diterapkan dengan cara mengatur waktu kerja relay agar bekerja lambat ketika terjadi arus gangguan kecil, dan bekerja semakin cepat apabila arus gangguan semakin besar

2.4.3.1 Setting Arus

Berikut ini merupakan parameter yang perlu dicari untuk pemyetelan rele arus lebih :



Arus nominal dari suatu peralatan listrik adalah :

$$I_N = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \dots\dots\dots (2.1)$$

Ratio CT yang ditentukan dari arus nominal peralatan adalah :

$$\text{Ratio CT} = \frac{\text{Primer}}{\text{Sekunder}} \dots\dots\dots (2.2)$$

Setting arus kerja untuk Rele OCR berdasarkan kemampuan trafo adalah:

$$I_{s1} = 1,05 \times I_{nom} \text{ trafo} \dots\dots\dots (2.3)$$

Setting arus kerja berdasarkan kemampuan peralatan terkecil (CT) adalah :

$$I_{s2} = 1,2 \times I_N \text{ Peralatan Terkecil} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dipilih nilai terkecil **Is = {Is1 . (Is1<Is2) + Is2 . (Is2<Is1)}** (A primer)

Nilai tersebut adalah nilai primer, untuk mendapatkan nilai setelan sekunder yang dapat disetkan pada relay OCR, maka harus dihitung dengan menggunakan ratio trafo (CT) yang terpasang pada sisi primer maupun sisi sekunder transformator tenaga.

Arus yang mengalir pada rele dapat ditentukan dengan persamaan :

$$I_{set \text{ sekunder}} = I_s \times \frac{1}{\text{ratio CT}} \text{ (A sekunder)} \dots\dots\dots (2.5)$$

Arus kerja rele dengan standard rele arus lebih 110%

$$I_{set} = 1,1 \times I_N \dots\dots\dots (2.6)$$

2.4.3.2 Setting Waktu

Untuk menentukan nilai waktu kerja (TMS), diperlukan hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat.

Rumus TMS sesuai pada standar karakteristik IEC 60255.

Tabel 2.1. Tabel Setelan Waktu (TMS) Berdasarkan Tipe Rele.

Tipe Relay	Setelan Waktu (TMS)
<i>Standar Inverse</i>	$TMS = \frac{\left(\left(\frac{I_f}{I_{set}}\right)^{0,02} - 1\right)}{0,14} xt$
<i>Very Inverse</i>	$TMS = \frac{\left(\left(\frac{I_f}{I_{set}}\right)^1 - 1\right)}{13,5} xt$
<i>Extremely Inverse</i>	$TMS = \frac{\left(\left(\frac{I_f}{I_{set}}\right)^2 - 1\right)}{80} xt$
<i>Long Inverse</i>	$TMS = \frac{\left(\left(\frac{I_f}{I_{set}}\right)^1 - 1\right)}{120} xt$

Waktu operasi (t) untuk karakteristik kurva Standard Inverse :

$$t = \frac{tms \times 0,14}{\left(\frac{I_{fs}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \dots\dots\dots (2.7)$$

2.5 Recloser

Dalam distribusi tenaga listrik, *recloser*, atau *autorecloser*, adalah pemutus sirkuit yang dilengkapi dengan mekanisme otomatis yang dapat menutup setelah terjadi suatu kesalahan yaitu trip *Recloser* digunakan pada SUTM untuk mendeteksi dan menanggulangi jika terjadi kesalahan sesaat. *Recloser* dapat dipasang pada tiang di luar ruangan dengan merakit mounting bracket yang terhubung dengan pagar logam yang ada di atas tiang dan juga dipasang dengan *box mounting* yang terpisah.

Pemutus vakum, penggerak magnetik, dan trafo arus (CT) yang ada di circuit breaker. Pemutus recloser didisain untuk tegangan 3- fasa dengan isolasi lengkap yang dipasang di kerangka epoxy yang terisolasi dan dioperasikan oleh Rod isolasi yang sama. Isolasi Rod terhubung pada ujung kontak transfer dengan

kekuatan penggerak dari actuator magnetik ke pemutus untuk operasi tutup dan buka.

Tigabox isolasi yang berada di atas pagar logam ini terbuat dari resin epoksi sikloalifatik. Transformator arus (CT) yang dibentuk dalam kerangka isolasi dan CT dapat memantau arus gangguan yang ada di setiap fasa, gangguan arus grounding dan arus beban, dan dapat mengirim sinyal ke kontrol elektronik yang ada pada kubikel kontrol.

Jika kabel kontrol CT terputus pada kedua ujungnya, CT secara otomatis putus karena diputuskan oleh kontrol otomatis yang melindungi CT.

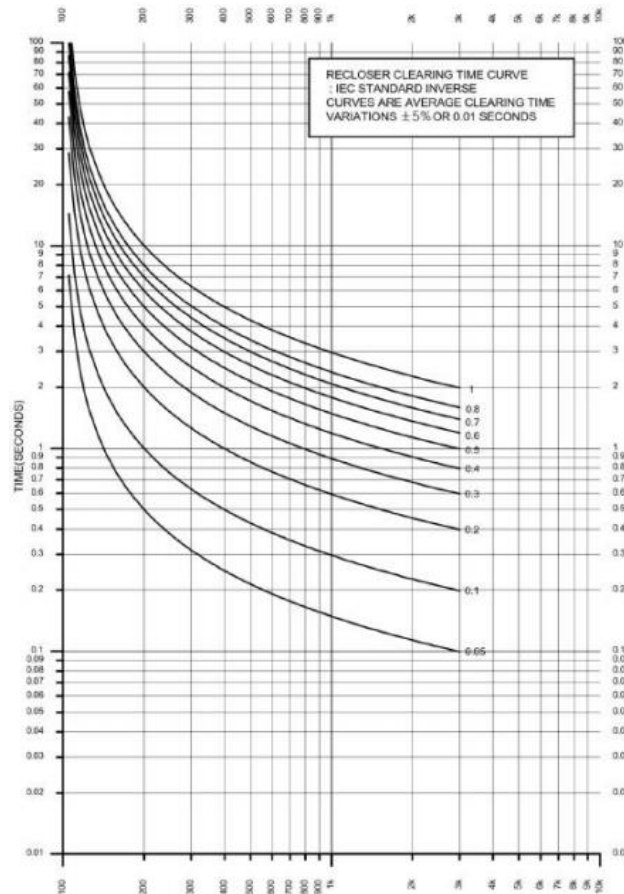
Manual Trip / Menutup / Perangkat Pengunci berada di sisi depan kubikel kontrol. Indikator menunjukkan statusnya buka / tutup –nya pemutus dan operasinal kontrol terletak di bagian bawah kubikel. Urutan pengoperasian recloser dilakukan oleh relay yang berbasis mikroprosesor. Relay dipasang di kubikel kontrol yang mana telah terlindungi oleh pelindung anti hujan. Recloser dengan segera akan melakukan urutan operasi untuk buka-tutup kembali ketika arus gangguan fase / grounding ini lebih tinggi dari nilai yang ditetapkan.

Jika arus gangguan tidak ditangani, maka recloser akantidak bekerja dan akantetap membuka sampai operasi berikutnya. Jika arus gangguan sudah ditangani, recloser akan menutup, dan kemudian kembali ke modus tidur setelah waktu direset ulang. Ketika arus gangguan terdeteksi, recloser beroperasi kembali secara normal.

Recloser disuplai oleh AC 110/220V atau baterai primer VDC tanpa transformator tambahan, dan dirancang untuk mengkonsumsi energi yang rendah untuk pengoperasian me-reclose dan me-remote.

Jika sumber tegangan tidak tersedia, recloser sudah dilengkapi dengan trafo tegangan tambahan untuk memasok sumber daya tambahan ke kubikel kontrol. Selama operasi membuka dan menutup, relay mengirimkan pulsa arus ke kumparan membuka dan menutup, dan gaya magnetik yang menginduktansi kumparan dan menggerakkan plunger padapenggerak magnetik.

Setting relay pada rangkaian kontrol dapat dimodifikasi di panel kontrol, PC atau metode komunikasi dikendalikan dari jarak jauh.



Gambar 2.8 Gambar Karakteristik *Recloser*⁵

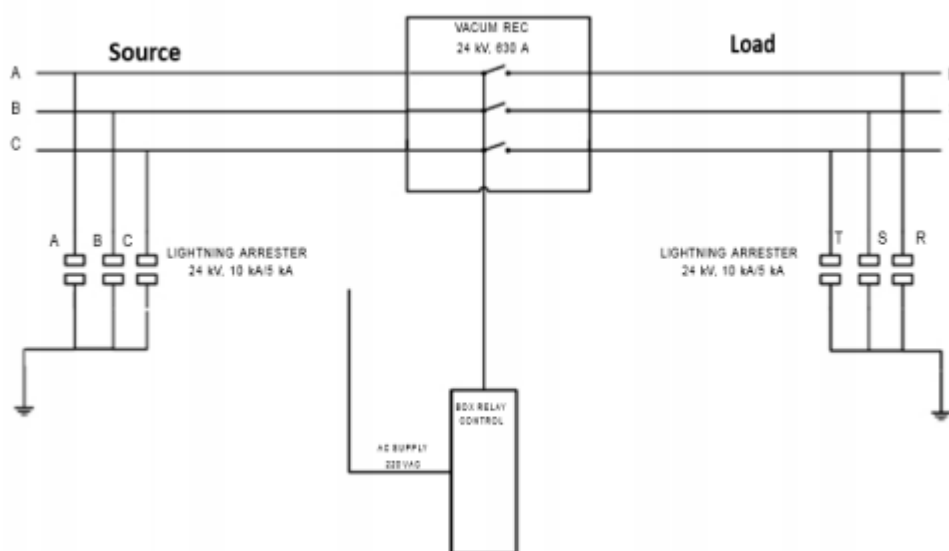
Karakteristik Waktu Kerja terdiri dari :

- Definite —————
- Normal / Standard Inverse —————
- Very Inverse - - - - -
- Long time Inverse - . - . -

⁵ JOONGWON.CO.,Ltd.KOREA dan PT. DUTA TERANG RUBBERINDO. *RECLOSER DAN KONTROL FTU R200 KURVA PROTEKSI*. (Indonesia : Hal 71)

2.5.1 Prinsip Kerja Recloser

Recloser hampir sama dengan circuit breaker, hanya recloser dapat diseting untuk bekerja membuka dan menutup kembali beberapa kali secara otomatis. Apabila feeder mendapat gangguan sementara, bila circuit breaker yang digunakan untuk feeder yang mendapat gangguan sementara, akan menyebabkan hubungan feeder terputus. Tetapi jika recloser yang digunakan diharapkan gangguan sementara tersebut membuat feeder terputus, maka recloser bekerja beberapa kali sampai akhirnya recloser membuka.



Gambar 2.9 Gambar Rangkaian Pengawatan Recloser⁶

2.6 Menghitung Impedansi

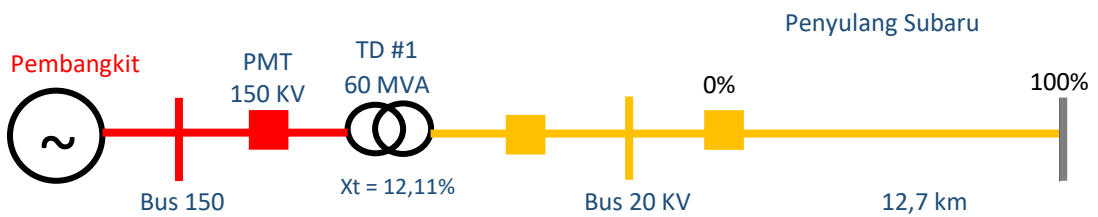
Dalam menghitung impedansi dikenal tiga macam impedansi urutan, yaitu:

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

⁶ JOONGWON.CO.,Ltd.KOREA dan PT. DUTA TERANG RUBBERINDO. *RECLOSER DAN KONTROL FTU R200*. (Indonesia : Hal 3)

- Impedansi urutan nol (Z_3), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh urutan nol.

Sebelum melakukan perhitungan arus hubung singkat, maka kita harus memulai perhitungan pada rel daya tegangan primer di gardu induk untuk berbagai jenis gangguan, kemudian menghitung pada titik-titik lainnya yang letaknya semakin jauh dari gardu induk tersebut. Untuk itu diperlukan pengetahuan mengenai dasar impedansi urutan rel daya tegangan tinggi atau bisa juga disebut sebagai impedansi sumber, impedansi transformator, dan impedansi penyulang.



Gambar 2.10 Gambar Sketsa Penyulang

Dimana :

X_s = Impedansi sumber (ohm)

X_t = Impedansi transformator (ohm)

a. Impedansi Transformator

Untuk menghitung impedansi transformator, maka harus mengetahui nilai dari arus hubung singkat pada transformator daya per bulan :

$$MVA_{sc3\phi} = \sqrt{3} \times V \times I_{hs} \dots \dots \dots (2.10)$$

b. Impedansi Dasar

Untuk menghitung impedansi dasar dapat digunakan rumus sebagai berikut :

- Impedansi dasar sisi 150 kV dan 20 kV :

$$I_{base} = \frac{MVA_{base}}{\sqrt{3} \times kV_{base}} \dots \dots \dots (2.11)$$



c. Impedansi Sumber

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

$$X_1 = X_2 = \frac{kV^2}{MVA_{SC\ 3\phi}} \dots\dots\dots (2.12)$$

Sedangkan untuk menghitung impedansi sumber di bus 20 kV diperoleh dengan rumus :

$$X_1 = X_2 = \frac{kV^2(\text{sisi sekunder trafo})}{kV^2(\text{sisi primer trafo})} \times X_1(\text{sisi primer}) \dots\dots\dots (2.13)$$

d. Nilai Reaktansi

$$X_t (\text{pada } 100\%) = \frac{kV(\text{sekunder})^2}{MVA \text{ Transformator}} \dots\dots\dots (2.14)$$

dimana :

X_t = Reaktansi Transformator (Ω)

kV = Nilai tegangan pada sisi sekunder trafo (V)

MVA = Nominal Rating Trafo (MVA)

- Reaktansi urutan positif – negatif (X_{t1} / X_{t2})

$$X_{t1} = X_{t2} = \% \text{ yang diketahui } \times X_t \text{ } 100\% \dots\dots\dots (2.15)$$

- Reaktansi urutan nol (X_{t0})

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

- Untuk transformator tenaga dengan hubungan belitan ΔY dimana kapasitas belitan delta sama besar dengan kapasitas belitan Y, maka $X_{t0} = X_{t1}$
- Untuk transformator tenaga dengan hubungan belitan Y_{yd} dimana kapasitas belitan delta (d) biasanya adalah sepertiga dari kapasitas belitan Y (belitan yang dipakai untuk menyalurkan daya, sedangkan belitan delta tetap ada di dalam tetapi tidak dikeluarkan kecuali satu terminal delta ditanahkan, maka nilai $X_{t0} = 3 \times X_{t1}$



- Untuk transformator tenaga dengan hubungan belitan YY dan tidak mempunyai belitan delta di dalamnya, maka untuk menghitung besarnya berkisar antara 9 sampai dengan 14 dikali $X_{t1} = X_{t2}$

$$X_0 = 9 s/d 10 x X_{t1} = X_{t2} \dots \dots \dots (2.16)$$

e. Impedansi Penyulang

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

Sehingga untuk impedansi penyulang dapat ditentukan dengan menggunakan rumus :

- Urutan positif dan urutan negatif

$$Z_1 = Z_2 = \% \text{ panjang penyulang (km)} x Z_1 / Z_2 \dots \dots \dots (2.18)$$

Di mana :

Z_1 = Impedansi urutan positif (ohm)

Z_2 = Impedansi urutan negatif (ohm)

- Urutan nol

$$Z_0 = \% \text{ panjang penyulang (km)} x Z_0 \dots \dots \dots (2.19)$$

Di mana :

Z_0 = Impedansi urutan nol (ohm)

f. Impedansi Ekuivalen Jaringan

Untuk menghitung impedansi ekuivalen jaringan dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

- Urutan positif dan urutan negative ($Z_{1eq} = Z_{2eq}$)

$$Z_{1eq} = Z_{2eq} = Z_{s1} + Z_{t1} + Z_1 \text{ penyulang} \dots \dots \dots (2.20)$$

Di mana :

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

Z_{2eq} = Impedansi ekuivalen jaringan urutan negatif (ohm)

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

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

- Urutan nol

$$Z_{0eq} = Z_{t0} + 3RN + Z_1 \text{ penyulang} \dots \dots \dots (2.21)$$

Di mana :

Z_{0eq} = Impedansi ekivalen jaringan nol (ohm)

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

RN = Tahanan transformator tenaga (ohm)

Z_0 = Impedansi urutan nol (ohm)

2.7 Gangguan

Gangguan adalah suatu ketidaknormalan (interferes) dalam sistem tenaga listrik yang mengakibatkan mengalirnya arus yang tidak seimbang dalam sistem tiga fasa. Gangguan dapat juga didefinisikan sebagai setiap kesalahan dalam suatu rangkaian yang menyebabkan terganggunya aliran arus yang normal (Suhadi, 2008).

Gangguan dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kelompok, yaitu :

A. Berdasarkan kesimetrisannya

1. Gangguan asimetris, merupakan gangguan yang mengakibatkan tegangan dan arus yang mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang, 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 fasa dan fasa antar kedua 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 sehingga arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Gangguan ini terdiri dari:

- Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa, yakni gangguan yang terjadi ketika ketiga fasa saling terhubung singkat
2. Gangguan simetris, merupakan gangguan yang terjadi pada semua fasanya sehingga arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Gangguan ini terdiri dari:
- Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa, yakni gangguan yang terjadi ketika ketiga fasa saling terhubung singkat
 - Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah, yakni gangguan yang terjadi ketika ketiga fasa terhubung singkat ke tanah.

Gangguan hubung singkat dapat didefinisikan sebagai gangguan yang terjadi akibat adanya penurunan kekuatan dasar isolasi antara sesama kawat fasa dengan tanah yang menyebabkan kenaikan arus secara berlebihan. Analisis gangguan hubung singkat diperlukan untuk mempelajari sistem tenaga listrik baik waktu perencanaan maupun setelah beroperasi.

2.7.1 Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa

Rumus dasar yang digunakan untuk menghitung besarnya arus gangguan hubung singkat 3 fasa adalah :

$$I = \frac{V}{Z} \dots\dots\dots (2.22)$$

Sehingga arus gangguan hubung singkat 3 fasa dapat dihitung sebagai berikut dengan persamaan :

$$I_{3\text{fasa}} = \frac{V_{\text{ph}}}{Z_{1\text{eq}}} \dots\dots\dots (2.23)$$

2.7.1 Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa

Rumus dasar yang digunakan untuk menghitung besarnya arus gangguan hubung singkat 2 fasa adalah :

$$I = \frac{V}{Z} \dots\dots\dots (2.24)$$



Sehingga arus gangguan hubung singkat 2 fasa dapat dihitung sebagai berikut dengan persamaan :

$$I_{2\text{fasa}} = \frac{V_{\text{ph-ph}}}{2 \times Z_{1\text{eq}}} \dots\dots\dots (2.25)$$

2.7.2 Gangguan Hubung Singkat 1 Fasa ke Tanah

Pada gangguan satu fasa ke tanah misal fasa A mengalami gangguan akan menyebabkan kenaikan arus pada fasa A dan drop tegangan di fasa A (menjadi nol) sedangkan arus pada fasa yang lain menjadi nol yang diikuti dengan kenaikan tegangan fasa yang lain. Sehingga arus gangguan hubung singkat 1 Fasa ke tanah dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$I_{1\text{fasa}} = \frac{3 \times V_{\text{ph}}}{2 \times Z_{1\text{eq}} + Z_{0\text{eq}}} \dots\dots\dots (2.26)$$