

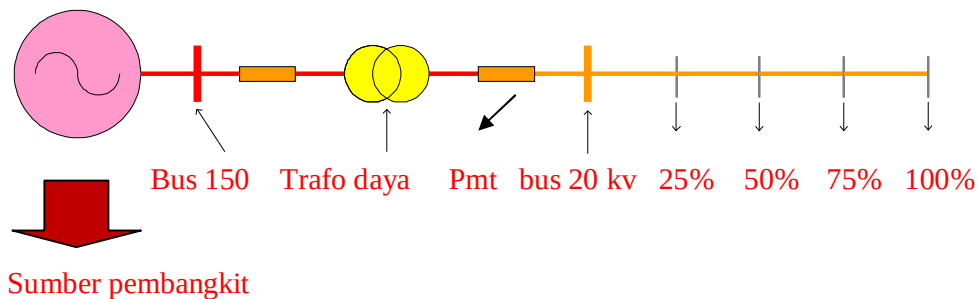


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Dasar Sistem Proteksi

Suatu sistem tenaga listrik dibagi ke dalam seksi-seksi yang dibatasi oleh *PMT*. Tiap seksi memiliki relai pengaman dan memiliki daerah pengamanan (*Zone of Protection*). Bila terjadi gangguan, maka relai akan bekerja mendeteksi gangguan dan *PMT* akan trip. Gambar 2.1 berikut ini dapat menjelaskan tentang konsep pembagian daerah proteksi.



Gambar 2.1. *Single Line* Jaringan Distribusi

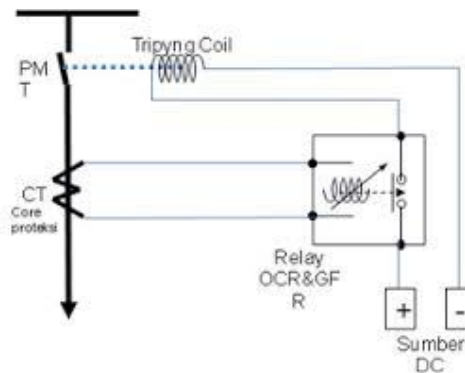
Pada gambar 2.1 di atas dapat dilihat bahwa daerah proteksi pada sistem tenaga listrik dibuat bertingkat dimulai dari pembangkitan, gardu induk, saluran distribusi primer sampai ke beban. Garis putus-putus menunjukkan pembagian sistem tenaga listrik ke dalam beberapa daerah proteksi. Masing-masing daerah memiliki satu atau beberapa komponen sistem daya disamping dua buah pemutus rangkaian.

Setiap pemutus dimasukkan ke dalam dua daerah proteksi berdekatan. Batas setiap daerah menunjukkan bagian sistem yang bertanggung jawab untuk memisahkan gangguan yang terjadi di daerah tersebut dengan sistem lainnya. Aspek penting lain yang harus diperhatikan dalam pembagian daerah proteksi adalah bahwa daerah yang saling berdekatan harus saling tumpang tindih (*overlap*), hal ini dimaksudkan agar tidak ada sistem yang dibiarkan tanpa



perlindungan. Pembagian daerah proteksi ini bertujuan agar daerah yang tidak mengalami gangguan tetap dapat beroperasi dengan baik sehingga dapat mengurangi daerah terjadinya pemadaman. Berdasarkan daerah pengamanannya sistem proteksi dibedakan menjadi :

1. Proteksi pada Generator
2. Proteksi pada Transformator
3. Proteksi pada Transmisi
4. Proteksi pada Distribusi



Gambar 2.2 Rangkaian dari sistem proteksi

Dalam sistem proteksi pembagian tugas dapat diuraikan menjadi :

- a. Proteksi utama, berfungsi untuk mempertinggi keandalan, kecepatan kerja, dan fleksibilitas sistem proteksi dalam melakukan proteksi terhadap sistem tenaga.
- b. Proteksi pengganti, berfungsi jika proteksi utama menghadapi kerusakan untuk mengatasi gangguan yang terjadi.
- c. Proteksi tambahan, berfungsi untuk pemakaian pada waktu tertentu sebagai pembantu proteksi utama pada daerah tertentu yang dibutuhkan.

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. Seperangkat peralatan / komponen proteksi utama berdasarkan fungsinya dapat dibedakan menjadi :

1. Rele Proteksi
2. Pemutus tenaga (PMT) : Sebagai pemutus arus untuk mengisolir sirkuit yangterganggu.
3. *Tranducer* yang terdiri dari sumber daya pembantu
4. Trafo Arus : Meneruskan arus ke sirkuit relai.
5. Trafo Tegangan : Meneruskan tegangan ke sirkuit relai
6. Baterai : sebagai sumber tenaga untuk mentriapkan PMT dan catu daya untuk relai statis dan alat bantu.

Adapun fungsi dari sistem proteksi adalah:

- a. Untuk menghindari atau mengurangi kerusakan peralatan listrik akibat adanya gangguan (kondisi abnormal). Semakin cepat reaksi perangkat proteksi yangdigunakan, maka akan semakin sedikitlah pengaruh gangguan terhadap kemungkinan kerusakan alat.
- b. Untuk mempercepat *melokaliser* luas/*zone* daerah yang terganggu, sehingga daerah yang terganggu menjadi sekecil mungkin.
- c. Untuk dapat memberikan pelayanan listrik dengan keandalan yang tinggi kepada konsumen, dan juga mutu listriknya baik.



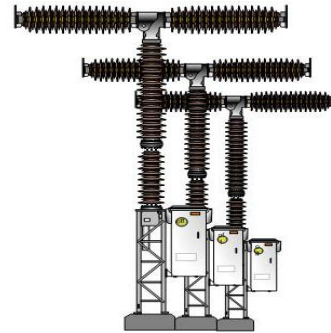
- d. Untuk mengamankan manusia (terutama) terhadap bahaya yang ditimbulkan oleh listrik.



PMT 20KV



PMT 150KV



PMT 500KV

Gambar 2.3 Macam-macam PMT

Pemutus Tenaga (PMT) ini terbagi dalam beberapa tipe antara lain;

1. Circuit Breaker dengan menggunakan media minyak (Oil Blast Circuit Breaker).
2. Circuit Breaker dengan menggunakan media hampa udara (Vacum Circuit Breaker).
3. Circuit Breaker dengan menggunakan media udara hembus (Air Blast Circuit Breaker).
4. Circuit Breaker dengan menggunakan media gas (Gas Sulfur Hexaflorida/ Gas SF₆).

Didalam Circuit Breaker ini terdapat bagian utama seperti bagian pemutus tenaga, kontak utama, pemutus/pemad am busur api, mekanisme penggerak, pengendali kontak, bagian penyangga.

2.2 Komponen Dan Fungsi Sistem Proteksi



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. Penghantar arus listrik (*electrical current carrying*)
2. Sistem isolasi (*electrical insulation*)
3. Media pemadam busur api
4. Mekanik penggerak
5. *Control / Auxilary circuit*
6. Struktur mekanik
7. Sistem pentanahan (*grounding*)

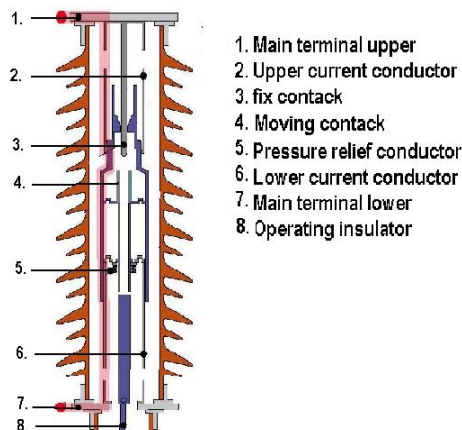
2.2.1 Penghantar arus listrik (*electrical current carrying*)

Merupakan bagian PMT yang bersifat konduktif dan berfungsi untuk menghantarkan / mengalirkan arus listrik. Penghantar arus listrik pada PMT terdiri dari beberapa bagian antara lain :

a. *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:

- Kontak bergerak / *moving contact*
- Kontak tetap / *fixed contact*
- Kontak arcing / *arcing contact*



Gambar 2.4 *Interrupter*

b. 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 2.5 Terminal utama

2.3 Persyaratan Sistem Proteksi

2.3.1 Cepat bereaksi

Relay harus dapat bekerja dengan kepekaan yang tinggi, artinya harus cukup sensitif terhadap gangguan didaerahnya meskipun gangguan tersebut minimum, selanjutnya memberikan jawaban / *response* .

Untuk relay arus-lebih hubung-singkat yang bertugas pula sebagai pengaman cadangan jauh bagi seksi berikutnya, relay itu harus dapat mendeteksi arus gangguan hubung singkat 2 (dua) fase yang terjadi diujung akhir seksi berikutnya dalam kondisi pembangkitan minimum. Sebagai pengaman peralatan seperti motor, generator atau trafo, relay yang peka dapat mendeteksi gangguan pada tingkatan yang masih dini sehingga dapat membatasi kerusakan. Bagi peralatan seperti tsb diatas hal ini sangat penting karena jika gangguan itu sampai



merusak besi laminasi stator atau inti trafo, maka perbaikannya akan sangat sukar dan mahal.

Sebagai pengaman gangguan tanah pada Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM), relay yang kurang peka menyebabkan banyak gangguan tanah, dalam bentuk sentuhan dengan pohon yang tertiup angin, yang tidak bisa terdeteksi. Akibatnya, busur apinya berlangsung lama dan dapat menyambar ke fasa lain, maka relay hubung-singkat yang akan bekerja. Gangguan sedemikian bisa terjadi berulang kali di tempat yang sama yang dapat mengakibatkan kawat cepat putus. Sebaliknya, jika terlalu peka, relay akan terlalusering trip untuk gangguan yang sangat kecil yang mungkin bisa hilang sendiri ataudapat diabaikan.

2.3.2 Selektif

Yang dimaksud dengan selektif disini adalah kecermatan pemilihan dalam mengadakan pengamanan, dimana hal ini menyangkut koordinasi pengamanan dari sistem secara keseluruhan. Untuk mendapatkan keandalan yang tinggi, maka relay pengaman harus mempunyai kemampuan selektif yang baik. Dengan demikian, segala tindakannya akan tepat dan akibatnya gangguan dapat dieliminir menjadi sekecil mungkin.

2.3.3 Andal / *reliability*

Keandalan relay dihitung dengan jumlah relay bekerja / mengamankan daerahnya terhadap jumlah gangguan yang terjadi. Keandalan relay dikatakan cukup baik bila mempunyai harga : 90 % - 99 %. Misal, dalam satu tahun terjadi gangguan sebanyak 25 X dan relay dapat bekerja dengan sempurna sebanyak 23 X, maka :

$$\text{keandalan relay} = \frac{23}{25} \times 100 \% = 92 \%$$

Keandalan dapat dibagi dua :

- 1) *Dependability* : Relay harus dapat diandalkan setiap saat.



- 2) *Security* : Tidak boleh salah kerja / tidak boleh bekerja yang bukan seharusnya bekerja.

2.3.4 Kecepatan (*speed*)

Untuk memperkecil kerugian/kerusakan akibat gangguan, maka bagian yang terganggu harus dipisahkan secepat mungkin dari bagian sistem lainnya. Waktu total pembebasan sistem dari gangguan adalah waktu sejak munculnya gangguan, sampai bagian yang terganggu benar-benar terpisah dari bagian sistem lainnya.

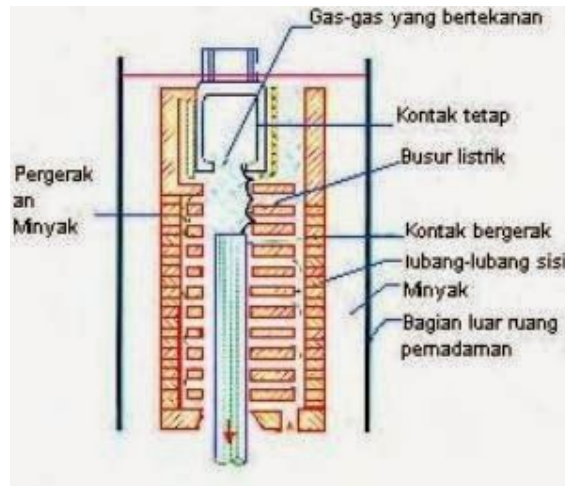
Kecepatan itu penting untuk:

1. Menghindari kerusakan secara thermis pada peralatan yang dilalui arus gangguan serta membatasi kerusakan pada alat yang terganggu.
2. Mempertahankan kestabilan sistem.
3. Membatasi ionisasi (busur api) pada gangguan disaluran udara yang akan berarti memperbesar kemungkinan berhasilnya penutupan balik PMT (reclosing) dan mempersingkat *dead timenya* (interval waktu antara buka dan tutup).

Untuk menciptakan selektifitas yang baik, mungkin saja suatu pengaman terpaksa diberi waktu tunda (td) namun waktu tunda tersebut harus sesingkat mungkin (seperlunya saja) dengan memperhitungkan resikonya.

2.4 Pemutus Tenaga (PMT)

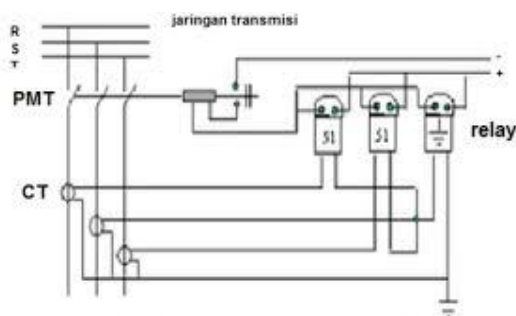
Adalah suatu komponen sistem proteksi yang memberikan respon terhadap terjadinya kerusakan pada peralatan sistem dan untuk mempertahankan kestabilan sistem ketika terjadi gangguan.



Gambar 2.6 Kontruksi suatu pemtus daya

Syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh suatu pemutus tenaga agar dapat melaksanakan nya, adalah sebagai berikut :

1. Mampu menyalurkan arus maksimum sistem secara kontinu.
2. Mampu memutuskan dan menutup jaringan dalam keadaan berbeban maupun terhubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus tenaga itu sendiri.
3. Dapat memutuskan arus hubung singkat dengan cepat agar arus hubung singkat tidak sampai merusak peralatan sistem, tidak membuat sistem kehilangan kestabilan dan tidak merusak pemutus tenaga itu sendiri.



Gambar 2.7 Sistem-sistem proteksi



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 netralsistem.
2. Arus maksimum kontinyu 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. Iklim dan ketinggian lokasi penempatan pemutus daya.

Tabel 2.1 Eksponen Faktor Koreksi Udara

Ketinggian (m)	Faktor koreksi
1000	1,00
1212	0,98
1515	0,95
3030	0,80

2.5 Jenis-Jenis Pemutus Tenaga (PMT)

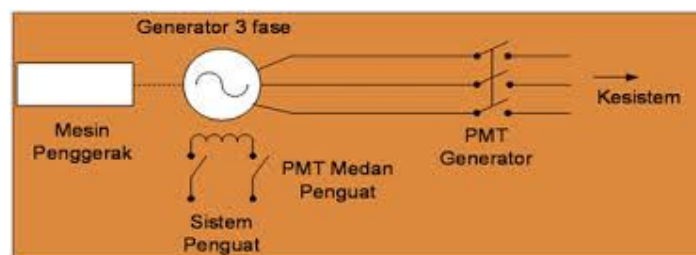
Pemutus tenaga dapat dikelompokkan berdasarkan beberapa kategori. Jenis-jenis pemutus tenaga menurut tegangan kerjanya adalah pemutus tenaga: tegangan rendah, tegangan menengah dan tegangan tinggi. Kemudian jenis-jenis pemutus tenaga menurut lokasi penempatannya adalah pemutus tenaga pasangan dalam dan pasangan luar.

**Tabel 2.2 Jenis PMT & Kurun Waktu Overhaul**

JENIS PMT	KURUN WAKTU OVERHAUL
Pmt dengan media udara hembus (<i>Air Blast</i>)	Selambat-lambatnya 9 tahun atau pada saat jumlah angka pemutusan $n = 4500$
Pmt dengan media sedikit minyak (<i>Low Oil Content</i>)	Selambat-lambatnya 6 tahun atau pada saat jumlah angka pemutusan $n = 1500$
Pmt dengan media banyak minyak (<i>Bulk Oil Content</i>)	Disesuaikan dengan ketentuan pabrik
Pmt dengan media gas SF ₆	Disesuaikan dengan ketentuan pabrik

Sedangkan jenis-jenis pemutus tenaga menurut medium pemadaman busur api yang digunakan adalah:

- Pemutus Tenaga Udara (*Air Circuit Breaker*)
- Pemutus Tenaga minyak (*Oil Circuit Breaker*)
- Pemutus Tenaga udara tekan (*Air-Blast Circuit Breaker*)
- Pemutus Tenaga vakum (*Vacuum Circuit Breaker*)
- Pemutus Tenaga isolasi SF₆



Gambar 2.8 Rangkaian dari sistem-sistem PMT

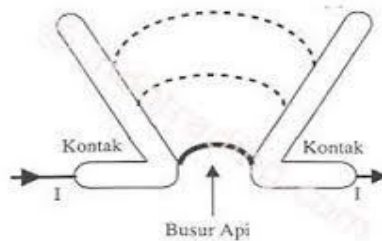
2.5.1 Pemutus Daya Udara (*Air Circuit Breaker*)

Deionisasi akan mengurangi partikel-partikel bermuatan. Dengan kata lain, pendinginan busur api akan mengurangi konduktivitas busur api atau meningkatkan resistansi busur api, sehingga jatuh tegangan pada resistansi busur



api semakin besar. Hal ini akan mengurangi arus yang mengalir pada kontak pemutus daya sehingga peluang busur api padam semakin besar. Pendinginan busur api semakin besar jika luas permukaan busur api yang bersentuhan dengan udara semakin besar. Hal ini dapat dilakukan dengan memperpanjang lintasan busur api. Perpanjangan busur api dilakukan dengan beberapa cara, antara lain dengan menggunakan kontak sela tanduk, seperti diperlihatkan pada gambar 2.6

Ketika kontak dipisahkan, busur api terbentuk pada bagian bawah kontak. Panas yang ditimbulkan busur api membuat temperature di bagian bawah kontak lebih tinggi daripada temperature di bagian atasnya, sehingga terjadi aliran udara dari bawah ke atas. Aliran udara ini mendorong busur api bergerak ke atas. Busur api yang panjang sangat mudah dipadamkan arus konveksi udara, sehingga busur api sudah padam sebelum mencapai ujung tanduk.



Gambar 2.9 Kontak sela tanduk

Busur api akan padam ketika arus yang mencapai nilai nol yang pertama. Busur api tidak terulang lagi, karena tegangan tidak cukup kuat menimbulkan emisi medan yang dapat mengawali terpaan balik busur api.

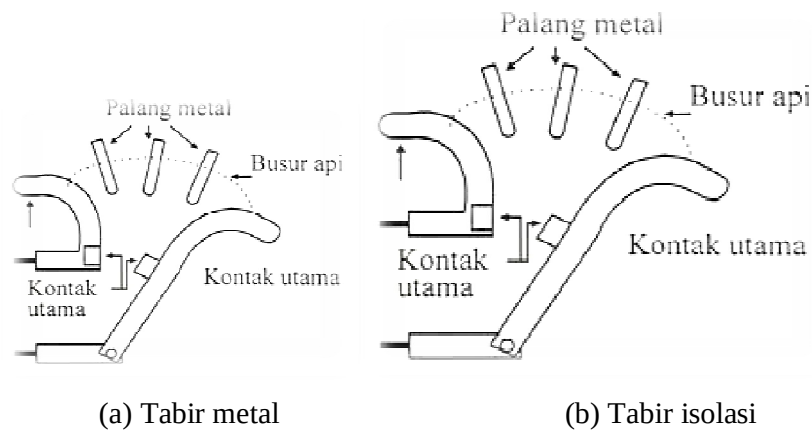
Letak isolasi pendukung kontak harus diatur sedemikian rupa sehingga tidak gosong karena panas yang ditimbulkan busur api. Isolator gosong akan memproduksi karbon sehingga isolasi seakan-seakan menjadi elektroda dan dari elektroda ini keluar electron hasil emisi termal yang dapat mengawali terjadinya terpaan busur api balik.



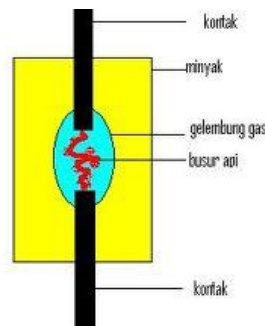
2.5.2 Pemutus Daya Minyak (*Oil Circuit Breaker*)

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 yang diperlihatkan pada gambar 2.9



Gambar 2.10 Kontak pemutus daya dengan tabir



Gambar 2.11 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 pada luas permukaan busur api yang bersentuhan dengan minyak dan daya hantar panas minyak. Adanya *hydrogen* 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 dengan tanah.

Tabel 2.3 Batas-batas pengusahaan minyak pemutus tenaga

Sifat-sifat dari minyak pemutus tenaga	Minyak terpakai	Minyak baru	Tindakan kolom 2&3 tidak terpenuhi	Standard dipakai
Kekuatan dielektrik untuk tegangan kerja: ≤ 60 kv 150 kv ≥ 150 kv 380 kv	80 kv/cm 110 kv/cm 140 kv/cm 180 kv/cm	≥200kv/cm	Difilter	IEC156/1963 IEC296/1969 IEC148/1959
Kadar asam (mg)	Maks 1	0,02-0,04	0,4s/d 1 difilter > diganti	ASTM D877
Viscosity (cst) pada 30°C	22	18	difilter	BS 148/1959 JIS2320/78
Kadar endapan(%)	0,1	Nol	Difilter	IEC 296/1969
Flash Point	146,1 ⁰ C (295 ⁰ F)	-	-	BS 148/1959
Warna mineral oli	3,5 max	3,5 max	Difilter	ASTM D877
Warna Askarels	2,0 max	2,0 max	Difilter	ASTM D877



(gardner Scales)				
------------------	--	--	--	--

Jenis PMT dengan minyak ini dapat dibedakan menjadi :

- PMT menggunakan banyak minyak (*bulk oil*)
- PMT menggunakan sedikit minyak (*small oil*)

PMT jenis ini digunakan mulai dari tegangan menengah 6 kV sampai tegangan ekstra tinggi 425 kV dengan arus nominal 400 A sampai 1250 A dengan arus pemutusan simetris 12 kA sampai 50 kA.

Kelemahan pemutus daya minyak adalah sebagai berikut:

1. Minyak mudah terbakar dan jika mengalami tekanan dapat meladak.
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 hydrogen bercampur dengan udara, maka akan 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.

2.5.3 Pemutus Daya Udara Tekan (*Air Blast-Circuit Breaker*)

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 seperti pada gambar 2.12



Gambar 2.12 Pemutus daya udara tekan

Kontak bergerak digerakkan oleh suatu piston. Pada keadaan normal, piston didorong oleh suatu pegas, sehingga kontak bergerak terhubung dengan kontak tetap. Bilik kontak dihubungkan dengan suatu tangki berisi bertekanan tinggi melalui suatu katup. Jika terjadi arus hubung singkat, katup akan terbuka, udara bertekanan tinggi keluar bergerak juga terdorong menjauhi kontak tetap.

Pada waktu yang bersamaan, udara bertekanan tinggi mendinginkan busur api, udara bertekanan tinggi juga menyingkirkan partikel bermuatan dari sela kontak, sehingga pemulihan kekuatan dielektrik pada sela kontak berlangsung cepat. Karena pemulihan kekuatan dielektrik pada sela kontak berlangsung cepat, maka busur api berlangsung cepat, sehingga peluruhan material kontak pemutus daya minyak.

Dengan kata lain, sela kontak pemutus daya udara tekan akan lebih lama daripada kontak pemutus daya minyak

Kecepatan pemulihan kekuatan dielektrik pada sela kontak pemutus daya berpengaruh terhadap jarak minimal sela kontak. Jika pemulihan kekuatan dielektrik berlangsung cepat, maka panjang sela kontak dapat dibuat lebih pendek. Dengan demikian, ukuran bilik kontak dapat dikurangi.



Durasi waktu kerja kompressor dan kebocoran udara yang ditoleransi sebagai akibat perbedaan temperatur udara sekitar untuk PMT dengan penggerak pneumatik menurut pabrikan adalah sebagai berikut:

Tabel 2.3 Standar Pengujian Tekanan Udara

Deskripsi		PMT dengan 1 chamber	PMT dengan 2 chamber		PMT dengan 4 chamber
		Dengan 1 Compressor		Dengan 2 Compressor	
Tekanan operasi	Mpa	1,95	1,95	3,05	3,05
	Lbf / in ²	283	283	442	442
Waktu kerja untuk 1 operasi C-O		5,5 menit		11,5 menit	
Waktu kerja per hari tanpa ada buka tutup PMT (yang di ijin antara 3 – 4 kali operasi kompressor per hari) -- ABB type ELF SL --		7, 0 menit		7,0 menit	
Waktu kerja per hari tanpa ada buka tutup PMT -- PMT MHMe (1P) - Magrini --		Maksimum 2 bar per 24 Jam			

2.5.4 Pemutus Daya Vakum(*Vacuum Circuit Breaker*)



Pada pemutus daya vakum, medium pemadam adalah vakum antara ($10^{-7} - 10^{-5}$). Vakum memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi dan merupakan bahan pemadam api yang lebih unggul daripada medium pemadam busur api lainnya. Contoh suatu pemutus daya vakum diperlihatkan pada gambar 2.13



Gambar 2.13 Pemutus daya vakum

Kontak pemutus daya ditempatkan pada suatu bilik vakum seperti pada gambar 2.13

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 bergerak menuju anoda dan menimbulkan busur api.

Dalam perjalanannya menuju anoda, elektron-elektron bebas ini tidak bertemu dengan molekul udara sehingga tidak 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 lagi, sehingga pemutusan berlangsung sangat cepat.



Kelebihan-kelebihan pemutus daya vakum antara lain adalah:

1. Kontruksinya kompak, andal, dan tahan lama.
2. Tidak menimbulkan bahaya kebakaran.
3. Ketika dioperasikan, tidak memproduksi gas.
4. Perawatannya mudah dan murah.
5. Mampu menahan tegangan implus petir.
6. Dapat memutuskan arus hubung singkat yang tinggi.
7. Energi yang dikonsumsi busur api rendah.
8. Kontruksi penarik kontak sederhana, sehingga dapat digerakkan peralatan mekanik bertenaga rendah

2.5.5 Pemutus Daya SF6

Dewasa ini, pemakaian pemutus daya *SF6* sedang berkembang pesat, terutama pada sistem tegangan tinggi.



Gambar 2.14 Pemutus daya SF6

Prinsip kerja sama dengan pemutus daya yang lainnya. Perbedaan nya hanya pada medium pemadam busur api. Pada pemutus daya *SF6*, medium pemadam busur api yang digunakan adalah gas *SF6*, yang pada posisi kontak tertutup bertekanan $\pm 2.8 \text{ kg/cm}^2$.

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 bewarna dan tidak berbau.
2. Gas SF_6 memiliki elektronegatif, yaitu molekulnya yang aktif menangkap electron bebas, sehingga molekul netral tersebut berubah menjadi ion negative. Sifat ini adalah salah satu yang membuat SF_6 memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi. Sifat elektronegatif gas SF_6 mempercepat pemulihan kekuatan dielektrik medium di sela kontak sehingga pemadaman busur api berlangsung cepat.
3. Pada kondisi yang sama, kekuatan dielektrik gas SF_6 dua sampai tiga kali lipat daripada kekuatan dielektrik udara, bahkan pada tekanan tertentu hampir sama dengan minyak. Sifat ini membuat pemutus daya SF_6 sangat efektif digunakan pada sistem tegangan tinggi maupun memutuskan arus tinggi.
4. Jika gas SF_6 terkontaminasi udara, kekuatan dielektriknya tidak banyak berubah.
5. Daya hantar panas gas SF_6 lebih baik daripada udara sehingga dapat digunakan untuk pendinginan konveksi.
6. Interaksi busur api dengan gas SF_6 tidak menimbulkan endapan karbon seperti halnya pada pemutus daya minyak.
7. Biaya perawatan murah.
8. Konstruksi pemutus daya SF_6 sederhana dan ringan biaya pembuatannya murah.

Bagian utama suatu pemutus daya SF_6 adalah kontak bergerak, kontak tangki gas SF_6 dan tangki gas bertekanan tinggi $\pm 14 \text{ kg/cm}^2$.

Tangki gas dihubungkan dengan bilik kontak melalui sebuah katup. Jika kontak terbuka, katup akan membuka, sehingga dari tangki mendorong gas SF_6 yang terdapat pada bilik kontak.

Ketika kontak terbuka, terjadi busur api. Pada saat yang bersamaan, katup penghubung bilik dengan tangki terbuka, sehingga tangki mendorong gas SF_6



yang ada pada bilik kontak. Gas SF_6 yang ada pada bilik kontak menyembur melalui leher bilik kontak sambil mendinginkan busur api. Pendinginan busur api dan sifat elektronegatif yang dimiliki gas SF_6 membuat pemulihan kekuatan dielektrik SF_6 berlangsung cepat, sehingga ketika busur api padam, busur api tidak terulang lagi.

Pengujian kualitas gas SF_6 dilaksanakan untuk mengetahui karakteristik gas SF_6 apakah masih dapat dikatakan layak digunakan sebagai dielektrik / media isolasi.

Standar nilai kualitas Gas SF_6 menurut ASTM 2472, IEC 376 dan ASG TYPICAL adalah sbb:

Tabel 2.4 Standar Pengujian Kualitas Gas SF_6

Component	ASTM 2472	IEC 376	ASG TYPICAL
Sulfurhexafluoride (by wt.)	□ 99.8%	□ 99.8%	□ 99.9%
Water (vol. %)	□ 8 ppmv	□ 15 ppmv	□ 5 ppmv
Dew Point	-62°C	-40°C	-65°C
Hydrolyzable Fluorides (HF)	□ 0.3 ppmw	□ 1.0 ppmw	□ 0.3 ppmw
Air (wt. %)	□ 500 ppmw	□ 500 ppmw	□ 200 ppmw
Carbon Tetrafluoride (CF_4) (wt. %)	□ 500 ppmw	□ 500 ppmw	□ 200 ppmw

Pengujian karakteristik dari gas SF_6 mengacu pada standart IEC dan pabrikan seperti tabel di bawah ini:

Tabel 2.5. Standar Pengujian Kualitas Gas SF_6 Lainnya



URAIAN	SATUAN	BATASAN	KETERANGAN
Berat molekol	gram	146,07	Delle Alsthom
Berat Jenis gas (Gas density) Pada temp. 20° C. 1 bar 1 bar 2 bar 6 bar	Kg/l Kg/l Kg/l Kg/l	$6,16 \cdot 10^{-3}$ $6,40 \cdot 10^{-3}$ $12,50 \cdot 10^{-3}$ $39,00 \cdot 10^{-3}$	IEC 376-1971 Delle Alsthom Delle Alsthom Delle Alsthom
Berat jenis cair (liquid density) Pada temp. 0° C.	Kg/l	1,56	S & S
Suhu kritis (critical temperature)	° C ° C	45,6 56,5	IEC 376-1971 Delle Alsthom
Berat jenis kritis (critical density)	Kg/l	0,370	Delle Alsthom
Tekanan kritis (critical pressure)	bar	40	Delle Alsthom

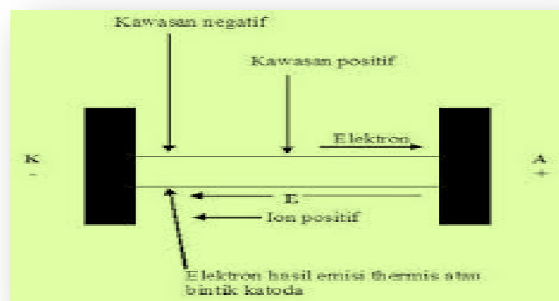
Kelemahan pemutus daya *SF6* adalah sebagai berikut.

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



2.6 Pemadaman Busur Api

Suatu pemutus tenaga 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 api akan terjadi lagi.



Gambar 2.15 Pembentukan busur api

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 tenaga searah berbeda dengan pemadaman busur api pada pemutus tenaga bolak-balik.

2.6.1 Pemadaman Busur Api Arus Searah

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

- Membuat jatuh tegangan pada busur api sama atau lebih besar daripada tegangan sistem; dan



- b. Mengijeksikan arus yang berlawanan arah dengan arus pada busur api.
Cara pertama dilakukan pada pemutus tenaga berkapasitas dan bertegangan rendah, sedangkan cara kedua dilakukan pada pemutus tenaga tegangan tinggi.

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 berikutnya harus dicegah. Pencegahan dilakukan dengan deionisasi. Deionisasi akan mengurangi electron bebas, sehingga konduktivitas busur api berkurang. Pengurangan konduktivitas busur api mengakibatkan resistansi busur api semakin besar. Penambahan resistansi busur api akan memperkecil arus pada sela kontak pemutus tenaga dan cenderung menjadi nol.

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

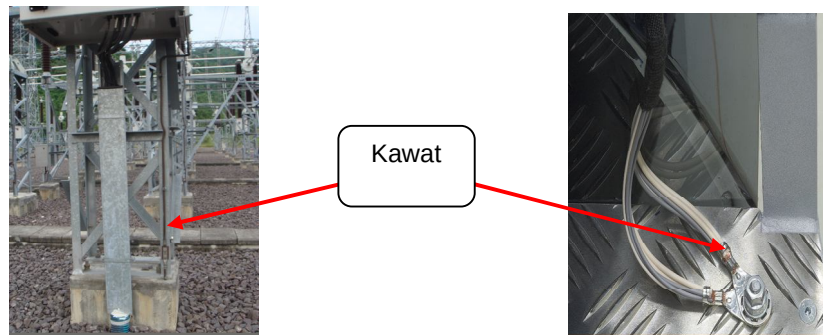
- a. Meniupkan udara ke sela kontak, sehingga busur api mengalami kedinginan dan partikel-partikel hasil *ionisasi* terdorong menjauhi sela kontak.
- b. Menyemburkan minyak atau gas isolasi ke busur api untuk mendinginkan busur api sehingga peluang bagi proses rekombinasi semakin besar.
- c. Memotong busur api dengan tabir isolasi atau tabir logam, sehingga memberi peluang yang lebih besar bagi proses rekombinasi.
- d. Membuat medium pemisah kontak dari bahan gas elektronegatif, sehingga elektron-elektron bebas tertangkap oleh molekul gas tersebut.

2.7 Sistem Pentanahan / *Grounding*



Sistem pentanahan atau biasa disebut sebagai *grounding* adalah sistem pengamanan terhadap perangkat-perangkat yang mempergunakan listrik sebagai sumber tenaga, dari lonjakan listrik, petir dll.

Fungsi pentanahan peralatan listrik adalah untuk menghindari bahaya tegangan sentuh bila terjadi gangguan atau kegagalan isolasi pada peralatan / instalasi dan pengaman terhadap peralatan.



Gambar 2.16 *Grounding*

2.8 Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubungan singkat yang mungkin terjadi dalam jaringan (Sistem kelistrikan) yaitu :

- 1) Gangguan hubung singkat tiga fasa
- 2) Gangguan hubung singkat dua fasa
- 3) Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah

Semua gangguan hubungan singkat diatas, arus gangguannya dihitung dengan menggunakan rumus dasar yaitu :

$$I = \frac{V}{Z} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana :



I = Arus yang mengalir pada hambatan Z (A)

V = Tegangan sumber (V)

Z = Impedansi jaringan, nilai ekivalen dari seluruh impedansi di dalam jaringan dari sumber tegangan sampai titik gangguan (ohm).

Yang membedakan antara gangguan hubungan singkat tiga fasa, dua fasa dan satu fasa ke tanah adalah impedansi yang terbentuk sesuai dengan macam gangguan itu sendiri, dan tegangan yang memasok arus ke titik gangguan. Impedansi yang terbentuk dapat ditunjukkan seperti berikut ini :

Z untuk gangguan tiga fasa, $Z = Z_1$

Z untuk gangguan dua fasa, $Z = Z_1 + Z_2$

Z untuk gangguan satu fasa, $Z = Z_1 + Z_2 + Z_0 \dots\dots\dots (2.2)$

Dimana:

Z_1 = Impedansi urutan positif (ohm)

Z_2 = Impedansi urutan negatif (ohm)

Z_0 = Impedansi urutan nol (ohm)

2.8.1 Menghitung Impedansi

Dalam menghitung impedansi dikenal tiga macam impedansi urutan yaitu :

- Impedansi urutan positif (Z_1), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan positif.
- Impedansi urutan negatif (Z_2), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan negatif.
- Impedansi urutan nol (Z_0), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh urutan nol.

Sebelum melakukan perhitungan arus hubung singkat, maka kita harus memulai belum melakukan perhitungan arus hubung singkat, maka kita harus memulai perhitungan pada rel daya tegangan primer di gardu induk untuk



berbagai jenis gangguan, kemudian menghitung pada titik – titik lainnya yang letaknya semakin jauh dari gardu induk tersebut. Untuk itu diperlukan pengetahuan mengenai dasar impedansi urutan rel daya tegangan tinggi atau bisa juga disebut sebagai impedansi sumber, impedansi transformator, dan impedansi penyulang.

Dimana :

X_S = Impedansi sumber (ohm)

X_T = Impedansi Transformator (ohm)

a) Impedansi Sumber

Untuk menghitung impedansi sumber di sisi bus 20 kV, maka harus dihitung dulu impedansi sumber di bus 150 kV. Impedansi sumber di bus 150 kV diperoleh dengan rumus:

$$X_{sc} = \frac{kV^2}{MVA_{sc}} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana :

X_{sc} = Impedansi sumber (ohm)

kV^2 = Tegangan sisi primer trafo tenaga (kV)

MVA = *Short circuit level trafo tenaga*

Arus gangguan hubung singkat di sisi 20 kV diperoleh dengan cara mengkonversikan dulu impedansi sumber di bus 70 kV ke sisi 20 kV. Untuk mengkonversikan Impedansi yang terletak di sisi 70 kV ke sisi 20 kV, dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$X_s(\text{sisi } 20 \text{ kV}) = \frac{20^2}{70^2} X_s(\text{sisi } 70 \text{ kV}) \dots \dots \dots (2.4)$$

b) Impedansi transformator

Pada perhitungan impedansi suatu transformator yang diambil adalah harga reaktansinya, sedangkan tahananannya diabaikan karena harganya kecil.



Untuk mencari nilai reaktansi trafo dalam Ohm dihitung dengan cara sebagai berikut

Langkah pertama mencari nilai ohm pada 100% untuk trafo pada 20 kV, yaitu dengan menggunakan rumus :

$$X_T \text{ pada } 100\% = \frac{kV^2}{MVA} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana :

X_T = Impedansi trafo tenaga (Ohm)

kV^2 = Tegangan sisi sekunder trafo tenaga (kV)

MVA= Kapasitas daya trafo tenaga (MVA)

Lalu tahap selanjutnya yaitu mencari nilai reaktansi tenaganya :

1. Untuk menghitung reaktansi urutan positif dan negatif ($X_{T1} = X_{T2}$) dihitung dengan menggunakan rumus :

$$X_T = \% \text{ yang diketahui } \times X_T \text{ pada } 100\%$$

2. Sebelum menghitung reaktansi urutan nol (X_{T0}) terlebih dahulu harus diketahui data trafo tenaga itu sendiri yaitu data dari kapasitas belitan delta yang ada dalam trafo :

- a. Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan ΔY dimana kapasitas belitan delta sama besar dengan kapasitas belitan Y, maka $X_{T0} = X_{T1}$.

- b. Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan Y_{yd} dimana kapasitas belitan delta (d) biasanya adalah sepertiga dari kapasitas belitan Y (belitan yang dipakai untuk menyalurkan daya, sedangkan belitan delta tetap ada di dalam tetapi tidak dikeluarkan kecuali satu terminal delta untuk ditanahkan), maka nilai $X_{T0} = 3 \times X_{T1}$

- c. Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan YY dan tidak mempunyai belitan delta di dalamnya, maka untuk menghitung besarnya X_{T0} berkisar antara 9 s/d $14 \times X_{T1}$.

c) Impedansi penyulang



Untuk perhitungan impedansi penyulang, perhitungannya tergantung dari besarnya impedansi per km dari penyulang yang akan dihitung, dimana besar nilainya tergantung pada jenis penghantarnya, yaitu dari bahan apa penghantar tersebut dibuat dan juga tergantung dari besar kecilnya penampang dan panjang penghantarnya.

Disamping itu penghantar juga dipengaruhi perubahan temperatur dan konfigurasi dari penyulang juga sangat mempengaruhi besarnya impedansi penyulang tersebut. Contoh besarnya nilai impedansi suatu penyulang : $Z = (R + jX)$ Sehingga untuk impedansi penyulang dapat ditentukan dengan menggunakan rumus :

1. Urutan positif dan urutan negatif:

$$Z_1 = Z_2 = \% \text{ panjang} \times \text{panjang penyulang (km)} \times Z_1 Z_2 (\text{ohm}) \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana :

Z_1 = Impedansi urutan positif (ohm)

Z_2 = Impedansi urutan negatif (ohm)

2. Urutan nol

$$Z_0 = \% \text{ panjang} \times \text{panjang penyulang (km)} \times Z_0 (\text{ohm}) \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana :

Z_0 = Impedansi urutan nol (ohm)

d) Impedansi Ekuivalen Jaringan

Perhitungan yang akan dilakukan di sini adalah perhitungan besarnya nilai impedansi ekuivalen positif, negatif dan nol dari titik gangguan sampai ke sumber. Karena dari sejak sumber ke titik gangguan impedansi yang terbentuk adalah tersambung seri maka perhitungan Z_{1ek} dan Z_{2ek} dapat langsung dengan cara menjumlahkan impedansi tersebut, sedangkan untuk perhitungan Z_{0ek} dimulai dari titik gangguan sampai ke trafo tenaga yang netralnya ditanahkan. Akan tetapi untuk menghitung impedansi Z_{0ek} ini, harus diketahui dulu hubungan belitan trafonya.



Sehingga untuk impedansi ekivalen jaringan dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

3. Urutan positif dan urutan negative ($Z_{1ek} = Z_{2ek}$)

$$Z_{1ek} = Z_{2ek} = Z_{s1}Z_{t1} + Z_{1penyulang} \dots \dots \dots (2.8)$$

Dimana :

Z_{1ek} = Impedansi ekivalen jaringan urutan positif (ohm)

Z_{2ek} = Impedansi ekivalen jaringan urutan negatif (ohm)

Z_{s1} = Impedansi sumber sisi 20 kV (ohm)

Z_{t1} = Impedansi trafo tenaga urutan positif dan negatif (ohm)

Z_1 = Impedansi urutan positif dan negatif (ohm)

4. Urutan nol $Z_{0ek} = Z_{t0} + 3R_N + Z_{penyulang} \dots \dots \dots (2.9)$

Dimana :

Z_{0ek} = Impedansi ekivalen jaringan nol (ohm)

Z_{t0} = Impedansi trafo tenaga urutan nol (ohm)

R_N = Tahanan tanah trafo tenaga (ohm)

Z_0 = Impedansi urutan nol (ohm)

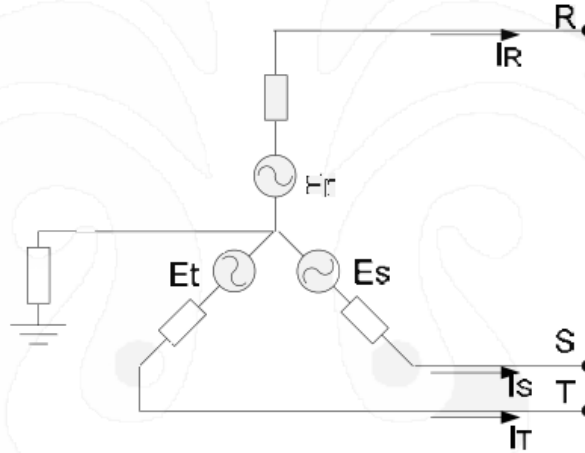
2.8.2 Menghitung Arus Gangguan Hubung Singkat

Perhitungan arus gangguan hubung singkat dapat dihitung dengan menggunakan rumus dasar, impedansi ekivalen mana yang dimasukkan ke dalam rumus dasar tersebut adalah jenis gangguan hubung singkat tiga fasa, dua fasa, atau satu fasa ke tanah. Sehingga formula yang digunakan untuk perhitungan arus hubung singkat tiga fasa, dua fasa, dan satu fasa ketanah berbeda.

a) Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa



Rangkaian gangguan tiga fasa pada suatu jaringan dengan hubungan transformator tenaga YY dengan netral ditanahkan melalui suatu tahanan.



Gambar 2.16 Gangguan hubung singkat 3 fasa

Rumus dasar yang digunakan untuk menghitung besarnya arus gangguan hubung singkat tiga fasa adalah :

$$I = \frac{V}{Z} \dots \dots \dots (2.10)$$

Sehingga arus gangguan hubung singkat tiga fasa dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$I_{3\text{fasa}} = \frac{V_{ph}}{Z_{1eq}} \dots \dots \dots (2.11)$$

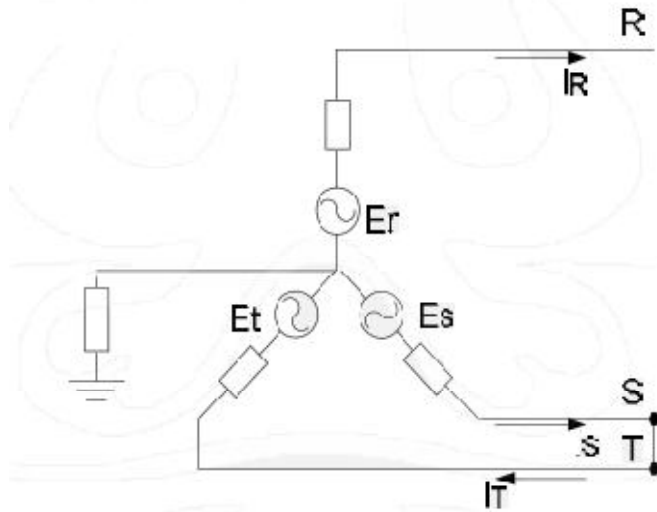
Dimana :

$I_{3\text{fasa}}$ = Arus gangguan hubung singkat tiga fasa (A)

V_{ph} = Tegangan fasa - netral sistem $20 \text{ kV} = \frac{20000}{\sqrt{3}} \text{ V}$

Z_{1ek} = Impedansi ekivalen urutan positif (ohm)

b) Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa



Persamaan pada kondisi gangguan hubung singkat 2 fasa ini adalah :

$$I_R = 0$$

$$I_S = -I_T$$

$$I = \frac{V}{Z} \dots\dots\dots(2.12)$$
$$I_{2\text{fasa}} = \frac{V_{\text{ph-ph}}}{Z_{1\text{ek}} + Z_{2\text{ek}}} \dots\dots\dots(2.13)$$

Karena $Z_{1ek} = Z_{2ek}$, maka :



$$I_{2\text{fasa}} = \frac{V_{\text{ph-ph}}}{2 \times Z_{1\text{ek}}} \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana :

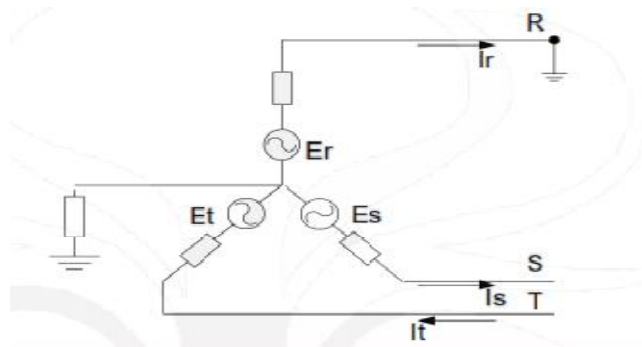
$I_{2\text{fasa}}$ = Arus gangguan hubung singkat dua fasa (A)

$V_{\text{ph-ph}}$ = Tegangan fasa - fasa sistem 20 kV = $\frac{20000}{\sqrt{3}} V$

$Z_{1\text{ek}}$ = Impedansi urutan positif (ohm)

c) Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah

Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah pada saluran tenaga dengan hubungan transformator YY dengan netral ditanahkan melalui RNGR, ditunjukkan pada gambar 2.18



Gambar 2.18 Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah

Persamaan pada kondisi gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah ini adalah:

$$V_T = 0$$

$$I_S = 0$$

$$I_T = 0$$

Rumus dasar yang digunakan untuk menghitung besarnya arus gangguan hubung singkat 1 fasa:

$$I = \frac{V}{Z} \dots\dots\dots(2.15)$$

Sehingga arus hubung singkat 1 fasa ke tanah dapat dihitung dengan rumus:

$$I_{1\text{fasa}} = \frac{3 \times V_{\text{ph}}}{Z_{1\text{ek}} + Z_{2\text{ek}} + Z_{3\text{ek}}} \dots\dots\dots(2.16)$$

Karena $Z_{1\text{ek}} = Z_{2\text{ek}}$, maka :



$$I_{1\text{fasa}} = \frac{3 \times V_{\text{ph}}}{2Z_{1\text{ek}} + Z_{0\text{ek}}} \dots\dots\dots(2.17)$$

Dimana :

$I_{1\text{fasa}}$ = Arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah (A)

V_{ph} = Tegangan fasa - netral sistem 20 kV = $\frac{20000}{\sqrt{3}} V$

$Z_{1\text{ek}}$ = Impedansi urutan positif (ohm)

$Z_{0\text{ek}}$ = Impedansi urutan nol (ohm)