



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Pemutus Tenaga (PMT) ¹

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 kondisi abnormal/gangguan seperti kondisi hubung singkat (*short circuit*).

Sedangkan definisi PMT berdasarkan IEEE C37.100:1992 (*Standard definitions for power switchgear*) adalah peralatan saklar/*switching* mekanis, yang mampu menutup, mengalirkan dan memutus arus beban dalam kondisi normal sesuai dengan ratingnya serta mampu menutup, mengalirkan (dalam periode waktu tertentu) dan memutus arus beban dalam spesifik kondisi abnormal/gangguan sesuai dengan ratingnya. 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 peralatan lain.

Jadi dapat disimpulkan bahwa pemutus tenaga (PMT) adalah peralatan saklar/*switching* mekanik yang memiliki pemadam busur api yang berfungsi untuk menghubungkan atau memutus arus beban atau arus gangguan dalam keadaan berbeban.

2.2 Klasifikasi Pemutus Tenaga (PMT)

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.

¹ Kelompok Kerja Pemutus Tenaga (PMT) dan Pemisah (PMS) PT PLN (Persero), *Buku Pedoman Pemeliharaan Pemutus Tenaga (PMT)*. (Jakarta: PT PLN (Persero), 2014), hlm. 1-13

2.2.1 Berdasarkan Kelas Tegangan

Berdasarkan kelas tegangannya, pemutus tenaga dapat dibedakan menjadi :

1. PMT Tegangan Rendah (*Low Voltage*)

Dengan range tegangan 0.1 s/d 1 kV (SPLN 1.1995 - 3.3)

2. PMT Tegangan Menengah (*Medium Voltage*)

Dengan range tegangan 1 s/d 35 kV (SPLN 1.1995 – 3.4) PMT Tegangan Tinggi (*High Voltage*)

Dengan range tegangan 35 s/d 245 kV (SPLN 1.1995)

3. PMT Tegangan Extra Tinggi (*Extra High Voltage*)

Dengan range tegangan lebih besar dari 245 kVAC (SPLN 1.1995 – 3.6)

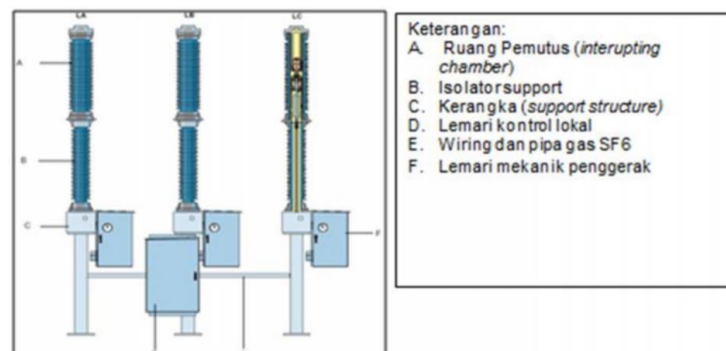


Gambar 2.1 Jenis PMT Berdasarkan Kelas Tegangan

2.2.2 Berdasarkan Jumlah Mekanik Penggerak / *Tripping Coil*

Berdasarkan jumlah mekanik penggerak, pemutus tenaga dapat dibedakan menjadi :

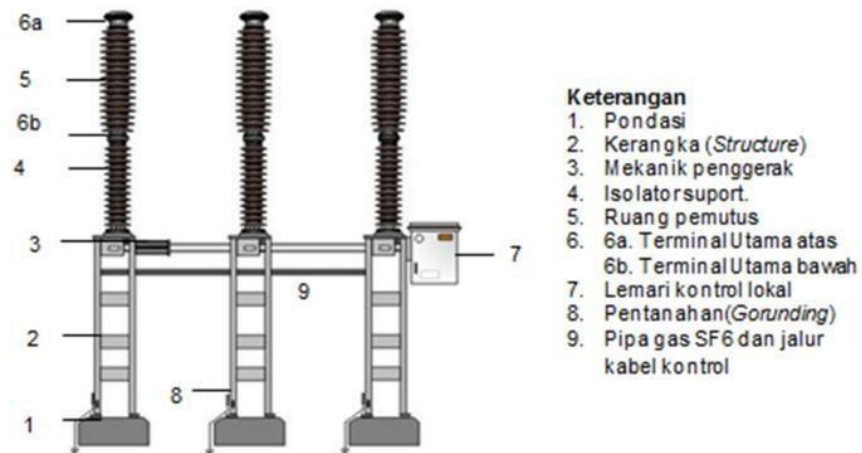
1. PMT *Single Pole*



Gambar 2.2 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.

2. PMT Three Pole



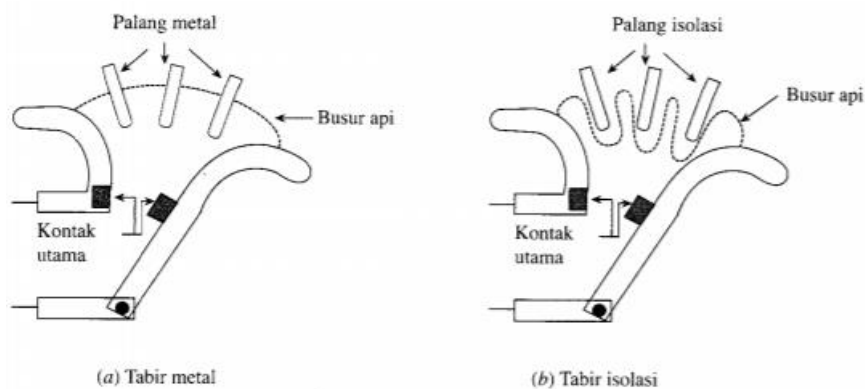
Gambar 2.3 PMT Three Pole

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.

2.2.3 Berdasarkan Media Isolasi

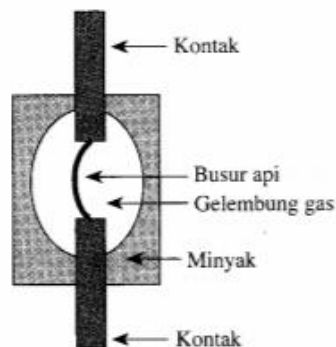
Berdasarkan media isolasinya, PMT dapat dibedakan menjadi :

1. PMT Minyak



Gambar 2.4 Kontak Pemutus Daya Dengan Tabir

Bahan dasar medium pemadam busur api pada pemutus daya ini adalah minyak mineral yang sudah disuling. Penyulingan minyak dilakukan untuk mencegah endapan dan korosi yang ditimbulkan sulfur dan bahan pencemar lainnya. Ketika kontak dipisahkan, busur api akan terjadi di dalam minyak, sehingga minyak menguap dan menimbulkan gelembung gas yang menyelubungi busur api, seperti diperlihatkan pada Gambar 2.4



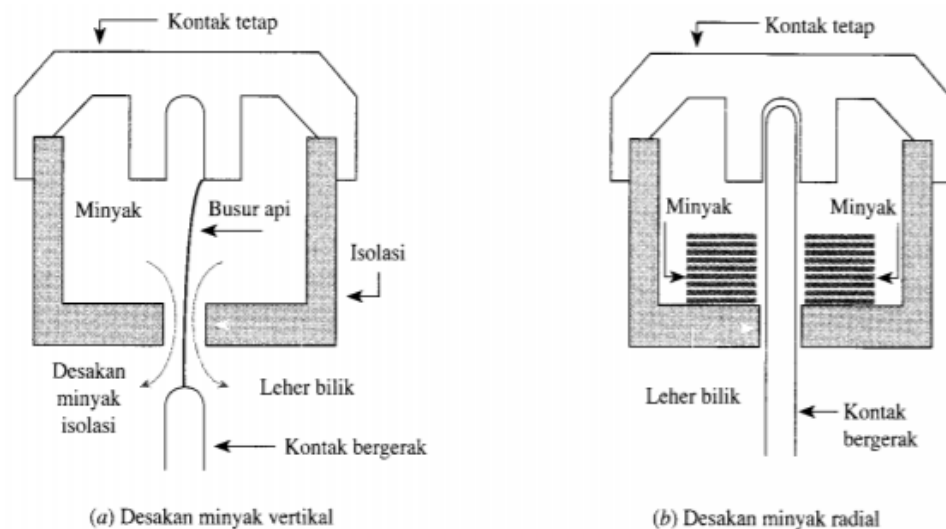
Gambar 2.5 Gelembung Gas Pada Sela Kontak

Panas yang ditimbulkan busur api menaikkan temperatur minyak, sehingga minyak mengalami dekomposisi dan menghasilkan gas hidrogen. Gas hidrogen bersifat menghambat produksi ion, sehingga membantu pemadaman busur api. Sementara itu, minyak mendinginkan busur api dengan menghantarkan panas dari busur api ke tangki pemutus daya. Keberhasilan pendinginan ini bergantung kepada luas permukaan busur api yang bersentuhan dengan minyak dan daya hantar panas minyak. Adanya hidrogen dan pendinginan seperti tersebut di atas, membuat minyak sangat efektif memutuskan arus. Di samping itu, minyak sekaligus berfungsi sebagai bahan isolasi untuk mengisolir bagian-bagian pemutus daya yang berbeda tegangan dengan tanah. 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 hidrogen. 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 dielektrik dan sifat kimia minyak.

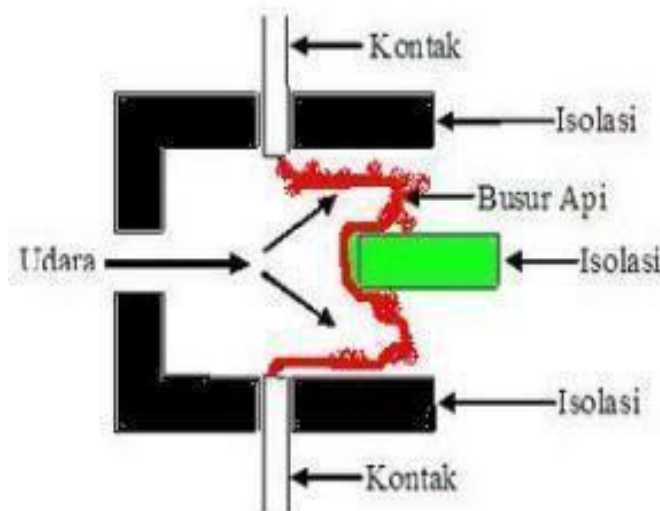


Gambar 2.6 Pendinginan Busur Api Pada Pemutus Daya Minyak

Pada Gambar 2.6 a diperlihatkan suatu kontak yang sudah dipisahkan. Busur api terjadi dalam bilik berisi minyak. Gas yang timbul karena dekomposisi minyak menimbulkan tekanan terhadap minyak, sehingga minyak juga terdorong ke bawah melalui leher bilik. Di leher bilik, minyak berinteraksi langsung dengan busur api. Hal ini akan menimbulkan pendinginan busur api, mendorong proses rekombinasi dan menjauhkan partikel bermuatan dari lintasan busur api. Jenis bilik kontak lain diperlihatkan pada Gambar 2.6 b. Leher bilik terbuat dari laminasi isolasi. Jika kontak bergerak ke bawah, minyak akan mengalir dari sela-sela laminasi, sehingga minyak terdorong dengan arah radial menuju busur api. Ada juga pemutus daya yang dirancang dengan alat tambahan, sehingga busur api yang berada di luar leher bilik didorong horizontal oleh suatu tabir isolasi, sehingga lintasan busur api di luar leher bilik semakin panjang. Jenis pemutus daya ini dapat memutuskan arus hubung singkat sampai 10 kA pada rangkaian bertegangan sampai 500 kV.

2. PMT Udara Hembus (*Air Blast*)

PMT ini dapat digunakan untuk memutus arus sampai 40 kA dan pada rangkaian bertegangan sampai 765 kV. Pemutus daya ini dirancang untuk mengatasi kelemahan pada pemutus daya minyak, yaitu dengan membuat medium pemadam kontak dari bahan yang tidak mudah terbakar dan tidak menghalangi mekanisme pemisahan kontak, sehingga pemisahan kontak dapat dilaksanakan dalam waktu yang sangat cepat. Medium pemadam yang digunakan adalah udara kering, bersih dan bertekanan tinggi. Karena media yang digunakan adalah udara, maka resiko terbakar sangat kecil. Untuk menghasilkan udara bertekanan tinggi pemutus daya ini dilengkapi dengan kompresor.

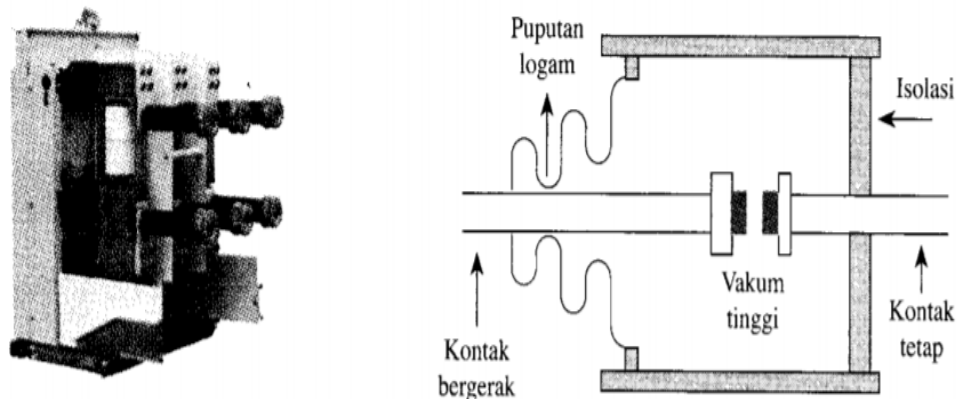


Gambar 2.7 Pemadam Busur Api pada PMT *Air Blast*

3. PMT Hampa Udara (*Vacuum*)

Sakelar PMT ini dapat digunakan untuk memutus rangkaian bertegangan sampai 38 kV. Pada pemutus daya vakum, medium pemadam adalah vakum antara ($10^{-7} - 10^{-5}$ torr). Vakum memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi dan merupakan bahan pemadam api yang lebih unggul daripada medium pemadam busur api lainnya. Kontak pemutus daya ditempatkan pada suatu bilik vakum untuk mencegah udara masuk ke dalam bilik, maka bilik harus ditutup rapat dan kontak Bergeraknya diikat ketat dengan puputan logam. Jika kontak dibuka,

maka pada kontak yang berperan sebagai katoda terjadi emisi termal dan medan tinggi. Kedua jenis emisi ini memproduksi elektron-elektron bebas yang bergerak menuju anoda dan menimbulkan busur api.



Gambar 2.8 PMT Jenis Vacuum

Dalam perjalanannya menuju anoda, elektron-elektron bebas ini tidak bertemu dengan molekul udara sehingga tidak terjadi ionisasi tumbukan. Akibatnya, di sela kontak tidak ada penambahan elektron bebas. Ketika arus sama dengan nol, busur api padam. Karena elektron bebas hasil ionisasi tidak ditemukan, maka kekuatan dielektrik vakum naik sangat cepat dan lebih cepat daripada kenaikan kekuatan dielektrik pemutus daya yang lain. Akibatnya, tidak terjadi lagi tembus listrik pada sela kontak atau peristiwa busur api tidak terulang, sehingga pemutusan berlangsung sangat cepat. Kelebihan-kelebihan pemutus daya vakum 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. Energi yang dikonsumsi busur api rendah.



8. Konstruksi penarik kontak sederhana, sehingga dapat digerakkan peralatan mekanik bertenaga rendah.

4. PMT Gas SF₆

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 SF₆ (*Sulphur Hexafluoride*) yang pada posisi kontak tertutup bertekanan +2.8 kg/cm².

Gas SF₆ sebagai medium pemadam busur api pemutus daya diminati karena memiliki beberapa keunggulan sebagai berikut.

1. Sifat kimianya yang stabil, tidak mudah terbakar, tidak menimbulkan korosi pada bahan logam, tidak beracun, tidak berwarna dan tidak berbau.
2. Gas SF₆ 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 SF₆ memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi. Sifat elektronegatif gas SF₆ mempercepat pemulihan kekuatan dielektrik medium di sela kontak sehingga pemadaman busur api berlangsung lebih cepat.
3. Pada kondisi yang sama, kekuatan dielektrik gas SF₆ dua sampai tiga kali lipat daripada kekuatan dielektrik udara, bahkan pada tekanan tertentu hampir sama dengan minyak. Sifat ini membuat pemutus daya SF₆ sangat efektif digunakan pada sistem tegangan tinggi dan mampu memutuskan arus tinggi.
4. Jika gas SF₆ terkontaminasi udara, kekuatan dielektriknya tidak banyak berubah.
5. Daya hantar panas gas SF₆ lebih baik daripada udara sehingga dapat digunakan untuk pendinginan konveksi.
6. Interaksi busur api dengan gas SF₆ tidak menimbulkan endapan karbon seperti halnya pada pemutus daya minyak.
7. Biaya perawatan murah.

8. Konstruksi pemutus daya SF6 sederhana dan ringan sehingga biaya pembuatan fondasinya murah.



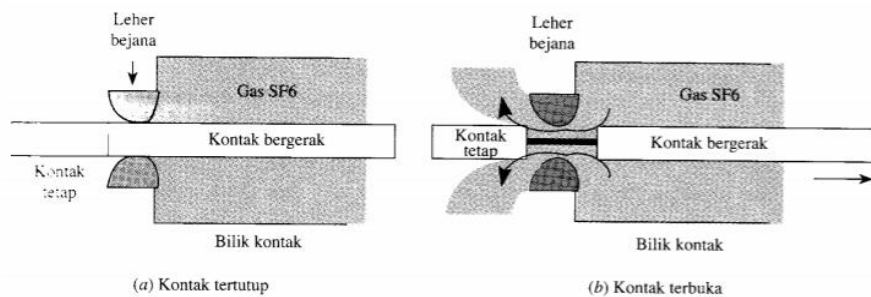
Gambar 2.9 SF6 Circuit Breaker



Gambar 2.10 PMT 20 kV Media Pemadam Busur Api SF6

Proses pemadaman busur api dengan gas SF6 dapat dijelaskan dengan bantuan Gambar 2.26. Bagian utama suatu pemutus daya SF6 adalah kontak bergerak, kontak tetap, bilik kontak berisi gas SF6 dan tangki gas SF6 bertekanan ringgi $\pm 14 \text{ kg/cm}^2$. Tangki gas dihubungkan dengan bilik kontak melalui sebuah katup. Jika kontak terbuka, katup akan membuka, sehingga gas SF6 dari tangki mendorong gas SF6 yang terdapat pada bilik kontak.

Ketika kontak terbuka, terjadi busur api. Pada saat yang bersamaan, katup penghubung bilik dengan tangki terbuka, sehingga gas SF6 keluar dari tangki mendorong gas SF6 yang ada di bilik kontak. Gas SF6 yang ada pada bilik kontak menyembur melalui leher bilik kontak sambil mendinginkan busur api. Pendinginan busur api dan sifat elektronegatif yang dimiliki gas SF6 membuat pemulihan kekuatan dielektrik SF6 berlangsung cepat, sehingga ketika busur api padam, busur api tidak terulang lagi.



Gambar 2.11 Pemadaman Busur Api PMT SF6

Kelemahan pemutus daya SF6 adalah sebagai berikut:

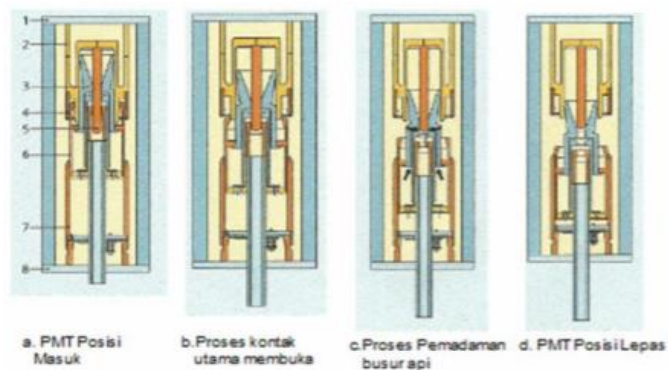
- Harga gas SF6 yang mahal mengakibatkan harga pemutus daya SF6 relatif mahal.
- Setelah pemutus daya SF6 bekerja, perlu dilakukan rekondisi gas SF6, sehingga dibutuhkan peralatan untuk rekondisi tersebut.

2.2.4 Berdasarkan Proses Pemadaman Busur Api Listrik Di Ruang Pemutus

Berdasarkan proses pemadaman busur api listrik di ruang pemutus, PMT SF6 dapat dibagi dalam 2 (dua) jenis, yaitu:

1. PMT Jenis Tekanan Tunggal (*Single Pressure Type*)

PMT terisi gas SF6 dengan tekanan kira-kira 5 Kg/cm², selama terjadi proses pemisahan kontak – kontak, gas SF6 ditekan (fenomena thermal overpressure) ke dalam suatu tabung/cylinder yang menempel pada kontak bergerak selanjutnya saat terjadi pemutusan, gas SF6 ditekan melalui nozzle yang menimbulkan tenaga hembus/tiupan dan tiupan ini yang memadamkan busur api.



Gambar 2.12 PMT SF6 Saat Proses Pemutusan Arus Listrik



Keterangan Gambar :

1. Terminal Utama atas (Rod Kontak diam)
2. Support Kontak diam
3. Nozzle
4. Kontak Utama (*Main Contact*)
5. Arcing contact
6. Kontak bergerak
7. Support kontak bergerak
8. Terminal utama bawah

2. PMT Jenis Tekanan Ganda (*Double Pressure Type*)

PMT terisi gas SF₆ dengan sistem tekanan tinggi kira-kira 12 Kg / cm² dan sistem tekanan rendah kira-kira 2 Kg / cm², pada waktu pemutusan busur api gas SF₆ dari sistem tekanan tinggi dialirkan melalui nozzle ke sistem tekanan rendah. Gas pada sistem tekanan rendah kemudian dipompakan kembali ke sistem tekanan tinggi, saat ini PMT SF₆ tipe ini sudah tidak diproduksi lagi.

2.3 Komponen dan Fungsi Pemutus Tenaga (PMT)

Sistem Pemutus (PMT) terdiri dari beberapa sub-sistem yang memiliki beberapa komponen. Pembagian komponen dan fungsi dilakukan berdasarkan Failure Modes Effects Analysis (FMEA), sebagai berikut:

1. *Primary*
2. *Dielectric*
3. *Driving Mechanism*
4. *Secondary*

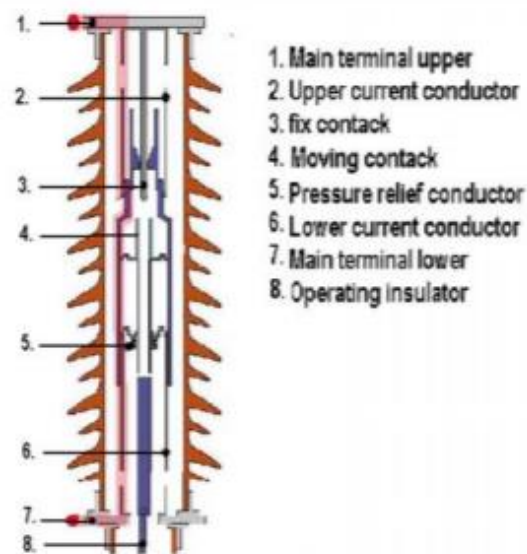
2.3.1 *Primary*

Primary merupakan bagian PMT yang bersifat konduktif dan berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dengan nilai losses yang rendah dan mampu menghubungkan / memutuskan arus beban saat kondisi normal/tidak normal. Bagian *primary* terdiri dari beberapa bagian yaitu :

1. Interrupter

Interrupter merupakan bagian terjadinya proses membuka atau menutup kontak PMT. Didalamnya terdapat beberapa jenis kontak yang berkenaan langsung dalam proses penutupan atau pemutusan arus, yaitu:

- a. Kontak bergerak/*moving contact*
- b. Kontak tetap/*fixed contact*
- c. Kontak arcing/*arcing contact*



Gambar 2.13 *Interrupter*

2. Aksesoris dari Interrupter

Aksesoris pada interrupter terdiri dari :

a. Resistor

Resistor/tahanan dipasang paralel dengan unit pemutus utama (bekerja hanya pada saat terjadinya penutupan kontak PMT) dan berfungsi untuk:

- Mengurangi kenaikan harga dari tegangan pukul (*restriking voltage*).
- Mengurangi arus pukulan (*chopping current*) pada waktu pemutusan.

- Meredam tegangan lebih karena mengoperasikan PMT tanpa beban pada penghantar panjang.

b. Kapasitor

Kapasitor terpasang paralel dengan tahanan, unit pemutus utama dan unit pemutus pembantu yang berfungsi untuk:

- Mendapatkan pembagian tegangan (*Voltage distribution*) yang sama pada setiap celah kontak, sehingga kapasitas pemutusan (*breaking capacity*) pada setiap celah adalah sama besarnya.
- Meningkatkan kinerja PMT pada penghantar pendek dengan mengurangi frekuensi kerja.

3. Terminal Utama

Bagian dari PMT yang merupakan titik sambungan/koneksi antara PMT dengan konduktor luar dan berfungsi untuk mengalirkan arus dari atau ke konduktor luar.



Gambar 2.14 Terminal Utama

2.3.2 Dielectric

Dielektrik berfungsi sebagai Isolasi peralatan dan memadamkan busur api dengan sempurna pada saat *moving contact* bekerja. Adapun bagian-bagian *dielectric* pada pemutus tenaga adalah sebagai berikut:

1. *Electrical Insulation* (Isolator)

Pada Pemutus (PMT) terdiri dari 2 (dua) bagian isolasi yang berupa isolator, yaitu:

a. Isolator Ruang Pemutus (*Interrupting Chamber*)

Isolator ruang pemutus merupakan isolator yang berada pada ruang pemutus (*interrupting chamber*)

b. Isolator Penyangga (*Isolator Support*)

Isolator penyangga merupakan isolator yang berada pada penyangga /*support*.



Gambar 2.15 Isolator Pada *Interrupting Chamber* dan *Support*

2. Media Pemadam Busur Api

Media pemadam busur api berfungsi untuk memadamkan busur api saat PMT bekerja saat PMT bekerja membuka atau menutup. Berdasarkan media pemadam busur api, PMT dapat dibedakan menjadi beberapa macam, antara lain:

1. Pemadam busur api dengan gas SF₆
2. Pemadam busur api dengan *oil*/minyak
3. Pemadam busur api dengan udara hembus / *air blast*.
4. Pemadam busur api dengan hampa udara (*vacuum*)

2.3.3 *Driving Mechanism*

Driving Mechanism berfungsi untuk menyimpan energi untuk dapat menggerakkan kontak gerak (*moving contact*) PMT dalam waktu tertentu sesuai dengan spesifikasinya. Terdapat beberapa jenis sistem penggerak pada PMT, antara lain:

1. Penggerak Pegas (*Spring Drive*)

Mekanik penggerak PMT dengan menggunakan pegas (*spring*) terdiri dari 2 macam yaitu :

a. Pegas Pilin (*Helical Spring*)

PMT jenis ini menggunakan pegas pilin sebagai sumber tenaga penggerak yang ditarik atau diregangkan oleh motor melalui rantai.



Gambar 2.16 Sistem Pegas Pilin (Helical)

b. Pegas Gulung (*Scroll Spring*)

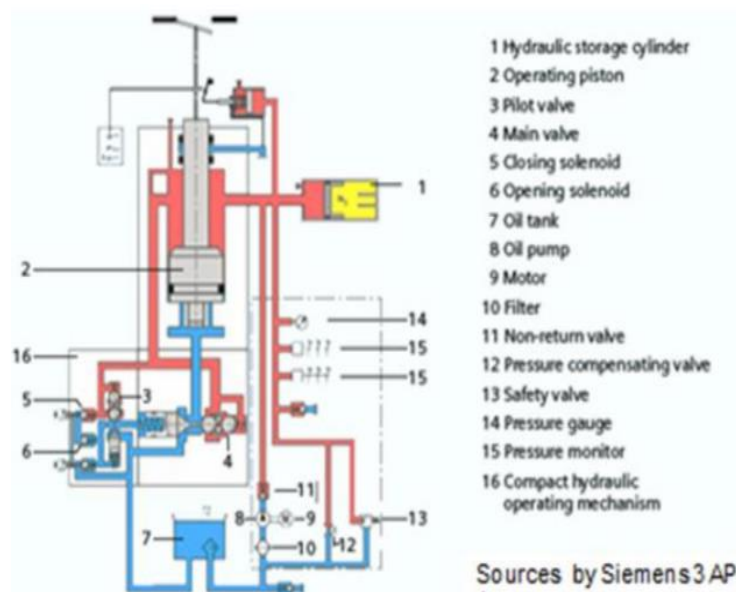
PMT ini menggunakan pegas gulung untuk sumber tenaga penggerak yang di putar oleh motor melalui roda gigi.



Gambar 2.17 Sistem Pegas Gulung (*Scroll*)

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.



Gambar 2.18 Skematik Diagram Sistem Hidrolik

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

3. Penggerak Pneumatik

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.

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 yang terdiri 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:

- Volume yang terbentuk dalam interrupter dan isolastor tumpu.
- Volume dalam enclosure mekanik penggerak



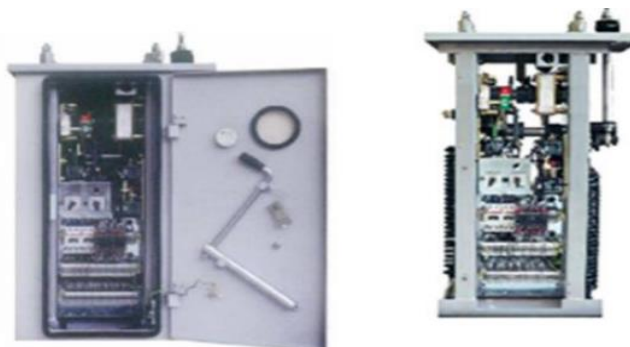
Gambar 2.19 PMT SF6 *Dynamic*

2.3.4 *Secondary*

Sub sistem secondary berfungsi mengirim sinyal kontrol/trigger untuk mengaktifkan subsistem mekanik pada waktu yang tepat, bagian subsistem secondary terdiri dari:

1. Lemari Mekanik / Kontrol

Lemari mekanik / control berfungsi untuk melindungi peralatan tegangan rendah dan sebagai tempat secondary equipment.

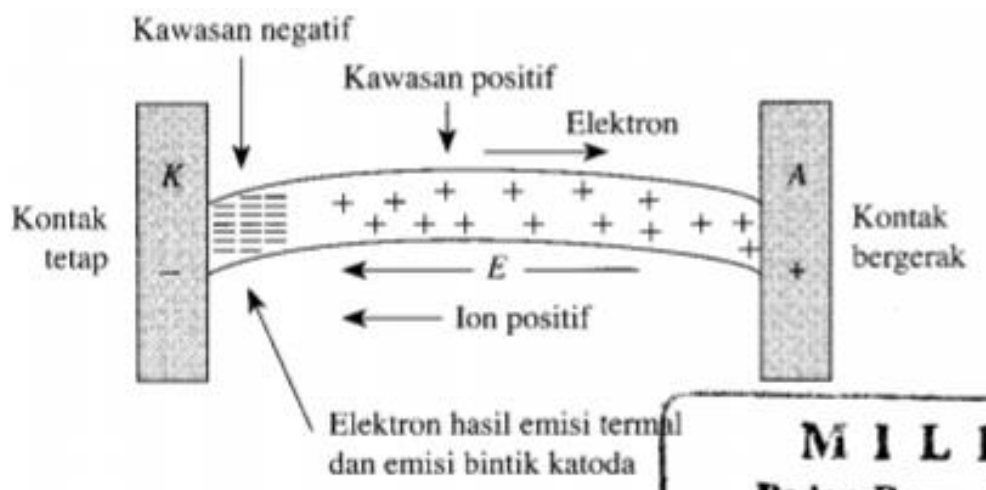


Gambar 2.20 Lemari Mekanik / Kontrol

2. Terminal dan *Wiring Control*

Sebagai terminal wiring kontrol PMT serta memberikan trigger pada mekanik penggerak untuk operasi PMT.

2.4 Proses Terjadinya Busur Api²



Gambar 2.21 Proses Terjadinya Busur Api

Jika kontak pemutus daya dipisahkan, maka beda potensial di antara kontak akan menimbulkan medan elektrik di sela kontak tersebut, seperti diperlihatkan pada Gambar 2.21. Arus yang sebelumnya mengalir melalui kontak akan memanaskan kontak pemutus daya sehingga ketika kontak membuka, pada permukaan kontak terjadi emisi termal. Medan elektrik di antara kontak menimbulkan emisi medan tinggi pada permukaan kontak yang beraksi sebagai katoda (K). Kedua peristiwa emisi ini menghasilkan elektron bebas yang sangat banyak dan bergerak menuju kontak yang berperan sebagai anoda (A). Elektron-elektron ini membentur molekul netral media isolasi di kawasan positif. Benturan-benturan ini akan menimbulkan proses ionisasi. Dengan demikian, jumlah elektron bebas yang menuju anoda semakin bertambah. Proses ionisasi juga menghasilkan Ion positif yang tiba di katoda akan menimbulkan dua efek yang berbeda. Jika ion positif yang bergerak menuju katoda. Perpindahan elektron bebas ke anoda menimbulkan arus, arus ini akan memanaskan anoda.

² Bonggas L. Tobing. *Peralatan Tegangan Tinggi Edisi Kedua*. (Jakarta: Erlangga, 2012), hal. 11, 17-18, 22



Ion positif yang tiba di 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 termal semakin meningkat. Jika kontak terbuat dari bahan yang titik leburnya rendah, misalnya tembaga, maka ion positif akan menimbulkan emisi medan tinggi. Hasil emisi termal dan emisi medan tinggi akan melanggengkan proses ionisasi, sehingga perpindahan muatan antar kontak terus berlangsung dan inilah yang disebut dengan busur api. Busur api yang berlangsung lama akan meluruhkan material permukaan kontak.

Syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh suatu PMT agar dapat bekerja optimal 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 PMT.
3. Dapat memutuskan arus hubung singkat dengan kecepatan tinggi agar arus hubung singkat tidak sampaimerusak peralatan sistem, membuat sistem kehilangan kestabilan dan merusak pemutus tenaga itu sendiri.

Setiap PMT dirancang sesuai dengan tugas yang akan dipikulnya, ada beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam rancangan suatu PMT, 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.
4. Arus hubung singkat maksimum yang akan diputuskan pemutus daya tersebut.
5. Lamanya maksimum arus hubung singkat yang boleh berlangsung. Hal ini berhubungan dengan waktu pembukaan kontak yang dibutuhkan.



6. Jarak bebas antara bagian yang bertegangan tinggi dengan objek lain disekitarnya.
7. Jarak rambat arus bocor pada isolatornya.
8. Kekuatan dielektrik media isolator sela kontak.
9. Iklim dan ketinggian lokasi penempatan pemutus daya.

2.5 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 daripada kekuatan dielektrik medium di sela kontak, maka busur api akan terjadi lagi.

Tujuan akhir pemadaman busur api adalah untuk membuat arus pada 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.

2.6 Pedoman Pemeliharaan ¹

Berdasarkan fungsinya dan kondisi peralatan bertegangan atau tidak, jenis pemeliharaan pada Pemutus dapat dikelompokkan sebagai berikut:

1. *In Service / Visual Inspection*

In Service Inspection atau *Visual Inspection* adalah inspeksi/pemeriksaan terhadap peralatan yang dilaksanakan dalam keadaan peralatan beroperasi/bertegangan (on-line), dengan menggunakan 5 panca indera (five senses) dan metering secara sederhana, dengan pelaksanaan periode tertentu (Harian, Mingguan, Bulanan, Tahunan).

¹ Kelompok Kerja Pemutus Tenaga (PMT) dan Pemisah (PMS) PT PLN (Persero), *Buku Pedoman Pemeliharaan Pemutus Tenaga (PMT)*. (Jakarta: PT PLN (Persero), 2014), hlm. 15-19.



Inspeksi ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui/memonitor kondisi peralatan dengan menggunakan alat ukur sederhana/umum yang dilaksanakan oleh petugas operator atau asisten supervisor di gardu induk (untuk Tragi atau UPT PLN P3B Sumatera atau Wilayah) atau petugas pemeliharaan/supervisor gardu induk (untuk APP PLN P3B JB).

2. *In Service Measurement / On Line Monitoring*

In Service Measurement atau *On Line Monitoring* merupakan pengukuran yang dilakukan pada periode tertentu dalam keadaan peralatan bertegangan (On Line). Pengukuran dan/atau pemantauan yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui/memonitor kondisi peralatan dengan menggunakan alat ukur yang canggih (seperti Thermal Imager) yang dilakukan oleh petugas pemeliharaan.

3. *Shutdown Measurement / Shutdown Function Check/Treatment*

Shutdown Measurement atau *Shutdown Function Check Treatment* merupakan pengukuran yang dilakukan pada periode 2 tahunan dalam keadaan peralatan tidak bertegangan (Off Line). Pengukuran dilakukan bertujuan untuk mengetahui kondisi peralatan dengan menggunakan alat ukur sederhana serta advanced yang dilakukan oleh petugas pemeliharaan.

4. *Conditional* (Pasca relokasi / Pasca Gangguan/bencana alam)

Pemeliharaan conditional adalah pekerjaan pemeliharaan yang dilaksanakan dipicu oleh kondisi tertentu atau pasca gangguan atau relokasi peralatan, misalnya karena bencana alam/gempa atau kondisi abnormal setelah pemeliharaan dilakukan.

5. *Overhaul*

Overhaul adalah pemeliharaan yang dilaksanakan sekurang-kurangnya sekali dalam tiga tahun atau lebih berdasarkan *manual instruction* ketentuan pabrikan atau pengalaman/ketentuan unit setempat.



2.7 Pengukuran Tahanan Kontak ¹

Pengujian tahanan kontak dilakukan untuk mengetahui nilai resistansi kontak penghubung dan pemutus pada pemutus tenaga (PMT). Rangkaian tenaga listrik sebagian besar terdiri dari banyak titik sambungan. Sambungan adalah dua atau lebih permukaan dari beberapa jenis konduktor bertemu secara fisik sehingga arus/energi listrik dapat disalurkan tanpa hambatan yang berarti. Pertemuan dari beberapa konduktor menyebabkan suatu hambatan/resistan terhadap arus yang melaluinya sehingga akan terjadi panas dan menjadikan kerugian teknis. Rugi ini sangat signifikan jika nilai tahanan kontakannya tinggi. Nilai tahanan kontak pemutus tenaga (PMT) diharapkan sekecil mungkin atau mendekati nol agar rugi daya yang ditimbulkan semakin kecil.

Pengujian tahanan kontak sangat diperlukan agar dalam setiap periode pemeliharaan nilai tahanan kontakannya dapat diketahui, sehingga apabila nilainya tidak sesuai dengan acuan yang diizinkan bisa dilakukan perbaikan terhadap kontak PMT. Perbaikan dilaksanakan dengan melakukan pengecekan secara menyeluruh terhadap kontak PMT kemudian dilakukan uji ulang. Apabila nilai tahanan kontakannya masih dibawah standar yang diizinkan, maka perlu dilakukan pergantian PMT yang baru.

Ketentuan arus yang digunakan untuk mengukur besarnya tahanan kontak PMT yaitu: 100 A, 200 A, 300 A. Tegangan yang digunakan untuk mensuply alat ukur tahanan kontak PMT yaitu 220 volt AC. Adapun untuk melakukan pengukuran tahanan kontak ini sendiri menggunakan alat ukur Micro Ohm Meter.

Sambungan antara konduktor dengan PMT atau peralatan lain merupakan tahanan kontak yang syarat tahanannya memenuhi kaidah Hukum Ohm berikut:

$$E = I \cdot R \dots\dots\dots (2.1)$$

Jika didapat kondisi tahanan kontak sebesar 1 Ohm dan arus yang mengalir adalah 100 Amp maka ruginya adalah:

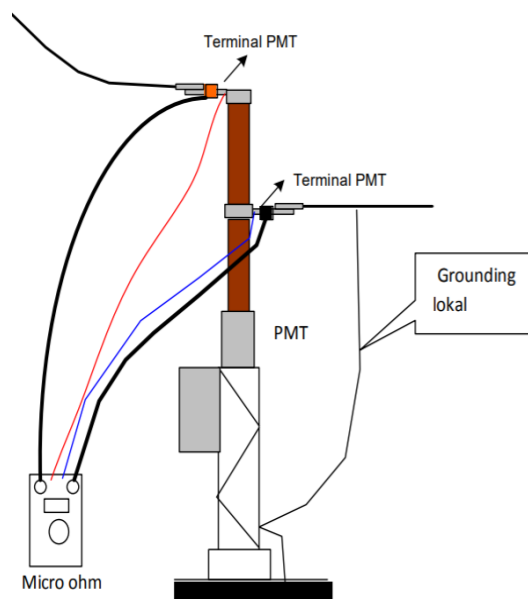
$$W = I^2 \cdot R \dots\dots\dots (2.2)$$

¹ *Ibied.* Hlm. 23-24

$W = 10.000$ watts

2.7.1 Langkah Kerja Pengukuran Tahanan Kontak Pemutus Tenaga (PMT)

Prinsip dasarnya adalah sama dengan alat ukur tahanan murni (Rdc), tetapi pada tahanan kontak arus yang dialirkan lebih besar $I = 100$ Amperemeter. Kondisi ini sangat signifikan jika jumlah sambungan konduktor pada salah satu jalur terdapat banyak sambungan sehingga kerugian teknis juga menjadi besar, tetapi masalah ini dapat dikendalikan dengan cara menurunkan tahanan kontak dengan membuat dan memelihara nilai tahanan kontak sekecil mungkin. Jadi pemeliharaan tahanan kontak sangat diperlukan sehingga nilainya memenuhi syarat nilai tahanan kontak.



Gambar 2.22 Rangkaian Pengukuran Tahanan Kontak

2.7.2 Standar Pengukuran Tahanan Kontak¹

Nilai tahanan kontak PMT yang normal (acuan awal) harus disesuaikan dengan petunjuk/manual dari masing – masing pabrikan PMT (dikarenakan nilai ini dapat berbeda antar merk), nilai standar normal yang menjadi acuan yaitu \leq

¹Ibid. Hlm. 64-65



120% nilai pabrikan atau Nilai Pengujian FAT, nilai saat pengujian komisioning. Berikut terlampir daftar nilai standar pabrikan beberapa PMT:

Tabel 2.1 Nilai Tahanan Kontak Acuan Pabrikan

MERK	Tipe PMT	Data Teknis	Resistansi Kontak Utama
ALSTHOM	FX11	72.5 kV, Hydraulic, CI mechanism	50 $\mu\Omega$
ALSTHOM	FX2	170 kV, Hydraulic, CIN mechanism	50 $\mu\Omega$
ALSTHOM	FX22 or FX22D	550 kV, Hydraulic, CIN mechanism	40 $\mu\Omega$
ALSTHOM	FX32 or FX32D	550 kV, Hydraulic, CIN mechanism	40 $\mu\Omega$
ALSTHOM	FXT9	72.5 kV, spring	50 $\mu\Omega$
ALSTOM	GL309 F1	72.5 kV, spring	40 $\mu\Omega$
ALSTOM	GL313 F1	170 kV, spring	40 $\mu\Omega$
ALSTOM	GL313 F3	170 kV, spring	40 $\mu\Omega$
ABB	S1 – 170 F1	170 kV, spring	50 $\mu\Omega$
ABB	S1 – 170 F3	170 kV, spring	50 $\mu\Omega$
ALSTOM	GL314	245 kV, spring	52 $\mu\Omega$
ALSTOM	GL317 or GL317D	550 kV, spring 2 chambers	95 $\mu\Omega$

Sumber : Buku Pedoman Pemeliharaan Pemutus Tenaga. Jakarta: PT PLN (Persero), 2014, hal. 65

Untuk PMT yang tidak memiliki data awal, maka dapat menggunakan nilai standar tipe sejenis atau nilai pengukuran terendah PMT tersebut yang mengacu pada history pemeliharaan (trend 3 kali periode pemeliharaan sebelumnya). Menjadi catatan pula, apabila hasil pengujian tidak sesuai/memenuhi standar, maka



pengujian tahanan kontaknya dapat dilakukan kembali setelah dilakukan perbaikan sampai kondisi PMT baik dan bekerja secara optimal.

2.8 Daya Listrik ³

Daya adalah energi yang dikeluarkan untuk melakukan usaha. Dalam sistem tenaga listrik, daya merupakan jumlah energi yang digunakan untuk melakukan kerja atau usaha. Daya listrik biasanya dinyatakan dalam satuan Watt atau Horsepower (HP), Horsepower merupakan satuan daya listrik dimana 1 HP setara 746 Watt atau lbf/second. Sedangkan Watt merupakan unit daya listrik dimana 1 Watt memiliki daya setara dengan daya yang dihasilkan oleh perkalian arus 1 Ampere dan tegangan 1 Volt. Daya listrik dapat dibagi menjadi tiga yaitu daya semu, daya aktif, dan daya reaktif.

2.8.1 Daya Semu

Daya semu adalah daya yang lewat pada suatu saluran transmisi atau distribusi, daya semu adalah tegangan dikali dengan arus.

Daya semu untuk satu fasa :

$$S_{1\phi} = V_n \cdot I \dots\dots\dots (2.3)$$

Daya semu untuk tiga fasa :

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_n \cdot I \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

V_n = Tegangan phasa netral (Volt)

I = Arus yang mengalir (A)

$S_{1\phi}$ = Daya semu satu fasa (VA, KVA, MVA)

$S_{3\phi}$ = Daya semu tiga fasa (VA, KVA, MVA)

³ Alto Belly dkk., "Makalah Daya Aktif, Reaktif & Nyata", Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik, UI, 2010, hlm. 1-2.



2.8.2 Daya Aktif

Daya aktif (Active Power) adalah daya yang terpakai untuk melakukan energi sebenarnya. Satuan daya aktif adalah Watt. Misalnya energi panas, cahaya, mekanik dan lain – lain. Daya ini digunakan secara umum oleh konsumen dan dikonversikan dalam bentuk kerja.

Daya aktif untuk satu fasa :

$$P_{1\phi} = V_n \cdot I \cdot \cos \varphi \dots\dots\dots (2.5)$$

Daya aktif untuk tiga fasa ;

$$P_{3\phi} = V_n \cdot I \cdot \cos \varphi \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana:

- cos φ = Faktor Kerja
- Satuan daya aktif = Watt, Kilowatt, Megawatt
- Satuan daya mekanik = HP (*horse power*)
- Satuan daya panas = Kg Cal/detik

2.8.3 Daya Reaktif

Daya reaktif adalah jumlah daya yang diperlukan untuk pembentukan medan magnet. Dari pembentukan medan magnet maka akan terbentuk fluks medan magnet. Contoh daya yang menimbulkan daya reaktif adalah transformator, motor, lampu pijar dan lain – lain. Satuan daya reaktif adalah Var.

Daya reaktif satu fasa:

$$Q = V_n \cdot I \cdot \sin \varphi \dots\dots\dots (2.7)$$

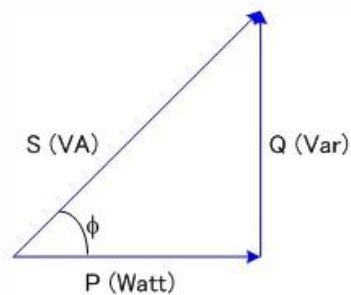
Daya reaktif tiga fasa:

$$Q = V_n \cdot I \cdot \sin \varphi \dots\dots\dots (2.8)$$

Satuannya adalah VAR, KVAR, MVAR.

2.8.4 Segitiga Daya

Segitiga daya adalah hubungan antara daya semu, daya aktif dan daya reaktif, sehingga dapat digambarkan dalam suatu segitiga daya sebagai berikut:



Gambar 2.23 Segitiga Daya

Dimana:

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

$$P = S \cdot \cos \phi$$

$$Q = S \cdot \sin \phi$$

$$S = \text{Daya semu}$$

$$P = \text{Daya aktif}$$

$$Q = \text{Daya reaktif}$$

$$Q_1 = \text{Daya reaktif induktif}$$

$$Q_2 = \text{Daya reaktif kapasitif}$$

2.9 Rugi-Rugi Daya Pada Jaringan ⁴

Susut daya atau rugi daya listrik adalah berkurangnya pasokan daya yang dikirimkan oleh sumber pasokan (PLN) kepada yang diterima dalam hal ini konsumen, artinya daya yang hilang akibat susut daya merupakan daya yang dibangkitkan namun tidak terjual. Dalam hal ini pihak penyedia daya listrik (PLN), menderita kerugian akibat membangkitkan daya dengan biaya yang cukup besar tetapi tidak mendapatkan keuntungan finansial dari hasil penjualan daya tersebut.

⁴ Aldhi Setiawan, "Analisa Pengaruh Tahanan Kontak Pemutus Tenaga Pada Kopel Busbar Tegangan Tinggi Terhadap Rugi Daya Penghantar Di Gardu Induk Palur" Publikasi Ilmiah Universitas Muhammadiyah Surakarta, (Surakarta: Perpustakaan Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2018), hlm. 8-10, t.d.



Susut daya jaringan listrik yang biasa terjadi pada sistem transmisinya dinyatakan dengan persamaan :

$$P_{\text{losses } 1 \phi} = I^2 \cdot R \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan :

P_{losses} = Rugi - rugi daya per fasa (watt)

I = Arus saluran per fasa(Ampere).

R = Resistansi total pada saluran (Ω)

$$P_{\text{losses } 3\phi} = P_{\text{losses } R} + P_{\text{losses } S} + P_{\text{losses } T} \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan :

$P_{\text{losses } 3\phi}$ = Rugi - rugi daya 3 fasa (watt)

$P_{\text{losses } R}$ = Rugi – rugi daya pada fasa R (watt)

$P_{\text{losses } S}$ = Rugi – rugi daya pada fasa S (watt)

$P_{\text{losses } T}$ = Rugi – rugi daya pada fasa T (watt)

2.10 Susut Energi Listrik

Akibat adanya rugi-rugi daya, maka akan timbul energi listrik yang tidak tersalur. Besarnya energi listrik yang hilang dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$E = P \times t \dots\dots\dots (2.5)$$

Keterangan :

E = Energi listrik (watt jam)

P = Daya listrik (watt)

t = Lama pemakaian (jam)