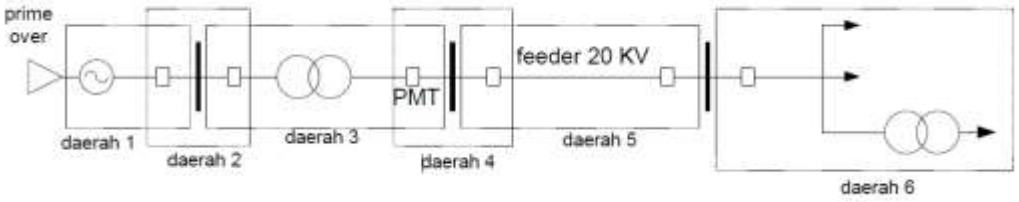
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Dasar Sistem Proteksi

Suatu sistem t`enaga listrik dibagi ke dalam seksi-seksi yang dibatasi oleh PMT. Tiap seksi memiliki relai pengaman dan memiliki daerah pengamanan (*Zone of Protektion*). Bila terjadi gangguan, maka relai akan bekerja mendeteksi gangguan dan PMT akan trip. Gambar 2.1 berikut ini dapat menjelaskan tentang konsep pembagian daerah proteksi.



Gambar 2.1. Pembagian daerah proteksi pada sistem tenaga

Pada gambar 2.1 di atas dapat dilihat bahwa daerah proteksi pada sistem tenaga listrik dibuat bertingkat dimulai dari pembangkitan , gardu induk, saluran distribusi primer sampai ke beban. Garis putus-putus menunjukkan pembagian sistem tenaga listrik ke dalam beberapa daerah proteksi. Masing-masing daerah memiliki satu atau beberapa komponen sistem daya disamping dua buah pemutus rangkaian. Setiap pemutus dimasukkan ke dalam dua daerah proteksi berdekatan. Batas setiap daerah menunjukkan bagian sistem yang bertanggung jawab untuk memisahkan gangguan yang terjadi di daerah tersebut dengan sistem lainnya. Aspek penting lain yang harus diperhatikan dalam pembagian daerah proteksi adalah bahwa daerah yang saling berdekatan harus saling tumpang tindih (*overlap*), hal ini dimaksudkan agar tidak ada sistem yang dibiarkan tanpa perlindungan. Pembagian daerah proteksi ini bertujuan agar daerah yang tidak mengalami gangguan tetap dapat beroperasi dengan baik sehingga dapat

mengurangi daerah terjadinya pemadaman. Berdasarkan daerah pengamanannya sistem proteksi dibedakan menjadi :

- Proteksi pada Generator
- Proteksi pada Transformator
- Proteksi pada Transmisi
- Proteksi pada Distribusi

Dalam sistem proteksi pembagian tugas dapat diuraikan menjadi :

a. Proteksi utama, berfungsi untuk mempertinggi keandalan, kecepatan kerja, dan fleksibilitas sistem proteksi dalam melakukan proteksi terhadap sistem tenaga.
b. Proteksi pengganti, Berfungsi jika proteksi utama menghadapi kerusakan untukmengatasi gangguan yang terjadi.
c. Proteksi tambahan, berfungsi untuk pemakaian pada waktu tertentu sebagai pembantu proteksi utama pada daerah tertentu yang dibutuhkan.

Seperangkat peralatan/ komponen proteksi utama berdasarkan fungsinya dapat dibedakan menjadi :

- Rele Proteksi
- Pemutus tenaga (PMT) : Sebagai pemutus arus untuk mengisolir sirkuit yang terganggu.
- Tranducer yang terdiri dari sumber daya pembantu
- Trafo Arus : Meneruskan arus ke sirkuit relai.
- Trafo Tegangan : Meneruskan tegangan ke sirkuit relai
- Baterai : sebagai sumber tenaga untuk mentripkan PMT dan catu daya untuk relai statis dan alat bantu.

Adapun fungsi dari sistem proteksi adalah:

- untuk menghindari atau mengurangi kerusakan peralatan Iistrik akibat adanya gangguan (kondisi abnormal). Semakin cepat reaksi perangkat proteksi yang

digunakan, maka akan semakin sedikitlah pengaruh gangguan terhadap kemungkinan kerusakan alat.

- untuk mempercepat melokaliser luas/zone daerah yang terganggu, sehingga daerah yang terganggu menjadi sekeciI mungkin.
- Untuk dapat memberikan pelayanan Iistrik dengan keandalan yang tinggi kepada konsumen, dan juga mutu listriknya baik.
- Untuk mengamankan manusia (terutama) terhadap bahaya yang ditimbulkan oleh Iistrik.

2.2 Persyaratan Sistem Proteksi

Syarat-syarat agar peralatan relay pengaman dapat dikatakan bekerja dengan baik dan benar adalah :

a) **Cepat bereaksi**

Relay harus dapat bekerja dengan kepekaan yang tinggi, artinya harus cukup sensitif terhadap gangguan didaerahnya meskipun gangguan tersebut minimum, selanjutnya memberikan jawaban / response .

Untuk relay arus-lebih hubung-singkat yang bertugas pula sebagai pengaman cadangan jauh bagi seksi berikutnya, relay itu harus dapat mendeteksi arus gangguan hubung singkat dua fasa yang terjadi diujung akhir seksi berikutnya dalam kondisi pembangkitan minimum. Sebagai pengaman peralatan seperti motor, generator atau trafo, relay yang peka dapat mendeteksi gangguan pada tingkatan yang masih dini sehingga dapat membatasi kerusakan. Bagi peralatan seperti tsb diatas hal ini sangat penting karena jika gangguan itu sampai merusak besi laminasi stator atau inti trafo, maka perbaikannya akan sangat sukar dan mahal.

Sebagai pengaman gangguan tanah pada SUTM, relay yang kurang peka menyebabkan banyak gangguan tanah, dalam bentuk sentuhan dengan pohon yang tertiup angin, yang tidak bisa terdeteksi. Akibatnya, busur apinya berlangsung

lama dan dapat menyambar ke fasa lain, maka relay hubung-singkat yang akan bekerja. Gangguan sedemikian bisa terjadi berulang kali di tempat yang sama yang dapat mengakibatkan kawat cepat putus. Sebaliknya, jika terlalu peka, relay akan terlalu sering trip untuk gangguan yang sangat kecil yang mungkin bisa hilang sendiri atau dapat diabaikan.

b) **Selektif**

Yang dimaksud dengan selektif disini adalah kecermatan pemilihan dalam mengadakan pengamanan, dimana haI ini menyangkut koordinasi pengamanan dari sistem secara keseluruhan. Untuk rnendapatkan keandalan yang tinggi, maka relay pengaman harus mempunyai kemampuan selektif yang baik. Dengan demikian, segala tindakannya akan tepat dan akibatnya gangguan dapat dieliminir menjadi sekecil mungkin.

c) **Andal / reliabiIity**

Keandalan relay dihitung dengan jumlah relay bekerja / mengamankan daerahnya terhadap jumlah gangguan yang terjadi. Keandalan relay dikatakan cukup baik bila mempunyai harga : 90 % - 99 %. Misal, dalam satu tahun terjadi gangguan sebanyak 25 X dan relay dapat bekerja dengan sempurna sebanyak 23 X, maka :

$$\text{keandaIan relay} = \frac{23}{25} \text{ x } 100\ \% = 92\ \%$$

Keandalan dapat di bagi 2 :

1) dependability : relay harus dapat diandalkan setiap saat.
2) security : tidak boleh salah kerja / tidak boleh bekerja yang bukan seharusnya bekerja.

d) Kecepatan (speed)

Untuk memperkecil kerugian/kerusakan akibat gangguan, maka bagian yang terganggu harus dipisahkan secepat mungkin dari bagian sistem lainnya. Waktu total pembebasan sistem dari gangguan adalah waktu sejak munculnya

gangguan, sampai bagian yang terganggu benar-benar terpisah dari bagian sistem lainnya.

Kecepatan itu penting untuk:

- Menghindari kerusakan secara thermis pada peralatan yang dilalui arus gangguan serta membatasi kerusakan pada alat yang terganggu.
- Mempertahankan kestabilan sistem
- Membatasi ionisasi (busur api) pada gangguan disaluran udara yang akan berarti memperbesar kemungkinan berhasilnya penutupan balik PMT (reclosing) dan mempersingkat dead timenya (interval waktu antara buka dan tutup).

Untuk menciptakan selektifitas yang baik, mungkin saja suatu pengaman terpaksa diberi waktu tunda (td) namun waktu tunda tersebut harus sesingkat mungkin (seperlunya saja) dengan memperhitungkan resikonya.

2.3 Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*)

Adalah suatu rangkaian peralatan rele pengaman yang memberikan respon terhadap kenaikan arus yang melebihi harga arus yang telah ditentukan pada rangkaian yang diamankan, sehingga bila terjadi gangguan maka pengaman proteksi pada relay arus lebih akan bekerja berdasarkan karakteristik operasinya.

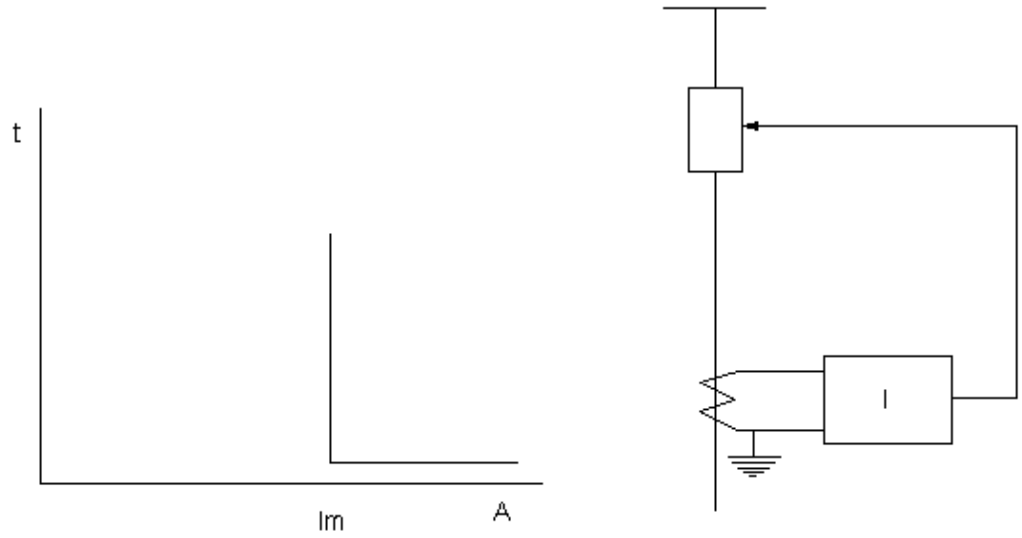
Keuntungan dari penggunaan proteksi rele arus lebih ini antara lain :

- Sederhana dan murah
- Mudah penyetelannya
- Dapat berfungsi sebagai pengaman utama dan cadangan
- Mengamankan gangguan hubung singkat antar fasa, satu fasa ke tanah, dan dalam beberapa hal digunakan untuk proteksi beban lebih (*overload*).
- Pengaman utama pada jaringan distribusi dan substransmisi
- Pengaman cadangan untuk generator, trafo, dan saluran transmisi.

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

1. **Rele Arus Lebih Sesaat/ Momen (*instantaneous overcurrent relay*)**

Relay ini akan memberikan perintah pada PMT pada saat terjadi gangguan bila besar arus gangguannya melampaui penyetelannya (Im), dan jangka waktu kerja relai mulai pik up samapai kerja relai sangat singkat tanpa penundaan waktu (20 – 60 mdet).

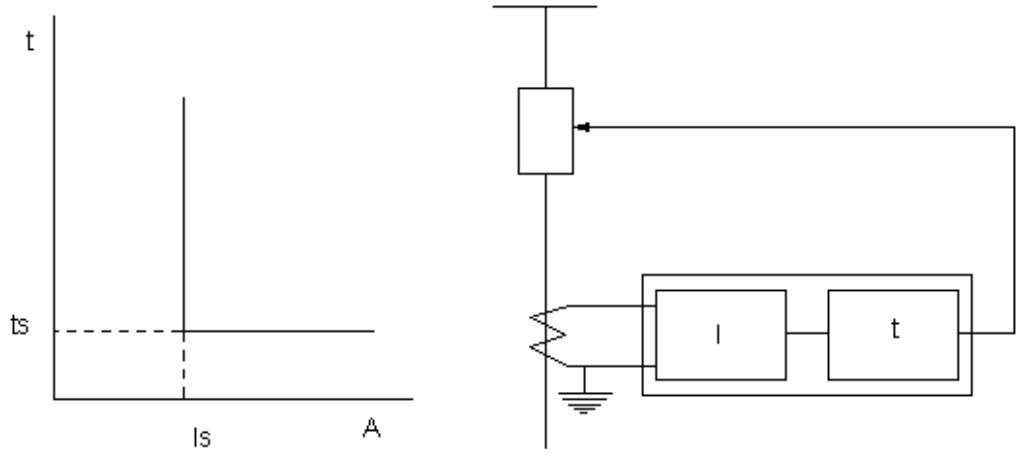


Gambar 2.2 Karakteristik Rele Arus Lebih Sesaat

2. Rele Arus Lebih Dengan Waktu Tunda (*time delay overcurrent*)

a. Rele Arus Lebih dengan Waktu Tertentu (*definite time*)

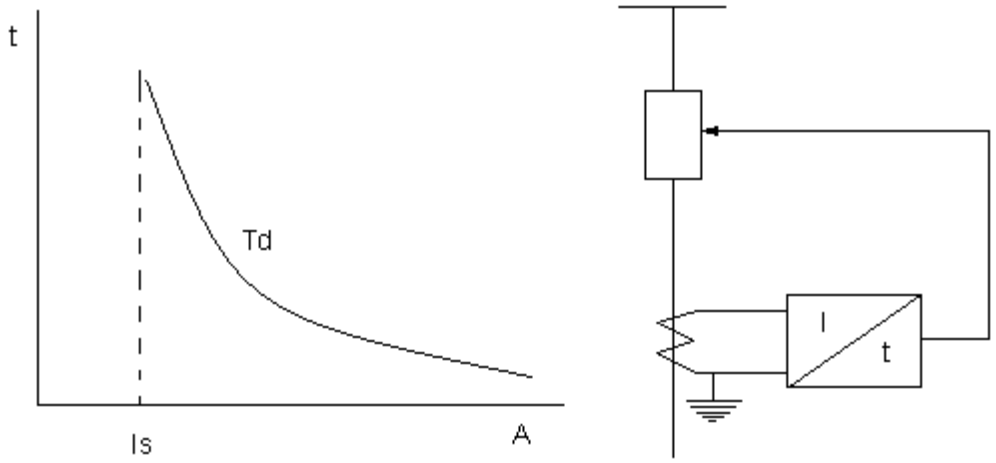
Relay ini akan memberikan perintah pada PMT pada saat terjadi gangguan bila besar arus gangguannya melampaui penyetelannya (I_S), dan jangka waktu kerja relai mulai pik up sampai kerja relai diperpanjang dengan waktu tertentu tidak tergantung besarnya arus lihat gambar 2.3.



Gambar 2.3 Karakteristik Rele Arus Lebih Definite Time

b. Rele Arus Lebih dengan Waktu Terbalik (*inverse time overcurrent relay*)

Relay ini akan memberikan perintah pada PMT pada saat terjadi gangguan bila besar arus gangguannya melampaui penyetelannya (I_S), dan jangka waktu kerja relai mulai pik up sampai kerja relay waktunya diperpanjang berbanding terbalik dengan besarnya arus.



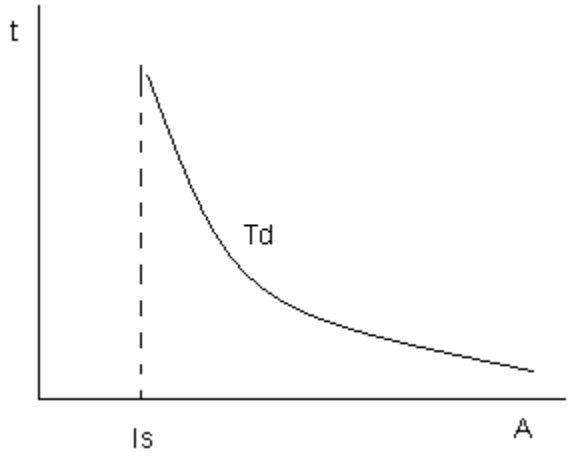
Gambar 2.4 Karakteristik Rele Arus Lebih Inverse Time

Pada jenis ini karakteristik kecuraman waktu arus dapat beragam dan berdasarkan standar BS 142 th dikelompokan menjadi :

- Normal inverse
- Very inverse
- Long inverse
- Definite time

c. Rele Arus Lebih Terbalik dan Terbatas Waktu Minimum (*inverse definiteminimum time* / IDMT)

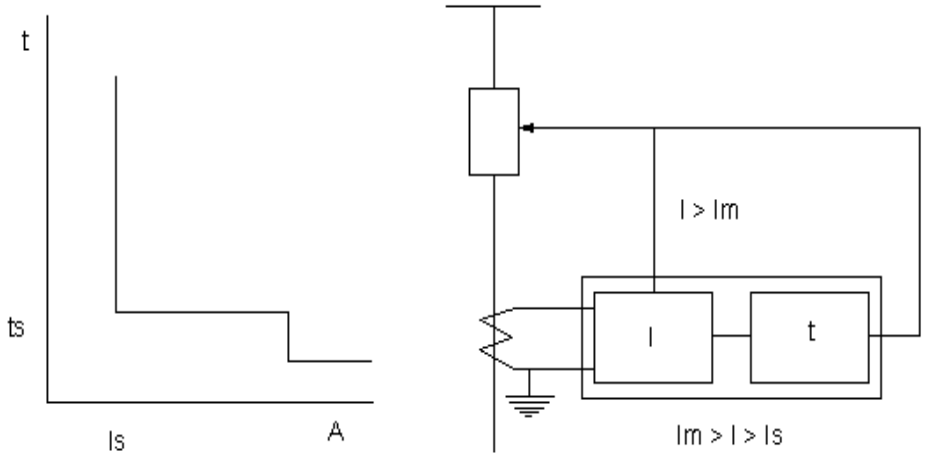
Relay arus lebih dengan karakteristik IDMT (Inverse Definite Minimum Time) mempunyai karakteristik kombinasi antara relay arus lebih waktu terbalik dan waktu tertentu. Didaerah awal seperti relay arus lebih waktu terbalik dan kemudian menjadi waktu tertentu.



Gambar 2.5 Karakteristik Rele Arus Lebih IDMT

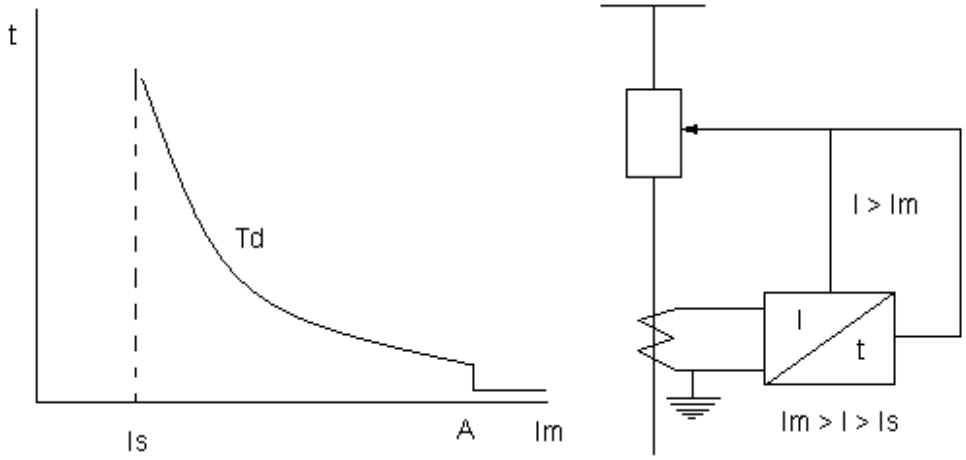
d. Kombinasi Relay Arus Lebih Waktu tertentu, Terbalik dan IDMT Dengan Waktu Seketika

Relay arus lebih waktu seketika umunya tidak berdiri sendiri tetapi digabung dengan relay arus lebih waktu tertentu atau waktu terbalik atau IDMT. Dalam hal ini bila arus yang melewati relay lebih dari arus seting *Is*, tetapi lebih kecil dari arus seting seketika *Im*, waktu kerjanya mengikuti karakteristik waktu tertentu, terbalik atau IDMT.

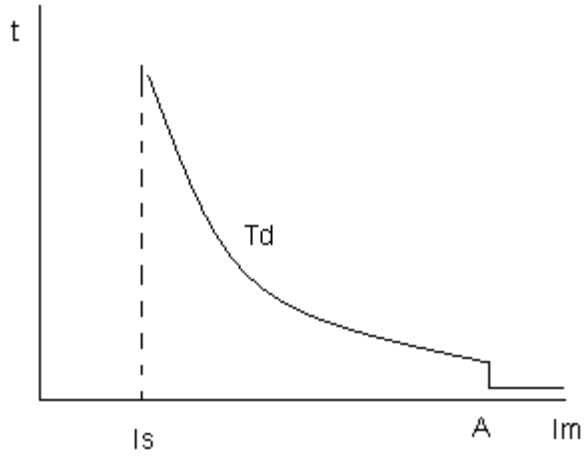


Gambar 2.6. Kombinasi Karakteristik Waktu Tertentu dan Seketika

Sedangkan bila arus yang melewati relai lebih besar dari arus seting seketika, relai akan bekerja seketika, masing – masing.



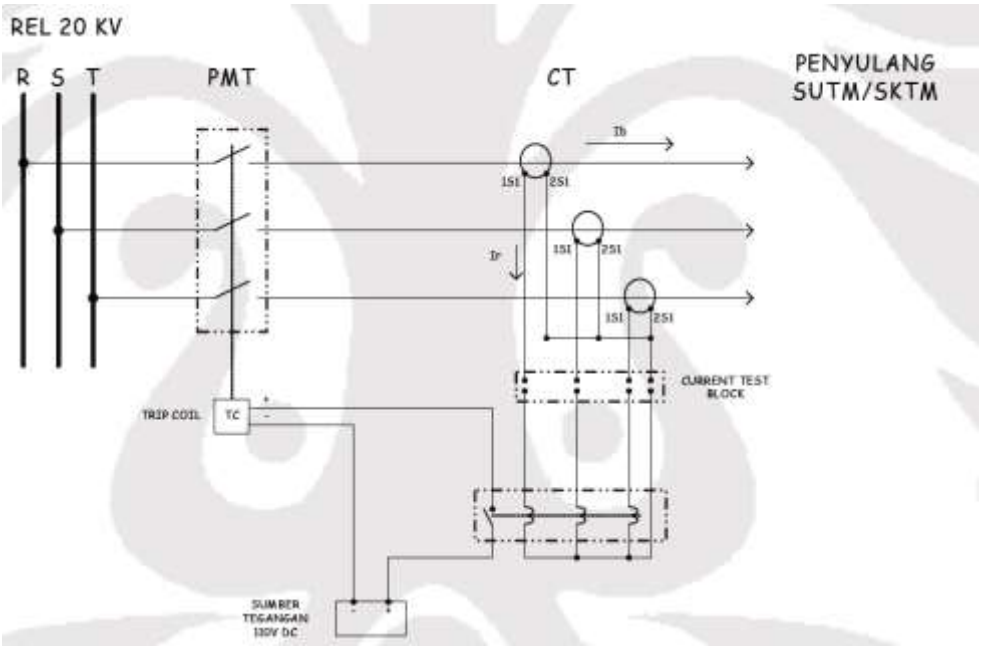
Gambar 2.7. Kombinasi Karakteristik Waktu Terbalik dan Seketika



Gambar 2.8. Kombinasi Karakteristik IDMT dan Seketika

2.3.1 Prinsip Kerja OCR

Prinsip kerja relay OCR adalah bedasarkan adanya arus lebih yang dirasakan relay, baik disebabkan adanya gangguan hubung singkat atau overload (beban lebih) untuk kemudian memberikan perintah trip ke PMT sesuai dengan karakteristik waktunya.



Gambar 2.9 Rangkaian pengawatan relai arus lebih

Cara kerjanya dapat diuraikan sebagai berikut :

- Pada kondisi normal arus beban (Ib) mengalir pada SUTM / SKTM dan oleh trafo arus besaran arus ini di transformasikan ke besaran sekunder (Ir). Arus (Ir) mengalir pada kumparan relai tetapi karena arus ini masih lebih kecil dari pada suatu harga yang ditetapkan (setting), maka relai tidak bekerja.
- Bila terjadi gangguan hubung singkat, arus (Ib) akan naik dan menyebabkan arus (Ir) naik pula, apabila arus (Ir) naik melebihi suatu harga yang telah ditetapkan (diatas setting), maka relai akan bekerja dan memberikan perintah trip pada tripping coil untuk bekerja dan membuka PMT, sehingga SUTM / SKTM yang terganggu dipisahkan dari jaringan.

2.3.2 Setting OCR

- Arus setting OCR

Penyetelan relay OCR pada sisi primer dan sisi sekunder transformator tenaga terlebih dahulu harus dihitung arus nominal transformator tenaga. Arus setting untuk relay OCR baik pada sisi primer maupun pada sisi sekunder transformator tenaga adalah[1]:

Iset (prim)= I set x Inominal trafo……(2.1)

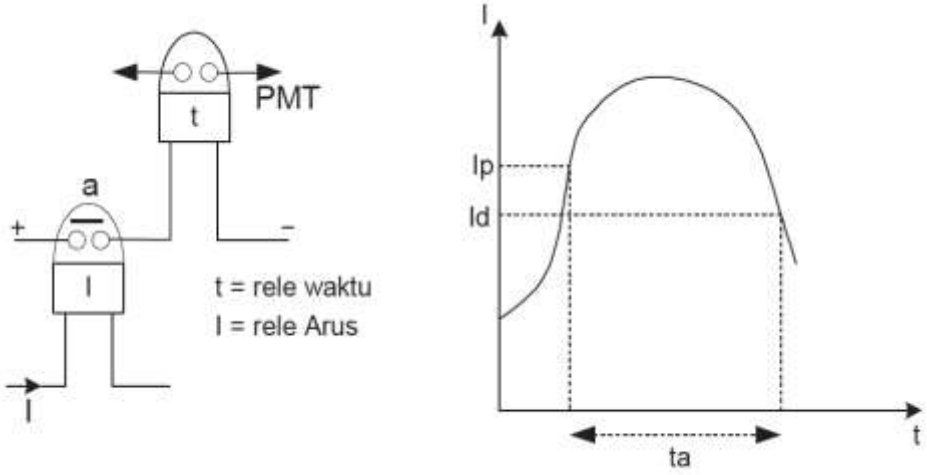
Nilai tersebut adalah nilai primer, Untuk mendapatkan nilai setelan sekunder yang dapat disetkan pada relay OCR, maka harus dihitung dengan menggunakan ratio trafo arus (CT) yang terpasang pada sisi primer maupun sisi sekunder transformator tenaga[2].

Iset (sek)= I set (prim) $x \frac{I}{ratioCT}$……(2.2)

[1] Affandi, Irfan. 2009. Analisa Setting Relai Arus Lebih dan Relai Gangguan Tanah Pada Penyulang Sadewa di GI Cawang. UI, Depok. Hal : 15

[2] Affandi, Irfan. 2009. Analisa Setting Relai Arus Lebih dan Relai Gangguan Tanah Pada Penyulang Sadewa di GI Cawang. UI, Depok. Hal : 15

Arus kerja atau arus pick up (Ip) adalah arus yang memerintahkan rele arus untuk bekerja dan menutup kontak a sehingga rele waktu bekerja. Sedangkan arus kembali atau drop off (Id) adalah nilai arus dimana rele arus berhenti bekerja dan kontak a kembali membuka., sehingga rele waktu berhenti bekerja.



Gambar 2.10 Arus Kerja dan Arus kembali (drop off)

Pada dasarnya penyetelan pengaman arus lebih dilakukan penyetelan atas besaran arus dan waktu. Batasan dalam penyetelan arus yang harus diperhatikan adalah :

→ Batas penyetelan minimum arus kerja yang tidak boleh bekerja pada saat arus beban maksimum[3].

$$Is = \frac{K_{FK}}{K_d} x I_{max} \quad \text{.....(2.3)}$$

→ Batas penyetelan maksimum arus kerja yang harus bekerja pada saat arus gangguan minimum.

$$Is \leq I_{hs2\emptyset}$$

Secara umum Batasan dalam penyetelan arus dapat dituliskan sebagai berikut :

[3] Affandi, Irfan. 2009. Analisa Setting Relai Arus Lebih dan Relai Gangguan Tanah Pada Penyulang Sadewa di GI Cawang. UI, Depok. Hal : 16

$$I_{max} < I_S < I_{hs\ min}$$

Dimana :

Is = Nilai setting arus

K_{FK} = Faktor keamanan (safety factor) sebesar 1,1 – 1,2

K_d = Faktor arus kembali

I_{max} = Arus beban maksimum yang diizinkan untuk alat yang diamankan, pada umumnya diambil arus nominalnya (In)

$I_{hs\ min}$ = $I_{hs\ (2\emptyset\ )min}$ pada pembangkitan minimum

Cara arus penyetelan :

$$I_S = \frac{K_{FK}}{K_d} \frac{1}{Ratio\ CT} x I_N \quad \text{.....(2.4)}$$

Dimana[4] :

a. Untuk arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu (*definite time*) nilai K_{FK} sebesar 1,1 – 1,2 dan K_d sebesar 0,8.
b. Untuk arus lebih dengan karakteristik waktu terbalik (*inverse time*) nilai K_{FK} sebesar 1,1 – 1,2 dan K_d sebesar 1,0.

2.3.3 Prinsip Dasar Perhitungan Penyetelan Waktu

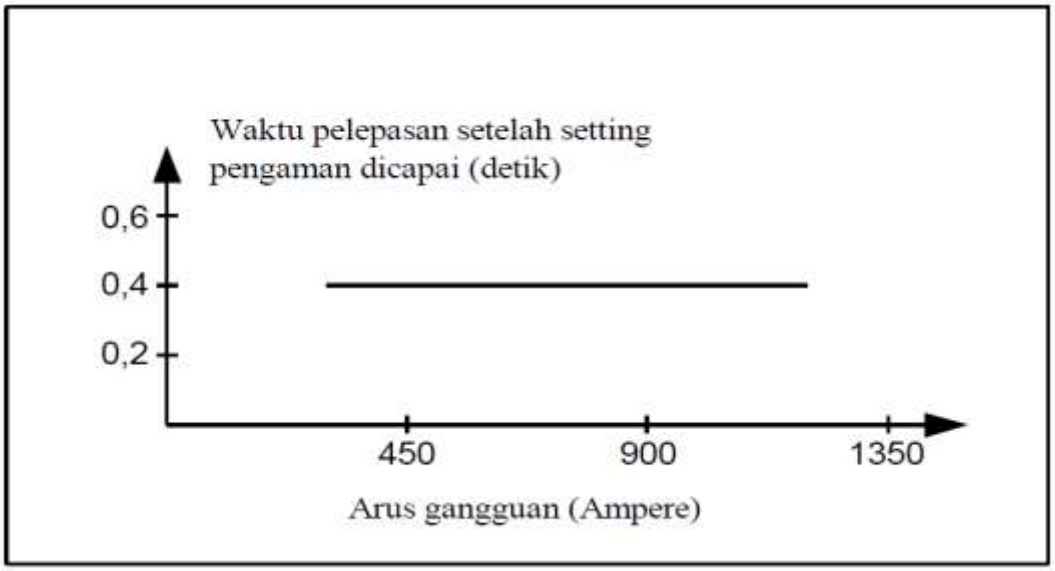
Untuk mendapatkan pengamanan yang selektif maka penyetelan waktunya dibuat bertingkat agar bila ada gangguan arus lebih di beberapa seksi rele arus akan bekerja.

Cara penyetelan waktu :

a. Rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu (*definite time*)

[4] Affandi, Irfan. 2009. Analisa Setting Relai Arus Lebih dan Relai Gangguan Tanah Pada Penyulang Sadewa di GI Cawang. UI, Depok. Hal : 17

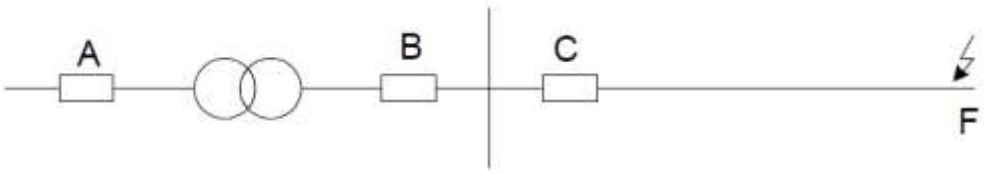
Untuk rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu, waktu kerjanya tidak dipengaruhi oleh besarnya arus. Biasanya, setting waktu kerja pada rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu adalah sebesar 0,2 - 0,4 detik.



Gambar 2.11 Karakteristik rele dengan waktu tetap

Dari gambar 2.8 di atas dapat diketahui kelambatan waktu rele selalu menunjukkan waktu yang tetap. Misalnya untuk kelebihan beban sebesar 450 Ampere, pelepasan beban baru dilaksanakan 0,4 detik kemudian.

b. Rele arus lebih dengan karakteristik waktu terbalik (*inverse time*)



Gambar 2.12 Gangguan pada sistem tenaga

Akibat gangguan di F, maka :

I_f di F > I_f di A > I_f di B > I_f di C

Sehingga rele arus di A, B, dan C akan pick up, dimana $t_A > t_B > t_C$.

Penyetelan waktu untuk karakteristik waktu terbalik dihitung berdasarkan besarnya arus gangguan dimana waktu (t) pada sisi penyulang ditentukan sebesar 0,2 - 0,4 detik. Dan untuk mendapatkan pengamanan yang baik, yang terpenting adalah menentukan beda waktu (Δ) antara dua tingkat pengaman agar pengamanan selektif tetapi waktu untuk keseluruhannya tetap singkat.

Jadi, waktu penyetelan arusnya dapat ditentukan sebagai berikut :

$t_C = t_1$

$t_B = t_1 + \Delta t$

$t_A = t_B + \Delta t$

Hal – hal yang mempengaruhi Δt adalah :

- Kesalahan rele waktu di C dan B adalah 0,2 detik
- Waktu pembukaan PMT sampai hilangnya bunga api 0,06 – 0,14 detik
- Faktor keamanan sebesar 0,05 detik
- Kelambatan rele arus lebih pembantu dan arus over travel 0,005 detik.

Sehingga nilai Δt ditentukan sebesar 0,4 – 0,5 detik dan untuk rele dengan ketelitian yang lebih nilai Δt ditentukan sebesar 0,2 – 0,4 detik.

Setelan waktu kerja standar inverse didapat dengan menggunakan kurva waktu dan arus. Secara matematis dapat ditentukan dengan rumus[5] :

$$tms = \frac{\left(\left(\frac{I_{fault}}{I_{set}}\right)^{\alpha} - 1\right)}{\beta} \quad \text{.....(2.5)}$$

[5] Affandi, Irfan. 2009. Analisa Setting Relai Arus Lebih dan Relai Gangguan Tanah Pada Penyulang Sadewa di GI Cawang. UI, Depok. Hal : 20

Dimana :

tms = factor pengali terhadap waktu

I_{fault} = Arus gangguan (Ampere)

Iset = Arus setting (Ampere)

t_{set} = Waktu setting (detik)

α dan β = konstanta

2.3.4 Penyetelan Pada Rele Schneider Sepam 1000

Untuk menyesuaikan perhitungan penyetelan rele arus lebih pada rele Sepam 1000 , maka persamaan untuk menyetel Iset adalah[6]:

$$t = \frac{tmsx\ \beta}{\left(\left(\frac{I_{fault}}{I_{set}}\right)^{\alpha} - 1\right)} \quad \text{.....(2.6)}$$

Dimana :

t_{set} = waktu setting

$\boldsymbol{\beta}$ = konstanta Invers (0.14)

I_{fault} = Arus gangguan (Ampere)

I set = Arus setting (Ampere)

α = 0.02

Gambar 2.13 Rele arus lebih Schneider Sepam 1000

[6] Schneider Electric. *Protection and Control Sepam Range Sepam 1000+ Substation, Transformer, Motor, Busbar.* (http://www.inlinerupa.com/Products/Power%20logic_1_files/p5.pdf). diakses pukul 09:00:21 WIB, 29 Juni 2014

Semua parameter yang siap dihitung kecuali Iset setting, dimana nilai arus akan mengaktifkan fungsi waktu arus lebih pada rele Sepam 1000, dan akan menggunakan rumus:

$$I_s = \frac{I}{0{,}02\sqrt{\frac{T.K}{t}+1}} \quad \text{.....(2.7)}$$

Di mana: Is = Arus penyetelan

I = Arus gangguan

T = TMS (Time multiple Setting)

K = 0,14

T = Waktu setting

2.4 Sistem satuan per unit

Satuan perunit untuk setiap harga didefinisikan sebagai nilai sebenarnya yang ada dari besaran tersebut dibagi dengan nilai dasar (nilai base) yang dipilih. Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\text{Sistem per unit (pu)} = \frac{Nilai\ sebenarnya\ terhadap\ besaran\ yang\ ditinjau}{Nilai\ dasar\ (base)\ besaran\ yang\ dipilih} \quad \text{.....(2.8)}$$

Dimana :

Base Arus (I_{base}) = $\frac{sbase}{\sqrt{3}V}$

Base Impedansi (Z_{base}) = $\frac{(KVbase)^2}{MVAbase}$

2.5 Gangguan Hubung Singkat

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

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

Semua gangguan hubungan singkat diatas, arus gangguannya dihitung dengan menggunakan rumus dasar yaitu :

$$I = \frac{V}{Z} \quad \text{.....(2.9)}$$

Dimana

I = Arus yang mengalir pada hambatan Z (A)

V = Tegangan sumber (V)

Z = Impedansi jaringan, nilai ekivalen dari seluruh impedansi di dalam jaringan dari sumber tegangan sampai titik gangguan (ohm).

Yang membedakan antara gangguan hubungan singkat tiga fasa, dua fasa dansatu fasa ke tanah adalah impedansi yang terbentuk sesuai dengan macam gangguan itu sendiri, dan tegangan yang memasok arus ke titik gangguan. Impedansi yang tebentuk dapat ditunjukan seperti berikut ini :

Z untuk gangguan tiga fasa, Z = z1

Z untuk gangguan dua fasa, Z = z1+ z2

Z untuk gangguan satu fasa, Z = z1+ z2+ z0 ..... (2.10)

Dimana:

z1= Impedansi urutan positif (ohm)

z2= Impedansi urutan negatif (ohm)

z0= Impedansi urutan nol (ohm)

2.5.1 Menghitung Impedansi

Dalam menghitung impedansi dikenal tiga macam impedansi urutan yaitu :

- Impedansi urutan positif (Z1), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan positif.
- Impedansi urutan negatif (Z2), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan negatif.
- Impedansi urutan nol (Z0), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh urutan nol.

Sebelum melakukan perhitungan arus hubung singkat, maka kita harus memulai belum 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.

Dimana :

Xs = Impedansi sumber (ohm)
Xt = Impedansi Transformator (ohm)

a) Impedansi sumber

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

$$Xsc = \frac{kV^2}{MVA_{sc}} \quad \text{.....(2.11)}$$

Dimana :

Xs = Impedansi sumber (ohm).
kV^2= Tegangan sisi primer trafo tenaga (kV).
MVA = Data hubung singkat di bus 70 kV (MVA).

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

Xs(sisi 20 kV) = $\frac{20^2}{70^2}$Xs(sisi 70 kV).....(2.12)

b) Impedansi transformator

Pada perhitungan impedansi suatu transformator yang diambil adalah harga reaktansinya, sedangkan tahanannya diabaikan karena harganya kecil. Untuk mencari nilai reaktansi trafo dalam Ohm dihitung dengan cara sebagai berikut

Langkah petama mencari nilai ohm pada 100% untuk trafo pada 20 kV, yaitu dengan menggunakan rumus :

Xt pada 100% = $\frac{kV^2}{MVA}$ .....(2.13)

Dimana :

Xt = Impedansi trafo tenaga (Ohm)

kV^2= Tegangan sisi sekunder trafo tenaga (kV)

MVA= Tapasitas daya trafo tenaga (MVA)

Lalu tahap selanjutnya yaitu mencari nilai reaktansi tenaganya :

- Untuk menghitung reaktansi urutan positif dan negatif (Xt1 = Xt2) dihitung dengan menggunakan rumus :

  Xt = % yang diketahui *x* Xt pada 100%

- Sebelum menghitung reaktansi urutan nol (Xt0) terlebih dahulu harus diketahui data trafo tenaga itu sendiri yaitu data dari kapasitas belitan delta yang ada dalam trafo :

1. Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan ∆Y dimana kapasitas belitan delta sama besar dengan kapasitas belitan Y, maka Xt0 = Xt1
2. Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan Yyd dimana kapasitas belitan delta (d) biasanya adalah sepertiga dari kapasitas belitan Y (belitan yang

dipakai untuk menyalurkan daya, sedangkan belitan delta tetap ada di dalam tetapi tidak dikeluarkan kecuali satu terminal delta untuk ditanahkan), maka nilai Xt0 = 3x Xt1

3. Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan YY dan tidak mempunyai belitan delta di dalamnya, maka untuk menghitung besarnya Xt0 berkisar antara 9 s/d 14 x Xt1

c) Impedansi penyulang

Untuk perhitungan impedansi penyulang, perhitungannya tergantung dari besarnya impedansi per km dari penyulang yang akan dihitung, dimana besar nilainya tergantung pada jenis penghantarnya, yaitu dari bahan apa penghantar tersebut dibuat dan juga tergantung dari besar kecilnya penampang dan panjang penghantarnya.

Disamping itu penghantar juga dipengaruhi perubahan temperatur dan konfigurasi dari penyulang juga sangat mempengaruhi besarnya impedansi penyulang tersebut. Contoh besarnya nilai impedansi suatu penyulang : Z = (R + jX) Sehingga untuk impedansi penyulang dapat ditentukan dengan menggunakan rumus :

- Urutan positif dan urutan negatif:

$Z_1 = Z_2$ = % panjang x panjang penyulang (km) x Z_1 / Z_2 (ohm).....(2.14)

Dimana :

Z1 = Impedansi urutan positif (ohm)

Z2 = Impedansi urutan negatif (ohm)

- Urutan nol

Zo = % panjang x panjang penyulang (km) x Zo (ohm).....(2.15)

Dimana :

Zo = Impedansi urutan nol (ohm)

D) Impedansi Ekivalen Jaringan

Perhitungan yang akan dilakukan di sini adalah perhitungan besarnya nilai impedansi ekivalen posifif, negatif dan nol dari titik gangguan sampai ke sumber. Karena dari sejak sumber ke titik gangguan impedansi yang terbentuk adalah tersambung seri maka perhitungan Z1eq dan Z2eq dapat langsung dengan cara menjumlahkan impedansi tersebut, sedangkan untuk perhitungan Z0eq dimulai dari titik gangguan sampai ke trafo tenaga yang netralnya ditanahkan. Akan tetapi untuk menghitung impedansi Z0eq ini, harus diketahui dulu hubungan belitan trafonya.

Sehingga untuk impedansi ekivalen jaringan dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

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

  $Z_{1eq} = Z_{2eq} = Zs_1 + Zt_1 + Z_1$penyulang).....(2.16)

  Dimana :

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

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

  Zs_1 = Impedansi sumber sisi 20 kV (ohm)

  Zt_1 = Impedansi trafo tenaga urutan positif dan negatif (ohm)

  Z_1 = Impedansi urutan positif dan negatif (ohm)

- Urutan nol $Z_0eq = Zt_0 + 3RN +$ Zpenyulang.....(2.17)

  Dimana :

  Z_0eq = Impedansi ekivalen jaringan nol (ohm).

  Zt_0 = Impedansi trafo tenaga urutan nol (ohm).

  RN = Tahanan tanah trafo tenaga (ohm).

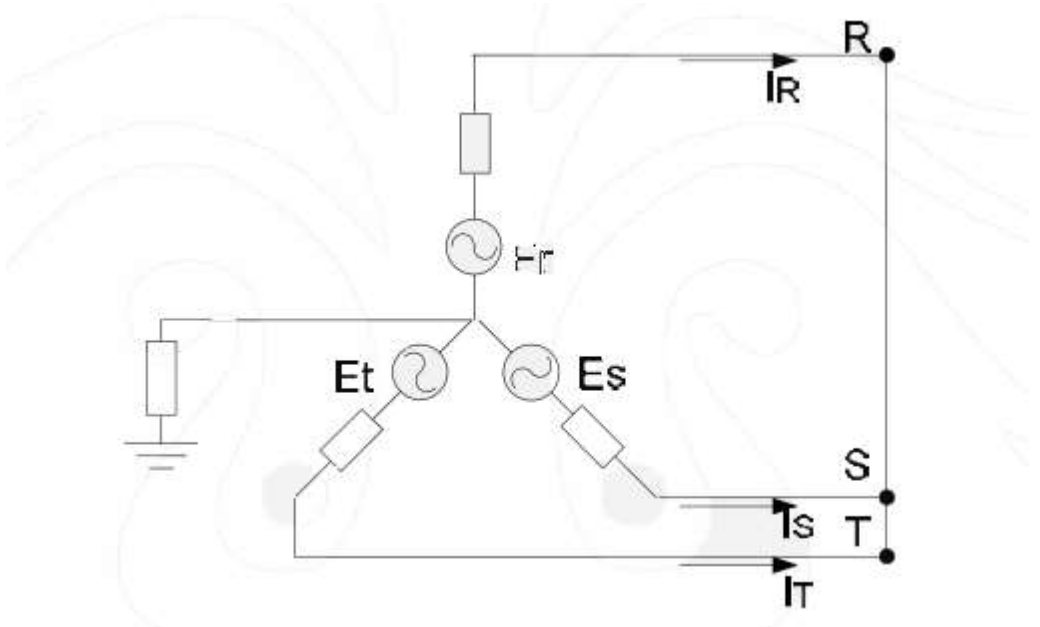
  Zo = Impedansi urutan nol (ohm).

2.5.2 Menghitung Arus Gangguan Hubung Singkat

Perhitungan arus gangguan hubung singkat dapat dihitung dengan menggunakan rumus dasar, impedansi ekivalen mana yang dimasukkan ke dalam rumus dasar tersebut adalah jenis gangguan hubung singkat tiga fasa, dua fasa, atau satu fasa ke tanah. Sehingga formula yang digunakan untuk perhitungan arus hubung singkat tiga fasa, dua fasa, dan satu fasa ketanah berbeda.

a) Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Rangkaian gangguan tiga fasa pada suatu jaringan dengan hubungan transformator tenaga YY dengan netral ditanahkan melalui suatu tahanan.



Gambar 2.13 Gangguan hubung singkat 3 fasa

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

$$I = \frac{V}{Z} \text{.....(2.18)}$$

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

$$I_{3fasa} = \frac{V_{ph}}{z_{1eq}} \text{.....(2.19)}$$

Dimana :

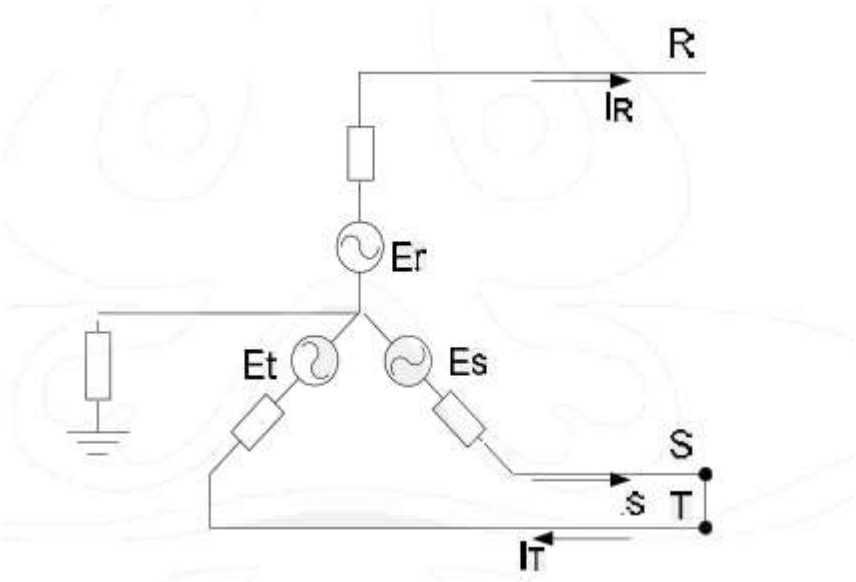
I_{3fasa} = Arus gangguan hubung singkat tiga fasa (A)

V_{ph} = Tegangan fasa - netral sistem 20kV = $\frac{20000}{\sqrt{3}}\ V$

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

b) Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa

Gangguan hubung singkat 2 fasa pada saluran tenaga dengan hubungan transformator YY dengan netral ditanahkan melalui RNGR., yang ditunjukan pada gambar 2.14



Gambar 2.14 Gangguan hubung singkat 2 fasa

Persamaan pada kondisi gangguan hubung singkat 2 fasa ini adalah :

VS= VT

IR= 0

IS= - IT

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

$$I = \frac{V}{Z} \quad \text{.....(2.20)}$$

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

$$I_{2fasa} = \frac{V_{ph-ph}}{Z_{1eq}+Z_{2eq}} \quad \text{.....(2.21)}$$

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

$$I_{2fasa} = \frac{V_{ph-ph}}{2xZ_{1eq}} \quad \text{.....(2.22)}$$

Dimana :

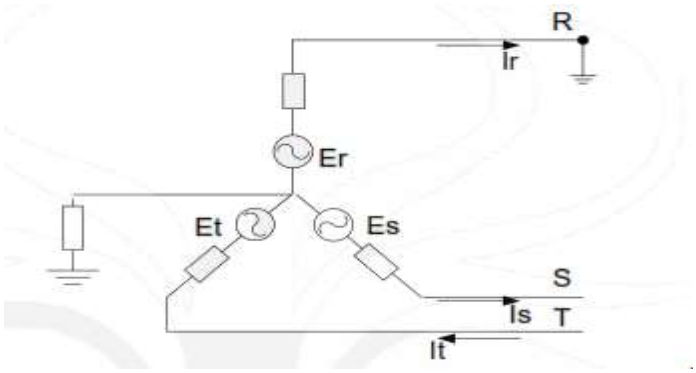
$I_{2\ fasa}$=Arus gangguan hubung singkat dua fasa (A)

$V_{ph\text{-}ph}$ = Tegangan fasa - fasa sistem 20 kV= $\frac{20000}{\sqrt{3}}\ V$

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

c) Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah

Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah pada saluran tenaga dengan hubungan transformator YY dengan netral ditanahkan melalui RNGR, ditunjukan pada gambar 2.15



Gambar 2.15 Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah

Persamaan pada kondisi gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah ini adalah:

VT= 0

IS= 0

IT= 0

Rumus dasar yang digunakan untuk menghitung besarnya arus gangguan hubung singkat 1 fasa:

$I = \frac{V}{Z}$ .....(2.23)

Sehingga arus hubung singkat 1 fasa ke tanah dapat dihitung dengan rumus:

$I_{1fasa} = \frac{3xV_{ph}}{Z_{1eq}+Z_{2eq}+Z_{3eq}}$ .....(2.24)

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

$I_{1fasa} = \frac{3xV_{ph}}{2Z_{1eq}+Z_{0eq}}$ .....(2.25)

Dimana :

I_{1fasa} = Arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah (A)

V_{ph} = Tegangan fasa - netral sistem 20 kV= $\frac{20000}{\sqrt{3}}\ V$

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

Z_{oeq} = Impedansi urutan nol (ohm)