



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kubikel Tegangan Menengah¹

2.1.1 Pengertian Kubikel Tegangan Menengah

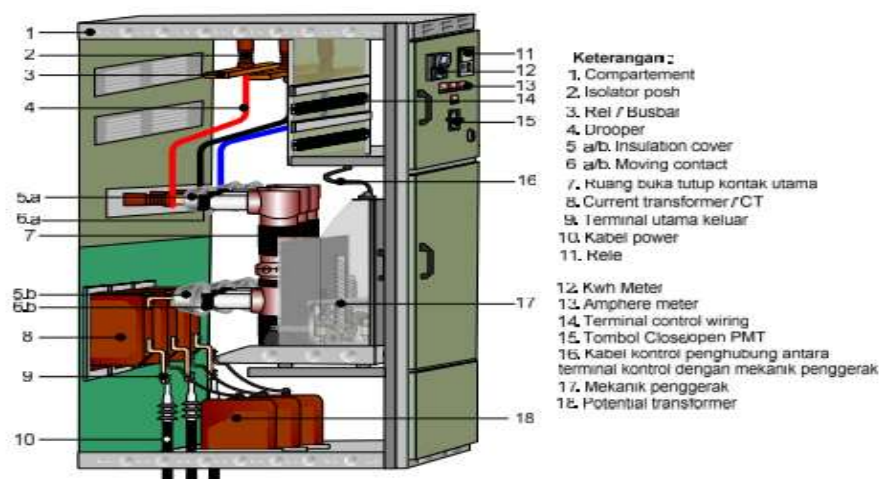
Kubikel Tegangan Menengah adalah seperangkat peralatan listrik yang dipasang pada Gardu Induk dan Gardu Distribusi/Gardu Hubung yang berfungsi sebagai pembagi, pemutus, penghubung, pengontrol dan pengamanan sistem penyaluran tenaga listrik tegangan menengah.



Gambar 2.1 Kubikel Tegangan Menengah

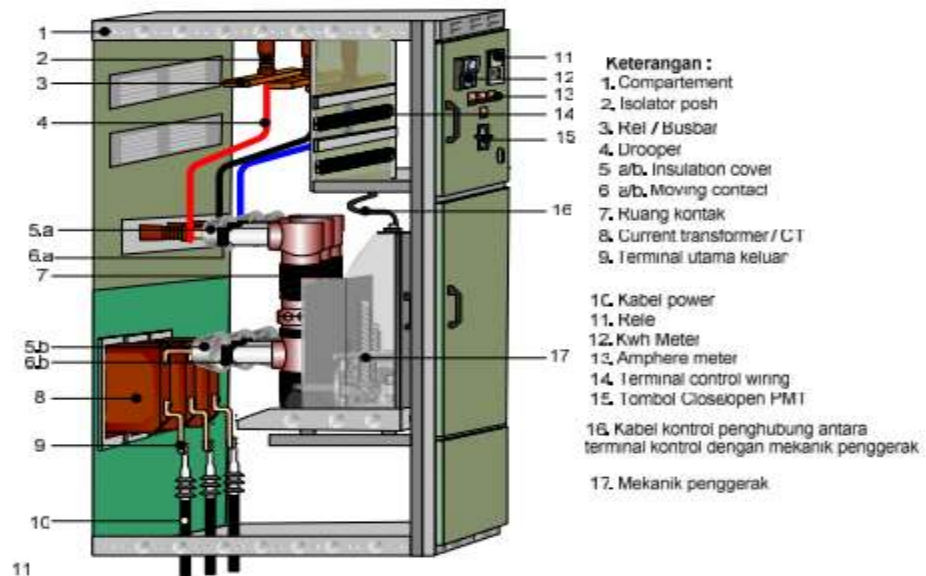
2.1.2 Bagian-Bagian Kubikel Tegangan Menengah

Bagian – bagian Kubikel dapat dijelaskan seperti pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.2 Bagian-bagian Kubikel Incoming

¹ PT.PLN (Persero).Buku Pedoman Pemeliharaan Kubikel Tegangan Menengah.2014,Hal.1

Gambar 2.3 Bagian-bagian Kubikel *Outgoing*

2.1.3 Fungsi Kubikel Tegangan Menengah

Berdasarkan fungsi/penempatannya, Kubikel Tegangan Menengah di Gardu Induk antara lain:

- Kubikel Incoming
Berfungsi sebagai penghubung dari sisi sekunder trafo daya ke rel tegangan menengah.
- Kubikel Outgoing
Berfungsi sebagai penghubung / penyalur dari rel ke beban.
- Kubikel Pemakaian Sendiri (Trafo PS)
Berfungsi sebagai penghubung dari rel ke beban pemakaian sendiri GI.
- Kubikel Kopel (Bus Kopleng)
Berfungsi sebagai penghubung antara rel 1 dengan rel 2.



- Kubikel PT
Berfungsi sebagai sarana pengukuran dan pengaman.
- Kubikel Bus Riser / Bus Tie (*Interface*)
Berfungsi sebagai penghubung antar Kubikel.

2.1.4 Jenis Kubikel

- Kubikel Open Type
Kubikel jenis *open type* adalah Kubikel yang terpasang dengan kondisi rel terlihat atau tidak dalam kompartemen yang tertutup. Sehingga rel tersebut memerlukan pemeliharaan rutin, terutama pembersihan isolator tumpu / *post insulator* dari debu / kotoran. PMT Kubikel jenis ini biasanya tidak dapat di-*rack in* atau *rack out*, tetapi Kubikel jenis ini dilengkapi dengan PMS kabel + PMS tanah dan PMS Rel sebagai pengamanan ketika ada perbaikan atau pemeliharaan.



Gambar 2.4 Kubikel *Open type*

- Kubikel Close Type
Kubikel jenis *close type* adalah Kubikel yang terpasang dengan kondisi rel tertutup atau di dalam kompartemen. Hal ini dimaksudkan agar rel lebih aman dan bersih karena tidak bersentuhan langsung dengan debu udara sekitar. Kubikel ini juga dilengkapi dengan pemanas (*heater*) untuk mencegah kelembaban di dalam Kubikel. PMT Kubikel jenis ini didesain dapat di-*rack in* atau *rack out* sebagai pengamanan ketika ada perbaikan atau pemeliharaan.



- Kubikel Berdasarkan Konstruksi
 - Kubikel dengan posisi rel di bawah. Pada Kubikel jenis ini, rel dipasang di bagian bawah dari Kubikel.
 - Kubikel dengan posisi rel di atas. Pada Kubikel jenis ini, rel dipasang di bagian atas dari Kubikel.

2.1.5 Penempatan Kubikel Tegangan Menengah

- *Indoor*
Kubikel *indoor* adalah Kubikel yang penempatan / pemasangannya di dalam bangunan tertutup, baik bangunan dari beton ataupun konstruksi bangunan dengan plat besi (*metal clad*). Kontruksi *metal clad* sering digunakan di Gardu Hubung atau bangunan mall, kantor dan lainnya.
- *Outdoor*
Kubikel *outdoor* adalah Kubikel yang penempatan / pemasangannya di luar bangunan. Untuk pengamanan, Kubikel tersebut dapat juga diberi atap. Kubikel jenis ini didesain untuk tahan terhadap perubahan cuaca. Namun penempatan rele proteksinya dipisah pada ruangan tersendiri.

2.2 PMT (Pemutus Tenaga)²

PMT terpasang pada kompartemen yang pada jenis tertentu terpasang “*Withdrawable Circuit Breaker*”. PMT dan mekanik penggeraknya dapat dengan mudah dikeluarkan / dimasukkan ke dalam Kubikel untuk keperluan pemeliharaan.

PMT adalah sakelar yang dapat digunakan untuk menghubungkan atau memutuskan arus / daya listrik sesuai ratingnya. Pada waktu memutuskan / menghubungkan arus / daya listrik akan terjadi busur api listrik. Pemadaman busur api listrik ini dapat dilakukan oleh beberapa macam bahan, yaitu: minyak, udara atau gas. Berdasarkan media pemadam busur api listrik tersebut, PMT dapat dinamakan menjadi:

² Ibid.,12.



- PMT minyak sedikit / Low Oil Circuit Breaker (minyak sebagai media pemadam busur api).
- PMT SF6 (Gas SF6 sebagai media pemadam busur api).
- PMT *Vacuum* (Ruang pemutus dibuat *vacuum*).

PMT Tegangan Menengah di Gardu Induk umumnya didisain dapat dikeluarkan dari Kubikel dengan cara ditarik. Sehingga PMT dan mekanik penggeraknya dapat dengan mudah dikeluarkan / dimasukkan untuk keperluan pemeliharaan.

PMT dari pabrik dan dengan rating sama, mempunyai konstruksi dan rangkaian yang sama. Sehingga dapat dipindah antar Kubikel dan hanya perlu satu PMT cadangan untuk PMT dengan rating yang sama. Selama operasi seluruh bagian yang bertegangan tertutup dengan pelindung metal yang ditanahkan, untuk menjamin agar operator aman selama mengoperasikannya.

Untuk mengeluarkan / memasukkan PMT dari / ke Kubikel, urutannya harus benar dan dicek untuk setiap langkah agar aman.



Gambar 2.5 PMT 20kV (*Vacuum*)

2.3 Rel³

Rel Tegangan Menengah pada Kubikel berfungsi sebagai penghubung antara kabel masuk dengan beberapa penyulang. Bentuk rel ini ada yang berpenampang bulat / pipa (tubuler), setengah bulat dan ada pula yang berbentuk plat sesuai dengan desain dari pabrik Kubikelnya.

³ Ibid.,15.



Besar kecilnya penampang rel tergantung pada besar / kecilnya daya yang akan disalurkan.

Contoh:

- Pipa tembaga untuk rel pada Kubikel Merlin Gerin, Mitsubishi dan Calor Emag.
- Pipa setengah bulat tembaga pada rel Kubikel ABB dan Calor Emag.
- Plat pejal tembaga untuk rel pada Kubikel Fuji.

Untuk merangkai Kubikel-Kubikel Tegangan Menengah dengan rel bulat / pipa, harus diperhatikan agar betul-betul rata (selevel). Hal itu untuk mencegah tingginya nilai tahanan kontak pada sambungan rel, yang dapat mengakibatkan gangguan / kerusakan.

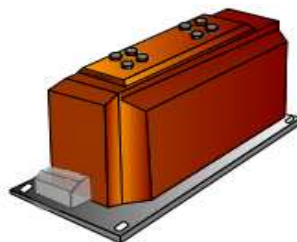
2.4 Trafo Arus (CT)

Trafo arus berfungsi untuk menurunkan arus bolak-balik yang besar menjadi arus bolak-balik yang kecil sesuai dengan kebutuhan instrumentasi yang tersambung. Nominal arus di sisi primer CT bermacam-macam, dapat dipilih sesuai dengan arus beban maksimum di sisi primer. Sedangkan arus nominal sisi sekunder adalah 1 Ampere atau 5 Ampere. Jenis CT yang terpasang pada Kubikel Tegangan Menengah biasanya:

- Berbentuk cincin atau ring.
- Berbentuk cor-coran / cast resin.

Bagian-bagian utama trafo arus, yaitu:

- Kumbaran primer.
- Kumbaran sekunder.
- Inti besi.
- Terminal primer dan terminal sekunder.



Gambar 2.6 Trafo Arus Tiper Cor-coran / Cast Resin



2.5 Trafo Tegangan (PT)⁴

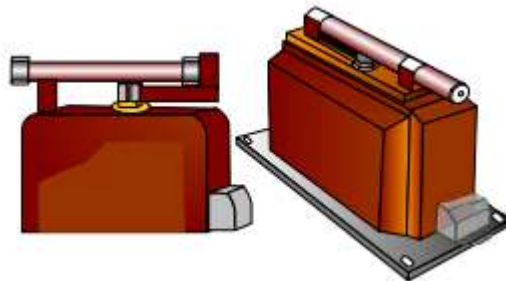
Fungsi trafo tegangan adalah untuk menurunkan tegangan tinggi / menengah bolak-balik menjadi tegangan rendah sesuai dengan tegangan nominal instrument.

Pemasangan trafo tegangan bisa pada Kubikel tersendiri atau pada Kubikel *incoming*, tergantung dari desain yang ada. Trafo tegangan pada Kubikel Tegangan Menengah umumnya berbentuk cor-coran / Cast resin. Perbandingan transformasinya (*rasio*) adalah: 20.000 Volt / 100 Volt; $20.000/\sqrt{3}$ Volt / $100/\sqrt{3}$ Volt; 20.000 Volt / 110 Volt atau $20.000/\sqrt{3}$ Volt / $110/\sqrt{3}$ Volt.

Bagian-bagian utama PT adalah:

- Kumparan primer.
- Kumparan sekunder.
- Inti besi.
- Terminal primer dan terminal sekunder.

Trafo tegangan dilengkapi dengan pelebur (*fuse*).



Gambar 2.7 Trafo Tegangan dengan Pelebur

2.6 PMS Rel dan PMS Tanah

2.6.1 PMS (Pemisah) Rel

Pemisah berfungsi untuk memisahkan peralatan yang akan dipelihara agar terlihat secara visual bahwa peralatan yang akan dipelihara sudah terpisah dari bagian yang bertegangan, sehingga aman bagi petugas terhadap tegangan dari luar peralatan tersebut.

⁴ Ibid.,17.



Lengan kontak PMT Tegangan Menengah pada Kubikel di sisi kabel dan di sisi rel, berfungsi sebagai pemisah, dimana untuk memisahkannya dilakukan dengan cara mengeluarkan PMT dari Kubikel tersebut atau diposisikan *rack out*. PMS Rel dan PMS Tanah seperti yang dimaksud di atas terpasang pada Kubikel *Open Type*.

2.6.2 PMS (Pemisah) Tanah/*Grounding*

Pemisah tanah berfungsi untuk pengamanan petugas yang akan bekerja, agar aman terhadap tegangan sisa dan tegangan induksi. Pemisah tanah pada Kubikel untuk mentanahkan di sisi kabel. Sedangkan untuk mentanahkan di sisi rel harus dilakukan secara manual melalui *grounding* lokal. PMS tanah sisi kabel untuk membuang sisa muatan listrik. PMS tanah ini dioperasikan dari panel dan terdapat *interlock* mekanik dengan PMT.

2.7 Pemeliharaan Kubikel⁵

2.7.1 *In Service/ Visual Inspection*

In Service Inspection adalah kegiatan yang dilakukan pada saat Kubikel dalam kondisi operasi/bertegangan. Tujuan dilakukannya *In Service Inspection* adalah untuk mendeteksi secara dini ketidaknormalan yang mungkin terjadi di dalam Kubikel tanpa melakukan pemadaman.

Dalam *In Service Inspection*, dilakukan beberapa pemeriksaan dengan metode:

1. Pengecekan dengan panca indera (visual, penciuman, pendengaran),
2. Pengecekan dengan alat ukur sederhana (*thermogun*, termometer, dan Lain-lain).

Untuk *In Service Inspection* pada pemeliharaan Kubikel dilakukan dengan periode Harian, Bulanan, 3 Bulanan, 2 tahunan. Selain itu ada beberapa pemeliharaan yang pelaksanaannya bergantung pada kondisi peralatan Kubikel tersebut (kondisional).

⁵ Ibid.,22.



- Periode Harian
 1. Pemeriksaan indikator pegas mekanik pada PMT sistem pegas.
 2. Monitor tekanan Gas SF 6 low (jenis PMT dengan media gas yang dilengkapi dengan indikator tekanan).
- Periode Bulanan
 1. Pemeriksaan visual terhadap benda asing, bunyi-bunyian dan bau-bauan.
 2. Pemeriksaan visual alat ukur (meter) dan rele.
 3. Pemeriksaan lemari kontrol, pemanas ruang (*heater*), lampu penerangan.
 4. Pemeriksaan kebersihan Kubikel dan ruang wiring kontrol.
- Periode 3 Bulanan
 1. Pemeriksaan indikator posisi PMT *Close /Open*.
 2. Pemeriksaan *counter* kerja PMT.
- Periode 2 Tahunan

Pemeriksaan struktur mekanik Kubikel.
- Kondisional

Pemeriksaan visual terhadap bunyi-bunyian dan bau-bauan dapat dilakukan bersamaan ketika melakukan pekerjaan lain, misalnya ketika sedang mencatat data pengusahaan Kubikel.

2.7.2 In Service Measurement

Merupakan pengukuran yang dilakukan pada periode tertentu dalam keadaan peralatan bertegangan. Pengukuran dan/atau pemantauan yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui / memonitor kondisi peralatan dengan menggunakan alat ukur yang *advanced* (seperti *Thermal Image Thermovision*).

Untuk *In Service Measurement* pada Pemeliharaan Kubikel dilakukan dengan periode Bulanan dan Kondisional.

- Periode Bulanan
 1. Pengukuran suplai tegangan AC dan DC Kubikel
 2. Pengukuran suhu Kubikel



3. Pengukuran suhu terminal dan sambungan pada rel, CT, PT, kabel dan peralatan lain yang dialiri arus dalam Kubikel. Pelaksanaan *thermovisi* dilakukan melalui lubang intai pada Kubikel.

- Kondisional

Pengukuran suhu Kubikel, terminal dan sambungan pada rel, CT, PT, kabel serta peralatan lain yang dialiri arus dalam Kubikel, juga dilakukan dengan memerhatikan kondisi pembebanan Kubikel tersebut. Semakin tinggi beban yang disalurkan, periode pengukuran suhu dengan *thermovisi* perlu semakin cepat.

2.7.3 Shutdown Measurement

Merupakan pengukuran yang dilakukan pada periode 2 tahunan dalam keadaan peralatan tidak bertegangan. Pengukuran ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui kondisi peralatan secara lebih rinci. Macam-macam pengukuran / pengujian:

A) Pengukuran / pengujian pada *PMT*:

- Pengukuran tahanan isolasi
- Pengukuran tahanan kontak
- Pengukuran kecepatan waktu buka / tutup
- Pengukuran media isolasi (Untuk *PMT* vacuum atau minyak)
- Pengukuran tekanan dan kebocoran gas SF₆ (jika terpasang manometer)
- Pengukuran tegangan kerja minimum coil

B) Pengukuran / pengujian CT

C) Pengukuran / pengujian PT

D) Pemeriksaan kebersihan Kubikel



2.8 Standar Evaluasi Pemeliharaan⁶

Standar evaluasi adalah acuan yang digunakan dalam mengevaluasi hasil pemeliharaan untuk dapat menentukan kondisi peralatan Kubikel yang dipelihara. Standar yang ada berpedoman kepada: *instruction manual* dari pabrik, standar-standar internasional maupun nasional (IEC, IEEE, CIGRE, ANSI, SPLN, SNI dan lain-lain) dan pengalaman serta observasi/pengamatan operasi di lapangan.

Dikarenakan dapat berbeda antar merk/pabrikan, maka acuan yang diutamakan adalah manual dari pabrikan Kubikel tersebut. Dapat digunakan acuan yang berasal dari standar internasional maupun nasional, apabila tidak ditemukan suatu nilai batasan pada manual dari pabrikan Kubikel tersebut.

2.9 Pengukuran/pengujian Tahanan Isolasi PMT⁷

Tahanan isolasi adalah tahanan yang terdapat diantara dua kawat saluran yang diisolasi satu sama lain atau tahanan antara satu kawat saluran dengan tanah (*ground*). Tahanan isolasi merupakan hal yang harus diperhatikan saat memasang instalasi listrik dengan menggunakan kawat tertutup.

Pengukuran tahanan isolasi pemisah (PMS) ialah proses pengukuran dengan suatu alat ukur untuk memperoleh nilai tahanan isolasi PMS antara terminal utama tiap fasa terhadap *body(base plat)* yang ditanahkan.

Agar dapat lebih memahami tentang pengukuran tahanan isolasi, diperlukan mengetahui persamaan sederhana dari tahanan isolasi ini, yaitu “Hukum Ohm” dimana:

$$V = I \times R \dots \dots \dots (2.1)$$

Keterangan:

V = Tegangan (Volt)

I = Kuat Arus (Ampere)

R = Tahanan (Ohm)

Dari persamaan diatas diketahui jika tegangan yang ada besar maka akan besar juga nilai kuat arus yang dimiliki. Dan juga semakin rendah nilai tahanan

⁶ Ibid.,37.

⁷ Ibid.



tersebut maka akan semakin besar nilai kuat arus yang di dapat dalam jumlah tegangan yang sama. Karena nilai tegangan dengan kuat arus sebanding maka semakin besar tegangan maka akan semakin besar juga kuat arus. Nilai arus yang kecil tidak akan merusak isolasi yang dalam keadaan baik. Namun, apabila terjadi kerusakan pada isolasi maka nilai arus yang kecilpun akan menjadi masalah.

Pada saat pengukuran tahanan isolasi hasil yang didapat harus dibagi dengan tegangan injeksi nya untuk mengetahui nilai hambatan per tegangan nya. Dapat diketahui dengan rumus :

$$\mathbf{Rpengukuran / Vinject} \dots\dots\dots(2.2)^8$$

Dimana Rpengukuran merupakan nilai hambatan yang didapat dari hasil pengujian tahanan isolasi. Sedangkan *Vinject* merupakan tegangan yang diberikan oleh alat ukur ke objek yang akan diukur.

Batasan tahanan isolasi PMT Kubikel menurut standar VDE (*catalogue* 228/4) minimum besarnya tahanan isolasi pada suhu operasi dihitung “ **1 kilo Volt = 1 MΩ (Mega Ohm)** “. Dengan catatan 1 kV = besarnya tegangan fasa terhadap tanah, kebocoran arus yang diijinkan setiap kV = 1 mA.

Untuk mendapatkan nilai tahanan isolasi, pengukuran dilakukan dengan cara menginject isolasi dengan tegangan 5kV selama 1 menit.

2.10 Pengukuran Tahanan Kontak PMT⁹

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 kontak nya tinggi.

⁸ Novia Fidianti, Skripsi, *Analisis Tahanan Isolasi Peralatan Utama Gardu Induk*, (Jakarta: UNJ, 2018), 15.

⁹ PT. PLN, Op. Cit., 37



Jadi tahanan kontak ini merupakan pertemuan antara dua titik sambung konduktor atau lebih yang dapat menyebabkan hambatan saat arus melaluinya yang lama kelamaan akan menyebabkan panas (*hotspot*) sehingga dapat merugikan apabila nilai tahanan kontak nya sudah tinggi.

Sambungan antar konduktor pada pemutus (PMT) merupakan tahanan kontak yang syarat tahananannya memenuhi hukum ohm yaitu sebagai berikut :

$$V = I \times R \dots \dots \dots (2.3)$$

Keterangan :

V = Tegangan (volt)

I = kuat arus (ampere)

R = hambatan/tahanan (ohm)

Jika arus listrik melalui suatu penghantar, maka kekuatan arus tersebut sebanding lurus dengan tegangan listrik yang terdapat antara kedua penghantar tadi (Tilloy, 1980).

Perlawanan adalah volt per ampere hambatan konduktor adalah 1 ohm jika potensa berbeda disamping terminal di dalam konduktor adalah volt ketika arus di konduktor 1 ampere (Richards, 1987).

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

$$P_{\text{loss}} = I^2 \cdot R \dots \dots \dots (2.4)^{10}$$

Keterangan :

P_{loss} = Rugi daya (W)

I = Arus (A)

R = Tahanan (Ω)

P_{loss} = 10.000 watts.

Sama dengan alat ukur tahanan murni (R_{dc}), tetapi pada tahanan kontak arus yang dialirkan lebih besar $I=100$ Amperemeter.

¹⁰ Aip Saripudin dkK, *Praktis Belajar Fisika*, (Jakarta: Pusat Perbukuan Departemen Pendidikan Nasional, 2009), 152



Setelah menghitung nilai rugi dayanya maka dapat diketahui besar energi yang hilang pada suatu tahanan kontak tersebut menggunakan persamaan berikut :

$$W_{\text{loss}} = P_{\text{loss}} \times T \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana :

W_{loss} = Energi yang terbuang (kWh)

P_{loss} = Rugi daya (W)

T = Waktu (Jam)

Jika jumlah sambungan konduktor pada salah satu jalur terdapat banyak sambungan sehingga akan banyak juga energi yang terbuang, tetapi masalah ini dapat dikendalikan dengan cara menurunkan tahanan kontak dengan membuat dan memelihara nilai tahanan kontak sekecil mungkin.

Untuk mendapatkan nilai tahanan kontak, pengukuran dilakukan dengan cara menginject konduktor dengan arus sebesar 100 Ampere. Nilai hasil pengukuran tahanan kontak ≤ 120 % nilai standar pabrikan atau Nilai Pengujian FAT dan nilai saat pengujian komisioning atau yang terdapat pada formulir pemeliharaan $< 100 \mu\Omega$. Jadi yang menjadi acuan saat melakukan pengukuran adalah $R < 100 \mu\Omega$.

2.11 Pengukuran Kecepatan Waktu Buka/Tutup PMT

Pada saat terjadi gangguan pada sistem tenaga listrik, diharapkan PMT bekerja dengan cepat. *Clearing Time* sesuai dengan standart SPLN No 52-1 1983 untuk sistem dengan tegangan 20 kV adalah < 50 ms. Kecepatan kontak PMT membuka dan / atau menutup harus disesuaikan dengan referensi / acuan dari masing – masing pabrikan PMT, sebagai contoh adalah sebagai berikut:

Tabel 2.1 Contoh Kecepatan Kontak PMT Open dan Close

PMT 20 kV	Opening time	Breaking time	Closing time
Areva	$(38 \pm 10\%)$ ms	$(50 \pm 10\%)$ ms	$(70 \pm 10\%)$ ms



Toleransi perbedaan waktu antar fasa R, S, dan T saat PMT beroperasi (*Open / Close*) ditentukan dengan melihat nilai Δt yang merupakan selisih waktu tertinggi dan terendah antar fasa R, S, dan T. Rekomendasi untuk nilai Δt adalah < 10 ms.

Untuk mendapatkan nilai uji keserempakkan, pengukuran dilakukan dengan cara di *sensing* menggunakan tegangan 24kV.

2.12 Pengujian Media Isolasi PMT (*Vacuum*)

Pengukuran/pengujian karakteristik media pemutus *vacuum* adalah untuk mengetahui apakah ke-*vacuum*-an ruang kontak utama (*breaking chamber*) PMT tetap hampa sehingga masih berfungsi sebagai media pemadam busur api listrik.

PMT jenis *vacuum* kebanyakan digunakan untuk tegangan menengah dan hingga saat ini masih dalam pengembangan sampai tegangan 36 kV. Jarak (*gap*) antara kedua katoda adalah 1 cm untuk 15 kV dan bertambah 0,2 cm setiap kenaikan tegangan 3 kV.

Ruang kontak utama (*breaking chambers*) dibuat dari bahan antara lain porselen, kaca atau plat baja yang kedap udara. Ruang kontak utamanya tidak dapat dipelihara dan umur kontak utama sekitar 20 tahun. Karena kemampuan dielektrikum yang tinggi maka bentuk fisik PMT jenis ini relatif kecil.

Untuk pengujian media isolasi ini titik acuan yang digunakan dalam pengujian ini yaitu dengan menahan tegangan sebesar 24kV selama 1 menit.