



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Pengertian *Circuit Breaker* (CB)

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<sup>[1]</sup>.

*Switchgear* adalah peralatan pemutus tenaga listrik atau lebih dikenal yaitu disebut *Circuit Breaker*, berfungsi untuk menghubungkan dan melepas beban di jaringan listrik serta mengamankan atau melindungi peralatan yang terhubung di rangkaian beban bila terjadi gangguan pada sistem yang dilayani

Dengan demikian maka suatu *switchgear* harus dilengkapi dengan peralatan rele proteksi dan sistem *interlock* yang bisa membuka secara otomatis saat terjadi gangguan sehingga kerusakan lebih lanjut dapat dihindari

Pada umumnya *switchgear* di Unit Pembangkit Listrik / *Power Station* adalah tipe busbar tunggal / *single busbar type* atau metal clad dimana *circuit breaker* ditempatkan dalam bilik tertutup yang dinamakan *Cubicle.Circuit Breaker* yang berada di dalam *cubicle* harus dapat dikeluarkan ( *rack out* ) dan dimasukkan kembali ( *rack in* ) terutama untuk keperluan pemeliharaan

Tegangan kerja dari *switchgear* tergantung dari kapasitas Unit Pembangkit dan tegangan kerja peralatan bantuannya, pada umumnya tegangan kerja yang digunakan antara 3.3kV sampai 11kV



Dari uraian tersebut diatas maka switchgear berfungsi sebagai berikut :

Saat kondisi normal

1. Menghubungkan rangkaian listrik
2. Membaca parameter listrik
3. Mengatur penyaluran listrik
4. Mendeteksi parameter listrik

Saat kondisi gangguan

1. Memutus rangkaian listrik
2. Membaca parameter listrik
3. Mengamankan komponen rangkaian listrik<sup>[5]</sup>

*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<sup>[2]</sup>.

Syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh suatu *Circuit Breaker* (CB) agar dapat melakukan hal-hal diatas, adalah sebagai berikut :

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.

---

<sup>2</sup>Electropedia - *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV), [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

<sup>5</sup>Modul switchgear pln.Jakarta: Pusat pendidikan dan pelatihan PLN

---



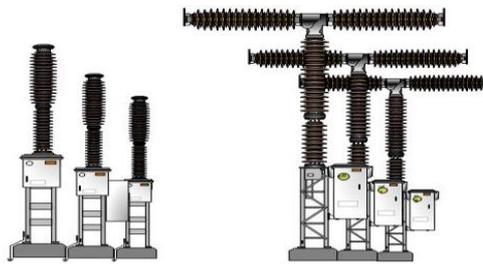
3. Dapat memutuskan arus hubung singkat dengan kecepatan tinggi agar arus hubung singkat tidak sampai merusak peralatan sistem, sehingga tidak membuat sistem kehilangan kestabilan, dan merusak pemutus tenaga itu sendiri<sup>[8]</sup>.

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*

<sup>8</sup>Tobing, Bonggas L. 2012. *peralatan tegangan tinggi*. medan: Erlangga.



## 2.2 Fungsi Bagian Utama CB

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.

---



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<sup>[6]</sup>

---

<sup>6</sup>Operator PLN. 1989. *Himpunan Buku Petunjuk Operasi Dan Pemeliharaan Peralatan Penyaluran Tenaga Listrik*. Jakarta: Perusahaan Listrik Negara

---



## 2.3 Klasifikasi *Circuit Breaker* (CB)

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 SF<sub>6</sub>.

### 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 ).

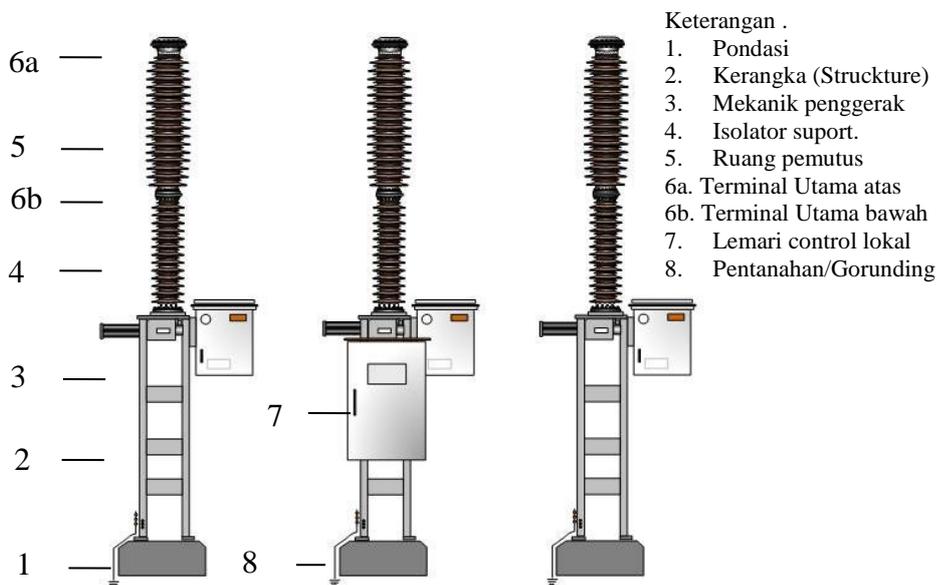
### 2.3.2 Berdasarkan jumlah mekanik penggerak (*tripping coil*)

PMT dapat dibedakan menjadi :

1. PMT *Single Pole*

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

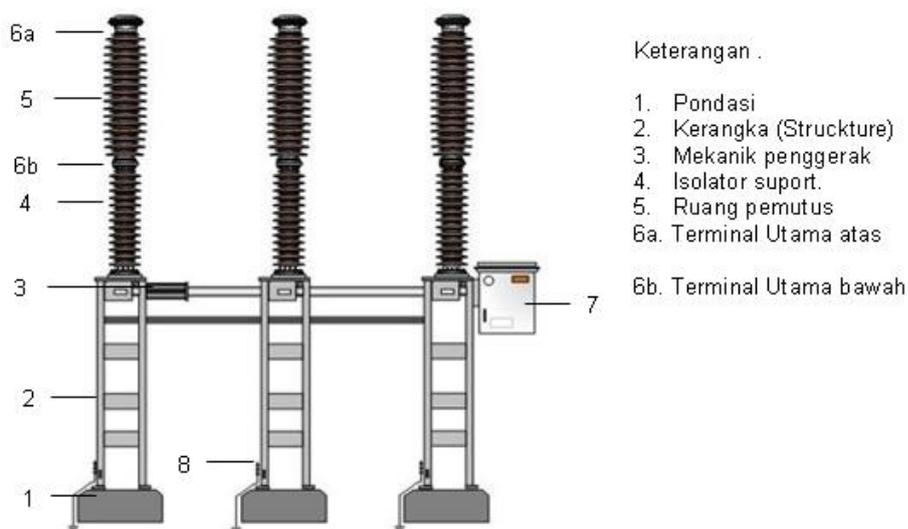
---



Gambar-2.2. 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<sup>[6]</sup>.



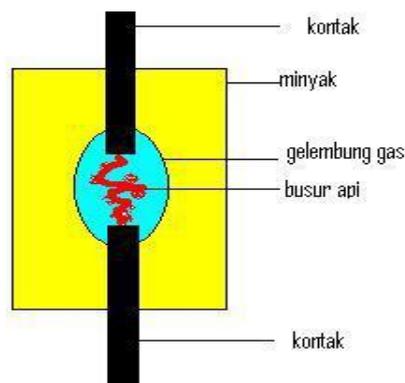
Gambar-2.3. PMT Three Pole



### 2.3.3 Berdasarkan jenis 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 Sakelar sebagai peredam loncatan bunga api listrik, sedangkan sebagai bahan isolator dari bagian-bagian yang bertegangan digunakan porselen atau material isolasi dari jenis organik.

Kelemahan pemutus daya minyak adalah sebagai berikut:

1. minyak mudah terbakar dan jika mengalami tekanan dapat meledak.
  2. Kekentalan minyak memperlambat pemisahan kontak, sehingga tidak cocok untuk sistem yang membutuhkan pemutusan arus yang cepat.
  3. 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.
-

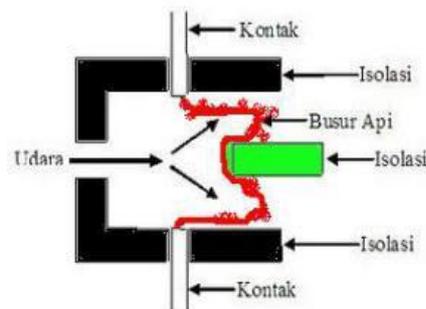


4. Minyak akan mengalami degradasi jika bercampur dengan air atau karbon, maka perlu diadakan pemeriksaan rutin terhadap sifat di elektrik dan sifat kimia minyak<sup>[8]</sup>.

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

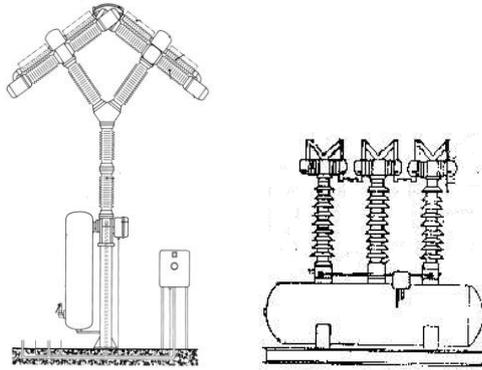
Sakelar PMT ini dapat digunakan untuk memutus arus sampai 40 kA dan pada rangkaian bertegangan sampai 765 kV. PMT udara hembus dirancang untuk mengatasi kelemahan pada PMT minyak, yaitu dengan membuat media isolator kontak dari bahan yang tidak mudah terbakar dan tidak menghalangi pemisahan kontak, sehingga 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

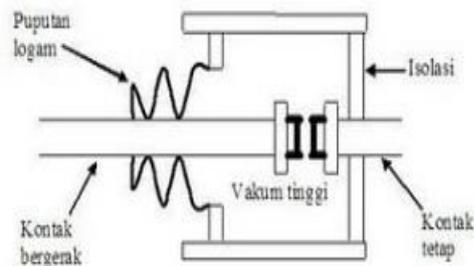
### 3. PMT Media Vakum (*Vacuum Circuit Breaker*)

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 *vacuum*. Untuk mencegah udara masuk kedalam bilik, maka bilik ini harus ditutup rapat dan kontak Bergeraknya diikat ketat dengan perapat logam.

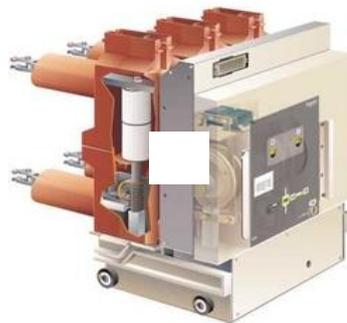
Jika kontak dibuka, maka pada katoda kontak terjadi emisi termis dan medan tegangan yang tinggi yang memproduksi elektron-elektron bebas. Elektron hasil emisi ini bergerak menuju anoda, elektron-elektron bebas ini tidak bertemu dengan molekul udara sehingga tidak terjadi proses ionisasi. Akibatnya, tidak 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 fisik PMT jenis ini relatif kecil.



Gambar-2.8. Proses Pemadaman Busur Api Media *Vacuum*

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.



Gambar-2.9. *Vacuum Circuit Breaker*

Kelebihan kelebihan pemutus daya vacuum antara lain adalah:

1. konstruksinya kompak, andal dan tahan lama
2. Tidak menimbulkan bahaya kebakaran
3. Ketika dioperasikan, tidak memproduksi gas
4. Dapat memutuskan arus hubung singkat yang tinggi
5. Perawatannya mudah dan murah
6. Mampu menahan tegangan impuls petir



7. Energy yang di konsumsi busur api rendah
8. Konstruksi penarik kontak sederhana, sehingga dapat di gerakkan peralatan mekanik bertenaga rendah<sup>[8]</sup>

#### 4. PMT Media Gas SF<sub>6</sub> (SF<sub>6</sub> 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 SF<sub>6</sub> (*Sulphur hexafluoride*).

Sifat gas SF<sub>6</sub> murni adalah tidak berwarna, tidak berbau, tidak beracun dan tidak mudah terbakar. Pada suhu diatas 150° C, gas SF<sub>6</sub> mempunyai sifat tidak merusak metal, plastic dan bermacam bahan yang umumnya digunakan dalam pemutus tenaga tegangan tinggi. Sebagai isolasi listrik, gas SF<sub>6</sub> mempunyai kekuatan dielektrik yang tinggi (2,35 kali udara) dan kekuatan dielektrik ini bertambah dengan pertambahan tekanan. Sifat lain dari gas SF<sub>6</sub> 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.



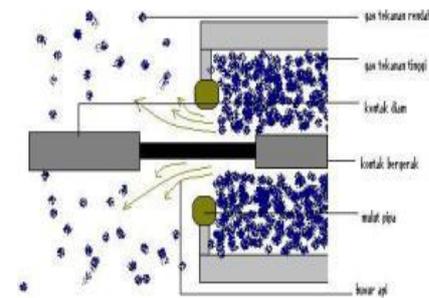
Gambar-2.10. SF<sub>6</sub> Gas Circuit Breaker

Selama pengisian, gas SF<sub>6</sub> akan menjadi dingin jika keluar dari tangki penyimpanan dan akan panas kembali jika dipompakan untuk pengisian kedalam bagian/ruang pemutus tenaga. Oleh karena itu gas SF<sub>6</sub> perlu diadakan pengaturan

---



tekanannya beberapa jam setelah pengisian, pada saat gas SF<sub>6</sub> pada suhu lingkungan



Gambar 2.11 Proses pemadaman busur api pada SF<sub>6</sub>

Gas SF<sub>6</sub> sebagai medium pemadam busur api pemutus daya di minati karena memiliki beberapa keunggulan sebagai berikut :

1. Sifat kimianya stabil, tidak mudah terbakar, tidak menimbulkan korosi pada bahan logam, tidak beracun, tidak berwarna dan tidak berbau
2. Gas SF<sub>6</sub> memiliki sifat elektronegatif, yaitu sifat molekulnya yang aktif menangkap elektron bebas, sehingga molekul netral tersebut berubah menjadi ion negatif. Sifat ini salah satu yang membuat SF<sub>6</sub> memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi. Sifat elektronegatif gas SF<sub>6</sub> mempercepat pemulihan kekuatan dielektrik medium di sela kontak sehingga pemadaman busur api berlangsung lebih cepat
3. Pada kondisi yang sama, kekuatan dielektrik gas SF<sub>6</sub> dua sampai tiga kali lipat dari pada kekuatan dielektrik udara, bahkan pada tekanan tertentu hampir sama dengan minyak. Sifat ini membuat pemutus daya SF<sub>6</sub> sangat efektif digunakan pada sistem tegangan tinggi dan mampu memutuskan arus tinggi
4. Jika gas SF<sub>6</sub> terkontaminasi udara, kekuatan dielektriknya tidak banyak berubah
5. Daya hantar panas gas SF<sub>6</sub> lebih baik dari pada udara sehingga dapat digunakan untuk pendingin konveksi



6. Interaksi busur api dengan gas SF<sub>6</sub> tidak menimbulkan endapan karbon seperti halnya pada pemutus daya minyak
7. Biaya perawatannya murah
8. Konstruksi pemutus daya SF<sub>6</sub> sederhana dan ringan sehingga biaya pembuatan pondasinya murah<sup>[8]</sup>

## 2.4 Sistem Penggerak

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:

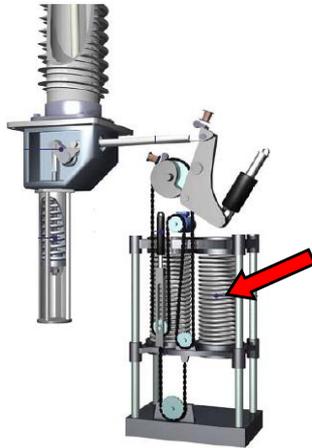
1. Pegas pilin (*helical spring*)

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

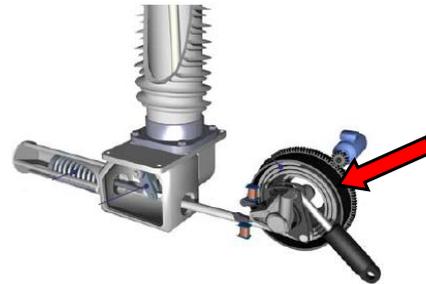
2. Pegas gulung (*scroll spring*)

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 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 dinamik

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

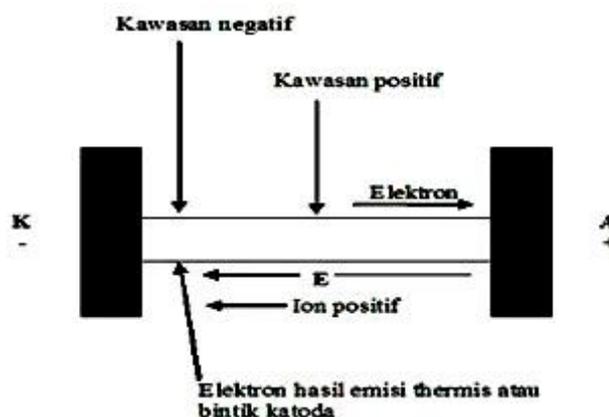
Setiap PMT terdiri dari 3 identik *pole*, dimana masing – masing merupakan unit komplit dari *Interrupter*, isolator tumpu, dan power aktuator yang digerakkan oleh gas SF6 masing – masing *pole* dalam *cycle* tertutup.

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<sup>[6]</sup>

#### 2.5 Proses Terjadinya Busur Api

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

Arus yang sebelumnya mengalir pada kontak akan memanaskan kontak dan menghasilkan emisi thermis 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<sup>[7]</sup>.

## 2.6 Pemadaman Busur Api

Suatu pemutus daya dinyatakan berhasil memutuskan hubungan rangkaian jika selama kontak terbuka, arus yang melalui sela kontak sama dengan nol, atau tidak terjadi busur api lagi pada sela kontak. Ketika busur api padam, di sela kontak akan tetap ada medan elektrik. Jika kuat medan elektrik pada sela kontak lebih besar dari pada kekuatan elektrik medium di sela kontak, maka busur api akan terjadi lagi.

Tujuan akhir pemadaman busur api adalah untuk membuat arus pada sela kontak sama dengan nol. Membuat arus searah menjadi nol berbeda dengan membuat arus bolak-balik menjadi nol. Oleh karena itu, pemadaman busur api pada pemutus daya searah berbeda dengan pemadaman busur api pada pemutus daya bolak-balik sebagai berikut :

### 2.6.1 Pemadaman busur api arus searah

Secara alami, arus searah tidak pernah nol. Ada dua cara membuat arus searah menjadi nol, yaitu :

1. Membuat jatuh tegangan (V) pada busur api sama atau lebih besar dari pada tegangan system
2. Menginjeksikan arus yang berlawanan arah dengan rus pada busur api

Cara pertama di lakaikan pada pemutus daya berkapasitas dan bertegangan rendah, sedangkan cara kedua dilakukan pada daya bertegangan tinggi. Pada cara pertama jatuh tegangan pada busur api di perbesar dengan menaikkan resistansi busur api. Menaikan resistans busur aoi bisa di lakukan dengan tiga cara yaitu :

1. Memperpanjang lintasan busur api

---

<sup>7</sup>Sarimun, Wahyudi. 2012 .*Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik*.depok: Garammond.

---



2. Menekan permukaan busur api supaya diameter busur api semakin kecil
3. Memotong busur api dengan beberapa plat logam sehingga membentuk segmen segmen busur api pendek yang terhubung secara seri. Setiap segmen busur api mengalami pengerutan sehingga resistansi seluruh segmen busur api lebih besar dari pada resistansi busur api tanpa plat logam.

Cara kedua adalah membuat arus pada busur api sama dengan nol, yaitu dengan menghubungkan suatu kapasitor bermuatan ke terminal pemutus daya dengan polaritas yang berlawanan.

### **2.6.2 Pemadaman busur api arus bolak balik**

Secara alamiah, dalam satu periode, arus bolak balik dua kali bernilai nol. Agar arus terus bernilai nol, setelah arus bernilai nol yang pertama, pembentukan busur api yang berikutnya harus di cegah. Pencegahan dilakukan dengan deionisasi. Deionisasi akan mengurangi lektron bebas, sehingga konduktivitas busur api berkurang. Pengurangan konduktivitas mengakibatkan resistansi busur api semakin besar. Penambahan resistansi busur api akan memperkecil arus pada sela kontak pemutus daya dan cenderung menjadi nol.

Jika pengurangan partikel bermuatan karena proses deionisasi lebih banyak dari pada penambahan muatan karena proses ionisasi, maka busur api akan padam. Usaha-usaha yang dilakukan untuk menimbulkan proses deionisasi, antara lain adalah sebagai berikut :

1. meniupkan udara kesela kontak, sehingga busur api mengalami pendinginan dan partikel – partikel hasil ionisasi terdorong menjauhi sela kontak
2. menyemburkan minyak atau gas isolasi ke busur api untuk mendinginkan busur api sehingga peluang bagi proses rekombinasi semakin besar
3. memotong busur api dengan tabir isolasi atau tabir logam, sehingga member peluang yang lebih besar bagi proses rekombinasi
4. membuat medium pemisah kontak dari bahan gas elektronegatif, sehingga electron-elektron bebas tertangkap oleh molekul netral gas tersebut<sup>[7]</sup>



## 2.7 Mekanisme Kerja *Circuit Breaker* (CB)

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

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 busbar 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<sup>[5]</sup>.

## 2.8 Konstruksi *Circuit Breaker*

Secara umum semua jenis *circuit breaker* terdiri atas 3 ( tiga ) bagian utama yaitu :

1. Bagian pemutus ” INTERRUPTER ”
2. Bagian mekanis penggerak” OPERATING MECHANISM ”
3. Peralatan bantu

### 2.8.1 Bagian pemutus ” INTERRUPTER ”

Bagian pemutus ” Interrupter ” adalah bagian yang memutuskan dan menghubungkan arus beban listrik sesuai dengan arus kerjanya ’ Rating Current’ dan memutuskan arus hubungan singkat yang besar atau arus gangguan yang lain. Bagian pemutus ini terdiri atas :



## 1. Kontak-kontak ” CONTACTS ”

Kontak dalam *circuit breaker* harus dapat mengalirkan atau menghubungkan arus beban dengan sempurna, sehingga hubungan antara kontak-kontaknya harus sempurna. Hubungan kontak yang tidak sempurna dapat menimbulkan busur api selama breaker mengalirkan arus beban yang merusakkan permukaan kontak itu sendiri. Agar didapat hubungan kontak yang sempurna, maka permukaan kontak tersebut harus rata dan bersih, sehingga seluruh bidang permukaan kontak-kontak tersebut dapat berhubungan dengan sempurna.

Selain mampu mengalirkan arus beban, kontak-kontak *circuit breaker* harus tahan juga terhadap busur api yang timbul saat melakukan pemutusan arus beban atau arus hubungan singkat yang besar.

Untuk menghindari kerusakan kontak akibat busur api yang timbul saat pemutusan, maka pada kontak tetap ( *fixed contact* ) dan kontak geraknya dipasang kontak busur ( *Archute Contact* ) yang terbuat dari logam yang lebih keras dari kontak utamanya yaitu terbuat dari tembaga yang dilapis dengan *wolfram* atau tembaga tungsten.

Dengan dipasangnya kontak-kontak busur, diharapkan busur api hanya timbul pada kontak busur, sehingga kontak utama ( *Main Contact* ) tidak terjadi busur api.

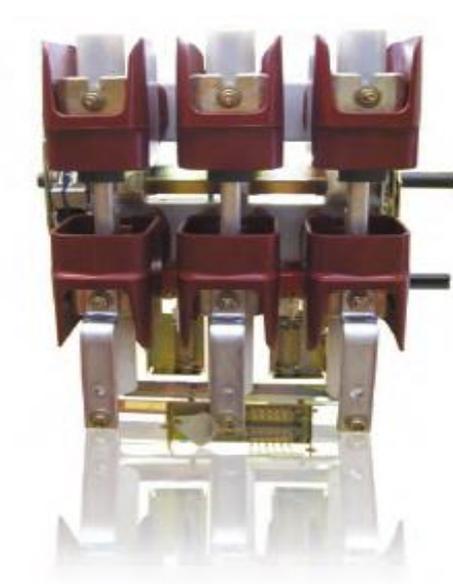
Untuk mengalihkan busur api agar selalu timbul pada kontak busur tersebut , khususnya saat *circuit breaker* masuk maupun saat *circuit breaker* melepas beban, maka kontak busur dilakukan dengan cara penempatannya kontak busur sedemikian rupa, sehingga kontak busur pada saat breaker dimasukkan akan terhubung lebih awal dari pada kontak utama ( kontak busur masuk terlebih dahulu dan baru kontak utama ) atau sebaliknya pada saat melepas beban atau breaker dilepaskan, maka yang lepas terlebih dahulu adalah kontak utama dan baru kontak busur ( kontak busur akan terlepas lebih akhir dari kontak utama ) saat operasi pemutusan.

Dengan adanya kontak busur , maka kontak utama akan aman dari busur api listrik pada saat operasi, sehingga kontak utama akan lebih awet dan tidak cepat terjadi kerusakan pada kontak utama.

---



Sebagaimana dijelaskan diatas, bahwa kontak utama harus dapat terhubung dengan sempurna, oleh karena itu bahan terbuat dari bahan khusus dan sebagai kontak atau yang menghubungkan dan melepaskan , maka kontak harus memenuhi persyaratan harga tahanan pada saat terhubung harus kecil.



Gambar-2.15. Kontak-kontak circuit breaker

## 2. Peralatan udara hembus ” AIR PUFFER ”

Peralatan udara hembus yang terpasang pada *circuit breaker* dipakai sebagai penghembus busur api listrik yang timbul pada kontak saat operasi pemutusan, agar busur api listrik tersebut dapat segera dipadamkan, sehingga tidak merusak kontak-kontak breaker.

*Puffer* dipasang pada bagian mekanis penggerak dan ujung-ujungnya diletakkan dibawah kontak dan ujung tersebut dipasang ” NOZZLE ” yang menghadap keatas. Gerakan *puffer* dilakukan oleh mekanisme bergerak membuka kontak.

Dengan dihembuskannya udara kearah kontak, maka dielektrik udara diantara kontak tetap dan kontak gerak dapat segera pulih.

---



### 3. Pemutus busur api listrik ” Arc – Chute ”

*Arc chute* dalam *circuit breaker* dipakai untuk memutuskan loncatan busur api listrik yang timbul diantara kontak-kontak breaker, sehingga busur api tersebut dapat dipadamkan lebih cepat dan mudah.

Busur api yang timbul pada kontak-kontak breaker tersebut dihembus oleh *puffer* dan bergerak keatas melalui ujung atas kontak busur dan *arc – horn* dan menuju kearah kisi-kisi *arc-chute*. Pada kisi-kisi inilah busur api diputuskan dan dipindahkan didalam *steck* utama, sehingga dapat dengan mudah dan cepat dipadamkan.

Timbulnya busur api listrik dalam waktu yang lama akan menimbulkan pukulan busur api ulang ” **RESTRINGING ARC** ” pada kontak-kontak breaker yang mengakibatkan tegangan *switching* yang tinggi.

### 4. *Primary disconnecting contact*

*Primary disconnecting contact* ini dipakai untuk menghubungkan kutub-kutub kontak *circuit breaker* dengan rangkaian sumber dan beban listrik didalam *cubicle*

### 5. *Secondary disconnecting contact*

Digunakan untuk menghubungkan kontak kontrol operasi breaker dengan rangkaian didalam *cubicle* :

- a. *Primary disconnecting contact*.
- b. *Secondary disconnecting contact*<sup>[3]</sup>.

## 2.8.2 Bagian mekanisme penggerak ” OPERATING MECHANISM ”

Mekanisme penggerak berfungsi menggerakkan kontak-kontak gerak *circuit breaker*. Kecepatan membuka kontak-kontak dapat mempercepat pemadaman busur api listrik dan mempersingkat terjadi restriking arc saat pemutusan beban. Kecepatan kontak tersebut tergantung dari kecepatan mekanisme penggerak.



Dalam operasinya, gerakan mekanisme penggerak tersebut dapat dilakukan oleh solenoid penutup ” *Closing Solenoid* ” atau dengan energi peregangan pegas atau menggunakan kedua-duanya, sedangkan gerakan membuka kontak dilakukan oleh energi pegas yang teregang saat operasi penutupan.



Gambar-2.16.Mekanisme Penggerak & anti *pumping device*

Didalam mekanisme penggerak inilah dipasang peralatan kontrol operasi dan mekanis penguncian ” INTERLOCK MECHANISM ” dan kontak-kontak bantu yang menunjang operasi *circuit breaker*.

Mekanisme penggerak ini terdiri atas :

1. Pegas-pegas penggerak kontak
2. Solenoid penutup.
3. Levering device.
4. Puffer.
5. Perlengkapan pengunci otomatis ” Interlock ”
6. Solenoid trip.

## 2.9 Gangguan Sistem Distribusi

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



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<sup>[1]</sup>.

### 2.9.1 Perhitungan arus gangguan

Rumus dasar yang digunakan untuk menghitung arus gangguan adalah :

1. Hubung singkat Tiga-Fasa

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

2. Hubung singkat Dua-Fasa

$$I_{1F} = I_{2F} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2}$$

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

---

<sup>1</sup>Arismunandar A., Kuwahara S.1993. *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik. Jilid II: Saluran Transmisi.* Jakarta:Pradnya Paramita .

---



Dimana :

Ihs : Arus gangguan (A)

Ep.u. : Tegangan Fasa (V)

ZT : Impedansi Total( $\Omega$ )<sup>[1]</sup>

## 2.9.2 Perhitungan impedansi

### 1. Impedansi dasar

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:

$$Z = \frac{V}{I}$$

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:

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

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

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



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

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

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

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

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

Dimana :

$Z_d$  : Impedansi dasar( $\Omega$ )

$Z_{pu}$  : Impedansi per-unit( $\Omega$ )

$V_d$  : Tegangan dasar(V)

$kVA$  : Kapasitas dasar (kV)(daya trafo) <sup>[3]</sup>

## 2. Impedansi Sumber

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 :

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

Dimana :

$X_{sc}$  : Impedansi sumber( $\Omega$ )

$kV$  : Tegangan pada sisi primer(kV)

$MVASC$  : Daya hubung singkat(MVA)

<sup>3</sup>Kadir, Abdul. 1998. *Transmisi Tenaga Listrik*. Jakarta :Universitas Indonesia (UI-Press).



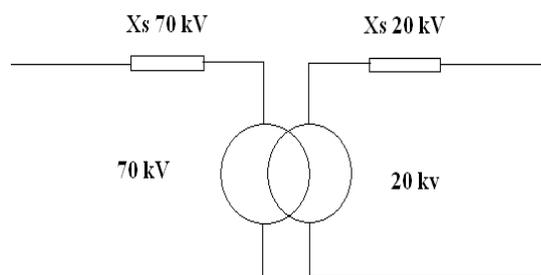
Dimana untuk daya hubung singkat menggunakan persamaan:

$$MVA_{SC} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \text{ (MVA)} [5] \dots\dots\dots (2.6)$$

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 :

$$MVA_{70 \text{ kV}} = MVA_{20 \text{ Kv}}$$



Gambar-2.15. Transformasi Impedansi pada Trafo Tenaga

Daya sisi 70 kV = Daya sisi 20 Kv

$$\frac{kV_1^2}{Z_1} = \frac{kV_2^2}{Z_2} \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana :

kV1 2 : Tegangan sisi primer (kV)

kV2 2 : Tegangan sisi sekunder (kV)

Z1 : Impedansi sisi primer (  $\Omega$  )

Z2 : Impedansi sisi sekunder (  $\Omega$  )<sup>[7]</sup>

### 3. Impedansi Trafo Tenaga

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.

<sup>7</sup>Sarimun,Wahyudi. 2012 .*Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik*.depok: Garamnond.



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

$$Z(\text{ohm}) = \frac{\text{Impedansi (\%)} \times [\text{Tegangan (kV)}]^2}{\text{Daya (MVA)} \times 100} \dots\dots\dots (2.9)$$

#### 4. Impedansi Penyulang

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

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

Dari perhitungan impedansi urutan positif dan urutan negatif diatas, maka dapat dicari pula untuk impedansi urutan positif ekivalen ( $Z_1 \text{ eki}$ ) dan impedansi urutan negatif ekivalen ( $Z_2 \text{ eki}$ ).  $Z_1 \text{ eki}$  dan  $Z_2 \text{ eki}$  dapat langsung dihitung sesuai dengan lokasi gangguan dengan menjumlahkan  $X_S + X_T + \% Z_L$ .

Hitungan  $Z_1 \text{ eki}$  dan  $Z_2 \text{ eki}$

$$Z_1 \text{ eki} = Z_2 \text{ eki} = X_S + X_T + Z_{\text{penyulang}} \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana :

$X_S$  : perhitungan impedansi sumber ( $\Omega$ )

$X_T$  : perhitungan impedansi trafo ( $\Omega$ )

$Z_{\text{penyulang}}$  : impedansi penyulang ( $Z_1 = Z_2$ ) ( $\Omega$ )<sup>[7]</sup>