

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Konsep Dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik<sup>[7]</sup>

Sistem proteksi tenaga listrik merupakan sistem pengaman pada peralatan-peralatan yang terpasang pada sistem tenaga listrik, seperti generator, busbar, transformator, saluran udara tegangan tinggi, saluran kabel bawah tanah, dan lain sebagainya terhadap kondisi abnormal operasi sistem tenaga listrik tersebut (J.Soekarto, 1985).

Kegunaan sistem proteksi tenaga listrik, antara lain untuk :

1. Mencegah kerusakan peralatan-peralatan pada sistem tenaga listrik akibat terjadinya gangguan atau kondisi operasi sistem yang tidak normal.
  2. Mengurangi kerusakan peralatan-peralatan pada sistem tenaga listrik akibat terjadinya gangguan atau kondisi operasi sistem yang tidak normal.
  3. Mempersempit daerah yang terganggu sehingga gangguan tidak melebar pada sistem yang lebih luas.
  4. Memberikan pelayanan tenaga listrik dengan keandalan dan mutu tinggi kepada konsumen.
- Mengamankan manusia dari bahaya yang ditimbulkan oleh tenaga listrik.



**Gambar 2.1** Diagram Blok Urutan Kerja Relai Pengaman

Relai Proteksi umumnya terdiri dari tiga bagian seperti pada Gambar 2.2, yaitu:<sup>[5]</sup>

1. Bagian Perasa (*sensing element*)

---

<sup>[7]</sup> Tasiem, F.J. 2017. *Proteksi Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta : Teknosain. Hal 151.

<sup>[5]</sup> Samaulah, Hazairin. 2004. *Dasar-Dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Unsri : Palembang. Hal. 69-70.

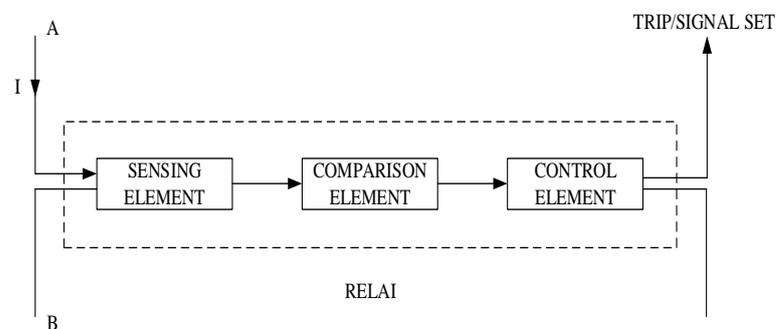
Pada bagian ini, perubahan dari besaran ukur yang dirasakan selanjutnya diteruskan ke bagaian pembanding.

## 2. Bagian Pembanding (*comparing element*)

Bagian ini yang akan membandingkan dan menentukan apakah besaran ukur itu masih dalam keadaan normal atau tidak.

## 3. Bagian Kontrol (*control element*)

Pada bagian ini pembukaan pemutus tenaga (PMT) atau pemberian tanda/signal diatur dan dilaksanakan.



**Gambar 2.2** Diagram Blok Elemen Relai Pengaman

### 2.2.1 Fungsi dan Persyaratan Relai Proteksi<sup>[7]</sup>

Syarat-syarat agar peralatan relai pengaman dapat dikatakan bekerja dengan baik dan benar adalah :

#### 1. Cepat bereaksi

Relai harus cepat bereaksi / bekerja bila sistem mengalami gangguan atau kerja abnormal. Kecepatan bereaksi dari relai adalah saat relai mulai merasakan adanya gangguan sampai dengan pelaksanaan pelepasan *Circuit Breaker* (CB) karena komando dari relai tersebut. Waktu bereaksi ini harus diusahakan secepat mungkin sehingga dapat menghindari kerusakan pada alat serta membatasi daerah yang mengalami gangguan / kerja abnormal.

Mengingat suatu sistem tenaga mempunyai batas-batas stabilitas serta kadang-kadang gangguan sistem bersifat sementara, maka relai yang semestinya

<sup>[7]</sup> Tasiem, F.J. 2017. *Proteksi Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta : Teknosain. Hal 151-153.

bereaksi dengan cepat kerjanya perlu diperlambat (*time delay*), seperti yang ditunjukkan persamaan :

$$t_{op} = t_p + t_{cb} \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana :

$t_{op}$  = total waktu yang dipergunakan untuk memutuskan hubungan

$t_p$  = waktu bereaksinya unit relai

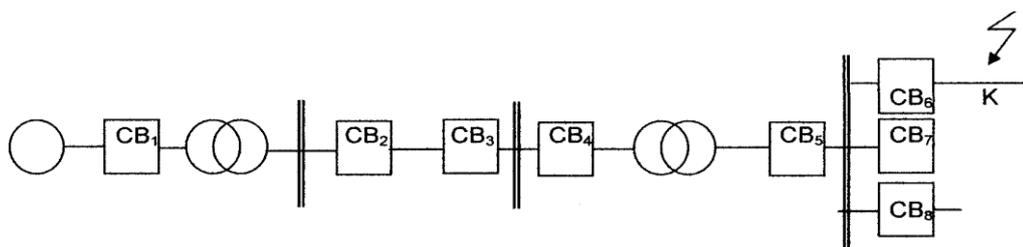
$t_{cb}$  = waktu yang dipergunakan untuk pelepasan CB

Pada umumnya untuk  $t_{op}$  sekitar 0,1 detik kerja peralatan proteksi sudah dianggap bekerja cukup baik.

## 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 relai pengaman harus mempunyai kemampuan selektif yang baik. Dengan demikian, segala tindakannya akan tepat dan akibatnya gangguan dapat dieliminir menjadi sekecil mungkin.

Berikut diberikan contohnya pada Gambar 2.3:



**Gambar 2.3** Suatu Sistem Tenaga Listrik Yang Sederhana Mengalami Gangguan Pada Titik K

Dalam sistem tenaga listrik seperti gambar di atas, apabila terjadi gangguan pada titik K, maka hanya CB 6 saja yang boleh bekerja sedangkan untuk CB 1, CB 2 dan CB - CB yang lain tidak boleh bekerja,

## 3. Peka / sensitif



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

#### 4. Andal / *Reliability*

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

$$\text{Keandalan relai} = 23/25 \times 100 \% = 92 \%$$

Keandalan dapat di bagi 2 :

- 1) *Dependability* : relai harus dapat diandalkan setiap saat.
- 2) *Security* : tidak boleh salah kerja / tidak boleh bekerja yang bukan seharusnya bekerja.

#### 5. Sederhana / *Simplicity*

Makin sederhana sistem relai semakin baik, mengingat setiap peralatan / komponen relai memungkinkan mengalami kerusakan. Jadi sederhana maksudnya kemungkinan terjadinya kerusakan kecil (tidak sering mengalami kerusakan).

#### 6. Murah / *Economy*

Relai sebaiknya yang murah, tanpa meninggalkan persyaratan-persyaratan yang telah tersebut di atas.

### 2.2.2 Penyebab Kegagalan Proteksi <sup>[5]</sup>

Kita sadari pula bahwa sistem proteksi tidak dapat sempurna walaupun sudah diusahakan pemilihan jenis relai yang baik dan penyetelan yang baik, tetapi adakalanya masih gagal bekerja. Hal yang menimbulkan kegagalan pengaman dapat dikelompokkan sebagai berikut :

- Kegagalan pada relai sendiri.

---

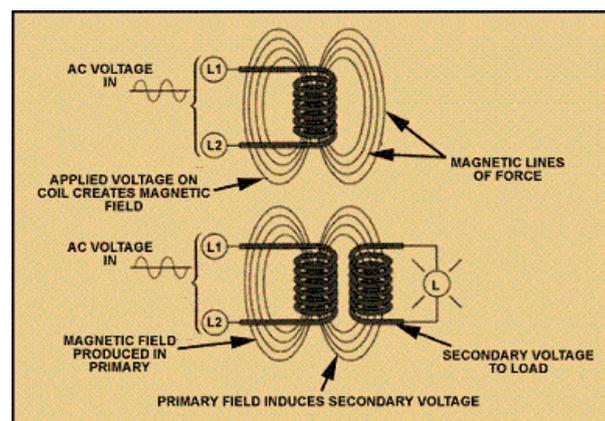
<sup>[5]</sup> Samaulah, Hazairin. 2004. *Dasar-Dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Unsri : Palembang. Hal. 4-5.

- Kegagalan suplai arus ke relai. Rangkaian suplai ke relai dari trafo tersebut terbuka atau terhubung singkat.
- Kegagalan sistem suplai arus daerah untuk tripping pemutus tenaga. Hal ini dapat disebabkan baterai lemah karena kurang perawatan, terbukanya atau terhubung singkat rangkaian arus searah.
- Kegagalan pada pemutus tenaga. Kegagalan ini dapat disebabkan karena kumparan trip tidak menerima suplai, kerusakan mekanis ataupun kegagalan pemutusan arus karena besarnya arus hubung singkat melampaui kemampuan dari pemutus tenaganya.

Pengaturan arus waktu yang berbeda – beda pada pengaman arus lebih diperlukan guna memperoleh suatu koordinasi proteksi pada suatu saluran listrik, agar bagian saluran yang dikeluarkan dari jaringan terbatas pada bagian yang terganggu saja.<sup>[3]</sup>

## 2.2 Transformator Daya<sup>[4]</sup>

Trafo merupakan peralatan statis dimana rangkaian magnetik dan belitan yang terdiri dari 2 atau lebih belitan, secara induksi elektromagnetik, mentransformasikan daya (arus dan tegangan) sistem AC ke sistem arus dan tegangan lain pada frekuensi yang sama (IEC 60076 -1 tahun 2011).

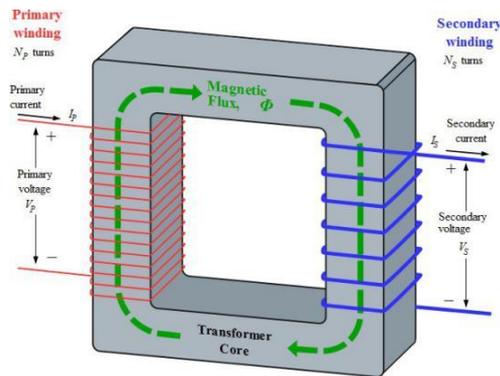


**Gambar 2.4** Prinsip Hukum Elektromagnetik

<sup>[3]</sup> Kadir, Abdul. 1998. *Transmisi Tenaga Listrik*. Jakarta : UIP. Hal 76.

<sup>[4]</sup> SK-DIR0250. 2014. *Buku Pedoman Pemeliharaan Proteksi dan Kontrol Transformator*. PT.PLN (Persero) : Jakarta. Hal 1.

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 induksi.



**Gambar 2.5** Elektromagnetik pada Trafo

Arus AC yang mengalir pada belitan primer membangkitkan flux magnet yang mengalir melalui inti besi yang terdapat diantara dua belitan, flux magnet tersebut menginduksi belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder akan terdapat beda potensial / tegangan induksi (Gambar 2.4).

Arus nominal pada transformator daya dapat ditentukan dengan persamaan berikut : <sup>[4]</sup>

Arus nominal pada sisi primer :

$$I_{N1} = \frac{S}{V_p \times \sqrt{3}} \dots\dots\dots (2.2)$$

Arus nominal pada sisi sekunder :

$$I_{N2} = \frac{S}{V_s \times \sqrt{3}} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana :

$I_{N1}$  = Arus nominal transformator daya sisi primer

$I_{N2}$  = Arus nominal transformator daya sisi sekunder

[4] Pusdiklat. 2009. *Perhitungan Setting Relai Proteksi Gardu Induk*. Bandung : PT. PLN (Persero). Hal. 83-84.

S = Daya pada transformator

V<sub>p</sub> = Tegangan pada sisi primer

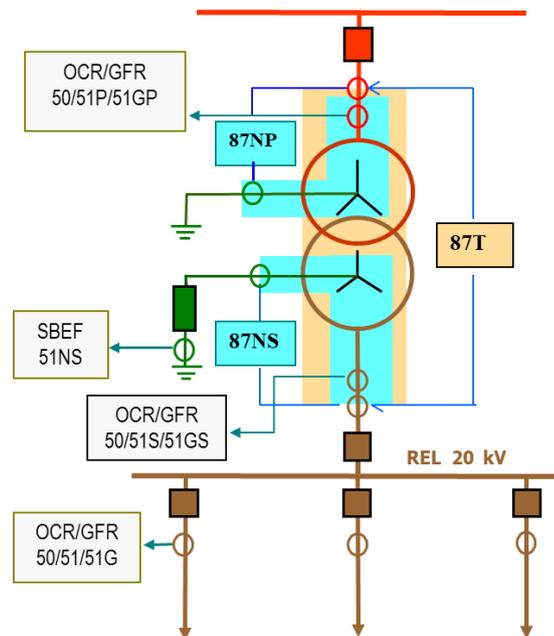
V<sub>s</sub> = Tegangan pada sisi sekunder

### 2.2.1 Daerah Pengaman Relai Proteksi Transformator Daya 150 kV/20kV

Proteksi utama adalah suatu sistem proteksi yang diharapkan sebagai prioritas untuk mengamankan gangguan atau menghilangkan kondisi tidak normal pada trafo tenaga. Proteksi tersebut biasanya dimaksudkan untuk memprakarsainya saat terjadinya gangguan dalam kawasan yang harus dilindungi. (IEC 15-05-025).<sup>[4]</sup>

Ciri-ciri pengaman utama :

- Waktu kerjanya sangat cepat seketika (*instantaneous*)
- Tidak bisa dikordinasikan dengan relai proteksi lainnya
- Tidak tergantung dari proteksi lainnya
- Daerah pengamanannya dibatasi oleh pasangan trafo arus, dimana relai differensial dipasang



**Gambar 2.6** Relai Proteksi pada Transformator Daya 150/20 kV



<sup>[4]</sup> Pusdiklat. 2009. *Perhitungan Setting Relai Proteksi Gardu Induk*. Bandung : PT. PLN (Persero). Hal. 6-7.

Proteksi cadangan adalah suatu sistem proteksi yang dirancang untuk bekerja ketika terjadi gangguan pada sistem tetapi tidak dapat diamankan atau tidak terdeteksinya dalam kurun waktu tertentu karena kerusakan atau ketidakmampuan proteksi yang lain (proteksi utama) untuk mengerjakan Pemutus tenaga yang tepat. Proteksi cadangan dipasang untuk bekerja sebagai pengganti bagi proteksi utama pada waktu proteksi utama gagal atau tidak dapat bekerja sebagaimana mestinya. (IEC 16-05-030).<sup>[4]</sup>

Ciri-ciri pengaman cadangan :

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

Pola Proteksi cadangan pada trafo tenaga umumnya terdiri dari OCR untuk gangguan fasa-fasa atau 3-fasa dan GFR untuk gangguan 1-fasa ketanah seperti dibawah ini :

**Tabel 2.1** Kebutuhan Fungsi Relai Proteksi Terhadap Berbagai Gangguan<sup>[5]</sup>

No	Jenis Gangguan	Proteksi		Akibat
		Utama	Back Up	
1	Hubung singkat di dalam daerah pengamanan trafo	Diferensial REF Bucholz Tangki Tanah Tek. Lebih	OCR GFR	Kerusakan pada isolasi, kumparan atau inti tangki mengembang
2	Hubung singkat diluar daerah pengamanan trafo	OCR GFR SBEF	OCR GFR	Kerusakan pada isolasi, kumparan atau NGR

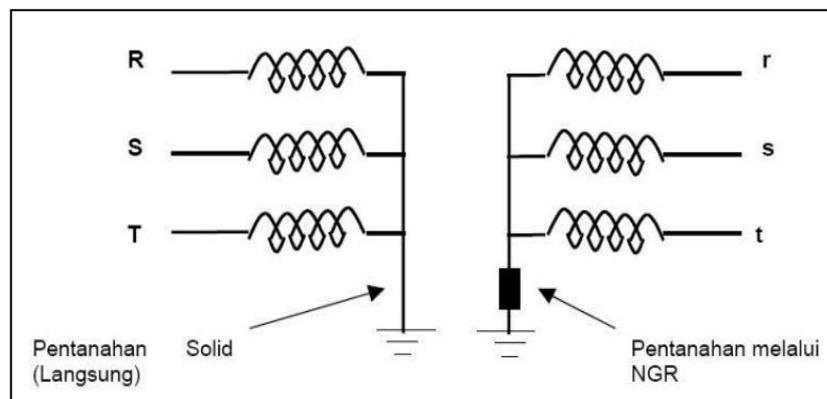
[4] Pusdiklat. 2009. *Perhitungan Setting Relai Proteksi Gardu Induk*. Bandung : PT. PLN (Persero). Hal. 9-10.

3	Beban Lebih	Relai Suhu	OCR	Kerusakan isolasi
4	Gangguan sistem pendingin	Relai Suhu	-	Kerusakan isolasi
5	Gangguan pada OLTC	Jansen Tek. Lebih	-	Kerusakan OLTC
6	Tegangan lebih	OVR LA	-	Kerusakan isolasi

### 2.2.2 *Neutral Grounding Resistance (NGR)*<sup>[6]</sup>

*Neutral Grounding Resistance (NGR)* adalah sebuah tahanan yang dipasang serial dengan netral sekunder pada transformator sebelum terhubung ke *ground*/tanah (antara titik netral trafo dengan pentanahan). Tujuan dipasangnya NGR adalah untuk mengontrol besarnya arus gangguan yang mengalir dari sisi netral ke tanah. Ada dua jenis NGR yang digunakan oleh PT.PLN (Persero) :

1. NGR jenis liquid, resistornya menggunakan larutan air murni yang ditampung di dalam bejana dan ditambahkan garam KOH untuk mendapatkan nilai resistansi yang diinginkan
2. NGR jenis solid, yaitu NGR jenis padat terbuat dari *Stainless Steel*, *FeCrAl*, *Cast Iron*, *Copper Nickel* atau *Nichrome* yang diatur sesuai nilai tahananannya.



**Gambar 2.7** Pentanahan Langsung dan Pentanahan Melalui NGR



[6] SK-DIR0250. 2014. *Buku Pedoman Pemeliharaan Proteksi dan Kontrol Transformator*. PT.PLN (Persero) : Jakarta. Hal. 13.

Pada umumnya nilai tahanan pentanahan lebih tinggi dari pada reaktansi sistem pada tempat dimana tahanan itu dipasang. Sebagai akibat besar arus gangguan fasa ke tanah pertama-tama dibatasi oleh tahanan itu sendiri. Dengan demikian pada tahanan itu akan timbul rugi daya selama terjadi gangguan pada fasa ke tanah. Secara umum harga tahanan yang ditetapkan pada hubung netral adalah :

$$R = \frac{E_f}{I} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

R = Tahanan (ohm)

E<sub>f</sub> = Tegangan fasa ke netral (V)

I = Arus beban penuh dalam ampere dari trafo (A)

### 2.3 Gangguan Hubung Singkat <sup>[1]</sup>

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

1. Gangguan hubungan singkat tiga fasa
2. Gangguan hubungan singkat dua fasa
3. Gangguan hubungan singkat satu fasa ke tanah

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

$$I = \frac{V}{Z} \dots\dots\dots$$

(2.5)

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)

[1] Affandi, Irfan. 2009. *Sistem Distribusi Tenaga Listrik*. Depok : Universitas Indonesia

### 2.3.1 Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat

Perhitungan arus gangguan hubung singkat adalah analisa suatu sistem tenaga listrik pada saat dalam keadaan gangguan hubung singkat, dimana nantinya akan diperoleh besar nilai besaran – besaran listrik yang dihasilkan sebagai akibat gangguan hubung singkat tersebut. Gangguan hubung singkat dapat didefinisikan sebagai gangguan yang terjadi akibat adanya penurunan kekuatan dasar isolasi (*basic insulation strength*) antara sesama kawat fasa, atau antara kawat fasa dengan tanah, yang menyebabkan kenaikan arus secara berlebihan atau biasa juga disebut gangguan arus lebih.

Perhitungan arus gangguan hubung singkat sangat penting untuk mempelajari sistem tenaga listrik baik pada waktu perencanaan maupun setelah beroperasi nantinya. Perhitungan arus hubung singkat dibutuhkan untuk :

- Setting dan koordinasi peralatan proteksi
- Menentukan kapasitas alat pemutus daya
- Menentukan rating hubung singkat peralatan – peralatan yang digunakan
- Menganalisa sistem jika ada hal – hal yang tidak baik yang terjadi pada waktu sistem sedang beroperasi.

Untuk menghitung arus gangguan hubung singkat pada sistem seperti diatas dilakukan dengan beberapa tahap perhitungan, yaitu sebagai berikut :

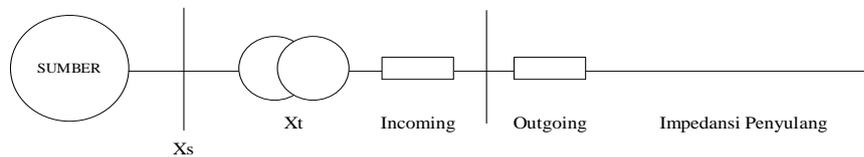
#### 2.3.1.1 Menghitung Impedansi

Dalam menghitung impedansi dikenal tiga macam impedansi urutan yaitu :

1. Impedansi urutan positif (  $Z_1$  ), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan positif.
2. Impedansi urutan negatif (  $Z_2$  ), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan negatif.

3. Impedansi urutan nol (  $Z_0$  ), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh urutan nol.

Sebelum 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.



**Gambar 2.8** Sketsa Penyulang Tegangan Menengah

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 :

$$S_{sc} = \sqrt{3} \times V_p \times I_{sc} \dots\dots\dots (2.9)$$

Dengan menyelesaikan persamaan diatas, maka dihasilkan :

$$X_s = \frac{V_p^2}{S_{sc}} \dots\dots\dots$$

(2.10)

Arus gangguan hubung singkat di sisi 20 kV diperoleh dengan cara mengkonversikan dulu impedansi sumber di bus 150 kV ke sisi 20 kV. Untuk



mengkonversikan Impedansi yang terletak di sisi 150 kV ke sisi 20 kV, dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$Xs(sisi\ 20\ kV) = \frac{Vs^2}{Vp^2} \times Xs(sisi\ 150\ kV) \dots\dots\dots$$

(2.11)

Dimana :

Vs = Tegangan sisi sekunder trafo tenaga (kV)

Vp = Tegangan sisi primer trafo tenaga (kV)

Isc = Arus hubung singkat sisi 150 kV (A)

Xs = Impedansi sumber (ohm)

Ssc = Data hubung singkat di bus 150 kV (MVA)

**b) Impedansi Transformator**

Pada perhitungan impedansi suatu transformator yang diambil adalah harga reaktansinya, sedangkan tahanannya 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 :

$$Xt(pada\ 100\%) = \frac{Vs^2}{S} \dots\dots\dots$$

(2.12)

Dimana :

Xt = Impedansi transformator tenaga (ohm)

Vp = Tegangan sisi sekunder trafo tenaga (kV)

S = Kapasitas daya trafo tenaga (MVA)

Lalu tahap selanjutnya yaitu mencari nilai reaktansi tenaganya :

- Untuk menghitung reaktansi urutan positif dan negatif ( $Xt1 = Xt2$ ) dihitung dengan menggunakan rumus :

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

(2.13)



- 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 :
  - Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan Y dimana kapasitas belitan delta sama besar dengan kapasitas belitan Y, maka  $X_{t0} = X_t \dots \dots \dots (2.14)$
  - Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan 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  $X_{t0} = 3x X_{t1}$ .
  - 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  $14 x X_t$ .

**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 :

- Urutan positif dan urutan negatif

$$Z1 = Z2 = \% \text{ panjang} \times \text{panjang penyulang (km)} \times Z1 / Z2 \text{ (ohm)} \dots \dots (2.15)$$

Dimana :

$$Z1 = \text{Impedansi urutan positif (ohm)}$$

$$Z2 = \text{Impedansi urutan negatif (ohm)}$$

- Urutan nol



$$Z_0 = \% \text{ panjang} \times \text{panjang penyulang (km)} \times Z_0 \text{ (ohm)} \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana :

$$Z_0 = \text{Impedansi urutan nol (ohm)}$$

**d) Impedansi Ekivalen**

Perhitungan yang akan dilakukan di sini adalah perhitungan besarnya nilai impedansi ekivalen 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  $Z_{1eq}$  dan  $Z_{2eq}$  dapat langsung dengan cara menjumlahkan impedansi tersebut, sedangkan untuk perhitungan  $Z_{0eq}$  dimulai dari titik gangguan sampai ke trafo tenaga yang netralnya ditanahkan. Akan tetapi untuk menghitung impedansi  $Z_{0eq}$  ini, harus diketahui dulu hubungan belitan trafonya. Sehingga untuk impedansi ekivalen jaringan dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

- Urutan positif dan urutan negative ( $Z_{1eq} = Z_{2eq}$ )

$$Z_{1eq} = Z_{2eq} = Z_{s1} + Z_{t1} + Z_1 \text{ penyulang} \dots\dots\dots(2.17)$$

Dimana :

$$Z_{1eq} = \text{Impedansi ekivalen jaringan urutan positif (ohm)}$$

$$Z_{2eq} = \text{Impedansi ekivalen jaringan urutan negatif (ohm)}$$

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

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

$$Z_1 = \text{Impedansi urutan positif dan negatif (ohm)}$$

- Urutan nol

$$Z_{0eq} = Z_{t0} + 3R_N + Z_0 \text{ penyulang} \dots\dots\dots(2.18)$$

Dimana :

$$Z_{0eq} = \text{Impedansi ekivalen jaringan nol (ohm)}$$

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

$$R_N = \text{Tahanan tanah trafo tenaga (ohm)}$$

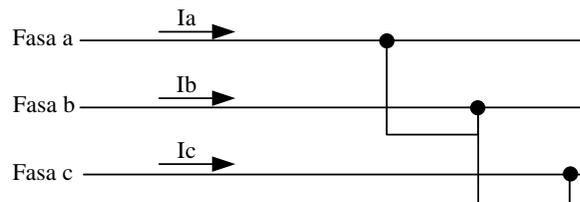
$$Z_0 = \text{Impedansi urutan nol (ohm)}$$

### 2.3.1.2 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

Gangguan ini adalah gangguan yang termasuk pada gangguan simetris, arus ataupun tegangan tiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Arus hubung singkat tiga fasa dapat dilihat pada Gambar 2.9 dibawah ini dan perhitungan arus hubung singkat tiga fasa adalah sebagai berikut :



**Gambar 2.9** Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

$$I_{3\text{fasa}} = \frac{E}{Z_{1eq}} \dots\dots\dots(2.19)^{[2]}$$

Dimana :

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

$E$  = Tegangan fasa - netral sistem 20 kV =  $\frac{20000}{\sqrt{3}}$  (V)

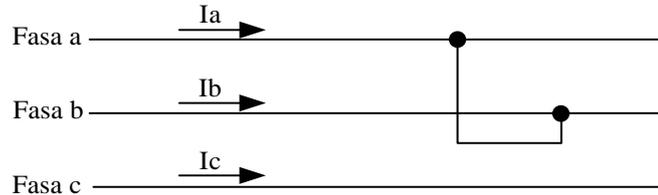
$Z_{1eq}$  = Impedansi ekivalen urutan positif (ohm)

#### b) Perhitungan arus gangguan hubung singkat antar fasa

Pada gangguan hubung singkat ini terjadi pada dua fasa tanpa terhubung ke tanah. Arus saluran tidak mengandung komponen urutan nol karena tidak ada

<sup>[2]</sup> Arismunandar, A. Susumu Kuwahara. 1993. *Teknik Tenaga Listrik Jilid.II Saluran Transmisi*. Jakarta : Pradnya Paramita. Hal. 73.

gangguan yang terhubung terhadap tanah. Arus hubung singkat antar fasa dapat dilihat pada Gambar 2.10 dibawah ini dan perhitungan arus hubung singkat antar fasa adalah sebagai berikut :



**Gambar 2.10** Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa

$$I_{2\text{fasa}} = \frac{E}{Z_{1eq} + Z_{2eq}} \dots\dots\dots(2.20)$$

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

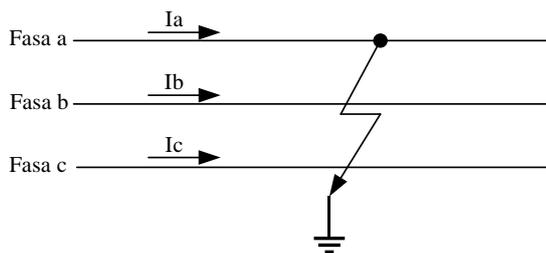
$$I_{2\text{fasa}} = \frac{E}{2 \times Z_{1eq}} \dots\dots\dots(2.21)$$

Dimana :

- $I_{2\text{fasa}}$  = Arus gangguan hubung singkat antar fasa (A)
- $E$  = Tegangan fasa - fasa sistem 20 kV = 20000 (V)
- $Z_{1eq}$  = Impedansi ekivalen urutan positif (ohm)

**c) Perhitungan arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah**

Pada hubung singkat ini besarnya arus hubung singkat tergantung pada sistem pentanahan yang di gunakan dan juga melibatkan 9 impedansi urutan nol ( $Z_0$ ). Arus hubung singkat satu fasa ke tanah dapat dilihat pada Gambar 2.11 dibawah ini dan perhitungan arus hubung singkat satu fasa ke tanah adalah sebagai berikut :



### Gambar 2.11 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Menurut Turan Gonen (1986 : 549 ) rumus untuk gangguan satu phasa ke tanah, yaitu:

$$I_{1\text{fasa}} = \frac{3 \times E}{Z_{1eq} + Z_{2eq} + Z_{0eq}} \dots\dots\dots(2.22)$$

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

$$I_{1\text{fasa}} = \frac{3 \times E}{2 \times Z_{1eq} + Z_{0eq}} \dots\dots\dots(2.23)$$

Dimana :

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

$E$  = Tegangan fasa - netral sistem 20 kV =  $\frac{20000}{\sqrt{3}}$  (V)

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

$Z_{0eq}$  = Impedansi urutan nol (ohm)

## 2.4 OCR (*Overcurrent Relay/Relai Arus Lebih*)

*Overcurrent Relay (OCR)* atau relai arus lebih adalah relai yang akan bekerja apabila arus yang mengalir melebihi arus *setting*. Relai ini di *setting* berdasarkan kemampuan peralatan ketika terjadi kenaikan arus agar tidak rusak, selain itu juga relai harus dapat bekerja pada jangka waktu yang telah ditentukan.

Relai ini bekerja untuk melindungi peralatan listrik lainnya akibat beberapa gangguan yang dapat menyebabkan arus lebih, diantaranya adalah gangguan beban lebih, gangguan tegangan lebih, dan gangguan hubung singkat.

### 2.4.1 Prinsip Kerja OCR (*Overcurrent Relay/Relai Arus Lebih*)

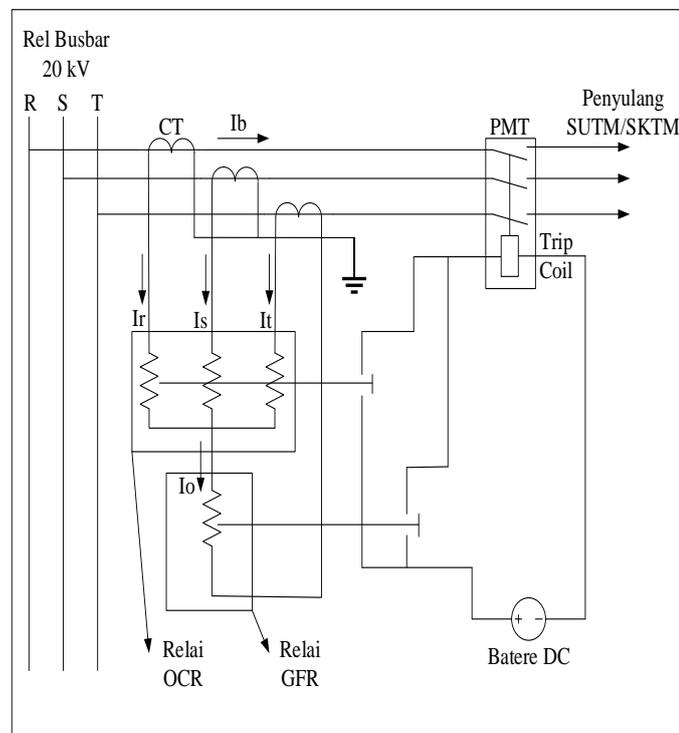
Prinsip kerja relai OCR adalah berdasarkan adanya arus lebih yang dirasakan relai dimana nilai arus melebihi arus *setting*, baik disebabkan adanya gangguan hubung singkat atau *overload* (beban lebih) untuk kemudian memberikan perintah trip ke PMT (pemutus tenaga) sesuai dengan karakteristik waktunya.

Berdasarkan pada prinsip kerja dan konstruksinya, maka relai jenis ini termasuk relai yang paling sederhana, murah dan mudah dalam penyetelannya.

Pada dasarnya relai arus lebih adalah suatu alat yang mendeteksi besaran arus yang melalui suatu jaringan dengan bantuan trafo arus. Harga atau besaran yang boleh melewatinya disebut dengan setting

Cara kerjanya dapat diuraikan sebagai berikut :

- Pada kondisi normal, arus beban ( $I_b$ ) mengalir pada SUTM / SKTM dan oleh transformator arus besaran arus ini di transformasikan ke besaran sekunder ( $I_r$ ). Arus ( $I_r$ ) mengalir pada kumparan relai tetapi karena arus ini masih lebih kecil daripada suatu harga yang ditetapkan (*setting*), maka relai tidak bekerja.
- Bila terjadi gangguan hubung singkat, arus ( $I_b$ ) akan naik dan menyebabkan arus ( $I_r$ ) naik pula, apabila arus ( $I_r$ ) naik melebihi suatu harga yang telah ditetapkan (diatas *setting*), maka relai akan bekerja dan memberikan perintah trip pada *tripping coil* untuk bekerja dan membuka PMT, sehingga SUTM /SKTM yang terganggu dipisahkan dari jaringan.



**Gambar 2.12** Rangkaian Pengawatan OCR pada Penyulang 20 kV



### 2.4.2 Fungsi & Penggunaan OCR (*Overcurrent Relay/Relai Arus Lebih*)

OCR (*Overcurrent Relay*) atau relai arus lebih ini berfungsi sebagai pengaman terhadap gangguan arus hubung singkat fasa-fasa maupun fasa tanah dan dapat digunakan sebagai :

- Pengaman utama penyulang (jaringan tegangan menengah)
- Pengaman utama untuk sistem tenaga listrik yang kecil dan radial
- Pengaman cadangan pada transformator, generator dan jaringan transmisi
- Pengaman utama motor listrik yang kecil

### 2.4.3 Karakteristik OCR (*Overcurrent Relay/Relai Arus Lebih*)<sup>[7]</sup>

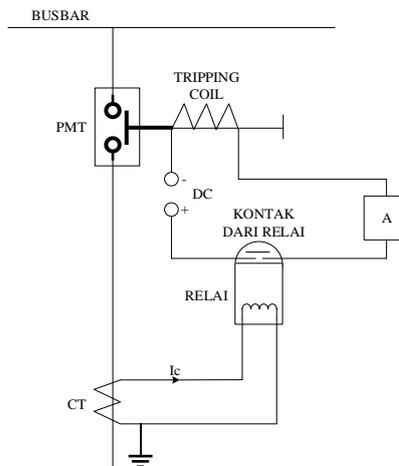
Jenis relai arus lebih berdasarkan karakteristik waktu kerjanya dibagi menjadi 3, yaitu :

#### a. Relai Arus Lebih Waktu Seketika (*Moment - Instantaneous*)

Relai arus lebih seketika adalah jenis relai arus lebih yang paling sederhana dimana jangka waktu kerja relai yaitu mulai saat relai mengalami pick-up sampai selesainya kerja relai sangat singkat yakni sekitar  $20 \approx 100$  mili detik tanpa adanya penundaan waktu.

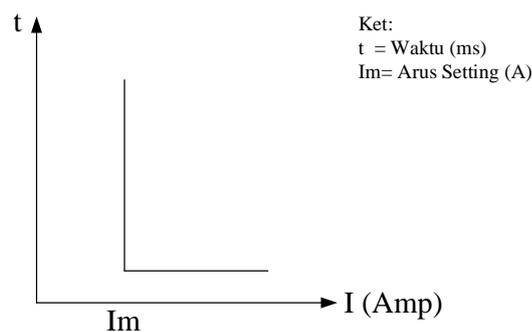
Bila karena suatu hal sehingga harga arus beban  $I$  naik melebihi harga yang diijinkan, maka harga  $I_r$  juga akan naik. Bila naiknya harga arus ini melebihi harga perasi dari relai, maka relai arus lebih seketika akan bekerja. Kerja dari relai ini ditandai dengan bergeraknya kontraktor gerak relai untuk menutup kontak. Dengan demikian, rangkaian pemutus/trip akan tertutup.

Mengingat pada rangkaian ini terdapat sumber arus searah, maka pada kumparan pemutus akan dialiri arus searah yang selanjutnya akan mengerjakan kontak pemutus sehingga bagian sistem yang harus diamankan terbuka. Untuk mengetahui bahwa relai harus bekerja, maka perlu dipasang suatu alarm.



**Gambar 2.13** Relai Arus Lebih Waktu Seketika

[7] Tasiyam, F.J. 2017. Proteksi Sistem Tenaga Listrik. Yogyakarta : Teknosain. Hal 175-179.



**Gambar 2.14** Karakteristik Relai Waktu Seketika

b. Relai Arus Lebih Waktu Tertentu (*Definite Time*)

Relai arus lebih waktu tertentu adalah jenis relai arus lebih di mana jangka waktu relai mulai pick-up sampai selesainya kerja relai dapat diperpanjang dengan nilai tertentu dan tidak tergantung dari besarnya arus yang mengerjakannya (tergantung dari besarnya arus setting, melebihi arus setting maka waktu kerja relai ditentukan oleh waktu settingnya).

Dengan memasang relai kelambatan waktu  $T$  (*Time Lag Relay*) seperti gambar 2.15, maka beroperasinya rangkaian relai akan tergantung pada penyetelan/setting waktu pada relai kelambatan waktunya. Sedangkan karakteristik kerjanya dapat dilihat pada gambar 2.16. Dengan pemasangan relai kelambatan waktu, maka pengamanan akan bekerja bila dipenuhi kondisi sebagai berikut :

$$t_{tr} = t_{mg} + t_{pr} + t_{pp} \dots\dots\dots(2.24)$$

Dimana :

$t_{tr}$  = waktu total relai mulai terjadinya gangguan sampai dengan pemutus bekerja

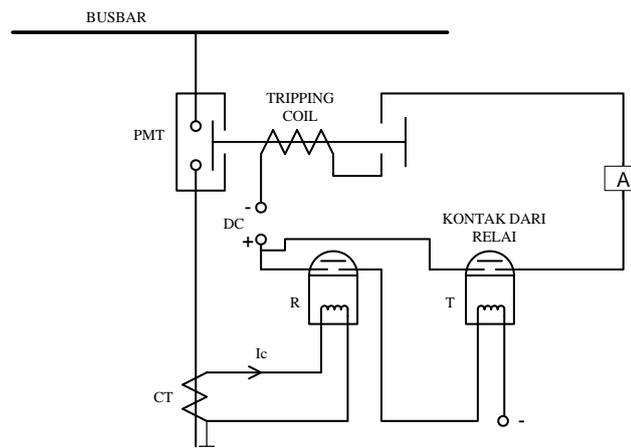
$t_{mg}$  = waktu mulai terjadinya gangguan sampai dengan relai pick-up

$t_{pr}$  = waktu penundaan kerja relai

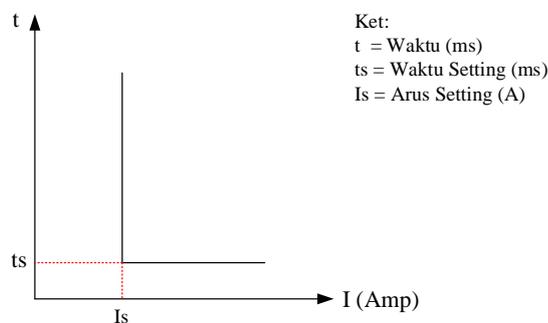
$t_{pp}$  = waktu yang dibutuhkan pemutus bekerja.

Pada umumnya range setting untuk relai definite time adalah antara 0,9 – 1,8  $I_n$  sedangkan untuk waktu operasinya dari 0,1 detik sampai 4 detik. Setting tersebut sudah memenuhi pertimbangan berikut:

- ✓ Tidak mendeteksi keadaan *overload*
- ✓ Memberikan *back-up protection* bagi *outgoing feeder*.
- ✓ *drop off / pick up ratio* dari relai



**Gambar 2.15** Relai Arus Lebih Waktu Tertentu

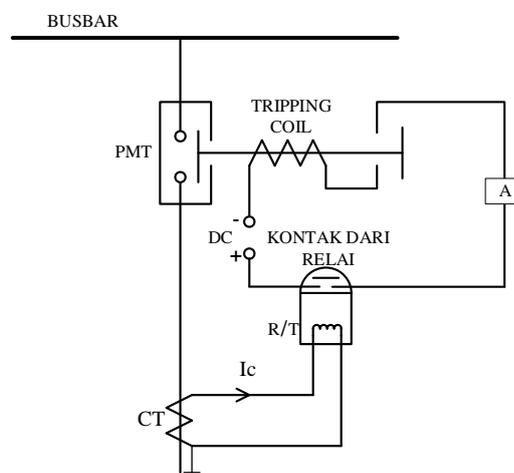


**Gambar 2.16** Karakteristik Relai Waktu Tertentu

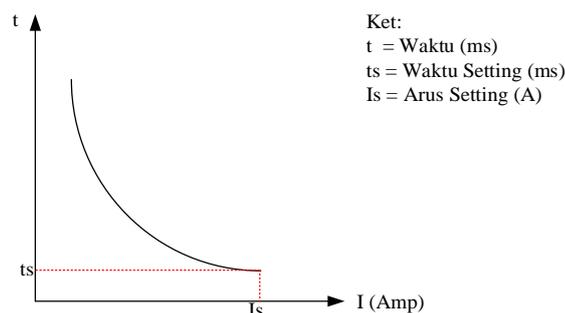
c. Relai Arus Lebih Waktu Terbalik (*Invers Time*)

Relai yang waktunya kerjanya tergantung dari arus gangguan. Relai ini akan memberikan perintah kepada PMT pada saat terjadi gangguan bila besar gangguannya melampaui arus penyetelannya dan jangka waktu relai ini mulai pick up sampai kerja waktunya diperpanjang berbanding terbalik dengan besarnya arus.

Sifat atau karakteristik dari relai inverse adalah relai baru akan bekerja bila yang mengalir pada relai tersebut melebihi besarnya arus setting ( $I_s$ ) yang telah ditentukan. Dan lamanya waktu relai bekerja untuk memberikan komando trpping adalah paling lambat sesuai dengan waktu setting ( $t_s$ ) yang dipilih. Pada relai ini waktu bekerjanya ( $t_{trip}$ ) tidak sama dengan waktu setting ( $t_s$ ).



**Gambar 2.17** Relai Arus Lebih Waktu Terbalik (*Invers Time Relay*)



**Gambar 2.18** Karakteristik Relai Waktu Terbalik/*IDMT Overcurrent Relays*

Karena sangat tergantung dengan besarnya arus yang mengerjakan relai tersebut, sehingga makin besar arus yang mengerjakan relai tersebut maka makin cepat waktu kerja ( $t_{trip}$ ) dari relai tersebut.



Relai arus lebih waktu terbalik juga disebut sebagai relai arus lebih waktu tertentu minimum terbalik (*Invers Definite Minimum Time Overcurrent Relays*). Karena relai arus lebih waktu terbalik biasanya memang dikombinasikan dengan relai arus lebih waktu tertentu.

Karakteristik ini bermacam-macam dan setiap pabrik dapat membuat karakteristik yang berbeda-beda, karakteristik berdasarkan waktunya dibedakan dalam tiga kelompok berdasarkan IEC 60255 :

#### 1. Berbanding Terbalik (*Standard inverse*)

- Keakuratan waktu operasi relai ini dapat berkisar dari 5 hingga 7,5% dari waktu operasi nominal sebagaimana ditentukan dalam aturan yang relevan.
- Ketidakpastian waktu pengoperasian dan waktu pengoperasian yang diperlukan mungkin memerlukan batas waktu *setting* 0,4 hingga 0,5 detik.

#### 2. Sangat Berbanding Terbalik (*Very inverse*)

- Memberikan garis kurva waktu terbalik nya lebih besar dari relai arus lebih waktu terbalik (*Inverse Time Overcurrent Relays*).
- Digunakan di mana ketika ada pengurangan arus gangguan, karena jarak dari sumber meningkat.
- Sangat efektif dengan gangguan tanah karena karakteristiknya yang curam.
- Cocok digunakan jika ada pengurangan besar arus gangguan karena jarak gangguan dari sumber daya meningkat.
- Karakteristik ini sangat cocok jika arus hubung singkat turun dengan cepat dengan jarak dari gardu.
- Batas penilaian (waktu *setting*) dapat dikurangi hingga nilai dalam kisaran 0,3 hingga 0,4 detik ketika relai arus berlebih dengan karakteristik ini digunakan.

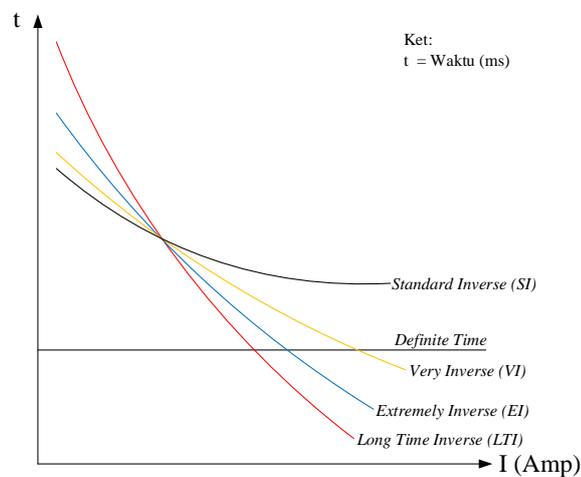
#### 3. Sangat Berbanding Terbalik Sekali (*Extremely inverse*)

- *Extremely Invers* memiliki karakteristik lebih terbalik dari *Inverse Time Overcurrent Relays* dan *very inverse overcurrent relay*.
- Cocok untuk perlindungan mesin terhadap panas berlebih.

- Penggunaan relai arus berlebih ini memungkinkan untuk menggunakan waktu tunda yang singkat meskipun arus *switching* yang tinggi.
- Digunakan saat gangguan saat ini terlepas dari perubahan normal pada kapasitas generator.

#### 4. Long Time Inverse

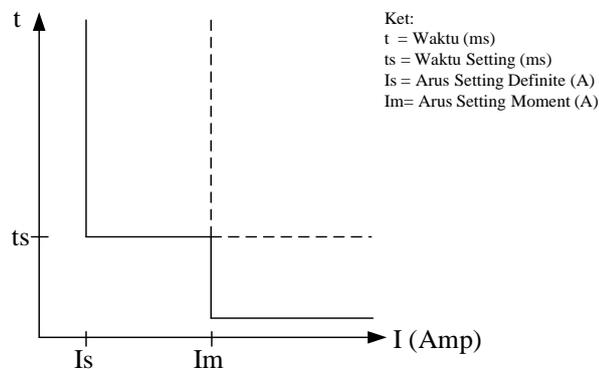
Aplikasi utama karakteristik ini adalah sebagai proteksi cadangan terhadap gangguan tanah (*earth fault*).



**Gambar 2.19** Perbandingan Karakteristik SI-VI-EI-LTI

#### d. Kombinasi Relai Arus Lebih Waktu Seketika (*Instantaneous Overcurrent Relay*)

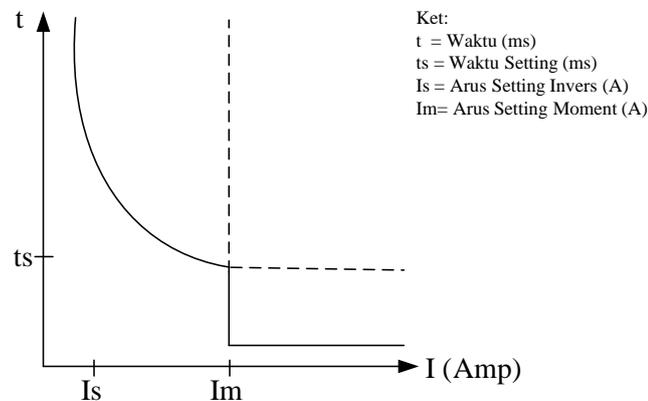
- Kombinasi Relai Arus Lebih Waktu Seketika dengan Waktu Tertentu



**Gambar 2.20** Karakteristik Relai Arus Lebih *Instantaneous* & *Definite*

Relai ini bekerja dengan perpaduan 2 karakteristik. Apabila arus yang melewati melebihi  $I_{\text{setting}}$  relai *instant* dan *definite*, maka kedua karakteristik tersebut sama – sama bekerja tetapi relai *instant* lebih cepat bekerja maka indikasi relai menunjukkan *instant* sedangkan apabila arus yang melewati melebihi  $I_{\text{setting}}$  relai definit tetapi dibawah  $I_{\text{setting}}$  instant maka yang merasakan dan bekerja adalah karakteristik relai *definite* sedangkan karakteristik relai *instant* tidak bekerja.

➤ Kombinasi Relai Arus Lebih Waktu Seketika dengan Waktu Terbalik



**Gambar 2.21** Karakteristik Relai Arus Lebih *Instantaneous & Invers*

Relai ini bekerja dengan perpaduan 2 karakteristik. Apabila arus yang melewati melebihi  $I_{\text{setting}}$  relai *instant* dan *inverse*, maka kedua karakteristik tersebut sama – sama bekerja tetapi relai *instant* lebih cepat bekerja maka indikasi relai menunjukkan *instant* sedangkan apabila arus yang melewati melebihi  $I_{\text{setting}}$  relai *inverse* tetapi dibawah  $I_{\text{setting}}$  *instant* maka yang merasakan dan bekerja adalah karakteristik relai *inverse* sedangkan karakteristik relai *instant* tidak bekerja.

## 2.5 GFR (*Ground Fault Relay/Relai Gangguan Tanah*)<sup>[4]</sup>

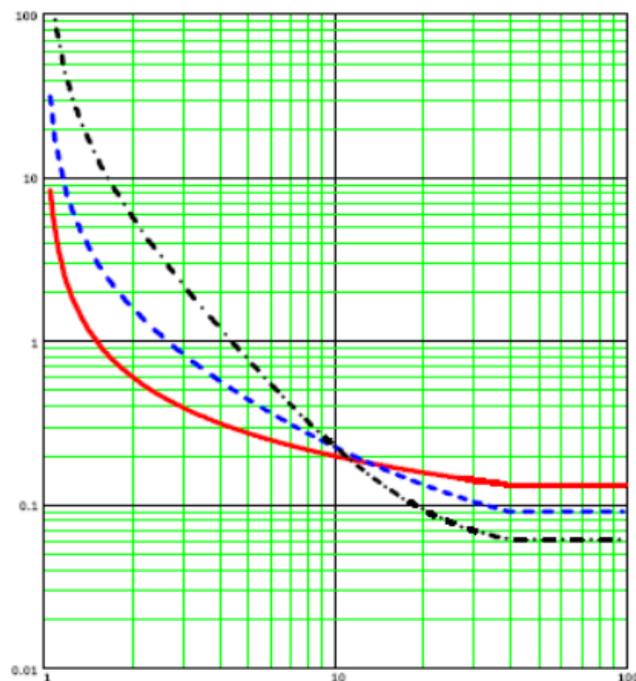
Prinsip kerja GFR sama dengan OCR yaitu berdasarkan pengukuran arus, dimana relai akan bekerja apabila merasakan arus diatas nilai settingnya. GFR dirancang sebagai pengamanan cadangan trafo jika terjadi gangguan hubung

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.

Karakteristik waktu kerja terdiri dari :

- Definite
- Normal/Standar inverse
- Very inverse
- Long time inverse

[4] Pusdiklat. 2009. *Perhitungan Setting Relai Proteksi Gardu Induk*. Bandung : PT. PLN (Persero). Hal. 12.



**Gambar 2.22** Kurva / Karakteristik Relai

Relai ini digunakan untuk mendeteksi gangguan fasa – tanah, sehingga karakteristik waktu yang dipilih cenderung lebih lambat daripada waktu OCR. Pada GFR setting highset diblok, kecuali untuk tahanan 500 ohm di sisi sekunder trafo.

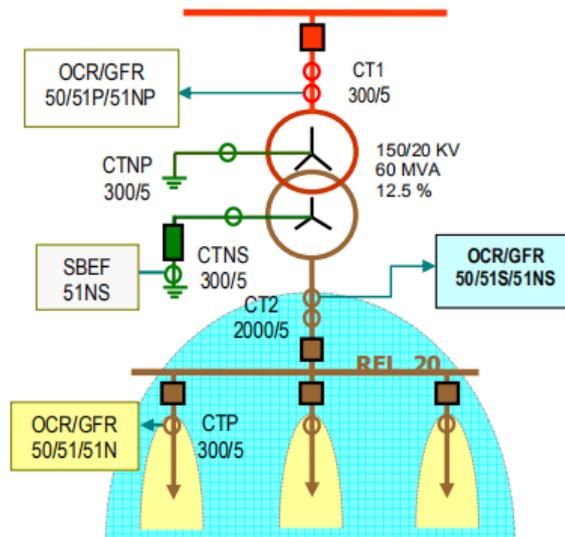
## 2.6 Koordinasi Setting (OCR,GFR& SBEF) Trafo dan Penyulang<sup>[4]</sup>

### 2.6.1 Setting OCR Sisi Sekunder Trafo (Incoming – 50/51)

#### a) Arus Kerja Minimum

Fungsi OCR incoming adalah sebagai pengaman cadangan trafo tenaga terhadap gangguan hubung singkat fasa-fasa eksternal yaitu gangguan pada jaringan TM, namun demikian untuk gangguan-gangguan yang besar (gangguan di Busbar sisi TM) atau dekat sekali dengan trafo tenaga harus secepat mungkin dieliminir sehingga tidak berdampak yang lebih serius pada trafo tenaga.

[4] Pusdiklat. 2009. *Perhitungan Setting Relai Proteksi Gardu Induk*. Bandung : PT. PLN (Persero). Hal. 104-111.



**Gambar 2.23** Daerah kerja proteksi OCR incoming

Setting arus kerja berdasarkan kemampuan trafo :

$$I_{s1} = 1,2 \times I_{nom \text{ trafo}} \dots\dots\dots (2.25)$$

Setting arus kerja berdasarkan kemampuan peralatan terkecil (CT, Kabel, PMT) :

$$I_{s1} = 1,2 \times I_{peralatan \text{ terkecil}} \dots\dots\dots (2.26)$$

Dipilih nilai terkecil  $I_s = \{ I_{s1} \cdot (I_{s1} < I_{s2}) + I_{s2} \cdot (I_{s2} < I_{s1}) \}$  (A primer)

Dalam Besaran Sekunder



$$I_{set} = \left( I_s \times \frac{I_n}{CT} \right) \text{ A (Sekunder) ..... (2.27)}$$

Tap value setting sesuai range yang ada pada relai tap =  $\frac{I_n}{CT}$

b) Waktu dan Karakteristik kerja

Setting waktu kerja harus memperhatikan ketahanan trafo terhadap besaran arus gangguan yang akan terjadi. Untuk menjamin trafo tahan terhadap gangguan maksimum, maka waktu kerja dipilih antara 0.7 – 1 detik untuk gangguan maksimum. Gangguan maksimum dipilih untuk gangguan fasa-fasa yang terjadi pada busbar TM. Untuk fleksibilitas dalam mengkoordinasikan dengan relai penyulang di GI dan GH, maka dipilih karakteristik waktu kerja jenis Normal/Standar inverse, maka setting *time dial* dapat dipilih sesuai kurva yang dipilih :

Untuk kurva standar inverse (SI) :

$$Td = \frac{\left( \frac{I_{hs}}{I_s} \right)^{0,02} - 1}{0,14} t \text{ .....(2.28)}$$

Dimana :

I<sub>hs</sub>= Hubung singkat maksimum 2-fasa di busbar TM

I<sub>s</sub> = Setting arus kerja dalam A primer

t = waktu kerja yang diinginkan untuk gangguan maks yaitu antara 0.7 – 1 detik.

c) Arus Momen (*High Set*)

Setting arus moment pada hakekatnya untuk mengantisipasi bila terjadi gangguan yang sangat besar pada busbar TM dan dikhawatirkan trafo tenaga tidak tahan terlalu lama sesuai setting kurva waktunya, maka pada kondisi seperti itu gangguan harus segera dieliminir seketika atau lebih cepat yaitu dengan high set . Setelan arus high set di incoming dapat diaktifkan bila setelan waktunya dapat diatur, tetapi bila setelan waktu high set tersebut tidak dapat diatur maka tidak diaktifkan.

Arus kerja moment maksimum :



$$I_{momen} = 0,8 \times 0,5 \times ( I_n \text{ trafo} \times \left( \frac{1}{Z_t(pu)} \right) ) \dots\dots\dots(2.29)$$

Setting Waktu Kerja :

$$T_{mom} = 0,3 - 0,5 \text{ detik (definite) } \dots\dots\dots(2.30)$$

### 2.6.2 Setting GFR Sisi Sekunder ( Incoming TM )

a) Arus kerja minimum gangguan tanah

Fungsi GFR incoming adalah sebagai pengaman cadangan trafo tenaga terhadap gangguan hubung singkat 1-fasa ketanah eksternal yaitu gangguan pada jaringan TM

Setting arus kerja berdasarkan kemampuan trafo :

$$I_{sg1} = ( 0,2 - 0,3 ) \times I_{nom \text{ trf MV}} \dots\dots\dots (2.31)$$

Setting arus kerja berdasarkan kemampuan peralatan terkecil (CT, PMT, NGR dan kabel), adalah :

$$I_{sg2} = ( 0,2 - 0,3 ) \times I_n \text{ peralatan terkecil} \dots\dots\dots (2.32)$$

Dipilih nilai terkecil  $I_{gs} = \{ I_{sg1} \cdot ( I_{sg1} < I_{sg2} ) + I_{sg2} \cdot ( I_{sg2} < I_{sg1} ) \}$  (A primer)

Dalam Besaran Sekunder

$$I_{set \ g} = \left( I_{sg} \times \frac{I_n}{CT20} \right) \dots\dots\dots (2.33)$$

$$\text{Tap value setting sesuai range yang ada pada relai tap } g = \frac{I_{setg}}{I_n}$$

b) Setting Waktu dan Karakteristik kerja

Setting waktu kerja harus memperhatikan ketahanan NGR terhadap besaran arus gangguan yang akan terjadi. Untuk menjamin NGR dengan tahanan 40Ω, dalam waktu 5 detik , maka waktu kerja dipilih antara 1 – 4 detik untuk gangguan maksimum. Untuk fleksibilitas dalam mengkoordinasikan dengan relai penyulang di GI dan GH, maka dipilih karakteristik waktu kerja jenis inverse atau definite time,

➤ Tahanan Rendah, NGR 40 Ohm, 300 A, 10 detik.

Jenis : relai gangguan tanah



- Karakteristik : Long Time Inverse
- Setelan arus : 0.2 – 0.3 x In NGR
- Setelan waktu : ≤ 40 % x ketahanan termis NGR, pada If=300 A
- Setelan arus high-set : tidak diaktifkan

➤ Tahanan Rendah, NGR 12 Ohm, 1000 A, 10 detik.

- Jenis relai : relai gangguan tanah
- Karakteristik : standard inverse
- Setelan arus : (0.2 – 0.3) x In Trafo
- Setelan waktu : 1 detik untuk Ihs maks. = 1000 A
- Setelan arus highset : tidak diaktifkan

➤ Pentanahan langsung (solid)

- Jenis relai : relai gangguan tanah tidak berarah
- Karakteristik : standard inverse
- Setelan arus : maksimum 0.4 X arus nominal trafo
- Setelan waktu : maks 0.7 detik untuk gangguan di bus 20 kV
- Setelan arus highset : maks 4 x In trafo
- Setelan waktu highset : - waktu tunda 300ms untuk pola kaskade  
- instant untuk pola non-kaskade

Untuk kurva standar inverse (SI) :

$$Tdg = \frac{\left(\frac{Ihs}{Isg}\right)^{0,02} - 1}{0,14} tg \dots\dots\dots(2.34)$$

Dimana :

Ihs= Hubung singkat maksimum 2-fasa di busbar TM

Isg=Setting arus kerja GFR dalam A primer

t =waktu kerja yang diinginkan untuk gangguan maks yaitu antara 0.7 – 1.2 detik.

c) Setting Arus Momen (*High Set*)

Setelan moment hanya dipakai pada sistem pentanahan langsung (*solid grounded*), sedangkan dalam sistem pentanahan dengan tahanan tinggi / rendah, setting momen tidak diperlukan (di blok) karena arus hubung singkat 1-fasa relatif lebih kecil dan aman terhadap ketahanan trafo tenaga

### 2.6.3 Setting OCR Sisi Primer 150 kV

#### a) Arus Kerja Minimum

Fungsi OCR sisi primer 150 kV adalah sebagai pengaman cadangan ke-dua trafo tenaga terhadap gangguan hubung singkat fasa-fasa eksternal yaitu gangguan pada jaringan TM.

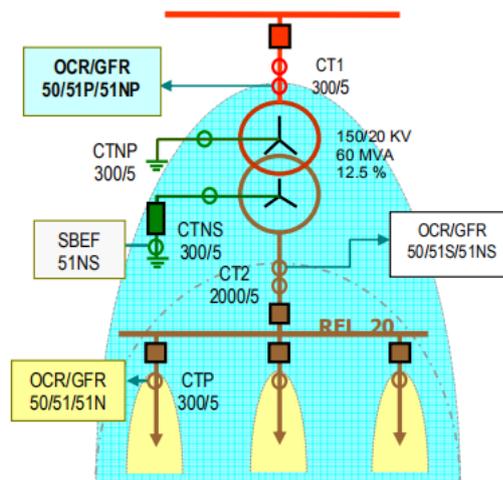
Setting arus kerja berdasarkan kemampuan trafo :

$$I_{s1} = 1,2 \times I_{nom \text{ trf } 150} \dots\dots\dots (2.35)$$

Dalam Besaran Sekunder

$$I_{set} = \left( I_s \times \frac{I_n}{CT_{150}} \right) \text{ A (Sekunder) } \dots\dots\dots (2.36)$$

$$\text{Tap value setting sesuai range yang ada pada relai tap} = \frac{I_{set}}{CT}$$



**Gambar 2.24** Daerah kerja proteksi OCR sisi 150 kV

#### b) Waktu dan Karakteristik kerja



Setting waktu kerja harus memperhatikan ketahanan trafo terhadap besaran arus gangguan yang akan terjadi. Untuk menjamin trafo tahan terhadap gangguan maksimum (standar 2 detik), maka waktu kerja dipilih antara 1.2 – 1.5 detik untuk gangguan maksimum. Gangguan maksimum dipilih untuk gangguan fasa-fasa yang terjadi pada busbar 20 kV.

Untuk kurva standar inverse (SI) :

$$Td = \frac{\left(\frac{Ihs}{Is}\right)^{0,02} - 1}{0,14} t \dots\dots\dots(2.37)$$

Dimana :

Ihs= Hubung singkat maksimum 2-fasa di busbar 20 kV

Is = Setting arus kerja dalam A primer

t = waktu kerja yang diinginkan untuk gangguan maks yaitu antara 1.2 – 1.5 detik.

c) Arus Momen (*High Set*)

Setting arus moment pada hakekatnya untuk mengantisipasi bila terjadi gangguan yang sangat besar pada bagian primer trafo (sisi 150kV), walaupun ada pengaman utama trafo, tetapi high set ini dapat membantu mengamankan trafo tersebut.

Arus kerja moment harus mempertimbangan prediksi hubung singkat maks berdasarkan impedansi trafo, yaitu :

$$Im = \left( K1x \frac{In150}{Xt.CT150} \right) \dots\dots\dots (2.38)$$

Dimana :

K1 = Konstanta waktu untuk priode 1/12 cycle, K1 = 1.5

Xt = Impedansi hubung singkat trafo

I150 = Arus nominal trafo sisi 150 kV

Tipikal setting momen trafo sisi 150 kV adalah  $Im = 8 \times Iset$  atau diblok.

**2.6.4 Setting GFR Sisi Primer 150 kV**

a) Arus kerja minimum gangguan tanah



Fungsi GFR netral adalah sebagai pengaman cadangan ke-dua Trafo tenaga terhadap gangguan hubung singkat 1-fasa internal maupun gangguan eksternal Kontribusi arus hubung singkat 1 fasa kepada konfigurasi kumparan delta (tersier winding) karena akan mengalir kontribusi arus urutan nol pada saat terjadi hubung singkat 1-fasa di sisi 150 kV yang besarnya tergantung kepada jarak lokasi gangguan dengan posisi trafo.

Oleh karena, dalam penentuan waktu kerja GFR sisi primer trafo harus dikoordinasikan dengan waktu kerja zone-2 distance relay di penghantar.

Setting arus kerja GFR untuk trafo dengan delta winding

$$I_s = (0,5 - 0,7) \times I_{nom\ trf\ 150} \dots\dots\dots (2.39)$$

Setting arus kerja GFR yang tidak dilengkapi delta winding

$$I_s = 0,2 \times I_{nom\ trf\ 150} \dots\dots\dots (2.40)$$

Untuk mendapatkan arus dalam besaran sekunder, dibagi ratio CT :

$$I_{set} = \left( I_{sg} \times \frac{I_n}{CT150} \right) \dots\dots\dots (2.41)$$

$$\text{Tap value setting sesuai range yang ada pada relai tap} = \frac{I_{set}}{I_n}$$

b) Setting Waktu dan Karakteristik kerja

Waktu kerja harus memperhatikan ketahanan trafo terhadap besaran arus gangguan yang akan terjadi dan juga harus dikoorinasikan dengan relain GFR / zone-2 Distance relai gangguan tanah, maka untuk mendapatkan selektifitas harus memenuhi persyaratnya sbb :

$$T_{GFR} > T_{zone-2} \rightarrow \text{untuk gangguan di penghantar}$$

$$T_{GFR} < T_{zone-2} \rightarrow \text{untuk gangguan di bay trafo}$$

Untuk kurva standar inverse (SI) :

$$T_{dg} = \frac{\left( \frac{I_{hs}}{I_{sg}} \right)^{0,02} - 1}{0,14} t_g \dots\dots\dots (2.42)$$



Dimana :

I<sub>hs</sub>= Hubung singkat maksimum 2-fasa di busbar 150 kV

I<sub>sg</sub>=Setting arus kerja dalam A primer

t =waktu kerja yang diinginkan untuk gangguan maks yaitu antara 1.0 – 1.5 detik.

➤ Dengan pentanahan langsung/solid, tanpa belitan delta/Yy Tipe Core

Jenis relai : relai gangguan tanah tidak berarah

Karakteristik : standard inverse

Setelan arus : 0.2 x arus nominal trafo

Setelan waktu :  $\Delta t = 0.3 - 0.5$  detik dari tincoming  
(direkomendasikan  $\Delta t = 0.5$  detik ) untuk gangguan  
di bus 20 kV

Setelan arus highset : tidak diaktifkan

Setelan waktu highset : tidak diaktifkan

➤ Dengan pentanahan langsung/solid, dilengkapi belitan delta/ Yy Tipe Shell:

Jenis relai : relai gangguan tanah tidak berarah

Karakteristik : standard inverse

Setelan arus : (0.5 - 0.7) x arus nominal trafo

Setelan waktu : 1.2 detik (untuk yang pentanahan di sisi 20 KV  
solid) dan 1.5 detik (untuk yang pentanahan di sisi 20  
KV dengan NGR) untuk gangguan di bus 20 kV

Setelan arus highset : tidak diaktifkan

Setelan waktu highset : tidak diaktifkan

Setelan arus moment untuk GFR sisi primer tidak diperlukan (blok).

### 2.6.5 Setting *Stand By Earth Fault* (SBEF) 20 kV

a) Arus kerja minimum gangguan tanah

Fungsi SBEF (stand by Earth Fault) sisi netral 20 kV , pada dasarnya merupakan pengaman NGR akibat gangguan 1-fasa ketanah pada jaringan SUTM.

Setting arus kerja berdasarkan kemampuan trafo :

$$ISE1F = (0.2) \times I_{nom} \text{ NGR}$$



$$ISEF2 = (0.1) \times Inom \text{ Trafo}$$

Dipilih nilai terkecil

Dalam besaran sekunder :

$$Iset \text{ SEF} = \left( Isef \times \frac{In}{CTN20} \right) \dots\dots\dots (2.43)$$

$$\text{Tap value setting sesuai range yang ada pada relai tap } g = \frac{Isef}{In}$$

b) Setting Waktu dan Karakteristik kerja

Setting waktu kerja harus memperhatikan ketahanan NGR terhadap besaran arus gangguan yang akan terjadi, ssesuai kurva ketahanan thermisnya Untuk NGR dengan tahanan 40Ω, ketahanan NGR mampu 5 detik pada rating nominalnya (300 A), maka waktu kerja dipilih antara 2 – 5 detik untuk gangguan maksimum.

Pada gangguan 1-fasa yang relatif kecil disarankan NGR dapat mendeteksi gangguan, tetapi waktu kerjanya lama. Untuk itu maka kurva karakteristik waktunya dipilih long time inverse.

➤ Tahanan Tinggi, NGR 500 Ohm, 30 detik.

- Jenis : relai gangguan tanah tak berarah
- Karakteristik : Long Time Inverse (LTI)/ Definite
- Setelan arus : (0.2 – 0.3) x In NGR
- Setelan waktu : 1. ≤ 8 detik (LTI) trip sisi incoming dan 10 detik untuk sisi 150 KV pada If=25 A untuk NGR yang mempunyai t = 30 detik
- 2. Apabila belum ada relai dengan karakteristik LTI maka menggunakan definite, t1=10 detik (trip sisi 20 kV) dan t2 = 13 detik (trip sisi 150 kV).

➤ Tahanan Rendah, NGR 40 Ohm, 300 A, 10 detik.

- Jenis : relai gangguan tanah (SBEF, simbol 51NS)
- Karakteristik : Long Time Inverse
- Setelan arus : (0.3 – 0.4) x In NGR



Setelan waktu :  $\leq 50\%$  x ketahanan termis NGR, pada  $I_f=300$  A

Setelan arus high-set : tidak diaktifkan

➤ Tahanan Rendah, NGR 12 Ohm, 1000 A, 10 detik.

Jenis relai : relai gangguan tanah tak berarah (SBEF, 51NS)

Karakteristik : long time inverse

Setelan arus :  $(0.1 - 0.2) \times I_n$  NGR

Setelan waktu :  $\leq 50\%$  x ketahanan termis NGR, pada  $I_f=1000$  A

Setelan arus highset : tidak diaktifkan

Formula kurva LTI :

$$Tdg = \frac{\left(\frac{I_{hs}}{I_{sg}}\right)^{-1}}{120} tg \dots\dots\dots(2.44)$$

Dimana :

$I_{hs}$ = Hubung singkat maksimum 1-fasa di busbar 20 kV

$I_{sg}$ =Setting arus kerja dalam A primer

$t$  =waktu kerja yang diinginkan untuk gangguan maks yaitu antara 3 – 5 detik.

c) Arus Momen (*High Set*)

Setelan moment hanya dipakai pada sistem pentanahan langsung (solid grounded), sedangkan dalam sistem pentanahan dengan tahanan tinggi / rendah, setting momen tidak diperlukan (di blok) karena arus hubung singkat 1-fasa relatif lebih kecil dan aman terhadap ketahanan trafo tenaga.

**2.7 Pengenalan Software Mathcad 2000 15.0**

Mathcad adalah suatu program aplikasi matematika berbasis Windows yang mempunyai unjuk kerja tinggi dalam menangani berbagai macam persamaan, angka, teks, maupun grafik. Menyelesaikan problem-problem matematika dengan menggunakan Mathcad adalah pekerjaan yang menyenangkan, karena dengan Mathcad kita akan mendapati media dan proses penyelesaian masalah sebagaimana kita menyelesaikannya dengan cara manual, yaitu menggunakan secarik kertas dan

sebuah pena. Layar interface dari Mathcad merupakan worksheet (lembar kerja) kosong, yang mana pada worksheet tersebut kita bisa mengetikkan persamaan, data grafik, fungsi, teks, dan sebagainya dengan cara yang mudah.<sup>[4]</sup>

Dalam sistem proteksi sendiri pengelolaan sistemnya sekarang sudah menggunakan sebuah *software* pendukung yang dapat mengelola sistem secara terprogram untuk memudahkan pengelolaan sistem tersebut. PT. PLN (persero) Unit Pelaksana Transmisi (UPT) Palembang sendiri menggunakan sebuah *software* resmi yang bernama Mathcad. Berdasarkan Buku *User Guide Mathcad 14.0* tahun 2007. Mathcad adalah standar industri alat perhitungan teknis untuk insinyur di seluruh dunia. Mathcad memberikan semua kemampuan pemecahan,

---

<sup>[4]</sup> Pusdiklat. 2009. *Perhitungan Setting Relai Proteksi Gardu Induk*. Bandung : PT. PLN (Persero). Hal. 131.

fungsionalitas, dan ketahanan yang dibutuhkan untuk perhitungan, manipulasi data, dan karya desain *engineering*. perhitungan standardisasi dan penggunaan kembali melalui Mathcad memastikan kepatuhan standar.

Data yang dihitung oleh mathcad berupa:

1. Arus nominal dan arus hubung singkat
2. Kurva ketahanan transformator
3. *Setting* sisi 150/70 kV
4. *Setting incoming*
5. *Setting* peyulang
6. *Setting* SBEF

Dan data grafik yang ditampilkan berupa :

1. Koordinasi setting transformator dan penyulang gangguan fasa-pahasa
2. Koordinasi setting transformator dan penyulang gangguan fasa-tanah

Untuk menghitung data-data diatas tentunya menggunakan rumus-rumus tertentu guna mendapatkan hasil yang benar. Rumus-rumus yang digunakan sesuai dengan standar yang telah ditentukan oleh PT. PLN (Persero) P3B Sumatera Bidang Transmisi Sub Bidang Proteksi Scadatel Padang, 2008. Sebelum menghitung data dengan rumus yang ditentukan oleh standar sub bidang proteksi PT. PLN P3B



Sumatera, perlu menampilkan data yang sudah ada berupa data yang terdapat pada nameplate peralatan yang dipakai seperti nameplate transformator dan NGR.