



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Umum Gardu Induk

Gardu Induk adalah bagian dari suatu sistem tenaga yang dipusatkan pada suatu tempat berisi saluran transmisi atau distribusi, perlengkapan hubung bagi, trafo, peralatan pengaman, peralatan kontrol, dan merupakan komponen utama dalam suatu proses penyaluran tenaga listrik dari pembangkit kepada konsumen (beban). Fungsi utama dari Gardu Induk adalah sebagai pentransformasi tenaga listrik tegangan tinggi yang satu ke tegangan tinggi yang lainnya atau ke tegangan menengah. sebagai pengukuran dan pengawasan operasi.

2.1.1 Jenis Gardu Induk di Indonesia

Gardu Induk yang terpasang di Indonesia bisa dibedakan menjadi beberapa bagian yaitu :

1. Berdasarkan Besaran Tegangannya, terdiri dari :
 - a. Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) 275 KV, 500 KV.
 - b. Gardu Induk Tegangan Tinggi (GI) 150 KV dan 70 KV.
2. Berdasarkan Pemasangan Peralatan

- a. Gardu Induk Pasangan Dalam (*In Door Substation*).

GIPD adalah Gardu Induk yang hampir semua komponennya (*switchgear, busbar, isolator*, komponen kontrol, komponen kendali, *cubicle*, dan lain-lain) dipasang di dalam gedung. Kecuali trafo daya, pada umumnya dipasang di luar gedung. Gardu Induk semacam ini biasa disebut *Gas Insulated Substation* (GIS). GIS merupakan bentuk pengembangan Gardu Induk, yang pada umumnya dibangun di daerah perkotaan atau padat pemukiman yang sulit untuk mendapatkan lahan yang luas.

- b. Gardu Induk Pasangan Luar (*Out Door Substation*)

GIPL adalah Gardu Induk yang terdiri dari peralatan tegangan tinggi pasang luar, misalnya trafo, peralatan penghubung (*switch gear*) yang mempunyai peralatan kontrol pasang dalam seperti meja penghubung



(*switch board*). Pada umumnya, Gardu Induk untuk transmisi yang mempunyai kondensator pasangan dalam dan sisi tersier trafo utama dan trafo pasangan dalam disebut juga sebagai pasangan luar. Jenis gardu ini memerlukan tanah yang luas akan tetapi biaya konstruksinya murah dan pendinginnya mudah. Oleh karena itu biasanya Gardu Induk jenis ini dipasang dipinggiran kota.

c. Gardu Induk Mobil (*Mobile Substation*).

GIM adalah Gardu Induk jenis mobil yang dilengkapi dengan peralatan diatas kereta hela (*trailer*). Gardu ini biasa digunakan jika ada gangguan disuatu gardu lain maka digunakan gardu jenis ini guna pencegahan beban lebih yang terjadi secara berkala dan juga biasa digunakan pada pemakaian sementara dilokasi pembangunan tenaga listrik. Maka dapat dikatakan bahwa gardu ini tidak dijadikan sebagai gardu utama melainkan sebagai Gardu Induk cadangan (sebagai penghubung yang dapat berpindah-pindah).

2.2 Sistem Proteksi ^[1]

Sistem proteksi merupakan bagian yang sangat penting dalam suatu instalasi tenaga listrik, selain untuk melindungi peralatan utama bila terjadi gangguan hubung singkat, sistem proteksi juga harus dapat mengeliminir daerah yang terganggu dan memisahkan daerah yang tidak terganggu, sehingga gangguan tidak meluas dan kerugian yang timbul akibat gangguan tersebut dapat di minimalisasi. Peralatan proteksi trafo tenaga terdiri dari rele proteksi, trafo arus (CT), trafo tegangan (PT), PMT, catu daya AC/ DC yang terintegrasi dalam suatu rangkaian, sehingga satu sama lainnya saling keterkaitan. Fungsi peralatan proteksi adalah untuk mengidentifikasi gangguan dan memisahkan bagian jaringan yang terganggu dari bagian lain yang masih sehat serta sekaligus mengamankan bagian yang masih sehat dari kerusakan atau kerugian yang lebih besar.

^[1] PUSDIKLAT, P.P, Dasar-dasar Sistem Proteksi Tegangan Tinggi, PT. PLN (Persero), Jakarta,2009. Diakses dari https://www.academia.edu/3629643/Proteksi_Gardu_induk pada tanggal 13 April 2020 pukul 21:00 WIB



2.2.1 Rele Proteksi

Rele proteksi adalah susunan peralatan yang direncanakan untuk dapat merasakan atau mengukur adanya gangguan atau mulai merasakan adanya ketidaknormalan pada peralatan atau bagian sistem tenaga listrik dan segera secara otomatis memberi perintah untuk membuka pemutus tenaga untuk memisahkan peralatan atau bagian dari sistem yang tergantung dan memberi isyarat berupa lampu dan bel.

Rele proteksi juga dapat merasakan atau melihat adanya gangguan pada peralatan yang diamankan dengan mengukur atau membandingkan besaran-besaran yang diterimanya, misalnya arus, tegangan, daya, sudut fase, frekuensi, impedansi dan sebagainya dengan besaran yang telah ditentukan, kemudian mengambil keputusan untuk seketika atau dengan perlambatan waktu membuka pemutus tenaga. Pemutus tenaga umumnya dipasang pada generator, Transformator Daya, saluran transmisi, saluran distribusi dan sebagainya supaya masing-masing bagian sistem dapat dipisahkan sedemikian rupa sehingga sistem lainnya tetap dapat beroperasi secara normal. Rele proteksi ini pada sistem tenaga listrik berfungsi untuk :

- a. Merasakan, mengukur dan memisahkan bagian sistem yang terganggu serta memisahkan secepatnya sehingga sistem lain yang tidak terganggu dapat beroperasi secara normal.
- b. Mengurangi kerusakan yang lebih parah dari peralatan yang terganggu.
- c. Mengurangi pengaruh gangguan terhadap bagian sistem yang lain yang tidak terganggu di dalam sistem tersebut serta mencegah meluasnya gangguan.
- d. Untuk dapat memberikan pelayanan listrik dengan keandalan yang tinggi kepada konsumen, dan juga mutu listriknya baik.
- e. Memperkecil bahaya bagi manusia.

2.2.1.1 Rele Proteksi Utama Trafo Tenaga

1. Rele *Differensial*

Fungsi rele *differensial* pada trafo tenaga adalah mengamankan trafo



dari gangguan hubung singkat yang terjadi di dalam trafo, antara lain hubung singkat antara kumparan dengan kumparan atau antara kumparan dengan tangki. Rele ini harus bekerja kalau terjadi gangguan di daerah pengamanan, dan tidak boleh bekerja dalam keadaan normal atau gangguan di luar daerah pengamanan.

2. *Restricted Earth Fault* (REF)^[2]

Merupakan salah satu proteksi utama transformator/ reaktor yang prinsip kerjanya sama dengan rele differensial, perbedaannya REF dipergunakan untuk pengaman transformator/ reaktor terhadap gangguan fasa – tanah, khususnya yang dekat dengan titik bintang transformator/ reaktor. REF dipasang pada belitan transformator/ reaktor dengan konfigurasi Y yang ditanahkan.

REF terdiri dari 2 jenis, yaitu :

- a. REF jenis *low impedance*, parameter kerjanya adalah arus minimum.
- b. REF jenis *high impedance*, parameter kerjanya adalah tegangan minimum, ataupun arus minimum.

Fungsi dari REF adalah untuk mengamankan trafo bila ada gangguan satu satu fasa ke tanah di dekat titik netral trafo yang tidak dirasakan oleh rele differensial.

Ciri- ciri rele pengaman utama:

- a. Waktu kerjanya sangat cepat seketika (*instanteneoues*).
- b. Tidak bisa dikoordinasikan dengan rele proteksi lainnya.
- c. Tidak tergantung dari proteksi lainnya.
- d. Daerah pengamanannya dibatasi oleh pasangan trafo arus, dimana rele differensial dipasang.

^[2] PT. PLN (Persero), Buku Pedoman Proteksi dan Kontrol Transformator, PT. PLN (Persero), 2014, Hal. 9

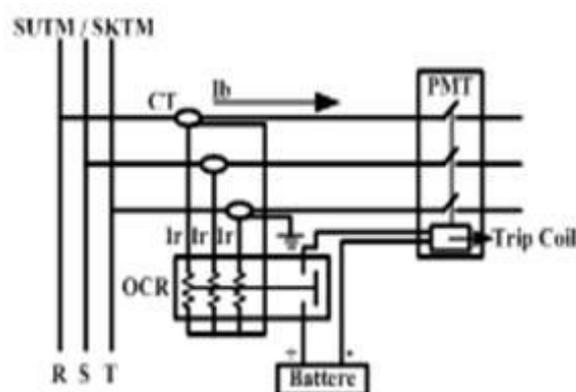


2.2.1.2 Rele Proteksi Cadangan Trafo Tenaga

1. *Over Current Rele (OCR)*

Prinsip kerja rele arus lebih adalah berdasarkan pengukuran arus, yaitu rele akan bekerja apabila merasakan arus diatas nilai *setting*nya. OCR dirancang sebagai pengaman cadangan trafo jika terjadi gangguan hubung singkat baik dalam trafo (*internal fault*) maupun gangguan eksternal (*external fault*). Oleh karena itu, *setting* arus OCR harus lebih besar dari kemampuan arus nominal *trafo* yang diamankan (110 – 120% dari *nominal*), sehingga tidak bekerja pada saat trafo dibebani *nominal*, akan tetapi harus dipastikan bahwa *setting* arus rele masih tetap bekerja pada arus hubung singkat fasa- fasa *minimum*.

Rele ini digunakan untuk mendeteksi gangguan fasa–fasa, mempunyai karakteristik *inverse* (waktu kerja rele akan semakin cepat apabila arus gangguan yang dirasakannya semakin besar) atau *definite* (waktu kerja tetap untuk setiap besaran gangguan). Selain itu pada rele arus lebih tersedia fungsi *highset* yang bekerja seketika (*moment/ instantaneous*).



Gambar 2.1 Prinsip Kerja Rele OCR

Untuk karakteristik *inverse* mengacu standar IEC atau ANSI/ IEEE. Rele ini digunakan sebagai proteksi cadangan karena tidak dapat menentukan titik gangguan secara tepat, dan juga ditujukan untuk keamanan peralatan apabila proteksi utama gagal kerja.



Agar dapat dikoordinasikan dengan baik terhadap rele arus lebih disisi yang lain (bukan rele arus lebih yang terpasang di penghantar), maka karakteristik untuk proteksi penghantar yang dipilih adalah kurva yang sama yaitu *standard inverse* (IEC) / *normal inverse* (ANSI/IEEE).

Parameter *over current rele* (OCR) dan *ground fault rele* (GFR) umumnya adalah:

1. Nilai arus kerja minimum, merupakan setelan arus minimal yang akan mengerjakan rele,
2. Nilai arus reset / drop off, merupakan besaran arus yang menyebabkan rele reset setelah mengalami pick up
3. Nilai arus kerja high set, merupakan setelan arus kerja high set untuk arus gangguan yang besar.
4. Karakteristik waktu kerja, merupakan parameter pemilihan kurva waktu kerja.
5. Nilai waktu kerja, merupakan setelan waktu kerja rele berdasarkan karakteristik yang telah ditentukan.

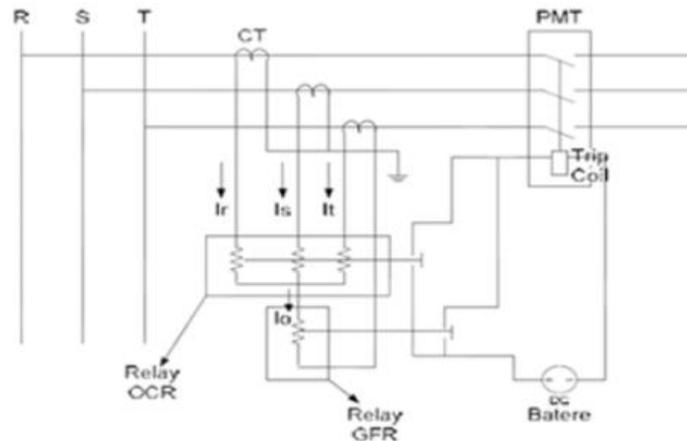
2. *Ground Fault Rele* (GFR)

Prinsip kerja GFR sama dengan OCR yaitu berdasarkan pengukuran arus, dimana rele akan bekerja apabila merasakan arus diatas nilai *settingnya*. GFR dirancang sebagai pengaman cadangan trafo jika terjadi gangguan hubung singkat fasa terhadap tanah, baik dalam trafo (*internal fault*) maupun gangguan eksternal (*external fault*). *Setting* arus GFR lebih kecil daripada OCR, karena nilai arus hubung singkatnya pun lebih kecil dari pada arus hubung singkat fasa- fasa

Prinsip kerja *Ground Fault Rele* (GFR) yaitu pada kondisi normal dengan beban seimbang arus-arus fasa I_r , I_s , dan I_t sama besar sehingga kawat netral tidak timbul arus dan relai gangguan tanah tidak dialiri arus. Namun bila terjadi ketidakseimbangan arus atau terjadi gangguan hubung singkat fasa ke tanah maka akan timbul arus urutan nol pada kawat netral. Arus urutan nol ini akan mengakibatkan *Ground Fault Rele* (GFR) bekerja..



Rele ini sangat selektif dan bekerjanya sangat cepat, tidak memerlukan waktu yang lama.



Gambar 2.2 Prinsip Kerja Rele GFR

3. *Stand By Earth Fault (SBEF)*;

Stand By Earth Fault adalah rele pengamanan untuk sistem pentanahan dengan *Neutral Grounding Resistance (NGR)* pada trafo. Berfungsi untuk mengamankan NGR dari hubung singkat phasa tanah, oleh karena itu SBEF hanya ada pada transformator yang pentanahannya menggunakan NGR. Di Indonesia ada tiga jenis pentanahan netral yaitu dengan tahanan rendah (12Ω , 40Ω), langsung (*solid*) dan pentanahan dengan tahanan tinggi (500Ω).

Ciri-ciri pengaman cadangan :

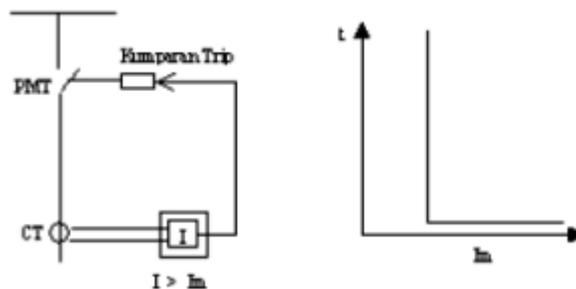
- a. Waktu kerjanya lebih lambat atau ada waktu tunda (*time delay*), untuk memberi kesempatan kepada pengaman utama bekerja lebih dahulu.
- b. Secara sistem, proteksi cadangan terpisah dari proteksi utama
- c. Rele pengaman cadangan harus dikoordinasikan dengan rele proteksi pengaman cadangan lainnya di sisi lain.



2.2.2 Karakteristik Waktu Rele Proteksi

1. Rele waktu seketika (*Instantaneous*)

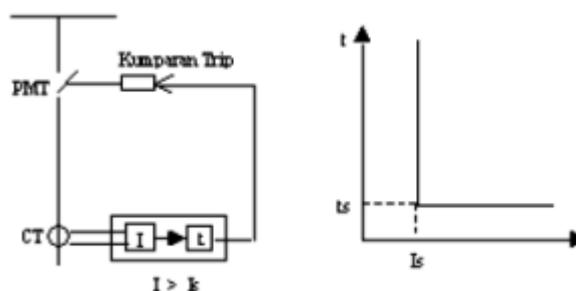
Rele yang bekerja seketika (tanpa waktu tunda) ketika arus yang mengalir melebihi nilai settingnya, rele akan bekerja dalam waktu beberapa mili detik (10 – 20 ms). Dapat kita lihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.3 Karakteristik *Instantaneous* Rele

2. Rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu (*definite time*)

Rele ini 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, lihat gambar dibawah ini.



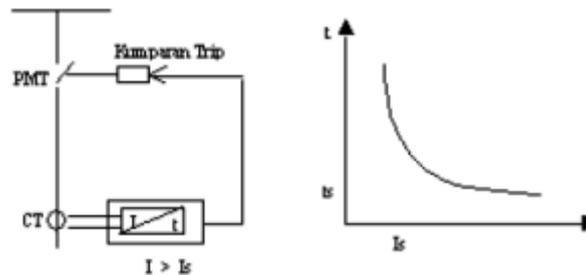
Gambar 2.4 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu

3. Rele arus lebih karakteristik waktu terbalik (*Inverse time*)

Rele ini akan bekerja dengan waktu tunda yang tergantung dari besarnya arus secara terbalik (*inverse time*), makin besar arus makin kecil waktu tundanya. Karakteristik ini bermacam-macam dan setiap pabrik dapat



membuat karakteristik yang berbeda-beda, karakteristik waktunya dibedakan dalam tiga kelompok :



Gambar 2.5 Karakteristik Rele Waktu Terbalik

Bentuk perbandingan terbalik dari waktu arus ini sangat bermacam-macam tetapi dapat digolongkan menjadi :

Tabel 2.1 Karakteristik Waktu Terbalik (*Inverse Time*)

Karakteristik	K	A
Standard Inverse	0.14	0.02
Very Inverse	13.5	1.00
Extremely Inverse	80.0	2.00
Long Time Inverse	120	1.00

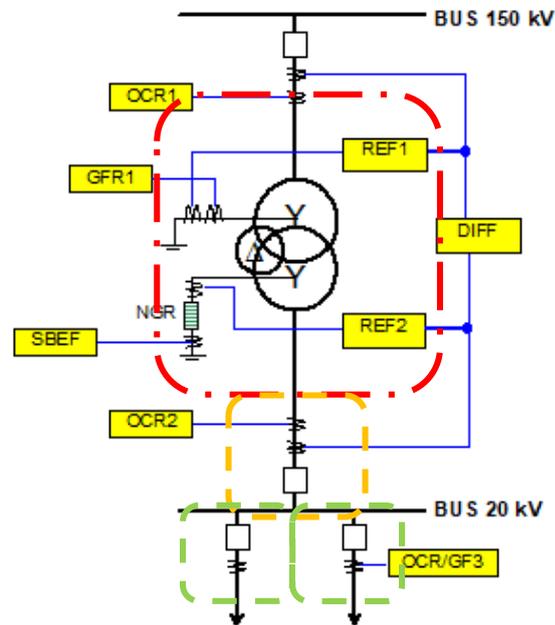
2.2.3 Daerah Pengamanan Proteksi^[3]

Daerah pengamanan dibagi dalam seksi-seksi yang dibatasi pemutus tenaga dimana tiap seksi ada rele pengaman dan punya daerah pengamanan. Pengaman cadangan lokal terletak di tempat yang sama dengan pengaman utamanya. Sedangkan pengaman cadangan jauh terletak di seksi sebelah hulunya. Oleh karena itu, akan terjadi *overlapping* antara kawasan pengaman utama dan pengaman cadangannya, baik cadangan jauh maupun cadangan lokal. Ini berarti gangguan yang terjadi pada kawasan pengaman utama akan dideteksi baik oleh pengaman utama maupun pengaman cadangan lokal. Untuk menghindari terlepasnya dua seksi sekaligus (seksi kawasan pengaman utama oleh rele pengaman utama dan seksi

^[3] PUSDIKLAT, P.P, Dasar-dasar Sistem Proteksi Tegangan Tinggi, PT. PLN (Persero), Jakarta, 2009. diakses dari https://www.academia.edu/3629643/Proteksi_Gardu_induk pada tanggal 13 April 2020 pukul 21:00 WIB



sebelah hulunya oleh rele pengaman cadangan jauh) maka rele pengaman jauh diberi waktu tunda.



Gambar 2.6 Daerah Pengaman Proteksi

Pada gambar 2.6 diatas dapat dilihat bahwa daerah proteksi pada sistem tenaga listrik dibuat bertingkat dimulai dari pembangkitan, Gardu Induk, saluran distribusi primer sampai ke beban. Tiap seksi memiliki rele pengaman dan memiliki daerah pengamanan (*Zone of Protection*). 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 terjadinya pemadaman.



2.2.4 Persyaratan Sistem Proteksi

Rele merupakan kunci kelangsungan kerja untuk menjaga kontinuitas penyaluran tenaga listrik, maka untuk menjaga keandalan dari sistem tenaga listrik rele harus memenuhi persyaratan-persyaratan sebagai berikut :

a. Kepekaan (sensitivitas)

Sesitivitas adalah istilah yang sering dikaitkan dengan harga besaran penggerak minimum, seperti level arus minimum, tegangan, daya dan besaran lain di mana rele atau skema proteksi masih dapat bekerja dengan baik. Suatu rele disebut sensitif bila parameter operasi utamanya rendah. Artinya, semakin rendah besaran parameter penggerak maka perangkat tersebut dikatakan semakin sensitif.

Pada prinsipnya rele harus cukup peka sehingga dapat mendeteksi gangguan di kawasan pengamanannya meskipun dalam kondisi yang memberikan rangsangan yang minimum.

b. Keandalan

Pada keandalan pengaman ada 3 aspek, yaitu :

1) *Dependability*

Yaitu tingkat kepastian bekerjanya (keandalan kemampuan bekerjanya). Pada prinsipnya pengaman harus dapat diandalkan dalam bekerja dapat mendeteksi dan melepaskan bagian yang terganggu), tidak boleh gagal bekerja.

2) *Security*

Yaitu tingkat kepastian untuk tidak salah kerja (keandalan untuk tidak salah kerja). Salah satu kerja adalah kerja yang semestinya tidak harus kerja, misalnya karena lokasi gangguan di luar kawasan pengamanannya atau sama sekali tidak ada gangguan, atau kerja yang terlalu cepat atau terlalu lambat.

3) *Availability*

Yaitu perbandingan antara waktu di mana pengaman dalam keadaan siap kerja (*actually in service*) dan waktu total operasinya.



c. Selektifitas

Pengaman harus dapat memisahkan bagian sistem yang terganggu sekecil mungkin yaitu hanya seksi yang terganggu saja yang menjadi kawasan pengaman utamanya. Pengamanan sedemikian disebut pengamanan yang selektif. Jadi rele harus dapat membedakan apakah gangguan terletak di kawasan pengamanan utamanya di mana ia harus bekerja cepat atau terletak di seksi berikutnya di mana ia harus bekerja dengan waktu tunda atau harus tidak bekerja sama sekali karena gangguannya di luar daerah pengamanannya atau sama sekali tidak ada gangguan.

d. Kecepatan

Untuk memperkecil kerugian atau kerusakan akibat gangguan, dengan arus besar. Maka bagian yang terganggu, harus dipisahkan secepat mungkin dari sumbernya. Untuk menciptakan selektifitas yang baik, mungkin saja suatu pengaman yang terpaksa diberi waktu tunda (*time delay*). Antara pengaman terpaksa diberi waktu tunda itu harus secepat mungkin.

2.2.5 Penyebab Kegagalan Proteksi^[4]

Sistem proteksi tidak dapat sempurna walaupun sudah diusahakan pemilihan jenis rele yang baik dan penyetelan yang baik, tetapi adakalanya masih gagal bekerja. Hal yang menimbulkan kegagalan pengaman dapat dikelompokkan sebagai berikut :

- a. Kegagalan pada rele sendiri
- b. Kegagalan suplai arus dan atau tegangan ke rele.
- c. Kegagalan sistem suplai arus searah *tripping* pemutus tenaga. Hal ini dapat disebabkan baterai lemah karena kurang perawatan, terbukanya atau terhubung singkat rangkaian arus searah.
- d. Kegagalan pada pemutus tenaga. Kegagalan ini dapat disebabkan karena kumparan *trip* tidak menerima suplai, kerusakan mekanis ataupun

^[4] PUSDIKLAT, P.P, Dasar-dasar Sistem Proteksi Tegangan Tinggi, PT. PLN (Persero), Jakarta, 2009. Diakses dari https://www.academia.edu/3629643/Proteksi_Gardu_induk pada tanggal 13 April 2020 pukul 21:00 WIB



kegagalan pemutus arus karena besarnya arus hubung singkat melampaui kemampuan dari pemutus tenaganya.

2.3 Transformator Daya

Trafo tenaga adalah suatu peralatan listrik yang termasuk dalam klasifikasi mesin listrik statis yang berfungsi sebagai pentransformasi harga arus dan tegangan pada harga daya dan frekuensi tetap (sama). Trafo menggunakan prinsip elektromagnetik yaitu hukum ampere dan induksi faraday, dimana perubahan arus atau medan listrik dapat membangkitkan medan magnet dan perubahan medan magnet / fluks medan magnet dapat membangkitkan tegangan induks. Bagian-bagian utama Transformator Daya:

a. Inti besi

Berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi, yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Dibuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi).

b. Kumparan

Berupa beberapa lilitan kawat berisolasi yang membentuk suatu kumparan. Kumparan tersebut terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder yang diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap antar kumparan dengan isolasi padat seperti karton, pertinak dan lain-lain.

c. Minyak Trafo

Seluruh kumparan dan inti besi transformator direndam dalam minyak trafo. Minyak berfungsi sebagai media pemindah panas trafo (pendingin) serta berfungsi sebagai isolasi.

d. Tangki dan Konservator

Pada umumnya bagian-bagian dari trafo yang terendam minyak trafo berada (ditempatkan) dalam tangki. Untuk menampung pemuaiian minyak trafo, tangki dilengkapi dengan konservator

e. Bushing

Hubungan antara kumparan trafo ke jaringan luar melalui sebuah bushing



yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, yang sekaligus berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki trafo.

2.3.1 Peralatan Pengaman Transformator Daya

2.3.1.1 Pemutus Tenaga (PMT)^[5]

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

Fungsi utamanya adalah sebagai alat pembuka atau penutup suatu rangkaian listrik dalam kondisi berbeban, serta mampu membuka atau menutup saat terjadi arus gangguan (hubung singkat) pada jaringan atau peralatan lain.

Syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh pemutus tenaga dalam sistem tenaga listrik adalah sebagai berikut :

- a. Mampu menyalurkan arus maksimum sistem tenaga listrik secara kontinu
- b. Mampu memutuskan dan menghubungkan jaringan dalam keadaan berbeban maupun dalam gangguan hubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus tenaga itu sendiri
- c. Dapat memutuskan arus hubung singkat dengan sangat cepat agar arus hubung singkat tidak sampai merusak peralatan sistem, membuat sistem kehilangan kestabilan dan merusak pemutus tenaga itu sendiri.

^[5] PT. PLN (Persero), Buku Pedoman Pemeliharaan Pemutus Tenaga (PMT), PT. PLN (Persero), Jakarta, 2014. Hal. 1



Gambar 2.7 Pemutus Tenaga (PMT)

2.3.1.2 *Lightning Arrester (LA)*^[6]

Lightning Arrester (LA) merupakan peralatan yang berfungsi untuk melindungi peralatan listrik lain dari tegangan surja (baik surja hubung maupun surja petir). Surja mungkin merambat di dalam konduktor saat peristiwa sebagai berikut :

- a. Kegagalan sudut perlindungan petir, sehingga surja petir mengalir di dalam konduktor fasa.
- b. Backflashover akibat nilai pentanahan yang tinggi, baik di Gardu Induk ataupun di saluran transmisi.
- c. Proses switching CB/ DS (Surja hubung).
- d. Gangguan fasa-fasa, ataupun fasa-tanah baik di saluran transmisi maupun di Gardu Induk.

^[6] PT. PLN (Persero), Buku Pedoman Pemeliharaan *Lightning Arrester (LA)*, PT. PLN (Persero), Jakarta, 2014, Hal. 1



Gambar 2.8 *Lightning Arrester (LA)*

2.3.1.3 *Current Transformer (CT)*^[7]

Current Transformator (CT) atau Trafo Arus yaitu peralatan yang digunakan untuk melakukan pengukuran besaran arus pada instalasi tenaga listrik disisi primer (TET, TT, dan TM) yang berskala besar dengan melakukan transformasi dari besaran arus yang besar menjadi besaran arus yang kecil secara akurat dan teliti untuk keperluan pengukuran dan proteksi. Fungsi dari trafo arus adalah:

- a. Mengkonversi besaran arus pada sistem tenaga listrik dari besaran primer menjadi besaran sekunder untuk keperluan pengukuran sistem metering dan proteksi
- b. Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer, sebagai pengamanan terhadap manusia atau operator yang melakukan pengukuran.
- c. Standarisasi besaran sekunder, untuk arus nominal 1 Amp dan 5 Amp

^[7] PT. PLN (Persero), Buku Pedoman Pemeliharaan Trafo Arus (CT), PT. PLN (Persero), Jakarta, 2014, Hal. 1



Gambar 2.9 *Current Transformer (CT)*

Secara fungsi trafo arus dibedakan menjadi dua yaitu:

1. Trafo arus pengukuran
 - a. Trafo arus pengukuran untuk metering memiliki ketelitian tinggi pada daerah kerja (daerah pengenalnya) 5% - 120% arus nominalnya tergantung dari kelasnya dan tingkat kejenuhan yang relatif rendah dibandingkan trafo arus untuk proteksi.
 - b. Penggunaan trafo arus pengukuran untuk Amperemeter, Watt-meter, VARh meter dan $\cos \pi$ meter.
2. Trafo arus proteksi
 - a. Trafo arus untuk proteksi, memiliki ketelitian tinggi pada saat terjadi gangguan dimana arus yang mengalir beberapa kali dari arus pengenalnya dan tingkat kejenuhan cukup tinggi.
 - b. Penggunaan trafo arus proteksi untuk rele arus lebih (OCR dan GFR), rele beban lebih, rele diferensial, rele daya dan rele jarak.



2.3.1.4 *Potential Transformer (PT)*^[8]

Trafo tegangan adalah peralatan yang mentransformasikan tegangan sistem yang lebih tinggi ke suatu tegangan sistem yang lebih rendah untuk kebutuhan peralatan indikator, alat ukur/ meter dan rele.



Gambar 2.10 *Potential Transformer (PT)*

Trafo tegangan memiliki prinsip kerja yang sama dengan trafo tenaga tetapi rancangan Trafo tegangan berbeda yaitu^[9] :

- a. Kapasitasnya kecil (10 – 150 VA), karena digunakan hanya pada alat ukur, rele, dan peralatan indikasi yang konsumsi dayanya kecil.
- b. Memiliki tingkat ketelitian yang tinggi.
- c. Salah satu ujung terminal tegangan tingginya selalu ditanahkan.

Fungsi Trafo tegangan, yaitu^[10] :

- a. Mentransformasikan besaran tegangan system dari yang tinggi ke besaran tegangan listrik yang lebih rendah sehingga dapat digunakan untuk peralatan proteksi dan pengukuran yang lebih aman, akurat, dan teliti.

^[8] PT. PLN (Persero), Buku Pedoman Pemeliharaan Trafo Tegangan (CVT), PT. PLN (Persero), Jakarta, 2014, Hal. 1

^[9] *Ibid.* Hal. 2

^[10] *Ibid*



- b. Mengisolasi bagian primer yang tegangannya sangat tinggi dengan bagian sekunder yang tegangannya rendah untuk digunakan sebagai sistem proteksi dan pengukuran peralatan dibagian primer.
- c. Sebagai standarisasi besaran tegangan sekunder untuk keperluan peralatan sis sekunder.
- d. Memiliki 2 kelas, yaitu kelas proteksi dan kelas pengukuran (0,1; 0,2; 0,5; 1; 3).

2.3.1.5 *Neutral Grounding Resistor (NGR)*^[11]

Pentanahan titik netral atau disebut juga *Netral ground resistant (NGR)* adalah sebuah tahanan yang dipasang seri dengan netral sekunder pada trafo sebelum terhubung ke *ground/* tanah. Tujuan dipasangnya NGR adalah untuk mengontrol besarnya arus gangguan yang mengalir dari sisi netral ke tanah.

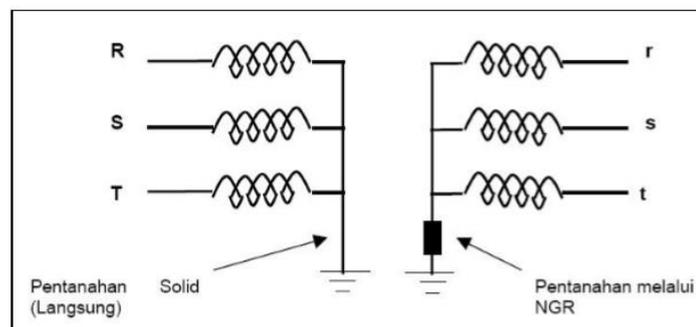
Ada dua jenis NGR, yaitu :

1. *Liquid*

Berarti resistornya menggunakan larutan air murni yang ditampung di dalam bejana dan ditambahkan air garam (NaCl) untuk mendapatkan hasil resistansi yang diinginkan.

2. *Solid*

NGR jenis padat terbuat dari *Stainless Steel*, *FeCrAl*, *Cast Iron*, *Copper Nickel* atau *Nichrome* yang diatur sesuai pentanahannya.



Gambar 2.11 Pentanahan Langsung dan Pentanahan Melalui NGR

^[11] PT. PLN (Persero), Buku Pedoman Pemeliharaan Trafo Tenaga, PT. PLN (Persero), Jakarta, 2014, Hal. 13



Gambar 2.12 Neutral Grounding Resistor (NGR)

2.3.1.6 Panel Kontrol

Panel kontrol yang terdapat di Gardu Induk terdiri dari panel *instrument* dan panel operasi. Pada panel *instrument* terpasang alat-alat ukur dan indikator gangguan, dari panel ini alat- alat tersebut dapat diawasi dalam keadaan sedang beroperasi. Indikator- indikator yang ada pada rel kontrol antara lain :



Gambar 2.13 Alarm Annunciator pada Panel Kontrol

Pada panel kontrol terpasang saklar operasi pemutus tenaga, pemisah serta lampu indikator posisi saklar dan diagram ril. Diagram ril (*mimic bus*), saklar dan lampu indikator diatur letak dan hubungannya sesuai dengan rangkaian yang sesungguhnya sehingga keadaan dapat dilihat dengan mudah.



2.3.1.7 Panel Proteksi

Pada panel ini terdapat rele pengaman untuk trafo dan sebagainya. Rele pengaman utama trafo dan pengaman cadangan pada trafo, bekerjanya rele dapat diketahui dari penunjukkan indikasi pada rele itu sendiri dan pada indikator gangguan dipanel kontrol. Pada Gardu Induk ada yang memanfaatkan sisi depan dari panel dipakai sebagai panel utama dengan *instrument* dan saklar, kemudian sisi belakangnya dipakai sebagai panel rele. Pada Gardu Induk yang rangkaiannya rumit, maka panel rele terpasang pada panel tersendiri.

2.4 Macam-macam Gangguan^[12]

1. Gangguan beban lebih

Gangguan ini sebenarnya bukan gangguan murni, tetapi bila dibiarkan terus menerus berlangsung dapat merusak peralatan listrik yang dialiri oleh arus tersebut. Karena arus yang mengalir melebihi dari kapasitas peralatan listrik dan pengaman yang terpasang melebihi kapasitas peralatan, sehingga saat beban melebihi pengaman tidak *trip*. Misal: kapasitas penghantar 300 A dan pengaman disetting 350 A tetapi beban mencapai 320 A, sehingga pengaman tidak *trip* dan penghantar akan terbakar.

2. Gangguan hubung singkat

Gangguan hubung singkat, dapat terjadi antar fasa (3 fasa atau 2 fasa) atau 1 fasa ke tanah dan sifatnya bisa temporer atau permanen.

a. Gangguan permanen antara lain :

Gangguan hubung singkat, bisa terjadi pada kabel atau pada belitan Transformator Daya yang disebabkan karena arus gangguan hubung singkat melebihi kapasitasnya, sehingga penghantar menjadi panas yang dapat mempengaruhi isolasi atau minyak transformator, sehingga isolasi tembus pada generator, yang disebabkan adanya gangguan hubung singkat atau pembebanan yang melebihi kapasitas.

^[12] Sarimun, Wahyudi, Buku Saku Pelayanan Teknik, Garamond, Depok, 2014.



Sehingga rotor memasok arus dari eksitasi berlebih yang dapat menimbulkan pemanasan yang dapat merusak isolasi sehingga isolasi tembus. Di sini pada titik gangguan memang terjadi kerusakan yang permanen. Peralatan yang terganggu tersebut, baru bisa dioperasikan kembali setelah bagian yang rusak diperrbaiki atau diganti.

b. Gangguan temporer, antara lain:

Flashover karena sambaran petir (penghantar terkena sambaran petir) flashover dengan pohon, penghantar tertiuip angin yang dapat menimbulkan gangguan antar fasa atau penghantar fasa menyentuh pohon yang menimbulkan gangguan 1 fasa ke tanah. Gangguan ini yang tembus (*breakdown*) adalah isolasi udaranya., oleh karena itu tidak ada kerusakan yang permanen. Setelan arus gangguannya terputus, misalnya karena terbukanya circuit breaker oleh rele pengamannya, peralatan atau saluran yang terganggu tersebut siap dioperasikan kembali.

3. Gangguan tegangan lebih

Gangguan tegangan lebih terjadi akibat adanya kelainan pada sistem tenaga listrik, antara lain:

a. Tegangan lebih dengan power frekuensi, misal: pembangkit kehilangan beban yang diakibatkan adanya gangguan pada sisi jaringan, sehingga *over speed* pada generator. Tegangan lebih ini dapat juga terjadi adanya gangguan pada pengatur tegangan secara otomatis (*Automatic Voltage Regulator*) yang terpasang pada generator.

b. Tegangan lebih *transient* karena adanya surja petir yang mengenai peralatan listrik disebut surja petir atau saat pemutus (PMT) terbuka karena adanya gangguan listrik yang menimbulkan kenaikan tegangan disebut surja hubung.



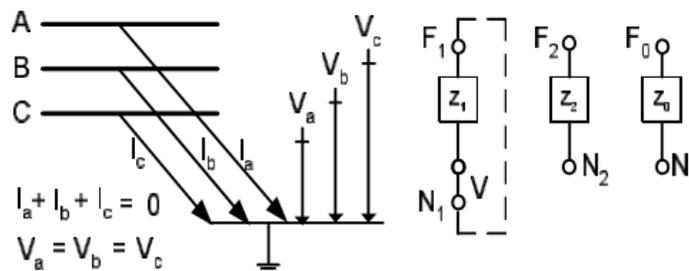
4. Gangguan ketidakstabilan

Gangguan ketidakstabilan sistem disebabkan karena adanya gangguan hubung singkat di sistem tenaga listrik atau lepasnya pembangkit, dapat menimbulkan ayunan daya (*power swing*) atau menyebabkan unit-unit pembangkit lepas sinkron, ayunan dapat menyebabkan salah kerja rele. Lepas sinkron dapat menyebabkan berkurangnya pembangkit, karena *trip*nya pembangkit yang besar dari *spining reserve*, maka frekuensi akan terus turun atau terpisahnya sistem tenaga listrik yang selanjutnya dapat menyebabkan gangguan yang lebih luas bahkan sistem terjadi keruntuhan listrik (*collapse*).

2.5 Perhitungan Arus Hubung Singkat

Perhitungan arus gangguan hubung singkat dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

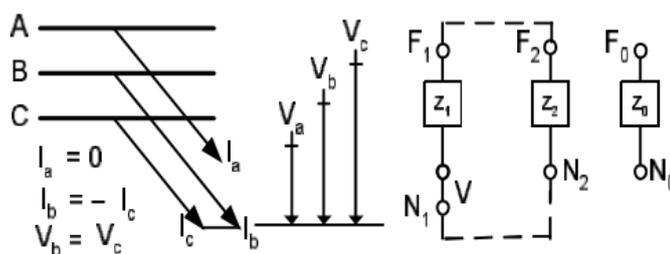
1. Hubung singkat 3 fasa



Gambar 2.14 Rangkaian Ekuivalen Gangguan 3 Fasa

$$I_{3\phi} = \frac{E_{ph}/\sqrt{3}}{Z_{1eq}} \dots\dots\dots (2.1)$$

2. Hubung singkat 2 fasa



Gambar 2.15 Rangkaian Ekuivalen Gangguan 2 Fasa



$$I_{\phi-\phi} = \frac{E_{ph}}{Z_{1eq} + Z_{2eq}} \dots\dots\dots (2.2)$$

2.6 Perhitungan Impedansi

2.6.1 Perhitungan Impedansi Sumber

Impedansi sumber diambil dari arus beban puncak yang mengalir dari sistem interkoneksi ke Gardu Induk atau *Gas Insulated Switchgear* (GIS). Perhitungan impedansi sumber didapatkan dari rumus berikut ini :

$$MVA_{\text{hubung-singkat}} = \sqrt{3} \times V \cdot I \text{ (MVA)} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dengan menyelesaikan persamaan di atas dihasilkan :

$$Z_{t1} \text{ (sisi Primer)} = \frac{kV^2}{MVA_{\text{hubung-singkat}}} \dots\dots\dots (2.4)$$

Perlu diingat bahwa impedansi sumber ini adalah nilai tahanan pada sisi primer, karena arus gangguan hubung singkat yang akan dihitung adalah gangguan hubung singkat pada sisi sekunder, maka impedansi sumber itu harus dikonversikan dulu ke sisi sekunder. Untuk mengkonversikan impedansi tersebut, dilakukan dengan cara berikut ini :

$$Z_{t2} \text{ (sisi Sekunder)} = \frac{kV_2^{2(\text{sekunder})}}{kV_1^{2(\text{primer})}} \times X_{sc} \dots\dots\dots (2.5)$$

Keterangan :

X_{sc} = Impedansi Transformator Daya sisi primer

Z_2 = Impedansi Transformator Daya sisi sekunder

kV_1 = Tegangan Transformator Daya sisi primer

kV_2 = Tegangan Transformator Daya sisi sekunder

2.6.2 Perhitungan Impedansi Penyulang

Impedansi penyulang yang akan dihitung di sini tergantung dari besarnya impedansi per km (km/ohm) dari penyulang yang dihitung, dimana nilainya ditentukan oleh jenis penghantar, luas penampang dan panjang jaringan SUTM.



Nilai impedansi penyulang disimulasikan gangguan untuk lokasi 25%, 50%, 75% dan 100% panjang penyulang, sehingga dapat dihitung dengan rumus berikut ini :

$$\text{Impedansi Penyulang} = \text{Panjang Penyulang} \times Z \text{ per km} \dots\dots\dots (2.6)$$

2.6.3 Perhitungan Impedansi Ekivalen Jaringan

Perhitungan impedansi ekivalen jaringan adalah perhitungan besarnya nilai impedansi ekivalen urutan positif dan impedansi ekivalen urutan negatif dari titik gangguan sampai ke sumber.

Untuk menentukan besaran nilai impedansi ekivalen urutan positif dan negatif ($Z_{1eq} = Z_{2eq}$) dapat menggunakan rumus sebagai berikut :

$$Z_{1eq} = Z_{2eq} = X_{ssek} + X_{T1} + Z_1 \text{ penyulang} \dots\dots\dots (2.7)$$

Keterangan :

X_{ssek} = Impedansi Sumber 20 kV

X_{T1} = Reaktansi Transformator Urutan positif dan negatif

$Z_1 \text{ penyulang}$ = Impedansi Urutan positif dan negatif Penghantar (Sesuai Titik Gangguan)

2.7 Perhitungan Reaktansi Trafo

Sebelum menghitung reaktansi trafo, hitung impedansi dasar pada trafo (100%) sisi sekunder. Data yang dibutuhkan yaitu daya yang digunakan pada trafo dan ratio tegangan pada trafo. Untuk perhitungan impedansi dasar pada trafo (100%) digunakan rumus berikut ini :

$$X_T \text{ (pada 100\%)} = \frac{(kV)^2}{(MVA)} \dots\dots\dots (2.8)$$

Nilai impedansi urutan positif, negatif ($X_{T1} = X_{T2}$) Transformator Daya :

$$X_{T1} = X_{T1} (\%) \times X_T \text{ (pada 100\%)} \dots\dots\dots (2.9)$$



Sebelum menghitung reaktansi urutan nol (X_{t0}) terlebih dahulu harus diketahui data trafo tenaga itu sendiri yaitu data kapasitas belitan delta yang ada dalam trafo :

- Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan ΔY dimana kapasitas belitan delta sama besar dengan kapasitas belitan bintang, maka :

$$X_{t0} = X_{t1} \dots \dots \dots (2.10)$$

- Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan $YY\Delta$ dimana kapasitas belitan delta adalah sepertiga dari kapasitas bintang (belitan Y adalah belitan yang digunakan untuk menyalurkan daya, sedangkan untuk belitan Δ tetap ada di dalam tetapi tidak dikeluarkan kecuali satu terminal delta untuk ditanahkan), maka nilainya adalah :

$$X_{t0} = 3 \times X_{t1} \dots \dots \dots (2.11)$$

- Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan YY dan tidak mempunyai belitan delta di dalamnya, maka untuk menghitung besarnya X_{t0} berkisar antara :

$$9 \text{ s.d } 14 \times X_{t1} \dots \dots \dots (2.12)$$

2.8 Perhitungan *Setting* Rele Arus Lebih

1. Setelan arus¹³

Rumus yang digunakan untuk menghitung setelan arus pada sisi primer yaitu :

$$I_{set(primer)} = 1,0 - 1,2 \times \text{ arus nominal sisi primer trafo atau rasio primer CT sisi primer } \dots \dots \dots (2.13)$$

Untuk perhitungan *setting* GFR menggunakan factor pengali 0,5 Setelah mendapatkan nilai arus sisi primer, untuk mendapatkan nilai sekunder yang disetkan pada rele arus lebih, maka harus dihitung dengan

¹³ PT. PLN (Persero), Buku Pedoman Pemeliharaan Proteksi PT. PLN (Persero), Padang, 2007. Hal. 17



menggunakan ratio *Current Trafo* (CT) atau trafo arus yang terpasang di penyulang tersebut, yaitu sebagai berikut :

$$I_{set(sekunder)} = I_{set(primer)} \times \frac{1}{ratio\ CT} \dots\dots\dots (2.14)$$

Keterangan :

$I_{set\ (primer)}$ = Arus yang *disetting* di sisi primer

$I_{set\ (sekunder)}$ = Arus yang *disetting* di sisi sekunder

Ratio CT = *Setting* trafo arus yang dipasang di penyulang

2. Setelan Waktu (tms)

Untuk setelan waktu rele *standart inverse* dihitung dengan menggunakan rumus kurva waktu dan arus. Rumus ini bermacam-macam sesuai dengan pabrikan pembuatan rele, dalam hal ini diambil rumus kurva waktu dan arus standar British, sebagai berikut :

$$tms = \frac{t \left\{ \left(\frac{I_{fault\ 3\ fasa}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right\}}{0,14} \dots\dots\dots (2.15)$$

$$t = \frac{0,14 \times tms}{\left\{ \left(\frac{I_{fault\ 3\ fasa}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right\}} \dots\dots\dots (2.16)$$

keterangan :

t = Waktu *tripnya* rele sesuai dengan arus gangguan (detik)

tms = *Time Multiple Setting* pada OCR atau GFR (tanpa satuan)

I_{fault} = Besarnya arus gangguan hubung singkat (amp)

I_{set} = Arus *setting* primer pada OCR

2.9 Pemeriksaan Selektifitas Kerja Rele Proteksi

Hasil perhitungan setelan rele arus lebih yang didapat masih harus diperiksa, apakah untuk nilai arus gangguan hubung singkat yang lain. Pemeriksaan ini dilakukan terutama pada rele arus lebih dari jenis *standart inverse*, karena setelan waktu (tms) pada rele arus lebih jenis *standart inverse* bukan menunjukkan lamanya waktu kerja rele tersebut. Lamanya waktu kerja rele tersebut ditentukan oleh besarnya arus yang mengalir pada rele. Semakin besar arus gangguan hubung



singkat yang mengalir pada rele semakin cepat juga rele tersebut bekerja atau menutup kontakannya, kemudian memberikan *tripping* PMT. Pemeriksaan ini dilakukan dengan bermacam-macam nilai gangguan hubung singkat sesuai hasil perhitungannya, dengan menggunakan persamaan *standart inverse*.

2.10 Software Mathcad

Software Mathcad merupakan suatu program yang sangat mudah dipergunakan terutama dalam hal visualisasi karena dapat menerangkan perhitungan kebentuk yang lebih mudah dipahami. mathcad sebagai alat untuk memvalidasi sebuah perhitungan yang biasanya dipergunakan seperti excel ke dalam bentuk yang dapat mudah dipahami bukan hanya dalam bentuk angka-angka saja. Representasi berupa penurunan rumus – rumus menggabungkan perhitungan, grafik, teks, dan gambar dalam satu dokumen akan sangat membantu dalam memahami sesuatu. Mathcad juga dapat menampilkan grafik dari hasil perhitungan yang telah kita buat.

Software Mathcad juga digunakan dalam sistem proteksi di PT. PLN (persero) unit layanan transmisi dan Gardu Induk (ULTG) prabumulih, sehingga dapat mengelola sistem proteksi secara terprogram untuk memudahkan pengelolaan sistem tersebut. Data sistem proteksi yang dihitung menggunakan Mathcad berupa:

1. Perhitungan arus nominal
2. Perhitungan *setting* sisi 150 kV
3. Perhitungan *setting incoming*
4. Perhitungan *setting* penyulang 20 kV

Dan data grafik yang ditampilkan berupa :

1. Grafik arus hubung singkat
2. Grafik Skema koordinasi *setting* transformator dan penyulang gangguan phasa-pahasa

Untuk menghitung data-data diatas yaitu dengan menggunakan rumus-rumus yang digunakan sesuai dengan standar yang telah ditentukan oleh PT. PLN (Persero) P3B Sumatera Bidang Transmisi Sub Bidang Proteksi Scadatel Padang, 2008.