

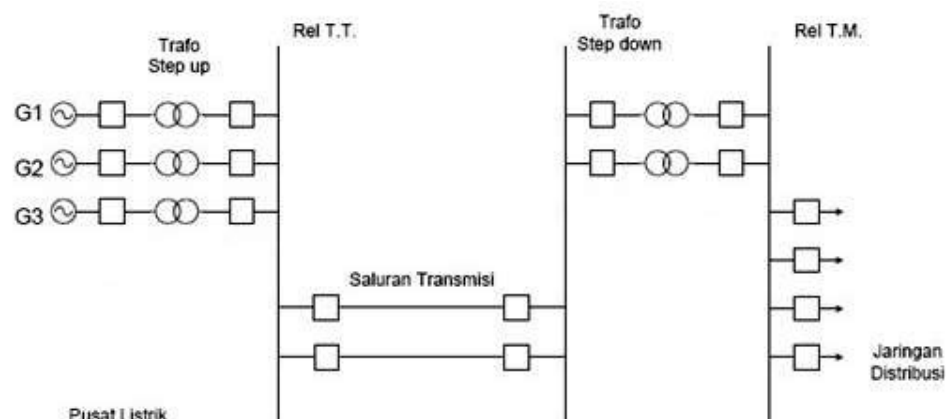
BAB.II

LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Pada dasarnya dalam sistem tenaga listrik, dikenal tiga bagian utama seperti pada gambar 2.1 yaitu :

- a. Sistem pembangkitan yaitu merupakan tempat dimana terdapat mesin –mesin yang membangkitkan tenaga listrik, dilengkapi dengan gardu induk penaik tegangan di mana tegangan rendah yang dihasilkan generator dinaikan menjadi tegangan tertentu.
- b. Sistem transmisi yaitu menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk pusat pembangkit ke gardu induk yang lain dengan jarak yang jauh.
- c. Sistem distribusi yaitu mendistribusikan tenaga listrik dari pusat suplai (gardu induk) ke kelompok beban (gardu distribusi) dan konsumen dengan mutu tegangan yang sesuai standar yang ditetapkan .



Gambar 2.1 Sistem tenaga listrik

Sumber : Pengantar teknologi SCADA (hal.2)

2.2 Gangguan Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik meliputi generator, transformator, saluran transmisi, saluran distribusi, dan beban. Hampir dua pertiga gangguan terjadi pada saluran daya (saluran transmisi dan distribusi). Hal ini dapat dimengerti karena saluran memiliki banyak cabang, panjang, dan bekerja dalam kondisi cuaca yang bervariasi, serta akibat berbagai faktor lainnya.

Sebaik apapun suatu sistem tenaga listrik dirancang, gangguan pasti dapat terjadi pada sistem tenaga tersebut. Gangguan ini dapat merusak peralatan sistem tenaga sehingga kerja sistem tenaga menjadi terganggu dan dapat menyebabkan gagalnya penyaluran daya ke konsumen.

Berdasarkan sumber gangguan, gangguan pada sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi dua, yaitu :

a) Gangguan *internal*

Sumber gangguan berasal dari dalam sistem. Penyebabnya dapat berupa :

- Penuaan peralatan
- Penentuan parameter proteksi yang kurang baik
- Tegangan dan arus *abnormal*

b) Gangguan *eksternal*

Sumber gangguan berasal dari luar sistem. Penyebabnya dapat berupa :

- Kesalahan manusia dalam mengoperasikan sistem tenaga
- Pengaruh cuaca seperti hujan, angin, serta surja petir
- Pengaruh lingkungan seperti pohon, binatang dan lain-lain.

Bila ditinjau dari segi lamanya waktu gangguan, maka dapat dikelompokkan menjadi :

- a. Gangguan yang bersifat temporer

Gangguan yang dapat hilang dengan sendirinya atau dengan memutuskan sesaat bagian yang terganggu dari sumber tegangannya. Gangguan sementara jika tidak dapat hilang dengan segera dapat berubah menjadi gangguan permanen.

- b. Gangguan yang bersifat permanen,

Dimana untuk membebaskannya diperlukan tindakan perbaikan atau menyingkirkan penyebab gangguan tersebut.

2.2.1 Penyebab Terjadinya Gangguan

Berdasarkan penyebab gangguan, gangguan pada sistem tenaga listrik seperti pada gambar 2.2 dapat dikelompokkan :

- a. Tegangan lebih (*over voltage*)

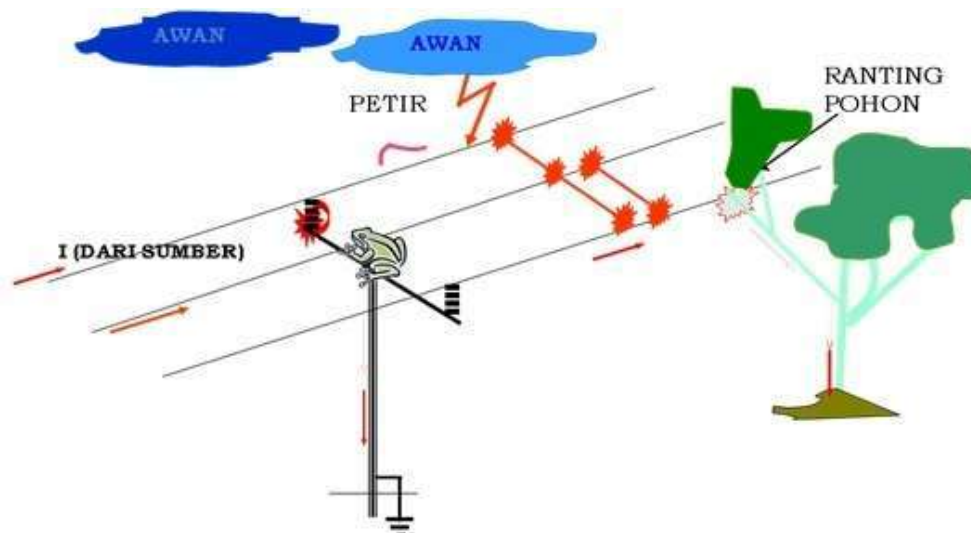
Suatu gangguan akibat tegangan pada sistem tenaga listrik lebih besar dari seharusnya. Umumnya diakibatkan oleh adanya sambaran petir. Perubahan arus yang sangat cepat dan faktor induktansi dari saluran menyebabkan timbulnya tegangan pada saluran. Penambahan tegangan ini dapat mengakibatkan tegangan pada sistem naik melampaui BIL (*Basic Impuls Level*) dari peralatan sistem sehingga dapat merusak peralatan tersebut (Kurniawan,A.P.2007:10-11).

- b. Arus lebih (*over current*)

Gangguan arus lebih ditandai dengan terjadinya kenaikan arus melebihi arus beban maksimum. Arus lebih terbagi menjadi arus beban lebih dan arus hubung singkat. Arus beban lebih terjadi akibat penambahan beban yang akan menyebabkan arus mengalir melebihi arus beban maksimum. Kenaikan arus beban lebih ini tidak terlalu besar (normal) sehingga sistem masih bisa bertahan untuk selang waktu yang cukup lama. Sedangkan arus hubung singkat adalah

terjadinya hubungan penghantar bertegangan maupun tidak bertegangan sehingga mengalir arus sangat besar (tidak normal/*abnormal*). Arus hubung singkat yang begitu besar membahayakan peralatan, sehingga perlu diputuskan dengan peralatan pemutus tenaga (PMT). Gangguan hubung singkat yang sering terjadi yaitu :

- 1) Hubung singkat satu fase ke tanah
- 2) Hubung singkat dua fase
- 3) Hubung singkat tiga fase



Gambar 2.2 Skema penyebab gangguan

Sumber : Wahyudi.SN & Pribadi.K (slide.8)

2.2.2 Jenis-jenis Gangguan Hubung Singkat

a) Hubung singkat satu fase ke tanah

Hubung singkat satu fase ke tanah adalah gangguan hubung singkat yang terjadi karena *flashover* antara penghantar fase dan tanah (tiang travers atau kawat tanah pada SUTM). Gangguan ini bersifat temporer, tidak ada kerusakan yang permanen di titik gangguan. Pada gangguan yang tembusnya (*breakdown*) adalah isolasi udaranya. Setelah arus gangguannya terputus, misalnya karena terbukanya *circuit breaker* oleh relai pengamannya, peralatan atau saluran yang terganggu tersebut siap dioperasikan kembali. Jika terjadi gangguan satu fase ke tanah arus gangguannya hampir selalu lebih kecil daripada arus hubung singkat tiga fase.

b) Hubung singkat dua fase

Hubung singkat dua fase adalah hubung singkat yang terjadi karena bersentuhannya antara penghantar fase dengan satu penghantar fase lainnya sehingga terjadi arus lebih (*over current*). Gangguan ini dapat diakibatkan oleh *flashover* dengan pohon-pohon yang tertiup oleh angin. Jika terjadi gangguan hubung singkat dua fase, arus hubung singkatnya lebih kecil dari arus hubung singkat tiga fase.

c) Hubung singkat tiga fase

Hubung singkat tiga fase adalah gangguan hubung singkat yang terjadi karena bersatunya ketiga penghantar fase. Gangguan ini dapat diakibatkan oleh tumbang pohon kemudian menimpa kabel jaringan.

Semua gangguan hubung singkat di atas, arus gangguannya dihitung dengan menggunakan rumus dasar (hukum ohm) yaitu :

$$I = \frac{V}{Z} \dots\dots\dots(2.1)$$

Di mana :

I = arus yang mengalir pada hambatan Z (amper)

V = tegangan sumber (volt)

Z = impedansi jaringan, nilai ekivalen dari seluruh impedansi didalam jaringan dari sumber tegangan sampai titik gangguan (ohm)

Yang membedakan antara gangguan hubung singkat satu fase ke tanah, dua fase dan tiga fase adalah impedansi yang terbentuk sesuai dengan macam gangguan itu sendiri, dan tegangan yang memasok arus ke titik gangguan. Impedansi yang terbentuk dapat ditunjukkan seperti berikut ini :

Z untuk gangguan satu fase ke tanah, $Z = Z_1 + Z_2 + Z_0$

Z untuk gangguan dua fase, $Z = Z_1 + Z_2$

Z untuk gangguan tiga fase, $Z = Z_1 \dots\dots\dots(2.2)$

Di mana :

Z_1 = impedansi urutan positif (ohm)

Z_2 = impedansi urutan negatif (ohm)

Z_0 = impedansi urutan nol (ohm)

2.3 Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat

Perhitungan arus gangguan hubung singkat adalah analisa suatu sistem tenaga listrik pada keadaan gangguan hubung singkat, di mana nantinya akan diperoleh besar nilai besaran-besaran listrik yang dihasilkan dari gangguan

tersebut. Di dalam sistem tenaga listrik parameter-parameter yang digunakan banyak dalam bentuk bilangan kompleks (ada bagian riil dan bagian imajiner), oleh sebab itu diperlukan penyamaan satuan dari parameter yang akan dihitung.

Penyamaan satuan parameter biasa digunakan adalah per unit (pu). Sehingga nilai impedansi, tegangan dan arus diubah ke satuan per unit pada suatu dasar yang ditetapkan. Biasanya dasar perhitungan untuk mendapatkan satuan per unit yang ditetapkan terlebih dahulu adalah MVA_{dasar} dan kV_{dasar} , dan selanjutnya dihitung impedansi dasar (Z_{dasar}) dan impedansi per unit (Z_{pu}).

Dasar perhitungan yang digunakan adalah sebagai berikut :

- MVA_{dasar} = dipilih (MVA)
- KV_{dasar} = dipilih (kV)

Dari dua dasar ini dapat dibentuk dasar selanjutnya, yaitu :

- Arus dasar (I_{dasar}) = $\frac{kVA \text{ dasar}}{\sqrt{3}kV \text{ dasar}}$ (amper)(2.3)

- Impedansi dasar (Z_{dasar}) = $\frac{(kV \text{ dasar})^2}{MVA \text{ dasar}}$ (ohm)(2.4)

- Impedansi perunit elemen rangkaian (Z_{pu}) = $\frac{Z \text{ sebenarnya } ,\Omega}{Z \text{ dasar } ,\Omega}$ (pu).....(2.5)

- $Z_{\text{pu}} \text{ baru} = Z_{\text{pu}}(\text{awal}) \times \frac{MVA \text{ dasar}}{MVA} \times \left[\frac{kV}{kV \text{ dasar}} \right]^2$ (pu).....(2.6)

Beberapa keuntungan penggunaan satuan per unit (Pandjaitan,Bonar.2012:27-28)

dapat diuraikan sebagai berikut :

- 1) Impedansi ekuivalen per unit setiap trafo adalah sama dilihat dari sisi primer maupun sisi sekunder,

- 2) Impedansi trafo pada sistem tiga fase adalah sama, tanpa perlu memperhatikan jenis hubungan trafo, misalnya pada hubungan Y-Y, delta-wai, wai-delta atau delta-delta,
- 3) Satuan per unit tidak tergantung pada perubahan tegangan dan pergeseran sudut fase karena melalui trafo dan tegangan dasar dalam kumparan adalah sesuai dengan jumlah belitan dalam kumparan,
- 4) Pabrikan biasanya menentukan impedansi *equipment* dalam per unit atau persen pada daya dasar (MVA) atau tegangan dasar (kV) sehingga *rating* impedansi dapat digunakan langsung bila harga dasar yang digunakan sama dengan harga dasar yang tertera di plat nama perangkat tersebut,
- 5) Impedansi per unit dari berbagai *rating* peralatan yang berbeda-beda berada dalam skala yang sempit, sementara pada nilai impedansi aktualnya mereka dapat saling berbeda jauh,
- 6) Dengan demikian bila nilai aktualnya tidak diketahui maka harga pendekatan yang disesuaikan dapat ditentukan. Harga-harga tipikal untuk berbagai jenis *equipment* selalu tersedia yang bisa diperoleh dari berbagai sumber dan buku referensi. Demikian pula kebenaran satuan yang ditentukan dapat diperiksa jika harga-harga tipikalnya diketahui,
- 7) Dengan menggunakan satuan per unit maka kebingungan antara daya sistem satu fase dengan daya sistem tiga fase akan berkurang. Demikian kesulitan dalam hal konversi antara tegangan kawat-kawat dan tegangan kawat netral akan menjadi lebih sederhana,
- 8) Satuan per unit sangat berguna dalam simulasi analisis sistem *steady state* dan dalam analisis keadaan transien sistem tenaga,

- 9) Dalam perhitungan gangguan maupun perhitungan tegangan sumber atau tegangan *driving*, biasanya diasumsikan sama dengan 1.0 pu,
- 10) Hasil perkalian antara dua besaran dalam unit tetap mempunyai dimensi yang sama, sementara agar satuan dari perkalian dua besaran dalam persen tetap dalam persen maka hasil perkalian tersebut harus dibagi dengan seratus (100),
- 11) Itulah sebabnya dalam berbagai perhitungan lebih disukai menggunakan satuan per unit ketimbang persen,
- 12) Representasi data suatu sistem tenaga listrik dalam satuan unit lebih mudah diartikan dibandingkan representasi data konvensional karena pada sistem tenaga yang sama dapat dibandingkan langsung .

2.3.1 Menghitung Impedansi

Sebelum melakukan perhitungan, kita harus memulai perhitungan pada rel (*busbar*) daya tegangan primer, kemudian menghitung pada titik-titik lainnya yang letaknya semakin jauh dari sumber tegangan yaitu impedansi peralatan, dan impedansi saluran.

a) Impedansi generator

Harga impedansi generator biasanya dicantumkan oleh pabrik pembuat dan biasanya dinyatakan dalam per unit pada MVA_{dasar} yang biasanya sama dengan nilai rating generator tersebut. Jika pabrik tidak mencantumkan harga tersebut, harga satuan per unit biasanya berada pada kisaran yang cukup masuk akal untuk dapat memperkirakan besaran-besaran tersebut untuk dapat digunakan pada studi sistem tenaga listrik. Prinsipnya impedansi generator adalah sangat dominan induktif

(reaktansi). Sementara tahanan generator adalah relatif kecil (Pandjaitan, Bonar.2012:34-35). Maka reaktansi generator per unit dapat diperoleh dari persamaan 2.6 sebagai berikut :

$$jX_G = jX_G(\%) \times \frac{MVA_{dasar}}{MVA} \times \left[\frac{kV}{kV_{dasar}} \right]^2 \text{ (pu)} \dots \dots \dots (2.7)$$

Di mana :

- jX_G = reaktansi generator (pu)
- $jX_G(\%)$ = reaktansi generator awal (%)
- MVA = MVA pada name plate (MVA)
- kV = kV pada name plate (kV)

b) Impedansi transformator

Harga impedansi transformator biasanya dicantumkan oleh pabrik pembuat dan biasanya dinyatakan dalam per unit atau persen (%). Impedansi transformator sangat dominan induktif (reaktansi). Sementara tahanan transformator adalah relatif kecil. Pada perhitungan studi ini tegangan pada sisi sekunder trafo adalah samadengan tegangan dasar (20 kV) maka reaktansi per unit dapat diperoleh dari persamaan 2.6 sebagai berikut :

$$jX_T = jX_T(\%) \times \frac{MVA_{dasar}}{MVA} \text{ (pu)} \dots \dots \dots (2.8)$$

Di mana :

- jX_T = reaktansi transformator (pu)
- $jX_T(\%)$ = reaktansi transformator awal (%)
- MVA = MVA pada name plate (MVA)

c) Impedansi saluran

Impedansi saluran penghantar udara terdiri dari resistansi (R), reaktansi induktif (X_L) dan reaktansi kapasitif (X_C), namun dalam studi gangguan reaktansi kapasitif diabaikan karena pengaruhnya terhadap kontribusi arus gangguan tidak begitu besar. Resistansi (R) adalah penyebab terpenting dari rugi daya (*power loss*) pada saluran. Pada saluran interkoneksi tidak memikul beban sehingga nilai resistansi relatif kecil. Reaktansi induktif (X_L) suatu kawat penghantar dalam kebanyakan hal tergantung pada karakteristik kawat penghantar dan jarak fisis antara kawat-kawat penghantar. Nilai resistansi dan reaktansi setiap kawat penghantar biasanya disajikan pada tabel karakteristik penghantar yang dikeluarkan oleh pabrik pembuat (Pandjaitan, Bonar. 2012:36-37). Karena saluran interkoneksi nilai resistansi relatif kecil maka reaktansi saluran per unit dapat dihitung menggunakan persamaan 2.5 sebagai berikut :

$$jX_{sal} = \frac{Z_{sebenarnya, \Omega}}{Z_{das}} \text{ (pu)} \dots \dots \dots (2.9)$$

Di mana :

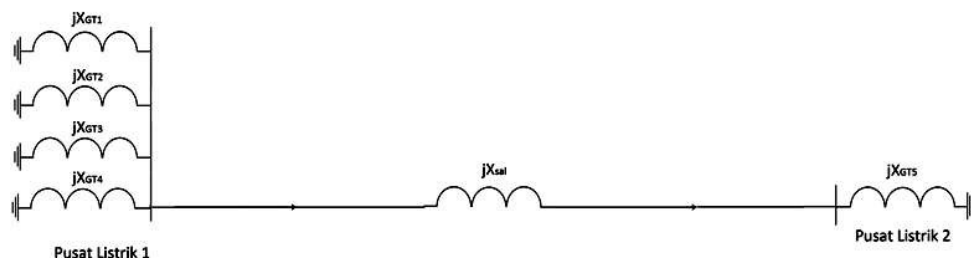
jX_{sal} = reaktansi saluran perunit (pu)

$Z_{sebenarnya}$ = reaktansi saluran (ohm)

Z_{dasar} = impedansi dasar (ohm)

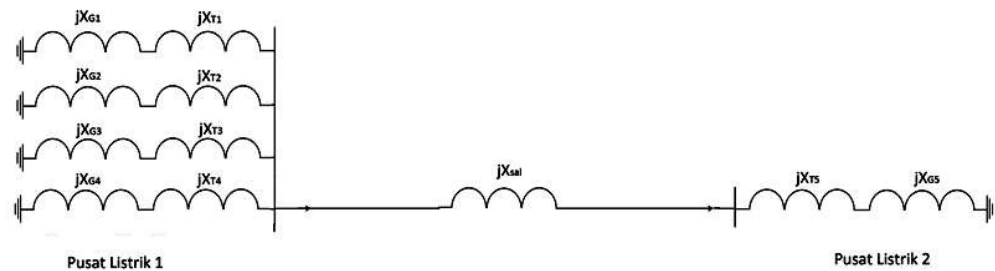
d) Impedansi ekuivalen

Perhitungan yang dilakukan adalah perhitungan nilai ekuivalen dari seluruh impedansi didalam jaringan dari sumber tegangan sampai titik gangguan. Pada pusat listrik 1 dan pusat listrik 2 reaktansi generator (jX_G) dan reaktansi transformator (jX_T) terhubung seri sehingga dapat dijumlahkan seperti ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Rangkaian reaktansi generator dan transformator

Setelah reaktansi generator (jX_G) dan reaktansi transformator (jX_T) dijumlahkan menghasilkan reaktansi generator transformator (jX_{GT}) seperti ditunjukkan pada gambar 2.5 .



Gambar 2.5 Rangkaian reaktansi ekuivalen generator transformator (jX_{GT})

Reaktansi generator transformator (jX_{GT}) pada pusat-pusat listrik yang terhubung secara paralel dapat dihitung menggunakan persamaan 2.10 sebagai berikut :

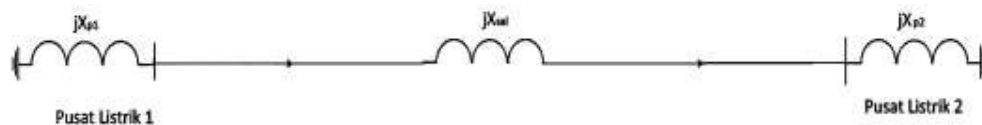
$$\frac{1}{jX_{P1}} = \frac{1}{jX_{GT1}} + \frac{1}{jX_{GT2}} + \dots + \frac{1}{jX_{GTn}} \dots\dots\dots(2.10)$$

Di mana :

jX_{P1} = reaktansi ekuivalen pusat listrik 1 (pu)

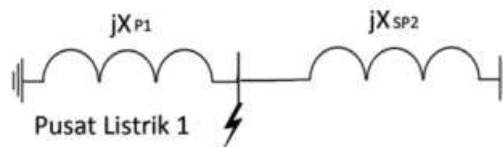
jX_{GTn} = reaktansi generator transformator (pu)

Setelah diperoleh nilai reaktansi ekuivalen pusat-pusat listrik maka rangkaian pada gambar 2.5 akan menjadi lebih sederhana dan terhubung secara seri yaitu ditunjukkan seperti pada gambar 2.6 .



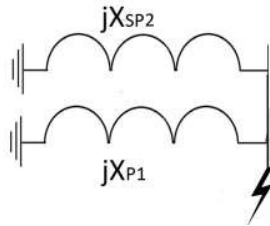
Gambar 2.6 Rangkaian reaktansi ekuivalen terhubung seri

Jika gangguan hubung singkat tiga fase terjadi pada bus pusat listrik 1 maka impedansi ekuivalen dihitung dengan cara menjumlahkan reaktansi ekuivalen pusat listrik 2 (jX_{P2}) dan reaktansi saluran (jX_{sal}) yang terhubung secara seri menghasilkan jX_{SP2} , maka rangkaian akan menjadi sederhana seperti ditunjukkan pada gambar 2.7 .



Gambar 2.7. Rangkaian reaktansi ekuivalen saluran pusat listrik 2 (jX_{SP2})

Pada gambar 2.7 reaktansi akan menjadi lebih sederhana dan tersusun secara paralel seperti ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8. Rangkaian reaktansi ekuivalen terhubung paralel

Maka reaktansi ekuivalen total (gangguan / jX_F) dapat dihitung menggunakan persamaan 2.11 sebagai berikut :

$$jX_F = \frac{jX_{P1} \cdot jX_{SP2}}{jX_{P1} + jX_{SP2}} \text{ (pu)} \dots\dots\dots(2.11)$$

Di mana :

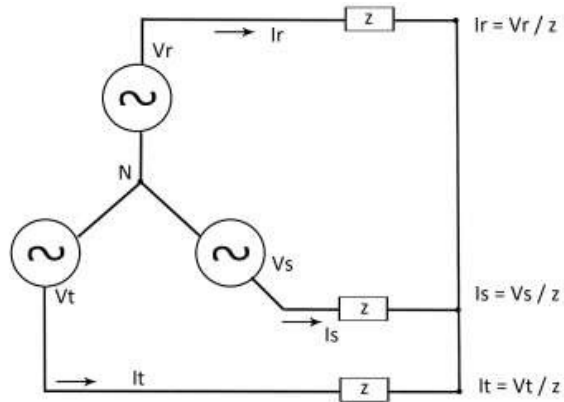
jX_F = reaktansi ekuivalen gangguan/*fault* (pu)

jX_{P1} = reaktansi ekuivalen pusat listrik 1 (pu)

jX_{SP2} = reaktansi ekuivalen saluran pusat listrik 2 (pu)

2.3.2 Menghitung Arus Gangguan Hubung Singkat Tiga Fase

Rangkaian gangguan hubung singkat tiga fase pada suatu jaringan dengan hubungan transformator tenaga YY dengan netral ditanahkan melalui suatu penghantar ditunjukkan pada gambar 2.9 di bawah ini :



Gambar 2.9. Gangguan hubung singkat tiga fase

Sumber : Wahyudi.SN & Pribadi.K (slide.4)

Gangguan hubung singkat tiga fase merupakan gangguan simetris, dimana arus maupun tegangan setiap fasenya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Sehingga dapat dianalisa hanya dengan menggunakan komponen urutan positif yaitu :

$$I_{3\text{fase}} = \frac{V_{\text{fase}}}{Z_1} \quad (\text{amper}) \dots\dots\dots(2.12)$$

Di mana :

$I_{3\text{fase}}$ = arus gangguan tiga fase (amper)

V_{fase} = tegangan fase-netral (volt)

Z_1 = impedansi ekuivalen (ohm)

Penggunaan besaran per unit dalam perhitungan gangguan maupun perhitungan tegangan sumber, biasanya diasumsikan sama dengan 1.0 pu. Untuk perhitungan yang hanya menggunakan reaktansi (jX) persamaan 2.12 akan menjadi persamaan 2.13 (Blackburn,J.L & Domin,T.J.2006:83) yaitu :

$$I_{3\text{fase}} = \frac{jV}{jX} \text{ (pu)(2.13)}$$

Dimana :

$I_{3\text{fase}}$ = arus gangguan tiga fase (pu)

jV = tegangan sumber = 1,0 (pu)

jX = reaktansi ekuivalen (pu)

Pada gambar 2.7 untuk pembagian arus gangguan hubung singkat tiga fase perlu diketahui dulu faktor distribusi aliran arus dikedua sisi (pusat listrik 1 dan pusat listrik 2) dari gangguan, yang harus sama 1.0 pu (Blackburn,J.L & Domin,T.J.2006:127-129). Perhitungan pembagian faktor distribusi ini dihitung dengan cara sebagai berikut :

$$I_{\text{pusat listrik1}} = \frac{jXP1}{jXP1+jXSP2} \text{ (pu)(2.14)}$$

$$I_{\text{pusat listrik2}} = \frac{jXSP2}{jXP1+jXSP} \text{ (pu)(2.15)}$$

$$I_{\text{pusat listrik1}} + I_{\text{pusat listrik2}} = 1,0 \text{ (pu)(2.16)}$$

Setelah didapat faktor distribusi aliran arus ($I_{\text{pusat listrik1}}$ dan $I_{\text{pusat listrik2}}$) pembagian arus gangguan hubung singkat tiga fase dihitung dengan mengalikan

faktor distribusi aliran arus dengan arus gangguan hubung singkat tiga fase seperti berikut ini :

$$I_{3\text{fase pusat listrik1}} = I_{\text{pusat listrik1}} \times I_{3\text{fase}} \text{ (pu)} \dots\dots\dots(2.17)$$

$$I_{3\text{fase pusat listrik2}} = I_{\text{pusat listrik2}} \times I_{3\text{fase}} \text{ (pu)} \dots\dots\dots(2.18)$$

Di mana :

$I_{\text{pusat listrik1}}$ = faktor distribusi aliran arus pada pusat listrik 1 (pu)

$I_{\text{pusat listrik2}}$ = faktor distribusi aliran arus pada pusat listrik 2 (pu)

$I_{3\text{fase pusat listrik1}}$ = arus gangguan hubung singkat tiga fase pada pusat listrik 1 (pu)

$I_{3\text{fase pusat listrik2}}$ = arus gangguan hubung singkat tiga fase pada pusat listrik 2 (pu)

2.4 Dasar Proteksi Sistem Tenaga Listrik

Sistem proteksi merupakan bagian yang sangat penting dalam suatu instalasi tenaga listrik, selain untuk melindungi peralatan utama bila terjadi gangguan hubung singkat, sistem proteksi juga harus dapat mengisolir daerah yang terganggu dan memisahkan daerah yang tidak terganggu, sehingga gangguan tidak meluas dan kerugian yang timbul akibat gangguan tersebut dapat di minimalisasi .

2.4.1 Pengertian dan Fungsi Sistem Proteksi

Proteksi sistem tenaga listrik adalah sistem proteksi yang dilakukan kepada peralatan-peralatan listrik yang terpasang pada suatu sistem tenaga misalnya generator, transformator, jaringan dan lain-lain, terhadap kondisi *abnormal* operasi sistem itu sendiri. Kondisi *abnormal* itu dapat berupa

antara lain : hubung singkat, tegangan lebih, beban lebih, frekuensi sistem rendah dan lain-lain.

Adapun fungsi dari sistem proteksi adalah :

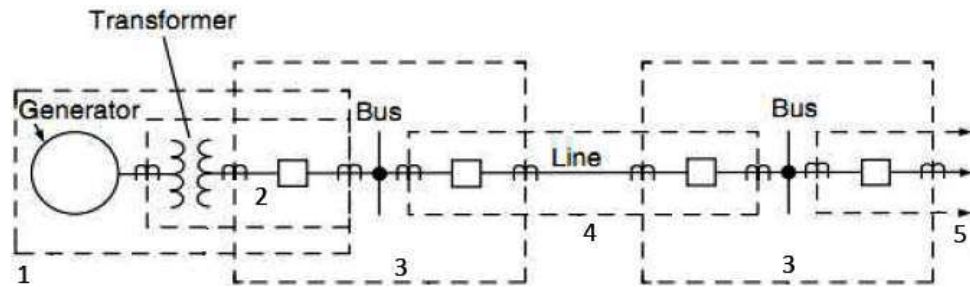
- a. untuk menghindari atau mengurangi kerusakan peralatan listrik akibat adanya gangguan (kondisi *abnormal*). Semakin cepat reaksi perangkat proteksi yang digunakan, maka akan semakin sedikitlah pengaruh gangguan terhadap kemungkinan kerusakan alat.
- b. untuk mempercepat melokalisasi luas daerah yang terganggu, sehingga daerah yang terganggu menjadi sekecil mungkin.
- c. untuk dapat memberikan pelayanan listrik dengan keandalan yang tinggi kepada konsumen, dan juga mutu listriknya baik.
- d. untuk mengamankan manusia (terutama) terhadap bahaya yang ditimbulkan oleh listrik.

2.4.2 Kawasan Sistem Proteksi

Untuk mendapatkan sistem pengamanan yang cukup baik didalam sistem tenaga listrik, sistem tenaga tersebut dibagi dalam beberapa daerah pengamanan yakni dengan pemutusan sub-sistem semimumimum mungkin. Adapun yang dimaksud dengan keterangan di atas adalah :

- Generator
- Transformator daya
- Busbar
- Transmisi, sub-transmisi dan distribusi
- Beban

Pembagian ke 5 daerah pengamanan diatas dilaksanakan secara saling meliputi (*over laping*), seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Diagram sistem tenaga listrik dengan daerah proteksi

Sumber : Tanzil.R (page.15)

Kawasan yang diproteksi (*zones of protection*) digunakan untuk menggambarkan suatu daerah yang menjadi tanggung jawab proteksi suatu sistem proteksi. Masing-masing kawasan proteksi memiliki satu atau lebih komponen sistem tenaga listrik ditambah dua pemutus tenaga (PMT). Masing-masing pemutus tenaga termasuk di dalam kawasan perlindungan yang berdekatan (bertetangga).

Batas suatu kawasan perlindungan mendefenisikan bahwa jika terjadi gangguan di bagian manapun di dalam kawasan perlindungan tersebut, maka sistem proteksi yang bertanggung jawab terhadap kawasan itu akan bekerja untuk memisahkan setiap bagian yang terganggu dari kawasan tersebut dari bagian yang sehat (normal).

Aspek lain yang penting mengenai kawasan perlindungan adalah bahwa kawasan proteksi yang bertetangga selalu tumpang tindih (*overlap*). Dengan

demikian tidak ada bagian sekecil apapun di kawasan yang bertetangga dibiarkan tanpa proteksi.

Sistem proteksi yang terutama bertanggung jawab terhadap kawasan yang dilinduginya disebut sistem proteksi utama (*primary protection*). Jika terjadi gangguan dan sistem proteksi utama gagal bekerja sesuai fungsinya, maka tanggung jawab perlindungan untuk kawasan tersebut akan dilakukan oleh sistem proteksi bantuan (*back-up protection*) yaitu sistem proteksi yang bertetangga dan berada dalam kawasan tumpang tindih dengan sistem proteksi utama.

2.4.3 Komponen-komponen Sistem Proteksi

Sistem proteksi tenaga listrik pada umumnya terdiri dari beberapa komponen yang dirancang untuk mengidentifikasi kondisi sistem tenaga listrik dan bekerja berdasarkan informasi yang diperoleh dari sistem tersebut seperti arus, tegangan atau sudut fase antara keduanya. Informasi yang diperoleh dari sistem tenaga listrik akan digunakan untuk membandingkan besarnya dengan besaran ambang-batas (*threshold setting*) pada peralatan proteksi. Apabila besaran yang diperoleh dari sistem melebihi *setting* ambang-batas peralatan proteksi, maka sistem proteksi akan bekerja untuk mengamankan kondisi tersebut.

Komponen – komponen penting dalam sistem proteksi antara lain yaitu :

a. Pemutus tenaga (*circuit breaker*)

Pemutus tenaga (PMT) atau *circuit breaker* (CB) merupakan peralatan yang digunakan untuk menghubungkan atau memutuskan arus listrik sesuai dengan kapasitas ratingnya. PMT mempunyai kemampuan untuk memutuskan arus beban

dan arus gangguan hubung singkat pada tegangan tinggi dalam waktu yang relatif sangat cepat. Energi mekanik yang diperlukan untuk membuka kontak utama diperoleh dari gaya pegas, tekanan hidrolik, tekanan pneumatic atau dari beberapa kombinasi diantaranya. Pada saat PMT memutuskan atau menghubungkan arus listrik akan timbul busur api, dan untuk memadamkan busur api tersebut digunakan beberapa bahan pada PMT yaitu minyak, udara dan gas .

b. Trafo arus (*current transformer/CT*)

Sebagai alat pengubah/pembanding besaran primer dan sekunder. Trafo ini digunakan untuk memperoleh besaran arus yang sama/proporsional dengan arus sistem. Fungsi trafo arus yaitu memperkecil besaran arus listrik (ampere) pada sistem tenaga listrik menjadi besaran arus untuk sistem pengukuran/proteksi serta memisahkan instalasi pengukuran/proteksi dari sistem tegangan tinggi . Rating dari trafo arus ditentukan berdasarkan rasio arus primer dengan arus sekunder. Umumnya rasio trafo arus yang digunakan 600:5, 800:5, 1000:5, 1600:1. Beberapa relai proteksi menggunakan arus sekunder CT sebagai input masukan seperti relai jarak, relai differensial, relai arus lebih dan lain-lain ,

c. *Battery* (aki) yaitu sebagai sumber tegangan untuk tripping pemutus tenaga (PMT) serta catu daya untuk relai proteksi.

d. Relai proteksi (*protection relay*)

Relai proteksi adalah suatu alat yang apabila diberi energi oleh besaran-besaran sistem yang tepat dapat memberi indikasi suatu kondisi *abnormal*. Relai dirancang dengan kemampuan membuat-keputusan yang logis (*logical* = sesuai dengan jalan pikiran yang lurus) sehingga berdasarkan keadaan sinyal

masukannya, relai mampu menghasilkan keluaran yang benar terhadap sinyal yang masuk. Apabila relai bekerja (kontak-kontak menutup) maka rangkaian-rangkaian trip pemutus tenaga (PMT) mendapat energi sehingga terbuka, dan mengisolir bagian yang terganggu dari sistem. Berikut ini adalah klasifikasi relai berdasarkan fungsi atau kegunaannya :

- 1) Relai arus lebih (*over current relay*/OCR) yaitu relai yang bekerja apabila arus yang terdeteksi oleh relai melebihi setelan nilai ambang batas arusnya,
- 2) *Differential relay* yaitu relai yang dirancang untuk mendeteksi perbedaan arus yang masuk dalam daerah atau zona yang diproteksinya dengan arus yang keluar. Relai ini bekerja apabila arus yang masuk tidak sama dengan arus yang keluar,
- 3) *Directional relay* yaitu dirancang untuk mengidentifikasi perbedaan fase antara arus yang satu dengan yang lain atau perbedaan fase antar tegangan,
- 4) *Distance relay* yaitu relai yang digunakan untuk proteksi pada saluran transmisi karena relai jarak dapat mengukur impedansi untuk mencapai titik tertentu,
- 5) *Ground fault relay* yaitu relai untuk mendeteksi gangguan ke tanah atau lebih tepatnya dengan mengukur besarnya arus residu yang mengalir ke tanah .

2.4.4 Persyaratan Penting Relai Proteksi

Persyaratan penting yang harus dipenuhi oleh sebuah relai proteksi adalah kepekaan, keandalan, selektifitas, dan kecepatan, seperti berikut :

a. Kepekaan (*sensitivity*)

Pada prinsipnya relai harus cukup peka sehingga dapat mendeteksi gangguan dikawasan pengamanannya, termasuk kawasan pengamanan cadangan-jauhnya. Sebagai pengaman peralatan (generator,trafo) relai yang peka dapat mendeteksi gangguan pada tingkatan yang masih dini sehingga dapat membatasi kerusakan. Sebagai pengaman gangguan tanah pada SUTM, relai yang kurang peka menyebabkan banyak gangguan tanah, dalam bentuk sentuhan dengan pohon yang tertiuip angin, yang tidak bisa terdeteksi. Akibatnya, busur apinya berlangsung lama dan dapat menyambar ke fase lain, maka relai hubung singkat yang akan bekerja. Gangguan sedemikian bisa terjadi berulang kali ditempat yang sama yang dapat mengakibatkan kawat cepat putus. Sebaliknya, jika terlalu peka, relai akan terlalu sering trip untuk gangguan yang sangat kecil yang mungkin bisa hilang dengan sendiri.

b. Keandalan (*reliability*)

Dalam keadaan normal, tidak ada gangguan relai tidak bekerja, mungkin berbulan-bulan atau bertahun-tahun. Tetapi bila pada suatu saat terjadi gangguan, maka relai harus trip, maka dalam hal ini relai tidak boleh gagal bekerja karena pemadaman akan meluas. Disamping itu juga relai tidak boleh salah bekerja . Dalam hal yang harus dapat diandalkan bukan hanya relainya saja, tetapi juga komponen-komponen perangkat proteksi itu, keandalan proteksi itu ditentukan mulai dari rencana, pengerjaan, bahan yang digunakan pengawatannya. Oleh karena itu diperlukan perawatan atau pemeliharaan secara periodik .

c. Selektifitas (*selectivity*)

Selektifitas merupakan kemampuan untuk menyeleksi titik gangguan dan memutuskan rangkaian dengan mentrip pemutus tenaga terdekat atau hanya bagian yang terganggu saja. Relai juga harus membedakan apakah :

- Gangguan terletak dikawasan pengamanan utamanya dimana relai harus bekerja cepat,
- Gangguan terletak diseksi berikutnya dimana relai harus bekerja dengan waktu tunda (sebagai pengaman cadangan) atau menahan diri untuk tidak trip,
- Gangguan diluar daerah pengamanannya, atau sama sekali tidak ada gangguan, dimana relai tidak harus bekerja sama sekali.

Untuk itu relai-relai yang didalam sistem terletak secara seri, dikoordinir dengan mengatur peningkatan waktu (*time grading*) atau peningkatan setting arus (*current grading*), atau gabungan keduanya. Karena itulah relai dibuat dengan bermacam-macam jenis dan karakteristiknya. Dengan pemilihan jenis dan karakteristik relai yang tepat, spesifikasi trafo arus (CT) yang benar, serta penentuan setting relai yang terkoordinir dengan baik, selektifitas yang baik dapat diperoleh,

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 sistem.

2.5 Relai Arus Lebih (*Over Current Relay / OCR*)

Relai arus lebih (*over current relay/OCR*) adalah relai yang bekerja apabila arus yang terdeteksi oleh relai melebihi setelan nilai ambang batas arusnya, dan kemudian memberi perintah kepada pemutus tenaga (PMT) untuk membuka rangkaian. Relai arus lebih digunakan untuk mengamankan peralatan terhadap arus gangguan hubung singkat dan beberapa hal dapat digunakan sebagai pengaman beban lebih. Relai arus lebih digunakan hampir pada seluruh pola pengamanan sistem tenaga listrik, lebih lanjut relai ini dapat digunakan sebagai pengaman utama (*primary protection*) ataupun pengaman cadangan (*back-up protection*).

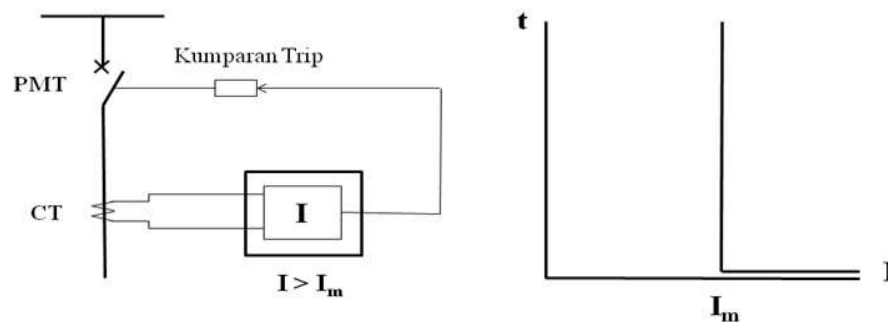
Umumnya relai arus lebih digunakan pada saluran udara tegangan menengah (SUTM) maupun saluran udara tegangan tegangan tinggi (SUTT). Pada transformator tenaga, relai arus lebih berfungsi sebagai pengaman cadangan untuk gangguan *eksternal* atau sebagai *back-up* bagi *outgoing feeder*.

2.5.1 Karakteristik Relai Arus Lebih (*Over Current Relay / OCR*)

Relai arus lebih (*over current relay/OCR*) dapat dibedakan menjadi beberapa jenis, yaitu :

a) Relai arus lebih seketika (*moment-instantaneous*)

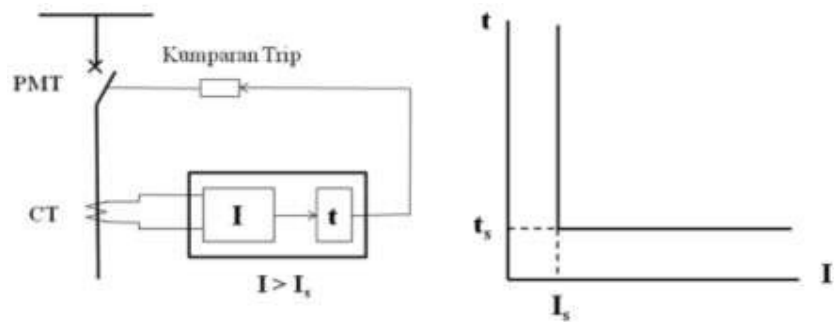
Relai arus lebih seketika adalah relai yang bekerja bila besar arus gangguannya melampaui arus penyetelannya, dan jangka waktu mulai dari *pick-up* sampai kerja, sangat singkat tanpa penundaan waktu (20 - 60 ms). Karena relai ini tanpa perlambatan, maka koordinasi untuk mendapatkan selektifitas didasarkan pada tingkat beda arus.



Gambar 2.11 Relai arus lebih seketika (*moment-instantaneous*)

b) Relai arus lebih waktu tertentu (*definite time*)

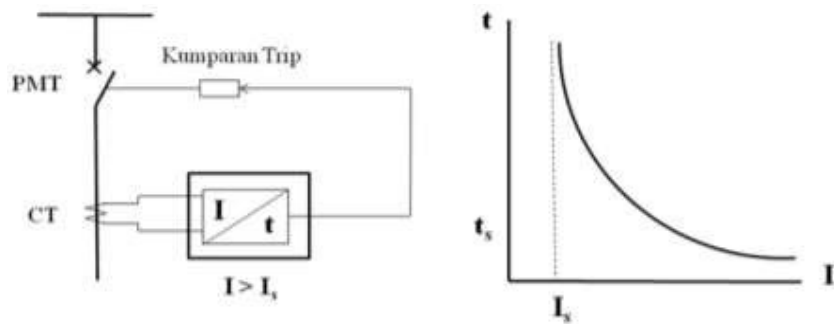
Relai arus lebih waktu tertentu adalah relai yang waktu tundanya tetap, tidak tergantung pada besarnya arus gangguan. Jika arus gangguan telah melebihi arus settingnya (I_s) berapapun besarnya arus gangguan, relai akan bekerja dengan waktu yang disetting (T_s).



Gambar 2.12 Relai arus lebih waktu tertentu (*definite time*)

c) Relai arus lebih waktu terbalik (*inverse time*)

Relai arus lebih waktu terbalik adalah relai dimana waktu tundanya tergantung pada besarnya arus gangguan. Jadi semakin besar arus gangguan maka waktu kerja relai akan semakin cepat, arus gangguan berbanding terbalik dengan waktu kerja relai.



Gambar 2.13 Relai arus lebih waktu terbalik (*inverse time*)

Berdasarkan BS 142 / IEC 255-3 / IEEE – ANSI ada 4 karakteristik setelan waktu *inverse* yaitu :

- Karakteristik *standard inverse* (SI)
- Karakteristik *very inverse* (VI)

- c. Karakteristik *extreme inverse* (EI)
- d. Karakteristik *long time inverse* (LTI)

Tabel 2.1 Karakteristik setelan waktu *inverse*

		SI	VI	EI	LTI
$T = \frac{\alpha \cdot t}{\left(\frac{I}{I_{set}}\right)^{\beta} - \delta}$	α	0,14	13,5	80	120
	β	0,02	1	2	1
	δ	1	1	1	1

Keterangan :

I_{set} = setelan nilai ambang batas arus

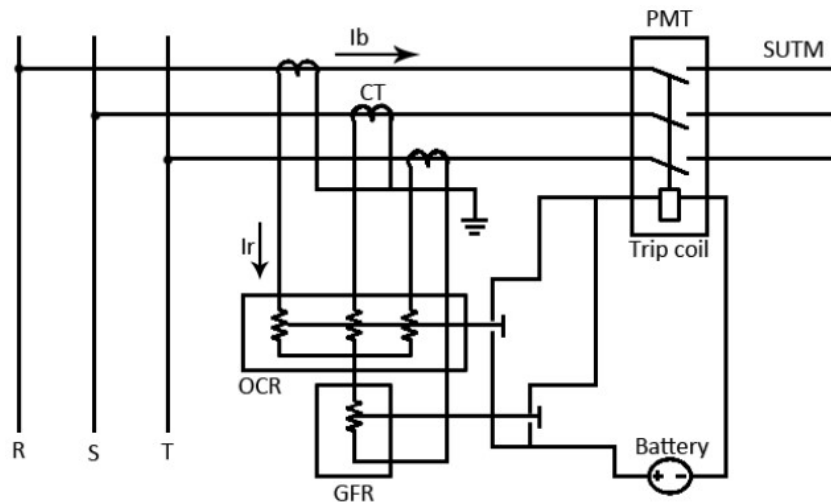
t_d = *time dial/time multiple setting* pada relai

T = waktu kerja relai

I = arus gangguan

2.5.2 Prinsip Kerja Relai Arus Lebih (*Over Current Relay / OCR*)

Prinsip kerja relai arus lebih (*over current relay/OCR*) yaitu apabila arus yang dirasakan oleh relai melebihi setelan nilai ambang batas arusnya, maka relai akan bekerja dan memberi perintah kepada pemutus tenaga (PMT) untuk membuka rangkaian. Pada kondisi normal arus beban (I_b) mengalir pada SUTM dan oleh trafo arus (CT) besaran primer ini ditransformasikan ke besaran sekunder (I_r). Seperti ditunjukkan pada gambar 2.14 dibawah ini .



Gambar 2.14 Rangkaian pengawatan relai arus lebih

Sumber : Irfan.A (2009,hal.36)

Bila terjadi gangguan hubung singkat, arus I_b akan naik dan menyebabkan arus I_r ikut naik. Apabila arus I_r naik melebihi setelan nilai ambang batas arusnya, maka relai akan bekerja dan memberikan perintah trip pada *tripping coil* untuk bekerja dan membuka pemutus tenaga (PMT), sehingga SUTM yang terganggu dipisahkan dari jaringan .

2.5.3 Perhitungan Koordinasi Relai Arus Lebih (*Over Current Relay / OCR*)

Hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat, pada tahap selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai setelan arus (I_{set}) dan setelan T_{ms} (*time multiple setting*) menggunakan relai arus lebih waktu terbalik (*inverse time*). Setelan relai arus lebih yang terpasang di saluran dihitung berdasarkan arus beban yang mengalir pada saluran tersebut. Relai *inverse time* biasa disetting sebesar $1,05 - 1,1 \times I_{beban}$. Persyaratan lain yang harus dipenuhi adalah relai proteksi yang

ditempatkan berurutan sepanjang jalur saluran diatur sedemikian rupa, sehingga mereka akan bekerja pada waktu bertingkat (*time grading*) terhadap gangguan. *Grading* waktu standar adalah 0,5 detik (Pandjaitan, Bonar.2012:85).

2.5.4 Menghitung Setting Relai Arus Lebih (*Over Current Relay / OCR*)

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

- Setelan arus (I_{set})

$$I_{set} \text{ (primer)} = 1,05 \times I_{beban} \quad (\text{amper}) \dots \dots \dots (2.15)$$

Nilai setelan tersebut adalah nilai primer. Untuk mendapatkan nilai setelan sekunder dihitung dengan menggunakan data rasio trafo arus (CT) yang terpasang pada saluran tersebut yaitu sebagai berikut :

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

- Setelan waktu/*Time Multiple Setting* (TMS)

Setelan waktu (TMS) dihitung berdasarkan karakteristik *standard inverse* (SI) sebagai berikut :

$$T = \frac{0,14 \cdot TMS}{\left(\frac{I}{I_{set}}\right)^{0,02} - 1} \quad (\text{detik}) \dots \dots \dots (2.17)$$

Untuk menentukan nilai TMS dapat dihitung dengan cara sebagai berikut:

$$TMS = \frac{t \cdot \left(\left(\frac{I}{I_{set}}\right)^{0,02} - 1\right)}{0,14} \quad (\text{detik}) \dots \dots \dots (2.18)$$