



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengertian Circuit Breaker (CB) ^[2]

Berdasarkan IEV (International Electrotechnical Vocabulary) 441-14-20 disebutkan bahwa Circuit Breaker (CB) atau Pemutus Tenaga (PMT) merupakan peralatan saklar / switching mekanis, yang mampu menutup, mengalirkan dan memutus arus beban dalam kondisi normal serta mampu menutup, mengalirkan (dalam periode waktu tertentu) dan memutus arus beban dalam spesifik kondisi abnormal / gangguan seperti kondisi short circuit / hubung singkat.

Circuit Breaker (CB) 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 : ^[5]

1. Mampu menyalurkan arus maksimum sistem secara terus menerus.
2. Mampu memutuskan dan menutup jaringan dalam keadaan berbeban maupun terhubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus tenaga itu sendiri.

^[2] Electropedia - International Electrotechnical Vocabulary (IEV), www.electropedia.org

^[5] Ir. Wahyudi Sarimun. N.MT. "Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik"



3. Dapat memutuskan arus hubung singkat dengan kecepatan tinggi agar arus hubung singkat tidak sampai merusak peralatan sistem, 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. 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.



PMT 20KV



PMT 150KV



PMT 500KV

Gambar-2.1. Macam-macam Circuit Breaker



2.2. Fungsi Bagian Utama CB^[4]

Ruangan pemutus tenaga ini berfungsi sebagai ruangan pemadam busur api, yang terdiri dari :

- a. Unit pemutus utama yang berfungsi sebagai pemutus utama

Unit pemutus utama ini berupa ruangan yang diselubungi bagian luar oleh isolator dari porselen dan disebelah dalamnya terdapat ruangan udara, kontak- kontak bergerak yang dilengkapi oleh pegas penekan dan kontak tetap sebagai penghubung yang terletak melekat pada isolator porselen.

- b. Unit pemutus pembantu yang berfungsi sebagai pemutus arus yang melalui tahanan.

Unit pemutus pembantu ini berupa ruangan yang diselubungi bagian luar oleh isolator dari porselen dan disebelah dalamnya terdapat ruangan udara, kontak-kontak bergerak yang dilengkapi oleh pegas penekan dan kontak tetap sebagai penghubung yang terletak melekat pada porselen.

- c. Katup kelambatan

Berfungsi sebagai pengatur udara bertekanan dari pemutus utama ke unit pemutus pembantu, sehingga kontak pada unit pemutus pembantu akan terbuka kurang dari 25 ms (micro detik) setelah kontak-kontak pada pemutus utama terbuka. Katup kelambatan ini berupa bejana berbentuk silinder yang berongga sebagai ruang udara dan juga terdapat ruang pengatur, katup penahan, katup pengatur, rumah perapat, dan tempat katup.

^[4] “Himpunan buku petunjuk operasi dan pemeliharaan penyaluran tenaga listrik PT.PLN “



d. Tahanan.

Tahanan ini dipasang paralel dengan unit pemutus utama, yang berfungsi untuk :

- a. mengurangi kenaikan harga dari tegangan pukul
- b. mengurangi arus pukulan pada waktu pemutusan

e. Kapasitor

Kapasitor ini dipasang paralel dengan tahanan, unit pemutus utama dan unit pemutus pembantu, yang berfungsi untuk mendapatkan pembagian tegangan yang sama pada setiap celah kontak, sehingga kapasitas pemutusan pada setiap celah sama besarnya.

f. Kontak-kontak

1. Unit pemutus utama Kontak bergerak dilapisi dengan perak terdiri dari:

- a. Kepala kontak bergerak
- b. Silinder kontak
- c. Jari-jari kontak
- d. Batang kontak
- e. Pegangan kontak Kontak tetap, terdiri dari :
 1. Kepala kontak
 2. Pegangan kontak

2. Unit pemutus pembantu

- a. Kontak bergerak
 - b. Kontak tetap, yang terdiri dari:
 1. Jari-jari kontak
 2. Pegangan kontak
-



2.3. Klasifikasi Circuit Breaker (CB) ^[4]

Klasifikasi Pemutus Tenaga dapat dibagi atas beberapa jenis, antara lain berdasarkan tegangan rating/nominal, jumlah mekanik penggerak, media isolasi, dan proses pemadaman busur api jenis gas SF₆.

2.3.1. Berdasarkan Besar / Kelas Tegangan

PMT dapat dibedakan menjadi :

1. CB tegangan rendah (Low Voltage)
Dengan range tegangan 0.1 s/d 1 kV (SPLN 1.1995 - 3.3).
2. CB tegangan menengah (Medium Voltage)
Dengan range tegangan 1 s/d 35 kV (SPLN 1.1995 – 3.4).
3. CB tegangan tinggi (High Voltage)
Dengan range tegangan 35 s/d 245 kV (SPLN 1.1995 – 3.5).
4. CB tegangan extra tinggi (Extra High Voltage)
Dengan range tegangan lebih besar dari 245 kVAC (SPLN 1.1995 – 3.6).

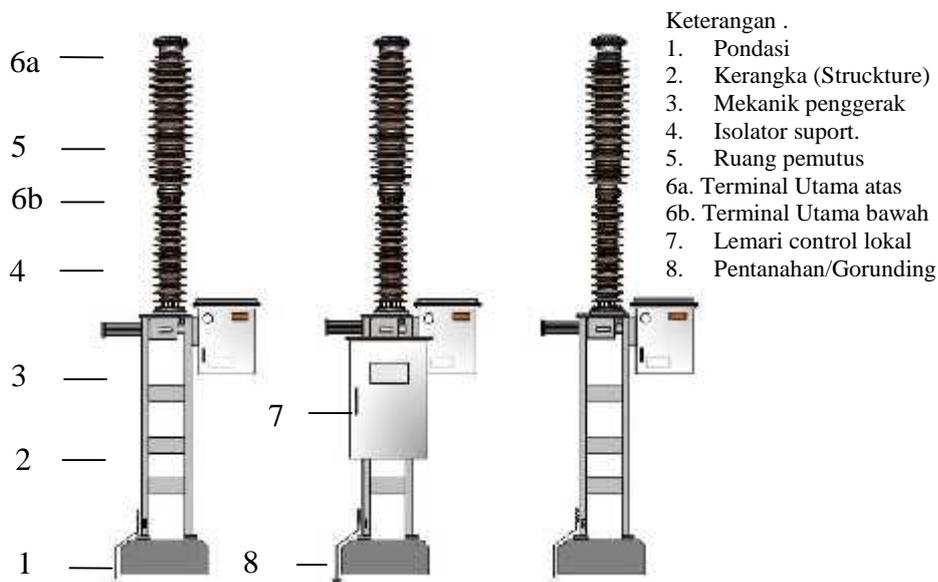
2.3.2. Berdasarkan Jumlah Mekanik Penggerak (Tripping Coil)

PMT dapat dibedakan menjadi :

1. PMT Single Pole

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

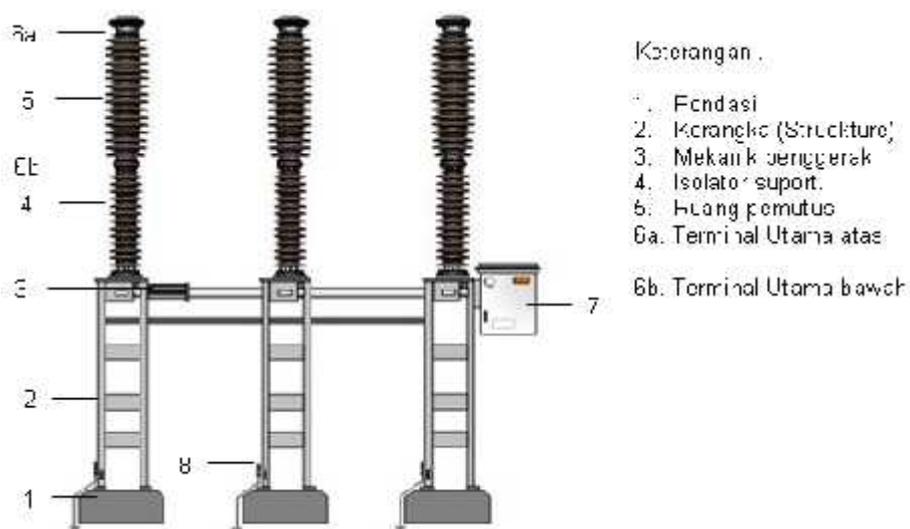
^[4] “Himpunan buku petunjuk operasi dan pemeliharaan penyaluran tenaga listrik PT.PLN “



Gambar-2.2. 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.

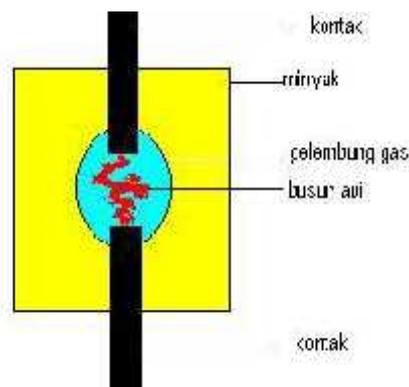


Gambar-2.3. PMT Three Pole

2.3.3. Berdasarkan Media Isolasi

1. Pemutus Tenaga (PMT) Media Minyak.

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 hydrogen 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.



Gambar-2.4. Proses Pemadaman Busur Api Media 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.



Gambar-2.5. Oil Circuit Breaker

Sakelar PMT minyak terbagi menjadi 2 jenis, yaitu :

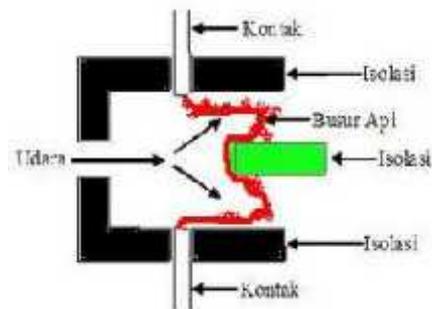
1. Sakelar PMT dengan banyak menggunakan minyak (Bulk Oil Circuit Breaker), pada tipe ini minyak berfungsi sebagai peredam loncatan bunga api listrik selama terjadi pemutusan kontak dan sebagai isolator antara bagian-bagian yang bertegangan dengan badan, jenis PMT ini juga ada yang dilengkapi dengan alat pembatas busur api listrik
2. Sakelar PMT dengan sedikit menggunakan minyak (Low oil Content Circuit Breaker), pada tipe ini minyak hanya dipergunakan sebagai peredam loncatan bunga api listrik, sedangkan sebagai bahan isolator dari bagian-bagian yang bertegangan digunakan porselen atau material isolasi dari jenis organic.

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.

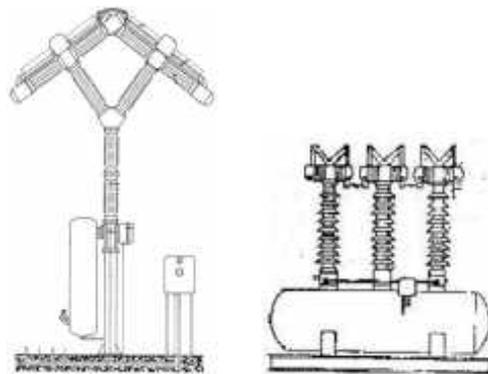


Saat busur api timbul, udara tekanan tinggi dihembuskan ke busur api dipadamkan oleh hembusan udara tekanan tinggi itu dan juga menyingkirkan partikel-partikel bermuatan dari sela kontak, udara ini juga berfungsi untuk mencegah restriking voltage (tegangan pukul ulang).



Gambar-2.6. Proses Pemadaman Busur Api Media Air Blast

Kontak pemutus ditempatkan didalam isolator, dan juga katup hembusan udara. Pada sakelar PMT kapasitas kecil, isolator ini merupakan satu kesatuan dengan PMT, tetapi untuk kapasitas besar tidak demikian halnya.



Gambar-2.7. Air Blast Circuit Breaker

3. PMT Media Vakum (Vacuum Circuit Breaker)

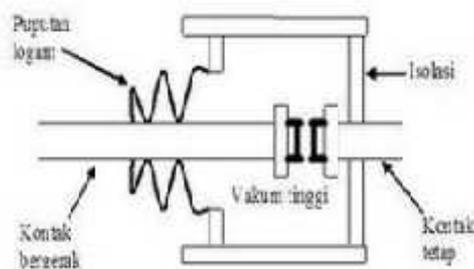
Sakelar PMT ini dapat digunakan untuk memutus rangkaian bertegangan sampai 38 kV. Ruang hampa udara pada CB jenis ini mempunyai kekuatan dielektrik (*dielektrik strength*) yang tinggi dan sebagai media pemadam busur api yang baik.



Pada vacuum circuit breaker kontak ditempatkan pada suatu bilik vakum. Untuk mencegah udara masuk kedalam bilik, maka bilik ini harus ditutup rapat dan kontak Bergeraknya diikat ketat dengan perapat logam.

Jika kontak dibuka, maka pada katoda kontak terjadi emisi thermis 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 dielektrikum yang tinggi maka bentuk pisik PMT jenis ini relatif kecil.



Gambar-2.8. Proses Pemadaman Busur Api Media Vakum

Prinsip kerjanya berbeda dengan dasar prinsip lain kerana 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.



Gambar-2.9. Vacuum Circuit Breaker

4. PMT Media Gas SF₆ (SF₆ Circuit Breaker)

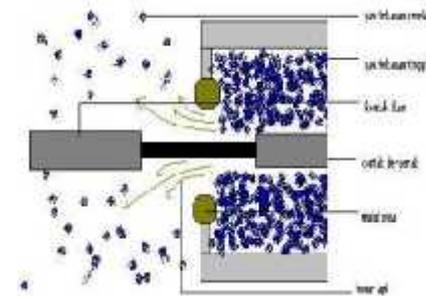
Sakelar PMT ini dapat digunakan untuk memutus arus sampai 40 kA dan pada rangkaian bertegangan sampai 765 kV. Media gas yang digunakan pada tipe ini adalah gas SF₆ (Sulphur hexafluoride).

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.

Gambar-2.10. SF₆ Gas Circuit Breaker



Selama pengisian, gas SF₆ akan menjadi dingin jika keluar dari tangki penyimpanan dan akan panas kembali jika dipompakan untuk pengisian ke dalam 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 2.11 Proses pemadaman busur api pada SF₆

2.4. Sistem Penggerak ^[4]

Berfungsi menggerakkan kontak gerak (moving contact) untuk operasi pemutusan atau penutupan PMT.

Terdapat beberapa jenis sistem penggerak pada PMT, antara lain :

2.4.1. Penggerak Pegas (Spring Drive)

Mekanis penggerak PMT dengan menggunakan pegas (spring) terdiri dari 2 macam, yaitu:

1. Pegas pilin (helical spring)

PMT jenis ini menggunakan pegas pilin sebagai sumber tenaga penggerak yang di tarik atau di regangkan oleh motor melalui rantai.

^[4] “Himpunan buku petunjuk operasi dan pemeliharaan penyaluran tenaga listrik PT.PLN “



2. Pegas gulung (scroll spring)

PMT ini menggunakan pegas gulung untuk sumber tenaga penggerak yang di putar oleh motor melalui roda gigi.



Gambar-2.12.

Sistem Pegas Pilin (Helical)



Gambar-2.13.

Sistem Pegas Gulung (Scroll)

2.4.2 Penggerak Hidrolik

Penggerak mekanik PMT hidrolik adalah rangkaian gabungan dari beberapa komponen mekanik, elektrik dan hidrolik oil yang dirangkai sedemikian rupa sehingga dapat berfungsi sebagai penggerak untuk membuka dan menutup PMT.

Pada kondisi PMT membuka / keluar, sistem hidrolik tekanan tinggi tetap pada posisi seperti pada gambar piping diagram, di mana minyak hidrolik tekanan rendah (warna biru) bertekanan sama dengan tekanan Atmosfir dan (warna merah) bertekanan tinggi hingga 360 bar.

2.4.3. Penggerak Pneumatic

Penggerak mekanik PMT pneumatic adalah rangkaian gabungan dari beberapa komponen mekanik, elektrik dan udara bertekanan yang dirangkai sedemikian rupa sehingga dapat berfungsi sebagai penggerak untuk membuka dan menutup PMT.



2.4.4 SF6 Gas Dynamic

PMT jenis ini media memanfaatkan tekanan gas SF6 yang berfungsi ganda selain sebagai pemadam tekanan gas juga dimanfaatkan sebagai media penggerak.

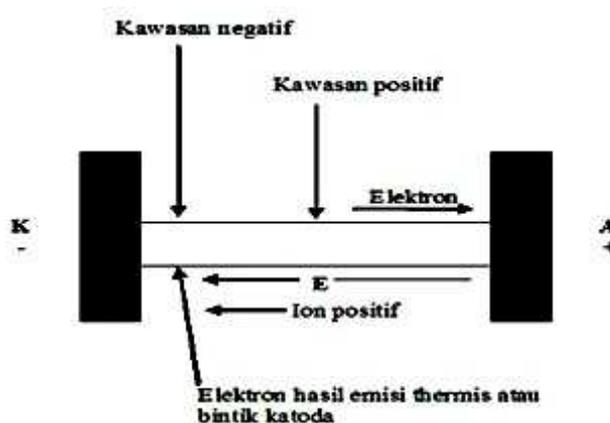
Setiap PMT terdiri dari 3 identik *pole*, dimana masing – masing merupakan unit komplit dari *Interrupter*, isolator tumpu, dan power aktuator yang digerakkan oleh gas SF6 masing – masing *pole* dalam *cycle* tertutup.

Energi untuk menggerakkan kontak utama terjadi karena adanya perbedaan tekanan gas SF6 antara :

1. Volume yang terbentuk dalam *interrupter* dan isolator tumpu.
2. Volume dalam enclosure mekanik penggerak

2.5. Proses Terjadinya Busur Api ^[5]

Pada waktu pemutusan atau penghubungan suatu rangkaian sistem tenaga listrik maka pada CB akan terjadi busur api, hal tersebut terjadi karena pada saat kontak CB dipisahkan, beda potensial diantara kontak akan menimbulkan medan elektrik diantara kontak tersebut, seperti ditunjukkan pada Gambar-2.30.



Gambar-2.14. Pembentukan Busur Api

^[5] Ir. Wahyudi Sarimun. N.MT.

“Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik”



Arus yang sebelumnya mengalir pada kontak akan memanaskan kontak dan menghasilkan emisi termis pada permukaan kontak. Sedangkan medan elektrik menimbulkan emisi medan tinggi pada kontak katoda (K).

Kedua emisi ini menghasilkan elektron bebas yang sangat banyak dan bergerak menuju kontak anoda (A). Elektron-elektron ini membentur molekul netral media isolasi dikawasan positif, benturan-benturan ini akan menimbulkan proses ionisasi. Dengan demikian, jumlah elektron bebas yang menuju anoda akan semakin bertambah dan muncul ion positif hasil ionisasi yang bergerak menuju katoda, perpindahan elektron bebas ke anoda menimbulkan arus dan memanaskan kontak anoda.

Ion positif yang tiba di kontak katoda akan menimbulkan dua efek yang berbeda. Jika kontak terbuat dari bahan yang titik leburnya tinggi, misalnya tungsten atau karbon, maka ion positif akan menimbulkan pemanasan di katoda. Akibatnya, emisi termis semakin meningkat. Jika kontak terbuat dari bahan yang titik leburnya rendah, misal tembaga, ion positif akan menimbulkan emisi medan tinggi. Hasil emisi termis ini dan emisi medan tinggi akan memperlama proses ionisasi, sehingga perpindahan muatan antar kontak terus berlangsung dan inilah yang disebut busur api.

Untuk memadamkan busur api tersebut perlu dilakukan usaha-usaha yang dapat menimbulkan proses deionisasi, antara lain dengan cara sebagai berikut: Meniupkan udara ke sela kontak, sehingga partikel-partikel hasil ionisasi dijauhkan dari sela kontak.

1. Menyemburkan minyak isolasi kebusur api untuk memberi peluang yang lebih besar bagi proses rekombinasi.
 2. Memotong busur api dengan tabir isolasi atau tabir logam, sehingga memberi peluang yang lebih besar bagi proses rekombinasi.
 3. Membuat media pemisah kontak dari gas elektronegatif, sehingga elektron-elektron bebas tertangkap oleh molekul netral gas tersebut.
-



4. Jika pengurangan partikel bermuatan karena proses deionisasi lebih banyak daripada penambahan muatan karena proses ionisasi, maka busur api akan padam. Ketika busur api padam, di sela kontak akan tetap ada terpaan medan elektrik.

Jika suatu saat terjadi terpaan medan elektrik yang lebih besar daripada kekuatan dielektrik media isolasi kontak, maka busur api akan terjadi lagi.

2.6. Mekanisme Kerja Circuit Breaker (CB) ^[5]

Pemutus tenaga mempunyai dua posisi kerja, membuka dan menutup. Selama operasi penutupan, kontak-kontak penutup menutup melawan gaya-gaya saling berlawanan. Selama operasi pembukaan, kontak-kontak tertutup terpisah sedini mungkin.

Mekanisme kerja pemutus tenaga harus melakukan gaya-gaya yang besar pada kecepatan yang tinggi. Waktu operasi antara saat penerimaan sinyal trip dan akhir pemisahan kontak dalam orde 0,03 detik (1,5 cycle) dalam pemutus tegangan tinggi. Pada pemutus lambat yang digunakan dalam sistem distribusi, waktu ini sekitar 3 siklus. Ketika menutup, penutupan kontak harus cepat dengan tekanan kontak yang tepat pada akhir perjalanan kontak. Jika kondisi ini tidak terpenuhi, pengelasan kontak dapat terjadi. Mekanisme harus mampu memberikan tugas khusus pemutus tenaga, kerja pembukaan dan penutupan.

1. Pembukaan Jaringan
 - a. PMT dioperasikan (dilepas) lebih dahulu
 - b. Sebelum pemisah dioperasikan apakah PMT sudah terbuka sempurna , apakah amperemeter menunjukkan nol.

Urutan pembukaan jaringan :

1. PMT dibuka
2. PMS busbar dibuka
3. PMS line dibuka
4. PMS tanah ditutup

^[5] Ir. Wahyudi Sarimun. N.MT.



Dalam operasi pembukaan, energi yang diperlukan untuk pembukaan dapat diperoleh dari salah satu metode tersebut :

1. Pegas yang terbuka
 2. Minyak hidrolik tekanan tinggi yang tersimpan dalam akumulator.
 3. Udara kompresif tekanan tinggi yang dalam penerima udara.
2. Penutupan Jaringan
- a. PMT dioperasikan setelah pemisah-pemisah dihubungkan.
 - b. Setelah PMT dihubungkan diperiksa apakah terjadi kebocoran isolasi pada PMT.

Urutan penutupan jaringan :

1. PMS tanah dibuka
2. PMS busabar ditutup
3. PMS line ditutup
4. PMT ditutup

Secara normal, penutupan kontak-kontak pemutus tenaga dalam kondisi normal tidak menimbulkan persoalan. Mekanisme kerja harus mampu mengatasi gesekan dan mempercepat kontak gerak. Tetapi ketika pemutus tenaga menutup pada kondisi hubung singkat gaya elektromagnetik akan terlibat. Kapasitas penutupan pemutus tenaga tergantung atas gaya dan kecepatan pada waktu operasi penutupan dilakukan.

2.7. Gangguan Sistem Distribusi ^[1]

Untuk dapat menghitung besarnya arus gangguan yang terjadi pada saluran distribusi perlu diketahui data mengenai trafo tenaga yang terdapat pada Gardu Induk.

^[1] DR. A. Arismunandar dan DR. S. Kuwahara,
"Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik", Jilid II: Saluran Transmisi



Ada beberapa jenis gangguan yang terjadi pada saluran distribusi diantaranya, yaitu :

1. gangguan hubung singkat 3 fasa

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

2. gangguan hubung singkat 2 fasa

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

2.7.1. Perhitungan Arus Gangguan

Rumus dasar yang digunakan untuk menghitung arus gangguan adalah :

1. Hubung singkat Tiga-Fasa

$$I_{1F} = I_F = \frac{E_{a1}}{Z_1} \dots \dots \dots (2.1)$$

2. Hubung singkat Dua-Fasa

$$I_{1F} \approx I_{2F} = \frac{E_{c1}}{Z_1 + Z_2}$$

$$I_F = \sqrt{3} \cdot I_{2F} \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan :

I_{hs} : Arus gangguan

E_{p.u.} : Tegangan Fasa

Z_T : Impedansi Total



2.7.2. Perhitungan Impedansi

1. Impedansi dasar ^[3]

Dalam suatu sistem tenaga listrik terinterkoneksi yang memiliki berbagai tingkat tegangan dan macam-macam peralatan daya adalah lebih mudah untuk bekerja dan membuat perhitungan-perhitungan dengan mempergunakan besaran-besaran system per-unit (pu). Nilai pu dari suatu besaran didefinisikan sebagai:

$$\frac{\text{Nilai aktual suatu besaran}}{\text{Nilai acuan besaran yang sama}}$$

Dalam teknik tenaga listrik terdapat tiga besaran dasar, yaitu tegangan, arus, dan impedansi. Bilamana dipilih dua besaran sebagai acuan, maka besaran ketiga akan dengan sendirinya memiliki nilai acuan juga. Misalnya bilamana tegangan V dan arus I merupakan besaran dasar, maka impedansi dasar sudah jelas karena:

$$Z = V / I$$

Biasanya dari suatu mesin listrik (trafo) disebut tegangan nominal dalam besaran V dan kapasitas kVA sebagai besaran-besaran dasar. Misalkan V_d merupakan tegangan dasar dan $kVAd$ merupakan kapasitas dasar, maka dapat ditulis:

$$V_{pu} = \frac{V_{\text{aktual}}}{V_d}$$

$$\text{Arus dasar} = \frac{kVAd \times 1000}{V_d}$$

$$\text{atau } I_{pu} = \frac{\text{Arus aktual}}{\text{Arus dasar}} = \frac{\text{Arus aktual}}{kVAd \times 1000} \times V_d$$

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{\text{Tegangan dasar}}{\text{Arus dasar}}$$

^[3] Abdul Kadir, "Transmisi Tenaga Listrik"



$$Z_d = \frac{V_d^2}{kVA_d \times 1000} \dots\dots\dots(2.3)$$

$$\text{atau } Z_{pu} = \frac{\text{Impedansi aktual}}{\text{Impedansi dasar}}$$

$$Z_{pu} = \frac{Z \cdot kVA_d \times 1000}{V_d^2}$$

$$Z_{pu} = \frac{z \cdot MVA}{(kV_d)^2} \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan :

- Zd : Impedansi dasar
 Zpu : Impedansi per-unit
 Vd : Tegangan dasar
 kVA : Kapasitas dasar (daya trafo)

2. Impedansi Sumber ^[5]

Impedansi sumber diambil dari arus beban puncak yang mengalir dari sistem interkoneksi ke gardu induk. Dalam kasus ini diambil arus beban puncak adalah 5 kA. Besarnya nilai impedansi sumber dapat diketahui dengan menggunakan persamaan :

$$X_{sc} = \frac{kV^2}{MVA_{sc}} \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan :

- Xsc : Impedansi sumber
 kV : Tegangan pada sisi primer
 MVA_{sc} : Daya hubung singkat

Dimana untuk daya hubung singkat menggunakan persamaan:

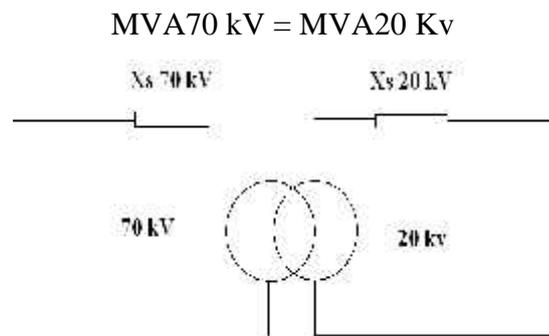
$$MVA_{sc} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \text{ (MVA)} \dots\dots\dots(2.6)$$

^[5] Ir. Wahyudi Sarimun. N.MT. "Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik"



Impedansi sumber ini merupakan nilai impedansi pada sisi primer. Untuk menghitung nilai impedansi sumber pada sisi sekunder maka harus dikonversi terlebih dahulu.

Daya trafo tenaga antara sisi primer dan sekunder sama, maka :



Gambar-2.15. Transformasi Impedansi pada Trafo Tenaga

Daya sisi 70 kV \approx Daya sisi 20 kV

$$\frac{kV_1^2}{Z_1} = \frac{kV_2^2}{Z_2}$$

Keterangan :

kV1 2 : Tegangan sisi primer

kV2 2 : Tegangan sisi sekunder

Z1 : Impedansi sisi primer

Z2 : Impedansi sisi sekunder

3. Impedansi Trafo Tenaga ^[5]

Untuk suatu transformator impedansi dapat ditinjau dari sisi tegangan tinggi atau tegangan rendahnya. Apabila persen atau per-unit dari impedansi suatu transformator ditinjau dari sisi tegangan rendahnya, maka besarnya juga dipilih dari tegangan rendahnya.

$$Z(\%) = \frac{\text{Impedansi (ohm)} \times \text{Daya (MVA)}}{[\text{Tegangan (kV)}]^2} \times 100 \dots\dots\dots (2.7)$$

$$Z(\text{ohm}) = \frac{\text{Impedansi (\%)} \times [\text{Tegangan (kV)}]^2}{\text{Daya (MVA)} \times 100} \dots\dots\dots (2.8)$$

^[5] Ir. Wahyudi Sarimun. N.MT. "Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik"



4. Impedansi Penyulang ^[5]

Impedansi penyulang dapat diketahui melalui data teknis pada Gardu Induk. Untuk mengetahui besar impedansi penyulang pada suatu titik gangguan tertentu dapat disimulasikan pada gangguan 25%, 50%, 75% dan 100% dari panjang penyulang.

Besar nilai impedansi urutan positif dan urutan negatif penyulang untuk setiap titik gangguannya adalah sebagai berikut :

Impedansi urutan positif (Z_1) = Impedansi Urutan negatif (Z_2)

Misalkan, S = Panjang saluran

Untuk panjang 25% $= 0,25 \times S \times (Z_1) = (Z_1 \text{ 25\%})$ ohm

Dari perhitungan impedansi urutan positif dan urutan negatif diatas, maka dapat dicari pula untuk impedansi urutan positif ekuivalen (Z_{1eki}) dan impedansi urutan negatif ekuivalen (Z_{2eki}). Z_{1eki} dan Z_{2eki} dapat langsung dihitung sesuai dengan lokasi gangguan dengan menjumlahkan $X_S + X_T + \% Z_L$.

Hitungan Z_{1eki} dan Z_{2eki}

$$Z_{1eki} = Z_{2eki} = X_S + X_T + Z_{penyulang} \dots \dots \dots (2.9)$$

Keterangan:

X_S = perhitungan impedansi sumber

X_T = perhitungan impedansi trafo

Z penyulang = impedansi penyulang ($Z_1 = Z_2$)

^[5] Ir. Wahyudi Sarimun. N.MT. "Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik"
