



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Switchgear

Switchgear adalah panel distribusi yang mendistribusikan beban kepanel-panel yang lebih kecil kapasitasnya. Secara umum *switchgear* adalah suatu unit peralatan listrik yang dapat memutuskan ataupun menghubungkan rangkaian listrik baik dalam keadaan normal maupun tidak normal demi keandalan sistem pelayanan daya listrik atau sistem disbtribusi listrik.

Dalam bahasa Indonesia artinya Panel Tegangan Menengah (PTM) atau juga disebut MVMDB (Medium Voltage Main distribution Board) dan sedangkan untuk tegangan rendah disebut LVMDB (Low Voltage Main Distribution Board). Switchgear adalah komponen-komponen hubung/ pemutus dan pendukung-pendukungnya dalam satu kesatuan (unit) terintegrasi, sehingga dapat difungsikan sebagai penghubung, pemutus, dan pelindung terhadap dua sisi rangkaian tersebut. Adapun fungsi dari switchgear ini yaitu :

- Menghubungkan dan memutuskan sisi sumber tenaga listrik dengan sisi beban;
- Menghubungkan dan memutuskan sumber tenaga listrik dengan peralatan listrik yang lain;
- Menghububgkan jaringan listrik utama dengan jaringan listrik cabang;
- Fungsi Switching. Yang dimana melalui Circuit Breaker atau Load Break Switch atau Disconnecting Switch, dll;

- Fungsi Proteksi. Yaitu switchgear dilengkapi dengan fuse atau relay untuk proteksi beban seperti overcurrent, overload, reverse power, under/over voltage, dll;
- Fungsi pengukuran. yaitu switchgear dilengkapi dengan meter untuk pengukuran besaran listrik seperti arus, tegangan, kwh, frekwensi, Power Factor, dll;
- Fungsi Monitoring. Yaitu switchgear dilengkapi dengan pilot indicator/fasilitas monitoring untuk memonitor status seperti status on/off maupun abnormal/trip),bisa untuk remote monitoring melalui PLC/DCS/SCADA.



gambar 2.1 Panel *Switchgear*

2.2 Bagian-Bagian *Switchgear*

Pada bagian-bagian sistem *switchgear* ada kelengkapan-kelengkapan penting yang harus diketahui sebelum pengoperasian berlangsung. Kelengkapan-kelengkapan yang ada pada sistem *switchgear* sangat penting dan harus dipelajari sebelum mengetahui bagaimana cara mengoperasikannya. Kelengkapan-kelengkapan penting pada switchgear itu antara lain

- Bus-bar (bus-bar compartment);
- Peralatan penghubung dan pemutus (*Circuit Breaker*, Switch Pemutus

- Beban, *Disconnecting Switch/Switch, Fuse*);
- Transformator Ukur (trafo tegangan/PT, trafo arus/CT);
 - Relai Proteksi (OCR, UV/OV relay);
 - Peralatan pengukuran;

2.2.1 Bus – Bar

Bus –bar (rel) adalah susunan konduktor yang digunakan dalam sebuah panel. Bus-bar untuk menghantarkan listrik dari incoming feeder ke seluruh cabang sirkuit perlindungan dalam instalasi listrik. Tentunya menggunakan alat ini untuk mempermudah instalasi maupun perubahan. Selain itu juga plat bus-bar efektif dalam mengantisipasi panas berlebih karena dilewati arus yang cukup besar. Alat ini salah satu komponen utama dari *Switchgear* yang berfungsi sebagai tempat atau mediator untuk menghubungkan beberapa rangkaian atau peralatan.

Bahan untuk bus-bar umumnya terbuat dari tembaga, aluminium, dan alloy. Material bus-bar yang berfungsi sebagai konduktor listrik memiliki peranan penting agar biaya yang dikeluarkan sebanding dengan umur hidup panel listrik. *Bus-bar* ada yang berbahan tembaga dan juga ada yang berbahan aluminium. Tembaga lebih baik dibandingkan aluminium dari segi konduktivitas dan kekuatan. Namun tembaga memiliki berat lebih besar dibandingkan aluminium. Tembaga memiliki tingkat kekerasan yang lebih tinggi sehingga memberikan resistensi yang lebih besar daripada aluminium sehingga bus-bar yang terbuat dari tembaga lebih tahan terhadap kerusakan.



Gambar 2.2 Bus Bar



2.2.2 Circuit Breaker ¹

Circuit Breaker atau Pemutus Tenaga (PMT) adalah suatu peralatan pemutus rangkaian listrik pada suatu sistem tenaga listrik, yang mampu untuk membuka dan menutup rangkaian listrik pada semua kondisi, termasuk arus hubung singkat, sesuai dengan ratingnya. Juga pada kondisi tegangan yang normal ataupun tidak normal. Pemutus Tenaga (PMT) merupakan suatu alat listrik yang berfungsi untuk melindungi sistem tenaga listrik apabila terjadi kesalahan atau gangguan pada sistem tersebut, terjadinya kesalahan pada sistem akan menimbulkan berbagai efek seperti efek termis, efek magnetis dan dinamis stability.

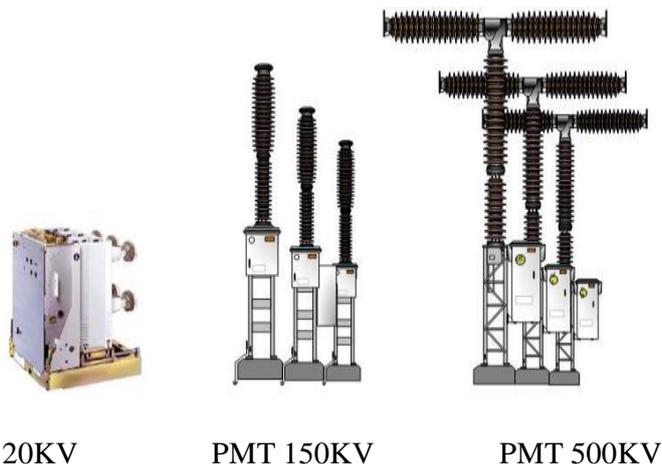
Fungsi utamanya adalah sebagai alat pembuka atau penutup suatu rangkaian listrik dalam kondisi berbeban, serta mampu membuka atau menutup saat terjadi arus gangguan (hubung singkat) pada jaringan atau peralatann lain. Syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh suatu Circuit Breaker (CB) agar dapat melakukan hal-hal diatas, adalah sebagai berikut :

- Mampu menyalurkan arus maksimum sistem secara terus menerus.
- Mampu memutuskan dan menutup jaringan dalam keadaan berbeban maupun terhubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus tenaga itu sendiri.
- Dapat memutuskan arus hubung singkat dengan kecepatan tinggi agar arus hubung singkat tidak sampai merusak peralatan sistem, sehingga tidak membuat sistem kehilangan kestabilan, dan merusak pemutus tenaga itu sendiri

Setiap Circuit Breaker dirancang sesuai dengan tugas yang akan dipikulnya, ada beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam rancangan suatu CB, yaitu :

¹ Sarimun, Wahyudi. *Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik*. 2012.

1. Tegangan efektif tertinggi dan frekuensi daya jaringan dimana pemutus daya itu akan dipasang. Nilainya tergantung pada jenis pentanahan titik netral sistem.
2. Arus maksimum continue yang akan dialirkan melalui pemutus daya. Nilai arus ini tergantung pada arus maksimum sumber daya atau arus nominal beban dimana pemutus daya tersebut terpasang.
3. Arus hubung singkat maksimum yang akan diputuskan pemutus daya tersebut.
4. Lamanya maksimum arus hubung singkat yang boleh berlangsung. hal ini berhubungan dengan waktu pembukaan kontak yang dibutuhkan.
5. Jarak bebas antara bagian yang bertegangan tinggi dengan objek lain disekitarnya.
6. Jarak rambat arus bocor pada isolatornya.
7. Kekuatan dielektrik media isolator sela kontak.
8. Iklim dan ketinggian lokasi penempatan pemutus daya.



Gambar 2.3 Jenis-Jenis PMT

Adapun pengklasifikasian PMT atau CB ini yang dibagi bebarapa jenis, yaitu :

- Berdasarkan tegangan Rating Nominal

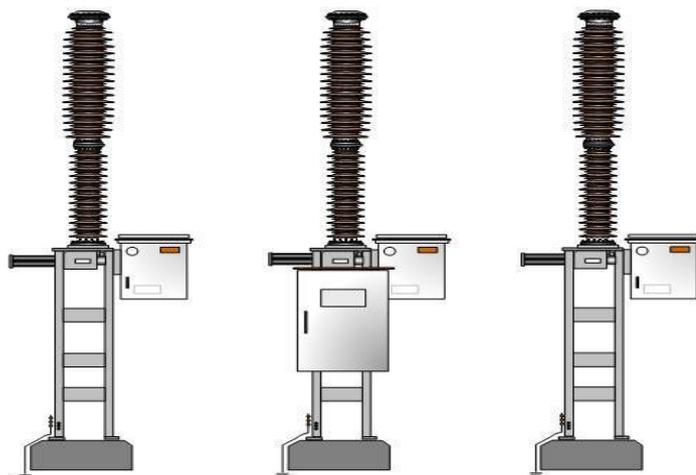
PMT atau CB dapat dibedakan menjadi beberapa tegangan :

1. CB tegangan rendah (*low voltage*)
Dengan tegangan 0,1 s/d 1 kV ;
2. CB tegangan menengah (*medium voltage*)
Dengan tegangan 1 s/d 35 kV ;
3. CB tegangan tinggi (*high voltage*)
Dengan tegangan 35 s/d 245 kV ;
4. CB tegangan extra tinggi (*extra high voltage*)
Dengan range tegangan lebih besar dari 245 kV

- Berdasarkan jumlah mekanik penggerak

1. PMT *single pole*

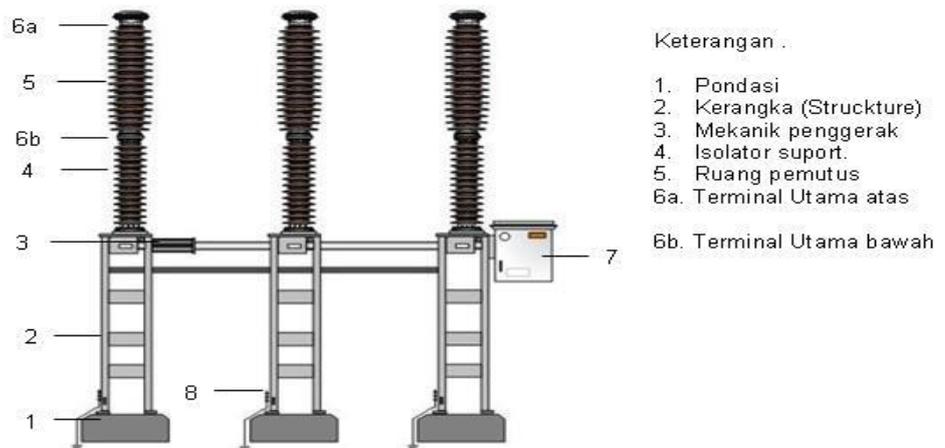
PMT tipe ini mempunyai mekanik penggerak pada masing-masing pole, umumnya PMT jenis ini dipasang pada bay penghantar agar PMT bisa reclose satu fasa.



Gambar 2.4 PMT *Single Pole*

2. PMT *three pole*

PMT jenis ini mempunyai satu mekanik penggerak untuk tiga fasa, guna menghubungkan fasa satu dengan fasa lainnya di lengkapi dengan kopel mekanik, umumnya PMT jenis ini di pasang pada bay trafo dan bay kopel serta PMT 20 kV untuk distribusi.



Gambar 2.5 PMT *three pole*

- Berdasarkan jenis media isolasi

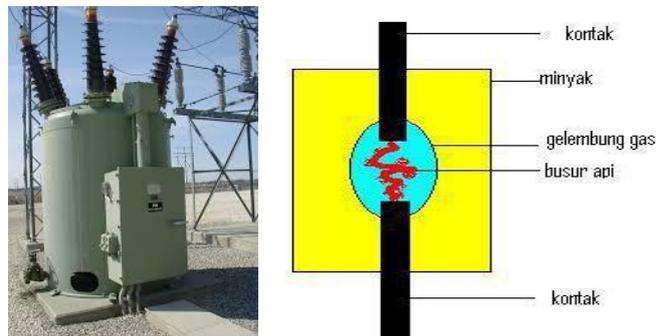
1. PMT Media Minyak (*Oil Circuit Breaker*)

Sakelar PMT ini dapat digunakan untuk memutus arus sampai 10 kA dan pada rangkaian bertegangan sampai 500 kV. Pada saat kontak dipisahkan, busur api akan terjadi didalam minyak, sehingga minyak menguap dan menimbulkan gelembung gas yang menyelubungi busur api, karena panas yang ditimbulkan busur api, minyak mengalami dekomposisi dan menghasilkan gas hidrogen yang bersifat menghambat produksi pasangan ion. Oleh karena itu, pemadaman busur api tergantung pada pemanjangan dan pendinginan busur api dan juga tergantung pada jenis gas hasil dekomposisi minyak.



Gas yang timbul karena dekomposisi minyak menimbulkan tekanan terhadap minyak, sehingga minyak terdorong ke bawah melalui leher bilik. Di leher bilik, minyak ini melakukan kontak yang intim dengan busur api. Hal ini akan menimbulkan pendinginan busur api, mendorong proses rekombinasi dan menjauhkan partikel bermuatan dari lintasan busur api. Minyak yang berada diantara kontak sangat efektif memutuskan arus. Kelemahannya adalah minyak mudah terbakar dan kekentalan minyak memperlambat pemisahan kontak, sehingga tidak cocok untuk sistem yang membutuhkan pemutusan arus yang cepat. Kelemahan menggunakan PMT ini adalah sebagai berikut :

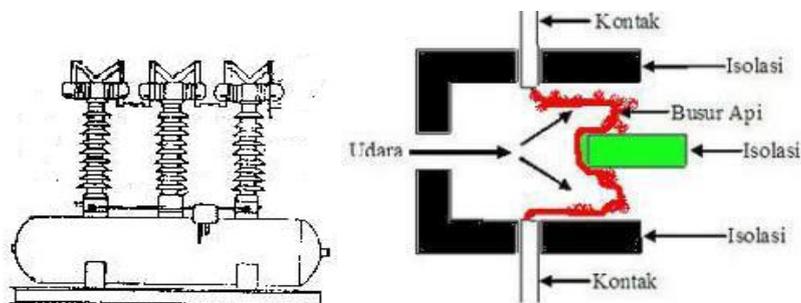
- minyak mudah terbakar dan jika mengalami tekanan dapat meledak ;
- Kekentalan minyak memperlambat pemisahan kontak, sehingga tidakcocok untuk sistem yang membutuhkan pemutusan arus yang cepat ;
- Interaksi busur api dengan minyak menimbulkan karbonisasi dan memproduksi gas hydrogen. Jika karbonisasi berlangsung lama akan terjadi endapan karbon dan jika gas hidrogen bercampur dengan udara, maka dapat menimbulkan campuran yang eksplosif;
- Minyak akan mengalami degradasi jika bercampur dengan air atau karbon, maka perlu diadakan pemeriksaan rutin terhadap sifat di elektrik dan sifat kimia minyak.



Gambar 2.6 *Oil Circuit Breaker* dan Pemadaman busur api.

2. PMT Media Udara Hembus (*Air Blast Circuit Breaker*)

Sakelar PMT ini dapat digunakan untuk memutus arus sampai 40 kA dan pada rangkaian bertegangan sampai 765 kV. PMT udara hembus dirancang untuk mengatasi kelemahan pada PMT minyak, yaitu dengan membuat media isolator kontak dari bahan yang tidak mudah terbakar dan tidak menghalangi pemisahan kontak, sehingga pemisahan kontak dapat dilaksanakan dalam waktu yang sangat cepat. Saat busur api timbul, udara tekanan tinggi dihembuskan ke busur api dipadamkan oleh hembusan udara tekanan tinggi itu dan juga menyingkirkan partikel-partikel bermuatan dari sela kontak, udara ini juga berfungsi untuk mencegah *restriking voltage* (tegangan pukul ulang).



Gambar 2.7 *Air Blast Circuit Breaker* dan proses Pemadaman busur api.



3. PMT Media Vakum (*Vacuum Circuit Breaker*)

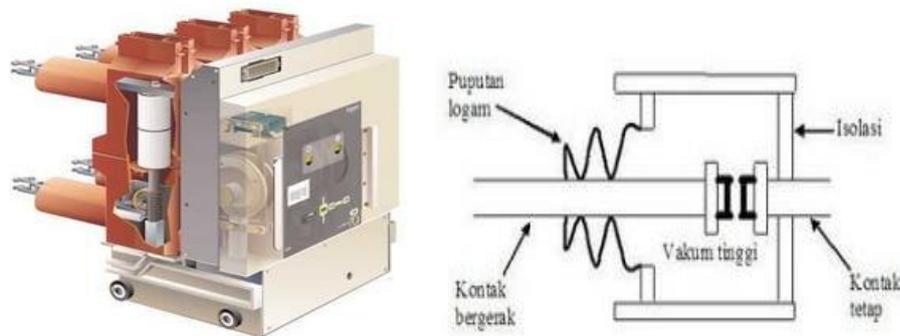
Sakelar PMT ini dapat digunakan untuk memutus rangkaian bertegangan sampai 38 kV. Ruang hampa udara pada CB jenis ini mempunyai kekuatan dielektrik (*dielektrik strength*) yang tinggi dan sebagai media pemadam busur api yang baik. Pada *vacuum circuit breaker* kontak ditempatkan pada suatu bilik vacuum. Untuk mencegah udara masuk ke dalam bilik, maka bilik ini harus ditutup rapat dan kontak Bergeraknya diikat ketat dengan perapat logam. Jika kontak dibuka, maka pada katoda kontak terjadi emisi termis dan medan tegangan yang tinggi yang memproduksi elektron-elektron bebas. Elektron hasil emisi ini bergerak menuju anoda, elektron-elektron bebas ini tidak bertemu dengan molekul udara sehingga tidak terjadi proses ionisasi. Akibatnya, tidak ada penambahan elektron bebas yang mengawali pembentukan busur api.

Dengan kata lain, busur api dapat dipadamkan. Ruang kontak utama (*breaking chambers*) dibuat dari bahan antara lain porcelain, kaca atau plat baja yang kedap udara. Ruang kontak utamanya tidak dapat dipelihara dan umur kontak utama sekitar 20 tahun. Karena kemampuan ketegangan dielektrik yang tinggi maka bentuk pisik PMT jenis ini relatif kecil.

Prinsip kerjanya berbeda dengan dasar prinsip lain karena tidak terdapat gas yang dapat berionisasi bilamana kontak - kontak terbuka, ketika kontak pemutus dibuka dalam ruang hampa maka akan timbul percikan busur api, elektron dan ion saat pelepasan walaupun hanya sesaat maka dengan cepat diredam karena percikan busur api, elektron dan ion yang dihasilkan pada saat pemutusan akan segera mengembun pada ruangan hampa, kemampuannya terbatas hingga kira-kira 30 kV. Untuk tegangan yang lebih tinggi pemutus ini dapat di pasang seri.

Kelebihan menggunakan CB jenis ini yaitu :

1. Konstruksinya kompak, andal, dan tahan lama ;
2. Tidak menimbulkan bahaya kebakaran ;
3. Ketika dioperasikan, tidak menimbulkan gas ;
4. Perawatannya mudah dan murah ;
5. Mampu menahan tegangan impuls petir.

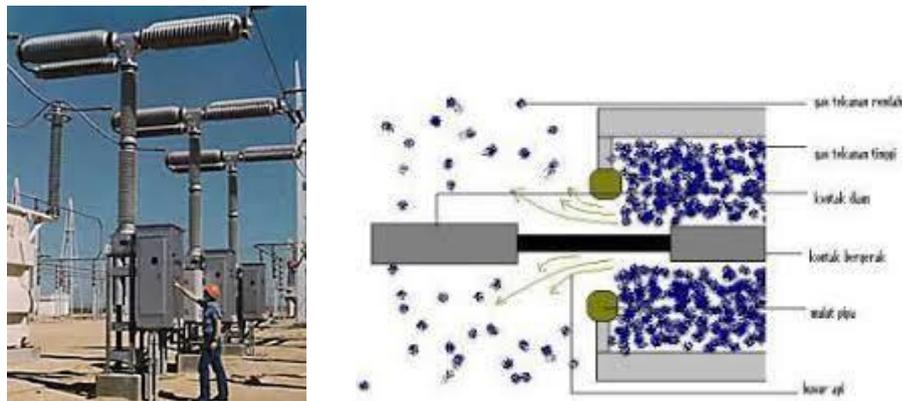


Gambar 2.8 *Vacuum Circuit Breaker* proses pemadaman busur api.

4. PMT Media gas SF₆ (SF₆ *Circuit Breaker*)

Sakelar PMT ini dapat digunakan untuk memutus arus sampai 40 kA dan pada rangkaian bertegangan sampai 765 kV. Media gas yang digunakan pada tipe ini adalah gas SF₆ (*Sulphur hexafluoride*). Sifat gas SF₆ murni adalah tidak berwarna, tidak berbau, tidak beracun dan tidak mudah terbakar. Pada suhu diatas 150° C, gas SF₆ mempunyai sifat tidak merusak metal, plastic dan bermacam bahan yang umumnya digunakan dalam pemutus tenaga tegangan tinggi. Sebagai isolasi listrik, gas SF₆ mempunyai kekuatan dielektrik yang tinggi (2,35 kali udara) dan kekuatan dielektrik ini bertambah dengan pertambahan tekanan.

Sifat lain dari gas SF₆ ialah mampu mengembalikan kekuatan dielektrik dengan cepat, tidak terjadi karbon selama terjadi busur api dan tidak menimbulkan bunyi pada saat pemutus tenaga menutup atau membuka. Selama pengisian, gas SF₆ akan menjadi dingin jika keluar dari tangka penyimpanan dan akan panas kembali jika dipompakan untuk pengisian kedalam bagian/ruang pemutus tenaga. Oleh karena itu gas SF₆ perlu diadakan pengaturan tekanannya beberapa jam setelah pengisian pada saat gas SF₆ pada suhu lingkungan.



Gambar 2.9 SF₆ Circuit Breaker dan proses pemadaman busur api.

2.2.3 Transformator Ukur²

Transformator ukur merupakan suatu peralatan yang dapat mentransformasikan (merubah) suatu besaran listrik (arus dan tegangan) ke besaran yang sama dengan harga yang berbeda. Transformator ukur memiliki belitan primer dan belitan sekunder. Belitan primer dihubungkan ke jaringan sistem tenaga listrik dan belitan sekunder dihubungkan ke peralatan ukur dan peralatan pengaman. Oleh karena itu pada sistem tenaga listrik memiliki besaran dengan nilai yang cukup besar maka transformator ukur berfungsi untuk

² Schulz, G. *Transformer and Protective Relays*. 1992



menurunkan nilai besaran. Berdasarkan besaran yang ditransformasikan. Transformator ukur terdiri dari :

1. Transformator Arus (*Current Transformer/CT*) :

Transformator arus berfungsi untuk mentransformasikan arus yang besar menjadi arus yang kecil. Arus yang kecil ini disebut sebagai arus sekunder dan dihubungkan ke peralatan ukur atau rele pengaman. Penerapan arus sekunder pada transformator arus dengan nilai nominal 1 A atau 5 A. Konstruksi dari trafo arus ini terdiri dari :

- Kumparan
Berfungsi untuk mentransformasikan besaran arus besar menjadi arus yang kecil.
- Pendingin
Merupakan bahan yang bersifat isolator seperti minyak atau udara. Berfungsi untuk mendinginkan kumparan dan sekaligus mengisolasi bagian bertegangan.
- Porselen
Sebagai pelindung (*body*) merupakan bagian luar dari transformator yang berfungsi untuk memisahkan bagian bertegangan.
- *Dehydrating Breather*
Sebagai pernafasan transformator yang berfungsi untuk menyerap udara lembab yang timbul dalam ruang transformator sehingga dapat mencegah rusaknya isolasi transformator.
- Terminal
Berfungsi untuk penyambungan dari sisi primer atau sekunder ke peralatan listrik lain yang membutuhkannya.

2. Transformator Tegangan (*Potential Transformer/PT*) :

Transformator tegangan berfungsi untuk mentransformasikan tegangan yang tinggi menjadi tegangan yang rendah, tegangan yang



rendah ini disebut tegangan sekunder dan dihubungkan ke peralatan ukur atau rele pengaman. Penerapan tegangan sekunder pada transformator tegangan dengan nilai nominal $100/\sqrt{3}$ V atau $110/\sqrt{3}$ V. Konstruksi tranformator tegangan terdiri dari :

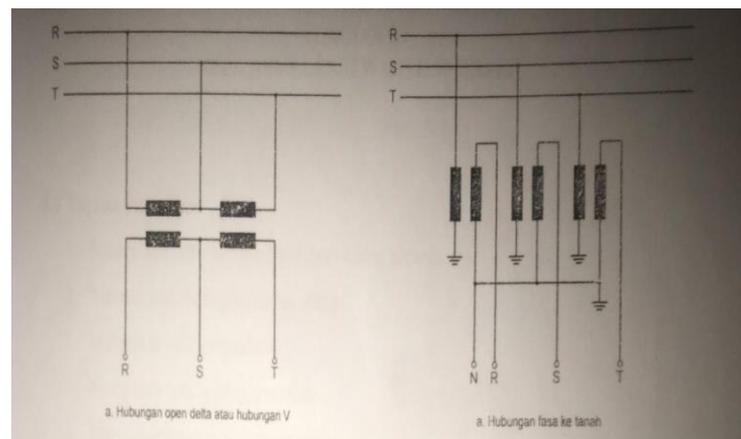
- Kumparan
Berfungsi untuk mentransformasikan besaran arus besar menjadi arus yang kecil.
- Pendingin
Merupakan bahan yang bersifat isolator seperti minyak atau udara. Berfungsi untuk mendinginkan kumparan dan sekaligus mengisolasi bagian bertegangan.
- Porselen
Sebagai pelindung (*body*) merupakan bagian luar dari transformator yang berfungsi untuk memisahkan bagian bertegangan.
- *Dehydrating Breather*
Sebagai pernafasan transformator yang berfungsi untuk menyerap udara lembab yang timbul dalam ruang transformator sehingga dapat mencegah rusaknya isolasi transformator.
- Terminal
Berfungsi untuk penyambungan dari sisi primer atau sekundur ke peralatan listrik lain yang membutuhkannya.

Sesuai dengan kebutuhan penggunaannya pada sistem tenaga listrik tiga fasa, kumparan pada transformator tegangan dihubungkan dengan beberapa formasi. Antara lain :

- Hubungan delta terbuka atau hubungan V
Hubungan ini digunakan untuk jaringan tegangan menengah dan terdiri dari dua buah transformator tegangan satu fasa.

➤ Hubungan fasa ke tanah

Hubungan ini digunakan pada jaringan tegangan menengah dan tegangan tinggi dengan menghubungkannya ke tanah sehingga tegangan sekundernya adalah tegangan fasa ke tanah.



Gambar 2.10 Hubungan pada Transformator Tegangan

2.2.4 Relay Pengaman³

Relay pengaman atau relay Proteksi adalah susunan peralatan yang berfungsi untuk mendeteksi atau merasakan adanya gangguan atau mulai merasakan adanya ketidaknormalan pada peralatan atau bagian sistem listrik. Relay pengaman dapat mendeteksi atau merasakan adanya gangguan pada peralatan yang diamankan dengan mengukur atau membandingkan besaran-besaran yang diterimanya, misalnya arus, tegangan, daya, sudut fasa, frekuensi, impedansi, dan sebagainya dengan besaran yang ditentukan.

Relay secara otomatis membuka Pemutus Tenaga (PMT) atau *Circuit Breaker* (CB) untuk memisahkan peralatan atau bagian dari sistem yang terganggu dan memberi isyarat berupa lampu atau alarm (bel) yang menandakan sistem telah terjadi gangguan. Adapun fungsi relay proteksi ini pada sistem tenaga listrik, yaitu :

³ Primaghani, Kaisar Fabhila. *Rancang Bangun Simulator Koordinasi Proteksi Arus Lebih Pada Jaringan SUTM Tipe Radial Menggunakan Relai SEPAM 1000 DAN MCGG 53*. 2017



1. Merasakan, mengukur, dan menentukan bagian sistem yang terganggu serta memisahkan secepatnya sehingga sistem lainnya tidak terganggu dan dapat beroperasi secara normal ;
2. Mengurangi kerusakan yang lebih parah dari peralatan atau bagian sistem yang terganggu ;
3. Mengurangi pengaruh gangguan terhadap bagian sistem lain yang tidak terganggu di dalam sistem tersebut serta mencegah meluasnya gangguan ;
4. Memperkecil bahaya bagi aspek kehidupan.

Adapun jenis-jenis pembagian relay proteksi berdasarkan besaran ukur yang sering ditemukan dalam pengamanan sistem tenaga listrik, diantaranya yaitu:

1. Relay Arus

Adalah relay yang bekerja berdasarkan pengaturan arus yang akan bekerja pada sistem. Adapun yang relay arus yang sering ditemukan pada sistem tenaga listrik yaitu relay arus lebih atau *Over current Relay* (OCR). Relay arus lebih adalah suatu relay yang bekerja berdasarkan kenaikan arus yang melebihi suatu nilai pengamanan tertentu dan dalam jangka waktu tertentu, sehingga relay ini dapat dipakai sebagai pola pengamanan arus lebih. Relay ini pada dasarnya mengamankan adanya arus lebih yang diakibatkan oleh hubung singkat dan beban lebih. Relay arus lebih ini memberi syarat kepada PMT (Pemutus Tenaga) bila terjadi gangguan untuk membuka rangkaian sehingga kerusakan alat akibat gangguan pada sistem tenaga listrik dapat dihindari.

2. Relay Tegangan

Adalah relay yang bekerja berdasarkan pengaturan tegangan yang ada pada sistem. Terdapat dua jenis relay tegangan yang digunakan pada sistem tenaga listrik sebagai proteksi. Yaitu relay tegangan lebih (*Over Voltage Relay*) dan relay tegangan jatuh (*Under Voltage Relay*). relay ini bekerja melindungi apabila terjadi



tegangan lebih atau tegangan jatuh akibat sambaran petir, selisih parameter beban yang digunakan sehingga dapat menimbulkan kerusakan pada peralatan sistem tenaga listrik. kepada PMT (Pemutus Tenaga) bila terjadi gangguan untuk membuka rangkaian sehingga kerusakan alat akibat gangguan pada sistem tenaga listrik dapat dihindari.

3. Relay Gangguan Tanah

Adalah relay yang bekerja apabila terjadi gangguan hubungan singkat fasa ke tanah. Prinsip kerja dari relay gangguan tanah (*Ground Fault Relay*) ini sama dengan prinsip kerja dari relay arus lebih (*Over Current Relay*). Yang membedakannya yaitu jika relay arus lebih mendeteksi adanya hubung singkat antara fasa dengan fasa, sedangkan relay gangguan tanah antara fasa dengan tanah. Dikarenakan arus gangguan yang timbul akibat kebocor mengalir ke tanah dengan nilainya kecil dan tidak bias terdeteksi oleh relay arus lebih, dengan demikian diperlukan relay gangguan tanah (*Ground Foulty Relay*)

2.2.5 Peralatan Pengukuran⁴

Adapun alat ukur yang terdapat pada alat *switchgear* yaitu diantaranya seperti :

1. Ampere Meter

Ampere meter adalah sebuah alat untuk mengukur kuat arus listrik dalam rangkaian tertutup. Ampere meter biasanya dipasang secara seri dengan elemen listrik. Alat ini sering digunakan oleh teknisi yang biasanya menjadi satu dalam multitester atau avometer. Cara penggunaannya yaitu dengan menghubungkan secara seri antara rangkaian yang akan diukur arusnya dengan amperemeter. Karena didalam ampere meter terdapat kumparan sebagai pelaku untuk

⁴ Sapiie, Soedjana. *Pengukuran dan Alat-Alat Ukur Listrik*. Jakarta. 1982.



menghasilkan putaran. Ampere meter bekerja berdasarkan prinsip gaya magnetik. Ketika arus mengalir melalui kumparan yang dilengkapi oleh medan magnet timbul gaya magnetik atau gaya Lorentz yang menggerakkan jarum penunjuk menyimpang.

2. Volt meter

Adalah alat untuk mengukur besar tegangan listrik dalam suatu rangkaian listrik. Volt meter disusun secara paralel terhadap letak komponen yang diukur dalam rangkaian. Prinsip kerjanya adalah adanya fluks magnetik yang memiliki bentuk gelombang sinus dengan frekuensi yang sama dan masuk ke dalam suatu kepingan logam secara paralel. Antara fluks yang satu dengan fluks yang lain terdapat suatu perbedaan fasa. Fluks bolak-balik akan membangkitkan tegangan-tegangan dalam kepingan logam yang akan menyebabkan terjadinya arus-arus putar di kepingan logam.

3. Frekuensi Meter

Tujuan alat ini adalah untuk mengetahui banyaknya getaran listrik dengan kesatuan Hertz (Hz) dari sumber pembangkit tenaga listrik. Mengapa getaran ini perlu diketahui, hal ini menyangkut permasalahan dari alat yang dipergunakan, dalam hal ini adalah alat-alat listrik karena alat-alat tersebut sudah mempunyai spesifikasi tertentu untuk getarannya. Biasanya yang dipakai rata-rata 48 Hz sampai dengan 60 Hz.

2.3 Gangguan Pada Sistem Switchgear⁵

Pada suatu jaringan listrik, banyak terjadi hal-hal yang dapat mengganggu kerja dari suatu switchgear dengan kata lain kondisi abnormal pada switchgear baik itu gangguan yang berasal dari internal maupun gangguan dari dalam. Gangguan-gangguan tersebut yang biasa terjadi pada switchgear yaitu terjadinya panas, sering trip tanpa sebab yang diketahui dengan pasti, dan sistem kerjanya

⁵ Amalia, Dewi. *Operasi dan Pemeliharaan Switchgear*. 2015.



tidak dapat dioperasikan. Pelacakan penyebab gangguan tersebut dapat dilakukan diantaranya :

1. Terjadinya panas
 - Periksa arus beban.
 - Periksa sambungan-sambungan.
 - Periksa kotoran yang menempel / debu.
 - Periksa sistem pendingin dan suhu ruangan.
2. Sering trip (tanpa sebab yang jelas)
 - Periksa atau acak pada kabel-kabel pada rangkaian
 - pengontrolan sesuai gambar diagram rangkaian control.
 - Periksa penyetelan/setting dari relay proteksi.
 - Periksa tegangan catu daya rangkaian control.
 - Periksa kondisi/spesifikasi peralatan proteksi dan pemutus (switchgear).
 - Periksa hubungan ke beban.
3. Gagal dioperasikan (on/off)
 - Periksa kondisi fisik switchgear
 - Periksa atau melacak kabel-kabel control
 - Periksa komponen rangkaian kontrol dan karakteristik atau spesifikasi
 - Periksa hubungannya ke beban

2.4 Hubung Singkat (*Short Circuit*)⁶

Gangguan ini timbul yang diakibatkan adanya hubung singkat, sehingga timbulnya arus baik itu dari fasa ke fasa maupun fasa ke tanah. Gangguan arus hubung singkat ini berakibat secara thermis maupun mekanis terhadap peralatan yang dilaluinya. Gangguan hubung singkat yang mungkin terjadi dalam jaringan yaitu ada 3 jenis :

⁶ Gonen, Turan. *Electrical Power Distribution System Engineering*. 1986. Hal 725.



- Gangguan hubung singkat 3 fasa
- Gangguan hubung singkat 2 fasa
- Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah

Dalam menghitung gangguan hubung singkat (*short circuit*), arus gangguannya dihitung dengan menggunakan rumus dasar yaitu :

$$I_{faut} = \frac{V}{Z} = (A) \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana :

V = Tegangan sumber (V)

Z = Impedansi jaringan, nilai ekuivalen dari seluruh impedansi di dalam jaringan dari sumber tegangan sampai ke titik gangguan (ohm/ Ω)

2.5 Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa

Dalam melakukan perhitungan arus gangguan hubung singkat 3 fasa dapat dihitung dengan menggunakan rumus dasar, yang dimana impedansi ekuivalen jaringan dimasukkan ke dalam rumus dasar tersebut. rangkaian gangguan tiga fasa pada suatu jaringan dengan hubungan transformator daya dengan netral ditanahkan melalui suatu tahanan. Sehingga arus gangguan hubung singkat tiga fasa dapat dihitung berdasarkan rumus dasar seperti persamaan (2.1) diatas dengan menggunakan rumus :

$$I_{3fasa} = \frac{V_{ph}}{Z_{eq}} \dots \dots \dots (2.2)^7$$

Dimana :

I 3fasa : Arus gangguan hubung singkat 3 fasa (A)

V_{ph} : Tegangan fasa – netral sistem (kV) = $\frac{\text{Tegangan yang diketahui}}{\sqrt{3}}$

Z_{eq} : Impedansi ekuivalen urutan Positif (ohm/ Ω)

sebelum melakukan perhitungan arus hubung singkat, maka kita harus memulai perhitungan pada rel daya sumber masukan untuk berbagai jenis gangguan, kemudian menghitung pada titik-titik lainnya. Untuk itu diperlukan

⁷ Gonen, Turan, loc. cit.



pengetahuan mengenai dasar impedansi urutan rel daya tegangan tinggi atau bisa juga disebut sebagai impedansi sumber, impedansi transformator, dan impedansi penyulang (penghantar).

a) Impedansi Sumber

Untuk menghitung impedansi sumber, maka dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$Z_s = \frac{(kV)^2}{MVA} \dots\dots\dots(2.3)^8$$

Dimana :

Zs = Impedansi Sumber (ohm/ Ω)

kV² = Tegangan pada suplay *Incoming* / tegangan pada sisi primer trafo daya (kV)

MVA = Kapasitas dari suplay *Incoming* (MVA)

b) Impedansi Transormator

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

- Langkah pertama mencari nilai ohm pada 100% untuk trafo yang diketahui (kV). Yaitu dengan menggunakan rumus :

$$X_t \text{ pada } 100\% = \frac{(kV \text{ sisi sekunder})^2}{MVA} \dots\dots\dots(2.4)^9$$

- Lalu tahap selanjutnya yaitu mencari nilai reaktansi tenaganya dengan menggunakan rumus:

$$X_t = \% \text{ impedansi transformator} \times X_t \text{ pada } 100\%$$

Dimana :

Xt = impedansi trafo tenaga (ohm/ Ω)

kV² = Tegangan pada sisi sekunder trafo daya (kV)

⁸ Ibid., Hal. 726

⁹ Gonen, Turan, loc. cit.



MVA = Kapasitas pada trafo daya (MVA)

c) Impedansi Penghantar

Untuk perhitungan impedansi penghantar, perhitungannya tergantung dari besarnya impedansi perunit yang diasumsikan dengan titik-titik gangguan yang terjadi, yaitu pada titik asumsi 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% dari panjang penghantar yang akan dihitung, dimana nilainya tergantung pada jenis penghantarnya, yaitu dari bahan apa penghantar tersebut dibuat dan juga tergantung dari besar kecilnya penampang dan panjang penghantarnya. Sehingga untuk impedansi penghantar dapat ditentukan dengan menggunakan rumus :

Zpenghantar= % panjang penghantar x Z/ (ohm).....(2.5)¹⁰

Dimana :

- Zpenghantar : Impedansi penghantar (per unit)
% panjang penghantar : Persen % x panjang penghantar
Z : Nilai Impedansi (per unit)

d) Impedansi Ekuivalen Jaringan

Setelah dihitung impedansi dari setiap unit, maka perhitungan yang akan dilakukan selanjutnya adalah perhitungan besar nilai impedansi ekuivalen atau total, dari titik gangguan sampai suplay masukan daya atau sumber. Karena dari sejak sumber ke titik gangguan yang ingin dicari terbentuk adalah tersambung seri. Maka perhitungannya dapat langsung dengan cara menjumlah impedansi yang telah dihitung per unit tersebut. sehingga untuk impedansi ekuivalen jaringan dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

Zeq = Zs + Zt + Z (penghantar) (ohm/ Ω)(2.6)¹¹

Dimana :

- Zeq : Nilai Impedansi Ekuivalen Jaringan

¹⁰ Ibid., hal. 727

¹¹ Gonen, Turan, loc. cit.



Z_s	: Nilai Impedansi Sumber
Z_t	: Nilai Impedansi Trafo daya
Z (penghantar)	: Nilai Impedansi Penghantar

2.6 Relay Proteksi¹²

Relay proteksi atau relay pengaman adalah susunan peralatan yang berfungsi untuk mendeteksi atau merasakan adanya gangguan atau mulai merasakan adanya ketidak normalan pada peralatan atau bagian sistem tenaga listrik. Relay proteksi dapat mendeteksi atau merasakan adanya gangguan pada peralatan yang diamankan dengan mengukur atau membandingkan besaran-besaran yang diterimanya, misalnya arus, tegangan, daya, sudut fasa, frekuensi, impedansi dan sebagainya dengan besaran yang telah ditentukan. Relay secara otomatis membuka Pemutus Tenaga (PMT) atau Circuit Breaker (CB) untuk memisahkan peralatan atau bagian dari sistem yang terganggu dan memberi isyarat berupa lampu atau alarm (bel) yang menandakan sistem telah terjadi gangguan. Adapun fungsi dari relay proteksi pada sistem tenaga listrik, yaitu :

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

¹² Primaghani, Kaiser Fabhila. op. cit. Hal. 6-9



2.6.1 Syarat-Syarat Relay Proteksi

Relay proteksi dirancang untuk dapat merasakan atau mengukur adanya gangguan atau mulai merasakan adanya ketidak normalan pada peralatan atau bagian sistem tenaga listrik. Maka dari itu relay proteksi harus memenuhi syarat- syarat sebagai berikut :

- Dapat diandalkan (*Reliable*)

Dalam keadaan normal (tidak ada gangguan) relay tidak boleh bekerja. Tetapi bila suatu saat terjadi gangguan yang mengharuskan relay bekerja, maka relay tidak boleh gagal bekerja untuk mengatasi gangguan tersebut. Disamping itu relay tidak boleh salah bekerja, sehingga menimbulkan pemadaman yang tidak seharusnya ataupun menyulitkan analisa gangguan yang terjadi. Relay pengaman diharapkan mempunyai jangka waktu pemakaian yang lama.

- Selektif

Relay bertugas mengamankan peralatan atau bagian sistem dalam daerah pengamanannya. Dengan kata lain pengamanannya dinyatakan selektif bila relay dan PMT yang bekerja hanyalah pada daerah yang terganggu saja.

- Waktu kerja relai cepat (*Responsive*)

Relay pengaman harus dapat bekerja dengan cepat segera setelah merasakan adanya gangguan pada sistem guna mengurangi kerusakan yang lebih parah dari peralatan atau bagian sistem yang terganggu.

- Peka (*Sensitive*)

Relay harus dapat bekerja dengan kepekaan yang tinggi, artinya harus cukup sensitif terhadap gangguan didaerahnya meskipun gangguan tersebut minimum.

- Ekonomis dan sederhana

Penggunaan relay pengaman harus dipertimbangkan sisi

ekonomisnya tanpa mempengaruhi fungsi relay tersebut.

2.6.2 Jenis-Jenis Relay Proteksi

a. Berdasarkan prinsip kerjanya:

➤ Relay Elektromagnetis

Relay elektromagnetis atau yang disebut dengan *electromechanical* relay. Relay ini menghubungkan rangkaian beban ON dan OFF dengan pemberian energi elektromagnetis, yang membuka dan menutup kontak pada rangkaian listrik maupun elektronis. Relay ini dapat digunakan untuk mengontrol rangkaian beban tegangan tinggi dengan control tegangan rendah.

➤ Relay Thermis

menggunakan panas sebagai pembatas arus, khususnya pada motor. Relay ini biasanya disebut *Thermal Overload Relay* (TOR). Cara kerja relay ini adalah dengan mengkonversi arus yang mengalir menjadi panas untuk mempengaruhi bimetal. Bimetal akan menggerakkan tuas untuk menghentikan aliran listrik

➤ Relay Elektronik

relay elektronik adalah bekerja karena adanya medan magnet yang digunakan untuk menggerakkan saklar. Saat kumparan diberikan tegangan sebesar tegangan kerja relay maka akan timbul medan magnet pada kumparan karena adanya arus yang mengalir pada lilitan kawat. Kumparan yang bersifat sebagai elektromagnet ini kemudian akan menarik saklar dari kontak NC (Normally Close) ke kontak NO (Normally Open). Jika tegangan – tegangan pada kumparan dimatikan maka medan magnet pada kumparan akan hilang, sehingga pegas akan menarik saklar ke kontak NC.

b. Berdasarkan konstruksinya :

➤ Tipe angker tarikan;

➤ Tipe batang seimbang;



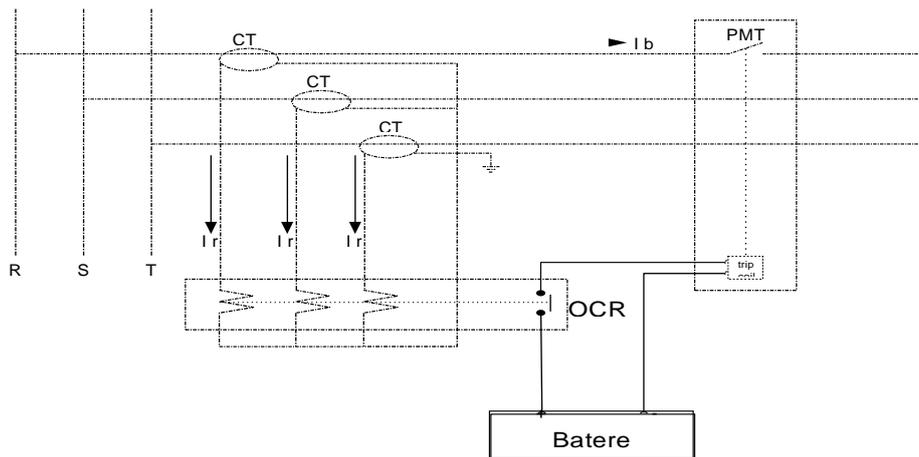
- Tipe cakram induksi;
- Tipe kumparan bergerak;
- c. Berdasarkan besar yang diukur :
 - Relay Tegangan, adalah relay yang bekerja berdasarkan pengaturan tegangan yang ada pada sistem.
 - Relay Arus, adalah relay yang bekerja berdasarkan pengaturan arus yang akan bekerja pada sistem.
 - Relay Impedansi, adalah relay yang bekerja berdasarkan batasan impedansi pada sistem.
 - Relay Frekuensi, adalah relay yang bekerja berdasarkan pengaturan frekuensi yang telah ditentukan.
- d. Berdasarkan cara kerja kontrol elemen :
 - *Direct acting* : Bagian elemen kontrol yang bekerja langsung memutuskan aliran.
 - *Indirect acting* : Bagian kontrol elemen hanya digunakan untuk menutup kontak suatu peralatan lain yang digunakan untuk memutus rangkaian.

2.7 Relay Arus Lebih (OCR)¹³

Relay arus lebih adalah suatu relay yang bekerjanya berdasarkan kenaikan arus yang melebihi suatu nilai pengamanan tertentu dan dalam jangka waktu tertentu, sehingga relay ini dapat dipakai sebagai pola pengamanan arus lebih. Relay ini pada dasarnya mengamankan adanya arus lebih yang disebabkan oleh gangguan hubung singkat atau beban lebih. Relay arus lebih akan bekerja bila besarnya arus input melebihi suatu harga tertentu (arus kerja) yang dapat diatur dan dinyatakan menurut kumparan sekunder dari trafo arus. Relay arus lebih akan memberi isyarat kepada PMT (Pemutus Tenaga) bila terjadi gangguan hubung singkat untuk membuka rangkaian sehingga kerusakan alat dapat dihindari.

¹³ Primaghani, Kaiser Fabhila. op. cit. Hal. 10-21

Proteksi arus lebih meliputi proteksi gangguan hubung singkat yang dapat berupa gangguan hubung singkat fasa-fasa, satu fasa ke tanah serta hubung singkat antar fasa. Proteksi terhadap hubung singkat antar fasa dikenal sebagai proteksi arus lebih dan relay yang digunakan rela arus lebih (*over current relay*).



Gambar 2.11 Rangkaian Relay Arus Lebih

Kondisi normal arus beban (I_b) mengalir pada jaringan tenaga dan oleh trafo arus besaran arus ini ditransformasikan ke besaran sekunder (I_r). Arus I_r mengalir pada kumparan relay, tetapi karena arus ini masih lebih kecil dari pada suatu harga yang ditetapkan (*setting*), maka relay tidak bekerja. Bila terjadi gangguan hubung singkat, arus I_b akan naik dan menyebabkan arus I_r naik pula. Apabila arus I_r naik melebihi suatu harga yang telah ditetapkan (diatas *setting*) maka relai akan bekerja dan memberikan perintah trip coil untuk bekerja dan membuka PMT, sehingga jaringan yang terganggu dipisahkan dari jaringan.

2.7.1 Karakteristik Relay Arus Lebih (OCR)

Karakteristik kerja relay arus lebih (*Over Current Relay*) didasarkan pada waktu kerjanya, yaitu:

1. Relay Arus Lebih Waktu Seketika (*Moment-Instantaneous*)

Relay ini akan memberi perintah kepada Pemutus Tenaga (PMT) pada saat terjadi gangguan bila arus gangguan besarnya melampaui



penyetelannya, dan jangka waktu kerja relay mulai pick-up sampai kerja relay sangat singkat tanpa penundaan waktu yaitu 20 – 60 ms.

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

Relay ini akan memberi perintah kepada Pemutus Tenaga (PMT) pada saat terjadi gangguan bila besarnya arus gangguan melampaui penyetelannya, dan jangka waktu kerja relay mulai pick-up sampai kerja relay waktunya ditunda dengan harga tertentu tidak dipengaruhi oleh besarnya arus gangguan.

3. Relay Arus Berbanding Terbalik (*Inverse*)

Relay ini akan memberi perintah kepada Pemutus Tenaga (PMT) pada saat terjadi gangguan bila besarnya arus gangguan melampaui penyetelannya, dan jangka waktu kerja relay mulai pick-up sampai kerja relay waktu tundanya berbanding terbalik dengan besarnya arus gangguan. Terdapat 3 macam relay *inverse* yaitu :

- *Standard Inverse Time* (SIT)

Yaitu karakteristik yang menunjukkan perbandingan antara besar arus dengan waktu kerja relai yang standar.

- *Very Inverse Time* (VIT)

Yaitu karakteristik yang menunjukkan perbandingan antara besar arus dengan waktu kerja relay yang lebih cepat/tinggi dari standar *inverse*.

- *Extremelly Inverse Time* (EIT)

Yaitu karakteristik yang menunjukkan perbandingan antara besar arus dengan waktu kerja relay yang lebih cepat/tinggi dari *standard* dan *very inverse*.

Tabel 2.1 Koefisien *invers time dial* ¹⁴

Tipe Kurva	Koefisien (k)	Koefisien (α)
<i>Standard Inverse</i>	0,14	0,02
<i>Very Inverse</i>	13,5	2
<i>Extremely Inverse</i>	80	2

2.7.2 Penyetelan Relay Arus Lebih (OCR)¹⁵

Relay arus lebih pada dasarnya lebih memiliki fungsi sebagai pengaman gangguan hubung singkat. Pada dasarnya penyetelan pengaman arus lebih dilakukan penyetelan atas besaran arus dan waktu. Sebelum melakukan penyetelan relay tersebut, terlebih dahulu harus dihitung arus nominalnya (*In*). kemudian barulah bisa melakukan penyetelan. Berikut tata cara melakukan penyetelan relay arus lebih dengan perhitungan-perhitungan dibawah ini :

1. Menghitung besarnya arus nominal :

$$I_n = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} \dots\dots\dots(2.7)^{16}$$

Dimana :

- I_n* : Arus nominal
- kVA : Daya base sebagai acuan (kVA)

2. Menghitung arus penyetelan :

$$I_s = \frac{Kfk}{Kd} \times \frac{1}{Ratio CT} \times I_n \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana :

- I_s* : Nilai *setting* arus
- Kfk : Faktor keamanan
- Kd : Faktor arus kembali
- Ratio CT : Ratio arus yang tertera pada CT

¹⁴ Mahendra, Doni. *Evaluasi Setting Rele Proteksi Untuk Mengurangi Busur Api Pada Switchgear di Bekasap Area PT. Chevron Pacific Indonesia*. 2018. Hal. 80.
¹⁵ Samaulah, Hazairin. 2000. *Dasar-Dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Unsri. Palembang.
¹⁶ Mahendra, Doni., loc. cit.



In : Arus nominal

- (untuk arus lebih dengan karekteristik waktu tertentu (*definite time*) nilai Kfk sebesar 1,1-1,2 dan Kd sebesar 0.8)
- (untuk arus lebih dengan karekteristik waktu terbalik (*inverse time*) nilai Kfk sebesar 1,1 dan Kd sebesar 1.0)

3. Menentukan TMS (*time multiplier setting*) :

$$tms = \left\{ \frac{t \times \left(\left(\frac{If}{Is} \right)^\alpha - 1 \right)}{\beta} \right\} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana :

- tms : Faktor pengali terhadap waktu
- t : Waktu operasi (yang dimana waktu kerja pada relay arus lebih ditentukan dengan kisaran nilai 0,2 – 0,4 untuk mendapatkan pengamanan yang selektif)
- If : Arus gangguan (A)
- Is : Arus penyetelan (*setting*) (A)
- α dan β : Konstanta Invers

4. Menentukan waktu *setting* :(2.10)

$$tset = \left\{ \frac{(tms \times \beta)}{\left(\left(\frac{If}{Is} \right)^\alpha - 1 \right)} \right\}$$

dimana :

- tset : Waktu setting
- tms : Faktor pengali terhadap waktu
- If : Arus gangguan (A)
- Is : Arus penyetelan (*setting*) (A)
- α dan β : Konstanta Invers