



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

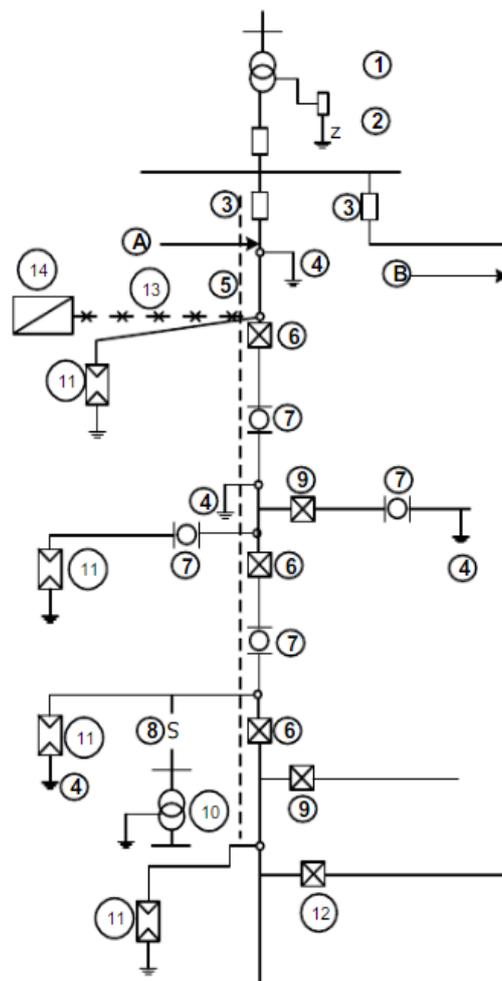
Secara umum suatu sistem tenaga listrik terdiri dari tiga bagian utama yaitu, pusat pembangkitan listrik, saluran transmisi dan sistem distribusi. Perlu dikemukakan bahwa suatu sistem terdiri atas beberapa sub sistem yang saling berhubungan atau yang biasa disebut sistem terinterkoneksi.

Feeder atau penyulang adalah jaringan PLN yang berfungsi menyalurkan listrik dengan tegangan 20 kV dari gardu induk menuju gardu distribusi. Nantinya di gardu distribusi ini listrik diubah tagangannya menjadi 380 Volt atau 220 Volt, untuk disalurkan kepada pelanggan umum maupun pelanggan khusus dengan level tegangan masih 20 kV.

Sistem distribusi dimulai dari gardu induk dimana tegangan tinggi diturunkan menjadi tegangan menengah sebesar 20 kv yang disebut tegangan distribusi primer. Kemudian tenaga listrik disalurkan melalui penyulang-penyulang yang berpa saluran udara ataupun saluran kabel bawah tanah. Pada penyulang distribusi ini terdapat gardu-gardu distribusi. Fungsi gardu distribusi ini menurunkan tegangan distribusi primer menjadi tegangan rendah atau tegangan distribusi sekunder 380/220 V.

Di dalam sistem tenaga listrik sering kali terjadi gangguan yang disebabkan oleh hubung singkat yang dapat merusak peralatan. Untuk melindungi peralatan terhadap gangguan hubung singkat di dalam sistem diperlukan alat pengaman atau proteksi. Sistem pengaman atau proteksi bertujuan untuk mencegah atau membatasi kerusakan pada jaringan beserta peralatannya dan keselamatan umum yang disebabkan oleh gangguan dan meningkatnya pelayanan pada konsumen.⁴

^[4] Marsudi, Djiteng. 2005. *Pembangkitan Energi Listrik*. Jakarta: Erlangga, hal: 5



Keterangan

- A : SUTM Penyulang –A
 B : SUTM Penyulang –B
 1 = Transformator gardu induk
 2 = Impedansi-Z (NGR) sisi 20 kV transformator
 $Z = 500 \text{ Ohm}$
 3 = Pemutus tenaga
 - Rele arus lebih
 - Rele gangguan tanah
 - Rele Pemutus Balik Otomatis
 4 = Pembumian bagian konduktif terbuka
 5 = Penghantar tanah (*shield wire*) : optional
 6 = Pengaman jaringan utama
 - Saklar Seksi Otomatis (SSO)
 7 = Saklar tiang
 - Pemisah (*pole top switch*)
 - Pemutus beban (*load break switch*)
 8 = *Fused Cut- Out* (FCO)
 9 = Pengaman Jaringan Pencabangan
 - Saklar seksi otomatis
 10 = Gardu Distribusi Tipe Tiang
 11 = *Lightning arrester*
 - 5 kA pada tiang tengah
 - 10 kA pada tiang ujung
 12 = Pemutus dengan fasilitas *interloop* penyulang A dan B
 13 = Kabel TM bawah tanah
 14 = Gardu Distribusi Tipe Beton

Gambar 2.1 Diagram Proteksi Sistem Listrik

2.2 Prinsip Dasar Sistem Rele Pengaman

Sistem rele pengaman pada sistem tenaga listrik tidak akan beroperasi selama sistem tersebut berada didalam keadaan normal, akan tetapi sistem rele pengaman harus cepat beroperasi dengan baik bila terjadi suatu gangguan atau keadaan tidak normal untuk mencegah kerusakan yang fatal terhadap peralatan listrik. Penggunaan peralatan pada sistem rele pengaman ini harus disesuaikan dengan tujuan dan fungsinya. Pada umumnya sistem rele pengaman digunakan untuk mendeteksi dan mengamati kondisi tidak normal yakni gangguan hubung singkat yang dapat mengganggu kestabilan sistem.



Untuk sistem rele pengaman yang mendeteksi gangguan terdapat dua jenis proteksi, yaitu:

1. Pengaman utama yang pada umumnya selektif dan cepat, pada jenis tertentu memiliki selektifitas mutlak misalnya rele differensial.
2. Pengaman cadangan yang pada umumnya mempunyai perlambatan waktu, hal ini untuk memberikan kesempatan pada pengaman utama bekerja terlebih dahulu dan jika pengaman utama gagal maka pengaman cadangan bekerja.⁶

Adapun penyebab kegagalan bekerjanya suatu pengaman utama yaitu:

1. Arus atau tegangan yang menyuplai rele mengalami kegagalan atau tidak sempurna.
2. Kegagalan pada sumber DC tripping.
3. Kegagalan pada pemutus tenaga (PMT) itu sendiri, baik pada mekanisnya maupun pada rangkaian pemutusnyanya.

Tidak semua bagian atau peralatan sistem tenaga listrik mempunyai kedua jenis sistem tersebut diatas, hal ini sangat tergantung pada tingkat kepentingan peralatan sistem tenaga listrik itu sendiri dan besarnya akibat gangguan yang mungkin terjadi.

2.3 Daerah Pengamanan Rele Pengaman

Dalam melaksanakan pembangkitan, penyaluran dan distribusi tenaga listrik, gangguan tidak dapat dihindari. Gangguan kebanyakan merupakan hubung singkat antarfasa ataupun antarfasa dengan tanah dan keduanya. Gangguan hubung singkat semacam ini menimbulkan arus yang besar yang dapat merusak peralatan sehingga diperlukan sistem proteksi untuk mengamankan peralatan tersebut.⁴

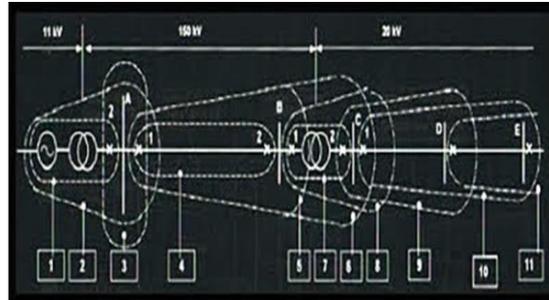
Suatu sistem tenaga listrik dibagi kedalam seksi-seksi yang dibatasi oleh PMT (Pemutus Tenaga). Tiap seksi memiliki rele pengaman dan memiliki daerah pengamanan (Zone of Protection). Bila terjadi gangguan, maka rele akan bekerja

[6] Samaulah, Hazairin. 2004. *Dasar – Dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Palembang : Universitas Sriwijaya, hal: 5

[4] Marsudi, Djiteng. 2005. *Pembangkitan Energi Listrik*. Jakarta: Erlangga, hal: 37



mendeteksi gangguan dan PMT akan trip. Gambar dibawah ini akan menjelaskan tentang konsep pembagian daerah proteksi.



Keterangan gambar:

- | | |
|--|--|
| 1. <i>Overall Differential Relay</i>
Pengaman utama Generator – Trafo | 7. <i>Differential Trafo</i>
Pengaman utama Trafo |
| 2. <i>Over Current Relay</i>
Pengaman cadangan local Generator – Trafo
Pengaman cadangan jauh Bus A | 8. <i>Over Current Relay</i> di sisi 150 KV
Pengaman cadangan local Trafo
Pengaman cadangan jauh Bus C |
| 3. Pengaman Bus
Pengaman utama Bus A | 9. <i>Over Current Relay</i> di sisi 20 KV
Pengaman utama Bus C
Pengaman cadangan jauh saluran C-D |
| 4. <i>Distance Relay Zone I</i> dan PLC di A1
Pengaman utama saluran A-B | 10. <i>Over Current Relay</i> di C1
Pengaman utama saluran C-D
Pengaman cadangan jauh saluran D-E |
| 5. <i>Distance Relay Zone II</i> di A1
Pengaman utama Bus B
Pengaman cadangan jauh sebagian Trafo di B | 11. <i>Over Current Relay</i> di D
Pengaman utama saluran D-E
Pengaman cadangan jauh seksi berikutnya. |
| 6. <i>Distance Relay Zone III</i> di A1
Pengaman cadangan jauh Trafo di B sampai ke Bus C | |

Gambar 2.2 Pembagian Daerah Proteksi Pada Sistem Tenaga Listrik

Pada gambar 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 pemadaman.



2.4 Syarat – Syarat Rele Pengaman

Apabila terjadi suatu gangguan di dalam rangkaian listrik, instalasi harus diamankan dan bagian yang terganggu harus dipisahkan dalam waktu yang secepatnya guna mencegah atau memperkecil kerusakan yang diakibatkan oleh gangguan tersebut. Hal ini dilakukan secara otomatis dan selektif, sehingga bagian instalasi yang tidak terganggu dapat berfungsi secara kontinyu. Untuk itu rele pengaman harus mempunyai sifat-sifat utama suatu pengaman yaitu:

1. Selektifitas

Sistem proteksi harus selektif dan memilih dengan tepat bagian mana dari instalasi yang terganggu dan harus dipisahkan dari rangkaian yang tidak terganggu dan harus terus beroperasi.

2. Sensitifitas

Sistem proteksi perlu memiliki suatu tingkat sensitifitas tinggi, agar gangguan dapat dideteksi sedini mungkin sehingga bagian yang terganggu, atau kemungkinan terjadinya kerusakan menjadi sekecil mungkin.

3. Andal

Sistem proteksi perlu memiliki suatu taraf keandalan yang tinggi dan senantiasa dapat bekerja pada kondisi-kondisi gangguan yang terjadi.

4. Cepat

Sistem proteksi perlu memiliki tingkat kecepatan sebagaimana ditentukan, sehingga meningkatkan waktu pelayanan, keamanan manusia dan peralatan, serta stabilitas operasi.

5. Perluasan Sistem

Sistem proteksi harus didesain sedemikian rupa sehingga tidak akan mengganggu kemungkinan perluasan instalasi atau jaringan diwaktu yang akan datang.⁶

^[6] Samaulah, Hazairin. 2004. *Dasar – Dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Palembang : Universitas Sriwijaya, hal:93



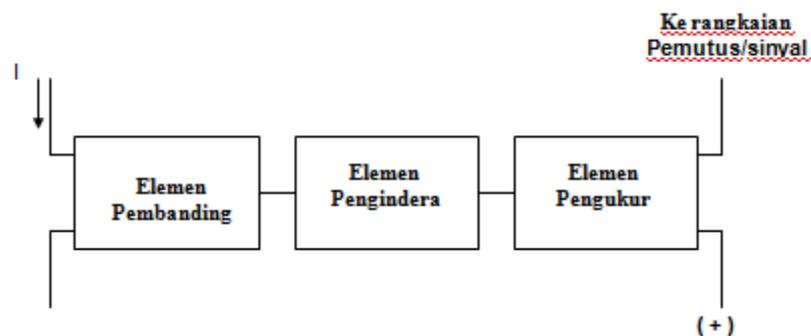
2.5 Bagian Dari Suatu Sistem Proteksi

Dalam usaha untuk meningkatkan keandalan penyediaan dan penyaluran energi listrik, kebutuhan sistem proteksi yang memadai tidak dapat dihindarkan. Sistem proteksi atau pengaman tenaga listrik tersebut adalah merupakan suatu kesatuan antara PMT atau CB, transduser dan rele. Adanya kesalahan dari salah satu komponen tersebut dapat berakibat sistem proteksi tersebut tidak dapat berjalan dengan baik.

2.5.1 Rele proteksi

Rele proteksi adalah susunan peralatan pengaman yang dapat merasakan atau mengukur adanya gangguan atau ketidakstabilan sistem yang kemudian secara otomatis dapat memberikan respon berupa sinyal untuk menggerakkan sistem mekanisme pemutus tenaga untuk memisahkan sistem yang terganggu sehingga sistem yang lainnya dapat beroperasi secara normal.

Secara garis besar bagian dari sistem proteksi terdiri dari tiga bagian utama, seperti gambar berikut ini:



Gambar 2.3 Bagian Rele Pengaman

Masing-masing elemen/bagian mempunyai fungsi sebagai berikut :

1. Elemen pengindera

Elemen ini berfungsi untuk merasakan besaran-besaran listrik, seperti arus, tegangan, frekuensi, dan sebagainya tergantung rele yang dipergunakan. Pada bagian ini besaran yang masuk akan dirasakan keadaannya, apakah keadaan yang diproteksi itu mendapatkan



gangguan atau dalam keadaan normal, untuk selanjutnya besaran tersebut dikirimkan ke elemen pembanding.

2. Elemen pembanding

Elemen ini berfungsi menerima besaran setelah terlebih dahulu besaran itu diterima oleh elemen pengindera untuk membandingkan besaran listrik pada saat keadaan normal dengan besaran arus kerja rele.

3. Elemen pengukur/penentu

Elemen ini berfungsi untuk mengadakan perubahan secara cepat pada besaran ukurnya dan akan segera memberikan isyarat untuk membuka PMT atau memberikan sinyal.

2.5.2 Transformatur arus

Transformator arus digunakan untuk mengukur arus beban suatu rangkaian dengan menggunakan trafo arus maka arus beban yang besar dapat diukur hanya menggunakan alat ukur (ammeter) yang tidak terlalu besar.⁸ Pengukuran arus yang besarnya ratusan amper lebih yang mengalir pada jaringan tegangan tinggi. Jika arus hendak diukur mengalir pada tegangan rendah dan besarnya dibawah 5 Ampere, maka pengukuran dapat dilakukan secara langsung sedangkan arus yang besar tadi harus dilakukan secara tidak langsung dengan menggunakan trafo arus sebutan trafo pengukuran arus yang besar.

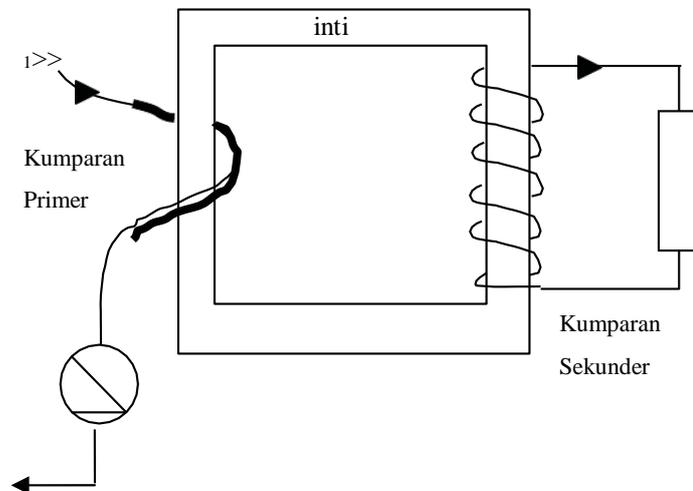
Disamping untuk pengukuran arus, trafo arus juga dibutuhkan untuk pengukuran daya dan energi, pengukuran jarak jauh dan rele proteksi. Kumparan primer trafo arus dihubungkan secara seri dengan jaringan atau peralatan yang akan diukur arusnya, sedangkan kumparan sekunder dihubungkan dengan peralatan meter dan rele proteksi.

Trafo arus bekerja sebagai trafo yang terhubung singkat. Kawasan kerja trafo arus yang digunakan untuk pengukuran biasanya 0,05 sampai 1,2 kali arus

^[8]Zuhal. 1991. *Dasar Tenaga Listrik*. Bandung: ITB-Press, hal: 50



yang akan diukur. Trafo arus untuk tujuan proteksi biasanya harus mampu bekerja lebih dari 10 kali arus pengenalnya.¹



Gambar 2.4 Transformator Arus

2.5.3 Circuit breaker (CB) / pemutus tenaga (PMT)⁶

PMT berfungsi untuk memisahkan bagian sistem yang terganggu. PMT dapat dioperasikan yaitu ditutup atau dibuka dengan menggunakan sistem proteksi. Dengan demikian sebuah pemutus tenaga dapat secara otomatis membuka suatu rangkaian bilamana arus saluran, tegangan saluran atau frekuensi sistem melampaui batas tertentu.

Alat pemutus tenaga (PMT) yang digunakan untuk memutuskan arus gangguan harus mampu memutuskan arus gangguan secara sempurna sebelum rele diskriminasi berikutnya terangsang untuk beroperasi. Waktu yang diberikan tergantung pada jenis pemutus tenaga (PMT) yang digunakan dan arus gangguan yang harus diputuskan. Meskipun PMT dengan teknologi modern dapat mempunyai waktu tripping yang sangat cepat namun secara umum lama waktu pemutusan PMT diambil pada harga 0,15 detik.⁵

^[1] Aslimeri dkk. 2008. *Teknik Transmisi Tenaga Listrik*. Jakarta: Direktorat Pembinaan SMK, hal:191

^[6] Samaulah, Hazairin. 2004. *Dasar – Dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Palembang : Universitas Sriwijaya, hal: 89-92

^[5] Pandjaitan, Bonar. 2012. *Praktik-praktik Proteksi Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta: Andi, hal: 83

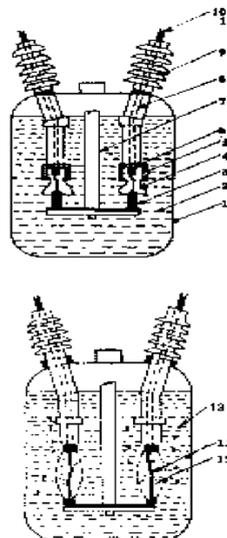


Jenis-jenis pemutus tenaga berdasarkan media pemutusnya yaitu:

1. *Oil circuit breaker* (pemutus tenaga minyak)

Pemutus tenaga minyak terdiri atas sebuah tangki atau bejana yang terbuat dari baja yang diisikan dengan minyak isolasi. Pada salah satu versi, isolator tembus (bushing) memasukkan tegangan fasa dan dihubungkan dengan suatu kontak tetap yang tidak bergerak. Kontak yang bergerak dikendalikan oleh rele yang dapat menutup atau membuka rangkaian.

Ketika rangkaian berada dalam keadaan tertutup, dan kontak tetap lalu kontak bergerak berada dalam keadaan terhubung maka arus listrik mengalir. Apabila beban lebih sehingga arus lebih bekerja, kontak bergerak akan ditarik keluar dari kontak tetap agar hubungan jaringan menjadi terbuka. Pada saat kedua kontak membuka, terjadi suatu busur api yang sangat kuat dan juga gas-gas panas. Tekanan dari gas inilah yang menyebabkan terjadinya turbulensi dari minyak sekitar busur api. Hal ini mengakibatkan minyak yang dingin mengitari busur api dan memadamkannya.



Keterangan gambar:

1. Tangki
2. Minyak dielektrik
3. Kontak yang bergerak
4. Gas yang terbentuk oleh dekomposisi minyak dielektrik (hydrogen 70%)
5. Alat pembatas busur api listrik
6. Kontak tetap
7. Batang penegang (dari fiberglass)
8. Konduktor dari tembaga
9. Bushing terisi minyak atau tipe kapasitor
10. Konduktor (tembaga berlapis perak)
11. Inti busur api listrik
12. Gas hasil ionisasi
13. Gelembung-gelembung gas

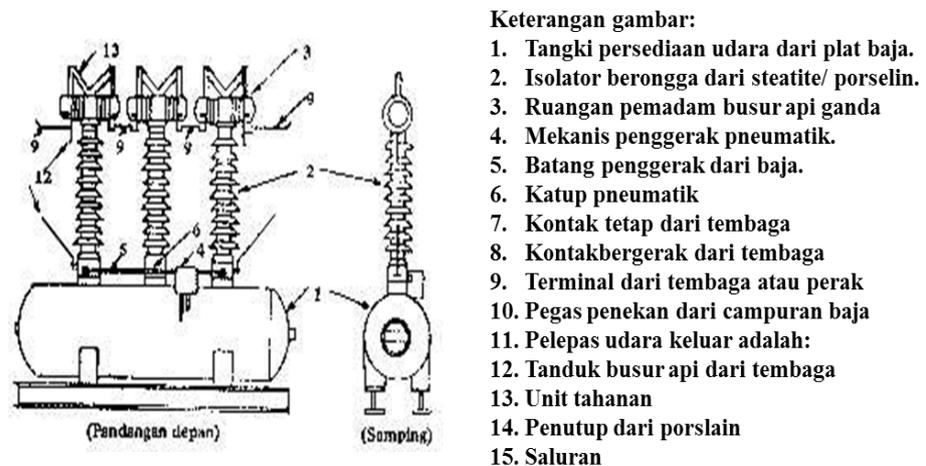
Gambar 2.5 Pemutus Tenaga Minyak¹

^[1] Aslimeri dkk. 2008. *Teknik Transmisi Tenaga Listrik*. Jakarta: Direktorat Pembinaan SMK, hal: 208



2. Air blast circuit breaker (pemutus tenaga udara tiup)

Pemutus tenaga udara tiup tidak menggunakan minyak. Pada pemutus jenis ini udara bertekanan tinggi dengan kecepatan supersonic melintasi busur api. Udara bertekanan tinggi itu disimpan dalam sebuah tangki dan diisi sebuah compressor, sehingga pemutus tenaga udara bertekanan dengan daya besar dapat membuka arus hubung singkat sebesar 40 kA pada tegangan 500 kV. Kebisingan yang terjadi saat pelepasan udara itu sedemikian nyaring sehingga lebih menyerupai ledakan yang dahsyat. Apabila GI terletak dekat daerah pemukiman, perlu diatur agar kebisingan itu dikurangi.



Gambar 2.6 Pemutus Tenaga Udara Tiup¹

3. SF6 circuit breaker (pemutus tenaga SF6)

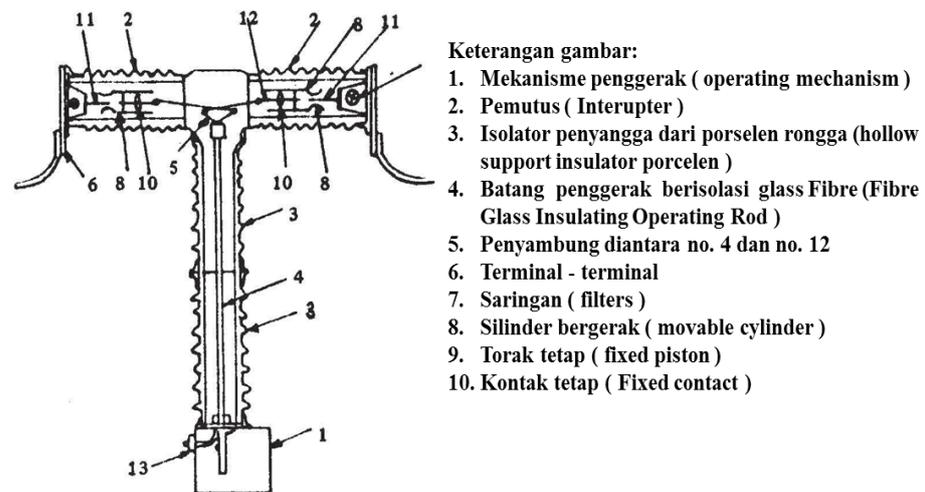
Pemutus tenaga SF6 merupakan suatu sistem yang sepenuhnya tertutup, dan diisolasikan dengan gas Sulfur Hexafluorida (SF6). Jenis pemutus tenaga ini sangat baik namun mahal. Karena bentuknya yang kompak peralatan yang berisolasi SF6 dipakai ditempat-tempat yang harga tanahnya tinggi, seperti di tengah kota besar. Kini terdapat GI yang berisolasi gas SF6. Gas SF6 merupakan suatu terobosan sebagai

^[1] Aslimeri dkk. 2008. *Teknik Transmisi Tenaga Listrik*. Jakarta: Direktorat Pembinaan SMK, hal: 203



bahan isolasi dan pemadaman bagi pemutus tenaga yang memiliki stabilitas termal yang tinggi, tidak beracun dan tidak mengganggu kelestarian lingkungan.

Pada tekanan yang sama, gas SF₆ memiliki kekuatan dielektrik 2,5 sampai 3 kali dari udara dan juga pada tekanan yang lebih rendah, gagal isolasi masih tinggi, dan menyamai yang dari minyak atau bahan isolasi padat. Kemampuan isolasi SF₆ untuk sebagian diperoleh dari sifatnya yang elektromagnetik sehingga menarik elemen-elemen bebas ke molekul.

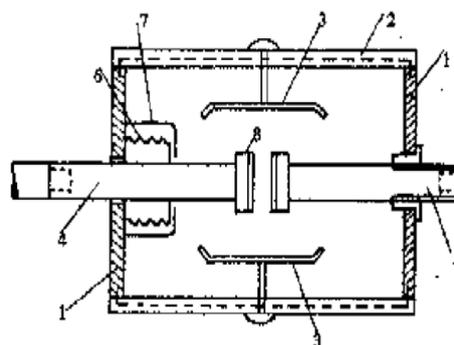


Gambar 2.7 Pemutus Tenaga SF₆¹

4. *Vacuum circuit breaker* (pemutus tenaga vakum)

Pemutus tenaga vakum bekerja atas dasar prinsip lain, karena terdapat gas yang dapat berionisasi apabila kontak-kontak terbuka. Pemutus tenaga jenis ini tertutup secara rapi, tidak boleh bocor karena tidak terdapat kebisingan atau polusi. Kemampuannya terbatas hingga kira-kira 30 kV. Untuk tegangan yang lebih tinggi pemutus ini dipasang secara seri. Pemutus tenaga vakum banyak dipakai pada sistem bawah tanah ACR (Automatic Circuit Recloser).

^[1] Aslimeri dkk. 2008. *Teknik Transmisi Tenaga Listrik*. Jakarta: Direktorat Pembinaan SMK, hal: 202

**Keterangan gambar:**

1. Plat-plat penahan – bukan bahan magnet
2. Rumah pemutus dari bahan berisolasi
3. Pelindung dari embun uap
4. Kontak bergerak
5. Kontak tetap
6. Penghembus dari bahan logam
7. Tutup alat penghembus
8. Ujung kontak

Gambar 2.8 Pemutus Tenaga Vakum¹

2.6 Rele Arus Lebih

Bilamana terjadi gangguan, pada umumnya terjadi arus-arus listrik yang lebih besar dari normal, yang dapat merusak peralatan dan mesin listrik. Untuk pengamanan, dipergunakan rele arus lebih.³ Rele arus lebih adalah suatu rele yang bekerja berdasarkan kenaikan besaran arus yang melebihi suatu nilai pengamanan tertentu dan dalam jangka waktu tertentu, sehingga dapat digunakan sebagai pola pengaman arus lebih atau hubung singkat.

Keuntungan dan fungsi rele arus lebih adalah:

1. Sederhana dan murah
2. Mudah dalam penyetelannya
3. Merupakan rele pengaman utama dan cadangan
4. Mengamankan gangguan hubung singkat antara fasa maupun hubung singkat satu fasa ke tanah dan dalam beberapa hal dapat digunakan sebagai pengaman beban lebih (overload)
5. Pengaman utama pada jaringan distribusi dan sub transmisi radial
6. Pengaman cadangan untuk generator, trafo tenaga dan saluran transmisi⁶

^[1] Aslimeri dkk. 2008. *Teknik Transmisi Tenaga Listrik*. Jakarta: Direktorat Pembinaan SMK, hal: 206

^[3] Kadir, Abdul. 1998. *Transmisi Tenaga Listrik, Edisi Revisi*. Jakarta: UI-Press, hal: 75

^[6] Samaulah, Hazairin. 2004. *Dasar – Dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Palembang : Universitas Sriwijaya, hal: 53



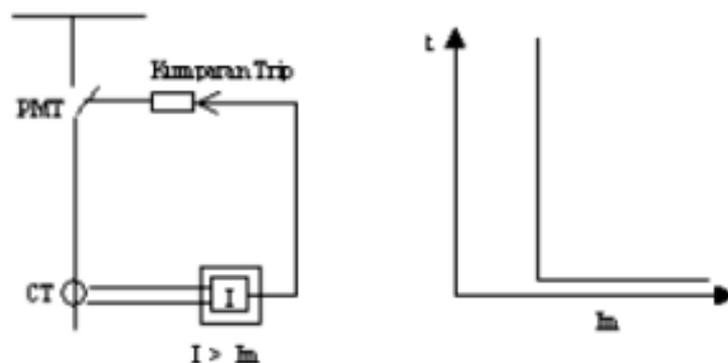
Dalam hubungannya dengan kecepatan sensitifitas dari rele ada beberapa karakteristik rele tersebut, yaitu:

1. Rele arus lebih waktu seketika (*instantaneous relay*)
2. Rele arus lebih waktu tertentu (*definite time relay*)
3. Rele arus lebih waktu terbalik (*inverse time relay*)

2.6.1 Rele arus lebih waktu seketika (*instantaneous relay*)

Rele arus lebih waktu seketika ialah rele yang bekerja seketika (tanpa waktu tunda) ketika arus yang mengalir melebihi nilai settingnya, rele akan bekerja dalam beberapa mili detik (10-20 ms). Rele ini jarang berdiri sendiri tetapi umumnya dikombinasikan dengan rele arus lebih dengan karakteristik yang lain.

Gambar 2.9 Rangkaian Pengawatan Rele Arus Lebih



Gambar 2.9 Karakteristik Rele Waktu Seketika⁷

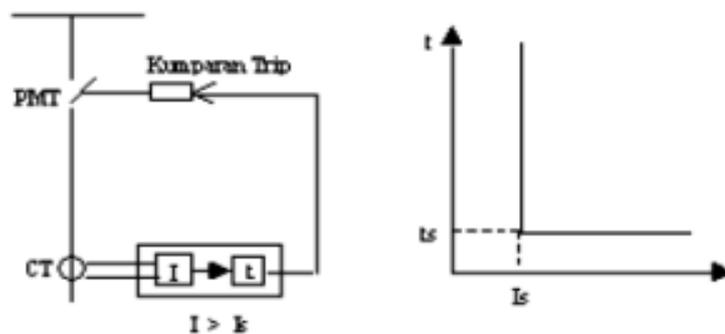
2.6.2 Rele arus lebih waktu tertentu (*definite time relay*)

Rele arus lebih waktu tertentu akan memberikan perintah pada PMT pada saat terjadi gangguan hubung singkat dan besarnya arus gangguan melampaui settingnya (I_s), dan jangka waktu kerja rele mulai *pick up* sampai kerja rele diperpanjang dengan waktu tertentu tidak tergantung besarnya arus yang mengerjakan rele. Karakteristik rele ini adalah:

^[7] Wahyudi, Sarimun. 2012. *Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik*. Depok: Garamond, hal: 29



1. Koordinasi mudah, hanya dengan peningkatan waktu.
2. Tidak terpengaruh dengan kapasitas pembangkit.
3. Semakin dekat ke sumber waktu kerja akan semakin panjang.

Gambar 2.10 Karakteristik Rele Waktu Definite⁷

2.6.3 Rele arus lebih waktu terbalik (*inverse time relay*)

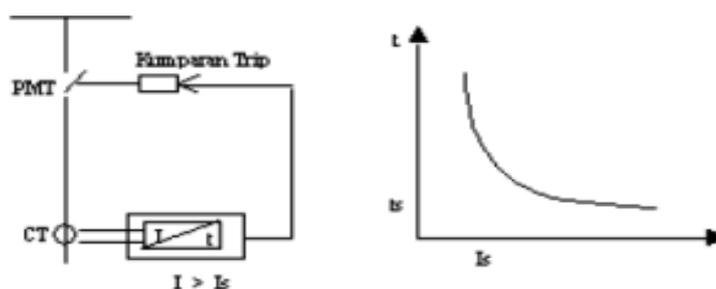
Rele arus lebih waktu terbalik akan bekerja dengan waktu tunda yang tergantung dari besarnya arus secara terbalik (*inverse time*), makin besar arus makin kecil waktunya. Keuntungan dan kerugian karakteristik rele ini adalah:

1. Perlu perhitungan yang teliti terutama untuk kapasitas pembangkit yang berubah-ubah.
2. Sebagai pengamanan banyak saluran, *inverse time* dapat menekan akumulasi waktu yang dapat memberikan pengamanan yang cepat baik diujung maupun di dekat sumber.
3. Sensitif terhadap perubahan pembangkit.

Karakteristik ini bermacam-macam, setiap pabrik dapat membuat karakteristik yang berbeda-beda, karakteristik waktunya dibedakan menjadi tiga kelompok yaitu:

1. *Standard inverse*
2. *Very inverse*
3. *Extremely inverse*

^[7] Wahyudi, Sarimun. 2012. *Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik*. Depok: Garamond, hal: 29

Gambar 2.11 Karakteristik Rele Waktu Inverse⁷

2.7 Perhitungan Arus Hubung Singkat Pada Jaringan

Analisa hubung singkat (yang mungkin terjadi pada setiap titik didalam sistem) yang dipelajari terutama adalah besarnya kontribusi arus gangguan hubung singkat pada setiap cabang (bisa di transmisi, distribusi, trafo maupun sumber pembangkit) disamping itu perlu diketahui pula besar tegangan pada setiap feeder. Besar arus dan tegangan inilah yang diperlukan untuk penyetulan proteksi/pengaman, sehingga bila gangguan hubung singkat itu benar-benar terjadi dalam sistem, peralatan proteksi dalam hal ini rele arus lebih akan bekerja mengamankan sistem yang terganggu sesuai yang diharapkan.

Gangguan yang mungkin terjadi dalam sistem pada jaringan adalah:

1. Gangguan hubung singkat 3 fasa
2. Gangguan hubung singkat antar fasa
3. Gangguan hubung singkat 2 fasa ke tanah
4. Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah

Untuk menghitung arus gangguan hubung singkat pada sistem seperti diatas hal pertama yang harus dihitung adalah:

1. Impedansi sumber (reaktansi)
2. Reaktansi transformator tenaga
3. Menghitung impedansi feeder
4. Menghitung impedansi ekivalen dengan menjumlahkan ketiga hal diatas.

^[7] Wahyudi, Sarimun. 2012. *Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik*. Depok: Garamond, hal: 34



2.7.1 Impedansi sumber

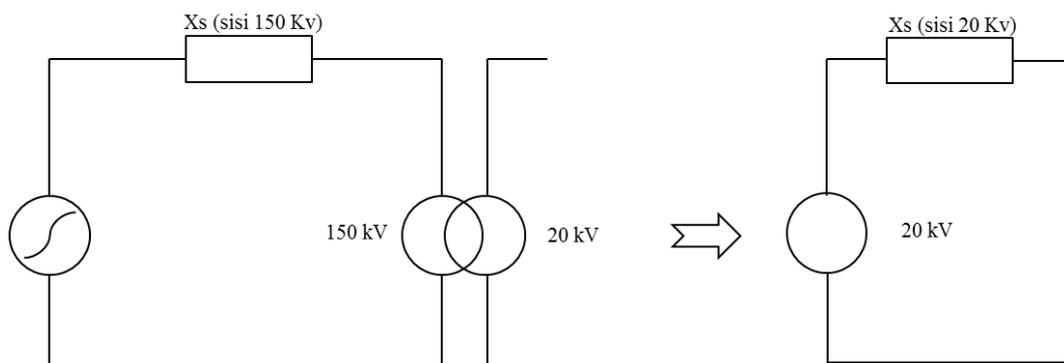
Menghitung impedansi sumber di sisi busbar sekunder 20 kV, maka harus dihitung dulu impedansi sumber busbar di sisi primer 150 kV. Impedansi sumber di sisi primer diperoleh dengan rumus:

$$Z_S = \frac{kV^2}{MVA_{hs}} \Omega \dots\dots\dots (2.1)^2$$

Dimana : Z_S = Impedansi sumber (Sisi 150 kV) / (Ω)

kV = Tegangan nominal (Sisi 150 kV) / (V)

MVA_{hs} = MVA hubung singkat (Sisi 150 kV) / (VA)



Gambar 2.12 Transformator Impedansi Transformator Tenaga

Untuk mengkonversikan impedansi sumber pada sisi 150 kV ke sisi 20 kV, dilakukan dengan cara sebagai berikut:

Daya transformator tenaga pada sisi primer dan sekunder sama, maka:

$$Z_{S2} = \frac{kV_2^2}{kV_1^2} Z_{S1} \Omega \dots\dots\dots (2.2)$$

2.7.2 Reaktansi transformator

Untuk transformator impedansinya dapat ditinjau dari sisi primer ataupun sekundernya. Apabila persen atau per unit impedansi dari suatu transformator ditinjau dari sisi tegangan rendahnya maka dasarnya juga dipilih pada sisi tegangan rendah dan bila ditinjau dari sisi tegangan tingginya maka besarnya juga akan

^[2] Kadarisman, Pribadi dan Wahyudi Sarimun. *Perhitungan Setting dan Koordinasi Proteksi Sistem Distribusi*. Jakarta: PT. PLN (Persero), hal: 22



dipilih pada sisi tegangan tingginya. Pada perhitungan impedansi suatu transformator yang dapat diambil dengan harga reaktansinya (%).

$$X_t (100\%) = \frac{kV^2}{MVA} \Omega \dots\dots\dots(2.3)^2$$

Dimana : $X_t (100\%) =$ Reaktansi trafo pada 100% / (Ω)

$kV^2 =$ Tegangan nominal (Sisi 20 kV) / (V)

$MVA =$ Kapasitas transformator tenaga / (VA)

2.7.3 Impedansi penyulang

Data impedansi penyulang bisa didapat dengan cara dihitung dari tabel panjang saluran per km. Impedansi yang akan dihitung disini tergantung dari besarnya impedansi/km dari data yang didapat dari tempat pengambilan data.

Dengan demikian nilai impedansi penyulang dapat dihitung dengan rumus:

$$Z_{Feeder} = \text{Panjang Feeder (km)} \times Z \text{ per km } (\Omega) \dots\dots\dots(2.4)^2$$

Untuk mendapatkan impedansi feeder secara keseluruhan maka disimpulkan lokasi gangguan per 1% hingga 100% maka dapat dibuat:

$$\% \times \text{Panjang Feeder} \times Z \text{ per km } (\Omega) \dots\dots\dots(2.5)$$

2.7.4 Impedansi ekivalen jaringan

Perhitungan yang akan dihitung disini adalah besar nilai impedansi positif (Z_{1eq}) dan impedansi urutan negatif (Z_{2eq}) dari titik gangguan ke sumber.

Karena dari sejak sumber ke titik gangguan impedansi yang berbentuk adalah terhubung seri, maka perhitungan Z_{1eq} dan Z_{2eq} dapat langsung dijumlahkan seperti berikut:

$$Z_{1eq} = Z_{2eq} = Z_s + Z_t + Z_{Feeder} (\Omega) \dots\dots\dots(2.6)^2$$

Dimana : $Z_s =$ Impedansi sumber / (Ω)

^[2] Kadarisman, Pribadi dan Wahyudi Sarimun. *Perhitungan Setting dan Koordinasi Proteksi Sistem Distribusi*. Jakarta: PT. PLN (Persero), hal: 23

^[2] *Ibid.* 25

^[2] *Ibid.* 27



Z_t = Reaktansi trafo (Sisi 20 kV) / (Ω)

Z_{Feeder} = Impedansi feeder / (Ω)

Setelah mendapatkan impedansi ekivalen dengan lokasi gangguan, selanjutnya perhitungan arus gangguan hubung singkat dapat dihitung dengan menggunakan rumus dasar yang sudah dijelaskan sebelumnya, hanya impedansi dimana yang dimasukkan ke dalam rumus tersebut adalah tergantung dari jenis gangguan hubung singkatnya. Gangguan-gangguan tersebut dihitung untuk lokasi gangguan yang terjadi pada 1%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% dan 100% dari panjang penyulang dalam hal ini dianggap nilai $Z_{1eq} = Z_{2eq}$.

2.7.5 Gangguan hubung singkat tiga fasa

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

$$I = \frac{V}{Z} \text{ (A)} \dots\dots\dots (2.7)^2$$

Dimana : I = Arus gangguan hubung singkat / (A/Ampere)

V = Tegangan sumber fasa netral / (kV) = $\frac{kV}{\sqrt{3}} = V_{ph}$

Z = Impedansi urutan Positif (Z_{eq}) / (Ω)

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

$$I_{3fasa} = \frac{V_{ph}}{Z_{1eq}} \text{ (A)} \dots\dots\dots (2.8)^2$$

Dimana : I_{3fasa} = Arus gangguan hubung singkat 3 fasa / (A)

V_{ph} = Tegangan fasa-netral sistem 20 kV = $\frac{20.000}{\sqrt{3}}$ / (V)

Z_{1eq} = Impedansi ekivalen urutan positif / (Ω)

^[2] Kadarisman, Pribadi dan Wahyudi Sarimun. *Perhitungan Setting dan Koordinasi Proteksi Sistem Distribusi*. Jakarta: PT. PLN (Persero), hal: 15

^[2] *Ibid.* 28



2.7.6 Gangguan hubung singkat dua fasa

Arus gangguan hubung singkat dua fasa dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$I_{2\text{fasa}} = \frac{V_{\text{ph-ph}}}{Z_{1\text{eq}} + Z_{1\text{eq}}} \text{ (A)} \dots\dots\dots (2.9)^2$$

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

$V_{\text{ph-ph}}$ = Tegangan fasa-fasa sistem 20 kV / (V)

$Z_{1\text{eq}}$ = Impedansi ekivalen urutan positif / (Ω)

2.7.7 Gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah

Arus gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$I_{2\text{fasa-tanah}} = \frac{V_{\text{ph}}}{Z_1 + \frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0}} \text{ (A)} \dots\dots\dots (2.10)^2$$

Dimana : $I_{2\text{fasa-tanah}}$ = Arus gangguan hubung singkat 2 fasa ke tanah / (A)

V_{ph} = Tegangan fasa-netral sistem 20 kV = $\frac{20.000}{\sqrt{3}}$ / (V)

Z_1 = Impedansi ekivalen urutan positif / (Ω)

Z_2 = Impedansi ekivalen urutan negatif / (Ω)

Z_0 = Impedansi ekivalen urutan nol / (Ω)

2.7.8 Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah

Arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$I_{1\text{fasa-tanah}} = \frac{3V_{\text{ph}}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \text{ (A)} \dots\dots\dots (2.11)^2$$

Dimana : $I_{1\text{fasa-tanah}}$ = Arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah / (A)

^[2] Kadarisman, Pribadi dan Wahyudi Sarimun. *Perhitungan Setting dan Koordinasi Proteksi Sistem Distribusi*. Jakarta: PT. PLN (Persero), hal: 29

^[2] *Ibid.* 11

^[2] *Ibid.* 12



V_{ph}	= Tegangan fasa-netral sistem 20 kV = $\frac{20.000}{\sqrt{3}}$ / (V)
Z_1	= Impedansi ekivalen urutan positif / (Ω)
Z_2	= Impedansi ekivalen urutan negatif / (Ω)
Z_0	= Impedansi ekivalen urutan nol / (Ω)

2.8 Penyetelan Rele Arus Lebih di Penyulang

2.8.1 Arus penyetelan dan penyetelan arus

Untuk rele arus lebih jenis normal (standard) inverse nilai arus penyetelan di penyulang dapat dihitung menggunakan rumus:

$$I_{set(primer)} = 1,05 \times I_{beban} \text{ (A/Ampere)} \dots\dots\dots (2.12)^7$$

Kemudian nilai arus setting tersebut diubah ke penyetelan arus, dalam hal ini rele yang digunakan adalah rele arus lebih merk Areva Micom P142, sehingga dapat dicari dengan menggunakan rumus:

$$I_p = \frac{I_{set(primer)}}{I_{CT(primer)}} \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana : I_{set} = Arus Penyettingan / (A)

I_{beban} = Arus pada beban / (A)

I_p = Penyetingan arus

$I_{CT(primer)}$ = Arus nominal pada CT primer / (A)

2.8.2 Penyetelan waktu (tms)

Untuk setelan waktu rele *standard inverse* dapat dihitung dengan menggunakan rumus kurva waktu dan arus. Rumus ini bermacam-macam sesuai dengan buatan pabrik pembuatan rele, dalam hal ini diambil rumus kurva waktu dan arus dari rele arus lebih merk Areva Micom P142, sebagai berikut:

$$t = \frac{0,14 \times tms}{\left\{ \left[\frac{I_f}{I_s} \right]^{0,02} - 1 \right\}} \text{ (dt/detik)} \dots\dots\dots (2.14)^7$$

^[7] Wahyudi, Sarimun. 2012. *Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik*. Depok: Garamond, hal: 173

^[7] *Ibid.* 173



Untuk menentukan nilai tms yang akan disetting pada rele arus lebih diambil misal angka pada gangguan (I_f) sebesar arus gangguan 3 fasa pada lokasi gangguan 1% panjang penyulang (feeder), dan waktu kerja rele arus lebih di penyulang itu (sesuai keterangan waktu tercepat standar PLN yaitu 0,3 s), maka tms yang akan disetting pada rele arus lebih adalah:

$$tms = \frac{t \left\{ \left[\frac{I_f}{I_s} \right]^{0,02} - 1 \right\}}{0,14} \text{ (detik)} \dots \dots \dots (2.15)^7$$

Dimana : t = Waktu kerja / (detik)

tms = Setelan waktu / (detik)

I_f = Arus hubung singkat 3 fasa dan 2 fasa. Untuk setelan OCR Inverse diambil arus gangguan hubung singkat yang terbesar / (A)

I_s = Arus yang disetting pada sisi primer / (A)

2.8.3 Pemeriksaan selektivitas kerja rele arus lebih

Hasil perhitungan setelan rele arus lebih yang didapat masih harus ditinjau, waktu kerja rele arus lebih yang terpasang di feeder dan yang terpasang di incoming trafo sudah bekerja selektif, tetapi masih harus diperiksa apakah memberikan beda waktu kerja (grinding time) yang terlalu lama.

Pemeriksaan ini dilakukan terutama pada rele arus lebih jenis standard (normal) invers, karena setelan waktu tms pada rele arus lebih jenis inverse akan menunjukkan lamanya waktu kerja rele tersebut. Lamanya waktu kerja rele ini ditentukan oleh besarnya gangguan yang mengalir di rele. Makin besar arus gangguan yang mengalir pada rele maka akan semakin cepat rele tersebut menutup kontaknya, yang kemudian memberikan tripping CB.

Pemeriksaan ini dilakukan dengan memasukkan nilai gangguan hubung singkat sesuai hasil perhitungan rumus standard inverse yang digunakan.

^[7] Wahyudi, Sarimun. 2012. *Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik*. Depok: Garamond, hal 173