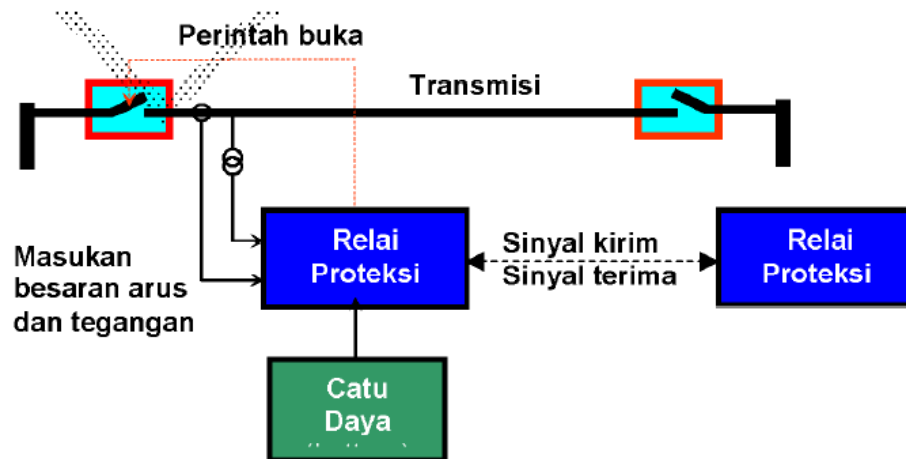


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Peralatan Sistem Proteksi³

Sistem proteksi terdiri dari peralatan Trafo Arus (Current Transformer = CT), Trafo Tegangan Kapasitor (Capacitive Voltage Transformer = CVT), Pemutus Tenaga (PMT), Catu daya AC/DC, Relai proteksi dan teleproteksi yang diintegrasikan dalam suatu rangkaian pengawatan. Selain itu diperlukan juga peralatan pendukung untuk kemudahan operasi dan evaluasi seperti sistem recorder, sistem scada dan indikasi rele.



Gambar 2.1 Gambar Sistem Proteksi

2.2 Sistem Pengamanan⁵

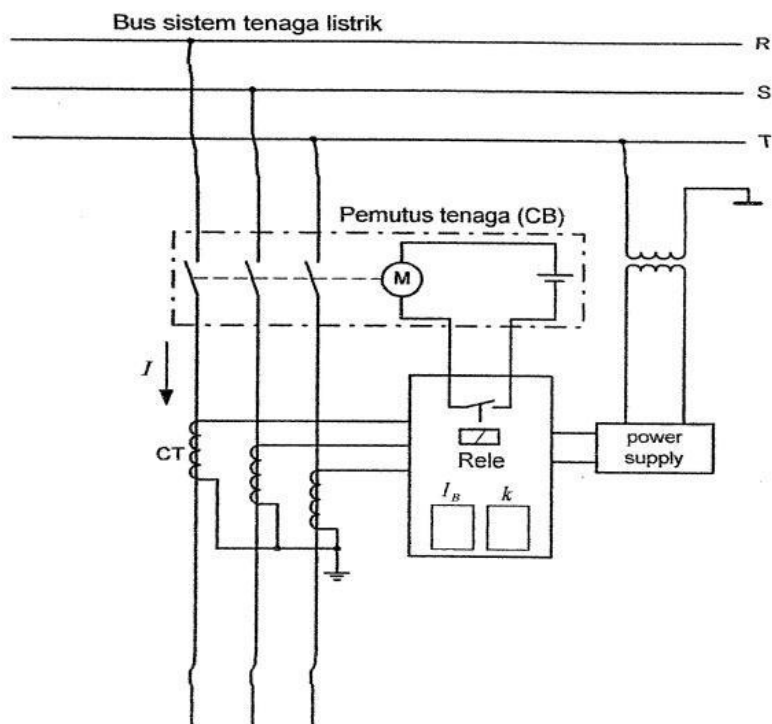
Untuk mengamankan sistem tenaga listrik dari gangguan seperti arus lebih atau hubung singkat, turun dan naiknya tegangan, turun dan naiknya frekuensi dan kegagalan isolasi atau melemahnya isolasi pada sistem tenaga listrik dilakukan dengan memasang alat pengaman atau pelindung, sedangkan untuk menghilangkan gangguan dengan cepat diperlukan sistem proteksi yang tepat dan benar. Oleh

³ PT. PLN (Persero) Pola Proteksi Sistem Transmisi. 1010. SPLN T5.002-1: 2010. Bagian 1 : Tegangan Tinggi 66 kV dan 150 kV

⁵ RS, Carlos dan Rumiasih. 2010. "Praktikum Sistem Proteksi". Palembang: Laboratorium Teknik Listrik Politeknik Negeri Sriwijaya.

karena itu, suatu sistem pengaman haruslah mempunyai sifat-sifat dan kriteria operasi yang handal, selektif dan sederhana.

Suatu sistem pengaman terdiri dari alat-alat utama yaitu pemutus tenaga atau CB, peralatan ukur atau transformator ukur terdiri dari transformator arus (CT) dan transformator tegangan (PT) dan rele untuk memonitori besaran gangguan. Gangguan pada sistem tenaga listrik merupakan suatu besaran seperti arus yang telah melampaui batas keadaan normal. Keadaan ini dapat mengganggu dan merusakkan peralatan sistem tenaga listrik. Untuk mengatasi persoalan tersebut, sebelum dilakukan pemisahan bagian yang terganggu oleh pemutus tenaga (CB), besaran gangguan harus dapat terdeteksi atau dimonitori oleh suatu peralatan. Peralatan yang dapat memonitori besaran gangguan atau terjadinya pada saat yang sama memberikan daya pada rangkaian trip pada pemutus tenaga (CB) agar pemutus tenaga pembuka kontakannya adalah rele.



Gambar 2.2 Gambar Peralatan dan hubungan sistem pengaman.

Naiknya arus atau naik/turunnya tegangan yang disebabkan oleh gangguan dapat digunakan sebagai tanda terjadinya suatu gangguan pada sistem tenaga listrik.

Gangguan tersebut akan diatasi oleh rele. Rele yang bekerja dengan sangat cepat untuk memerintahkan pemutus tenaga (CB) untuk trip.

2.3 Rele Proteksi⁶

Rele proteksi adalah susunan peralatan yang direncanakan untuk dapat merasakan atau mengukur adanya gangguan atau mulai merasakan adanya ketidaknormalan pada peralatan atau bagian system tenaga listrik dan secara otomatis memberi perintah untuk membuka pemutus tenaga (PMT) untuk memisahkan peralatan atau bagian dari system yang terganggu dan memberi isyarat berupa lampu dan bel. Secara umum rele proteksi arus bekerja sesuai dengan yang diharapkan dengan waktu yang cepat sehingga tidak akan mengakibatkan kerusakan, ataupun kalau suatu peralatan terjadi kerusakan secara dini telah diketahui, atau walaupun terjadi gangguan tidak menimbulkan pemadaman bagi konsumen.

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.

2.3.1 Fungsi Rele Proteksi⁶

Maksud dan tujuan pemasangan Rele proteksi adalah untuk menunjukkan lokasi dan macam gangguannya. Dengan data tersebut memudahkan Analisa dari gangguannya. Dalam beberapa hal rele hanya memberi tanda adanya gangguan atau kerusakan, jika dipandang gangguan atau kerusakan tersebut tidak segera membahayakan. Adapun fungsi dari rele proteksi :

⁶ Samaulah, Hazairin. *Dasar-dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. (Palembang: Penerbit Unsri, 2004), Hal. 3 – 4.

- a) Merasakan, mengukur, dan menentukan bagian system yang terganggu serta memisahkan secepatnya sehingga system lain yang tidak terganggu dapat beroperasi secara normal.
- b) Mengurangi kerusakan yang lebih parah dari peralatan yang terganggu.
- c) Mengurangi pengaruh gangguan terhadap bagian system yang lain tidak terganggu di dalam sistem tersebut serta mencegah meluasnya gangguan.
- d) Memperkecil bahaya bagi manusia.

2.3.2 Persyaratan Kualitas Proteksi⁷

Ada beberapa persyaratan yang sangat perlu diperhatikan dalam suatu perencanaan system proteksi yang efektif, yaitu :

a. Selektivitas dan Diskriminasi

Efektivitas suatu sistem proteksi dapat dilihat dari kesanggupan system dalam mengisolir bagian yang mengalami gangguan saja

b. Stabilitas

Sifat yang tetap tidak operasi apabila gangguan-gangguan terjadi diluar zona yang melindungi (gangguan luar).

c. Kecepatan Operasi

Sifat ini lebih jelas, semakin lama arus gangguan terus mengalir, semakin besar kerusakan peralatan. Hal yang paling penting adalah perlunya membuka bagian-bagian yang terganggu sebelum generator-generator yang dihubungkan sinkron kehilangan sinkronisasi dengan system selebihnya.

d. Sensitivitas (kepekaan)

Yaitu besarnya arus gangguan agar alat bekerja. Harga ini dapat dinyatakan dengan besarnya arus dalam jaringan aktual (arus primer) atau sebagai prosentase dari arus sekunder (trafo arus).

e. Pertimbangan Ekonomis

Dalam sistem aspek ekonomis hampir mengatasi aspek teknis, oleh karena jumlah feeder, trafo dan sebagainya yang begitu banyak, asal saja

⁷ Tasiam, F.J., Proteksi Sistem Tenaga Listrik, (Yogyakarta: Teknosain, 2017), hlm 15-17.

persyaratan keamanan yang pokok dipenuhi. Dalam sistem-sistem transmisi justru aspek teknis yang penting. Proteksi relatif mahal, namun demikian pula sistem atau peralatan yang dilindungi dan jaminan terhadap kelangsungan peralatan sistem adalah vital. Biasanya digunakan dua sistem proteksi yang terpisah, yaitu proteksi primer atau proteksi utama dan proteksi pendukung (*back up*).

f. Reabilitas (Keandalan)

Sifat ini jelas, penyebab utama dari “*outage*” rangkaian adalah tidak bekerjanya proteksi sebagaimana mestinya (*mal operation*).

g. Proteksi Pendukung

Proteksi pendukung (*back up*) merupakan susunan yang sepenuhnya terpisah dan bekerja untuk mengeluarkan bagian yang terganggu apabila proteksi utama tidak bekerja (*fail*). Sistem pendukung ini sedapat mungkin independen seperti halnya proteksi utama, memiliki trafo-trafo dan rele-rele tersendiri. Seringkali hanya tripping CB dan trafo-trafo tegangan yang dimiliki bersama oleh keduanya.

2.4 Rele Arus Lebih / Over Current Relay (OCR)⁶

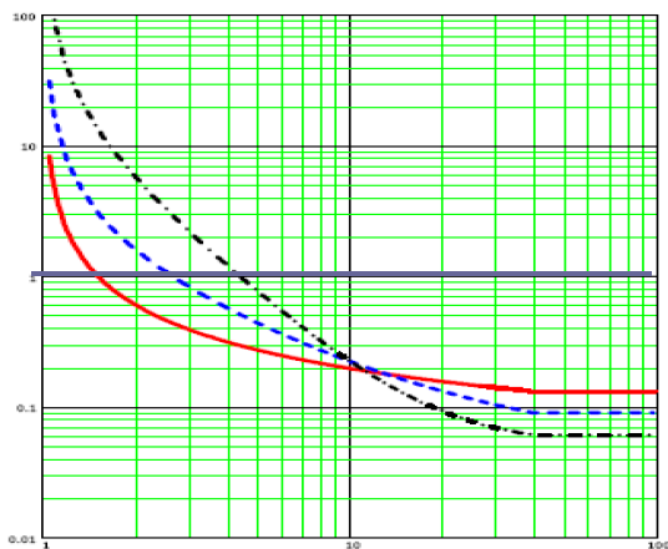
Rele Arus Lebih / *Over Current Relay* (OCR) adalah suatu rele yang bekerjanya didasarkan adanya kenaikan arus yang melebihi suatu nilai pengaman tertentu dan dalam jangka waktu tertentu, sehingga rele ini dapat dipakai sebagai pola pengamanan arus lebih.

Keuntungan dari penggunaan proteksi Rele arus lebih ini antara lain :

- a) Sederhana dan murah
- b) Mudah penyetelannya
- c) Merupakan rele pengaman utama dan cadangan.
- d) Mengamankan gangguan hubung singkat antar fasa maupun hubung singkat satu fasa ke tanah dan dalam beberapa hal dapat digunakan sebagai pengaman beban lebih (*overload*).

⁶ Samaulah, Hazairin. *Dasar-dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. (Palembang: Penerbit Unsri, 2004), Hal. 53

- e) Pengaman utama pada jaringan distribusi dan sub transmisi.
- f) Pengamanan cadangan untuk generator, trafo tenaga, dan saluran transmisi.



Gambar 2.3 Gambar Karakteristik Rele Arus Lebih

Karakteristik Waktu Kerja terdiri dari :

- Definite —————
- Normal / Standard Inverse —————
- Very Inverse - - - - -
- Long time Inverse - . - . -

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 high set yang bekerja seketika (moment/instantaneous). Untuk karakteristik inverse mengacu kepada 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

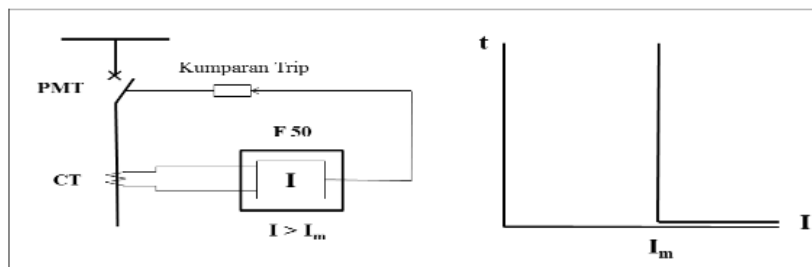
adalah kurva yang sama yaitu standard inverse (IEC) / normal inverse (ANSI/IEEE).^[8]

2.4.1 Karakteristik Waktu Kerjanya⁶

Berdasarkan karakteristik dari waktu kerjanya reel arus lebih dapat dibedakan menjadi :

a) Rele Arus Lebih Seketika / Momen (*Instantaneous Overcurrent Relay*)

Rele arus lebih dengan karakteristik waktu kerja seketika (moment) ialah jika jangka waktu rele mulai saat rele arusnya pick up sampai selesainya kerja rele sangat singkat (20-100 ms), yaitu tanpa penundaan waktu. Rele ini umumnya dikombinasikan dengan rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu (*definite time*) atau waktu terbalik (*inverse time*) dan hanya dalam beberapa hal berdiri sendiri secara khusus.



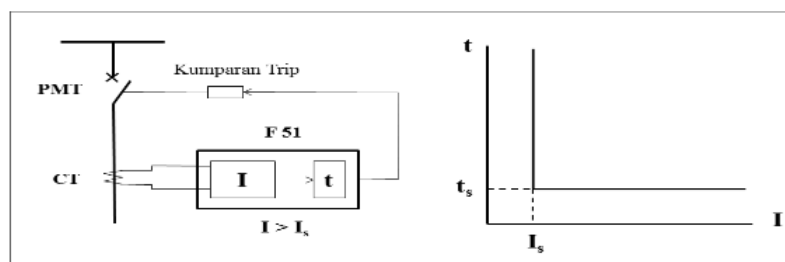
Gambar 2.4 Gambar Karakteristik Rele Arus Lebih Sesaat / Momen

b) Rele Arus Lebih Dengan Waktu Tunda (*Time Delay Overcurrent*)

• Rele Arus Lebih dengan Waktu Tetentu (*definite Time*)

Rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu ialah jika jangka waktu mulai rele arus pick up sampai selesainya kerja rele diperpanjang dengan nilai tertentu dan tidak tergantung dari besarnya arus yang menggerakkan.

⁶ Samaulah, Hazairin. *Dasar-dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. (Palembang: Penerbit Unsri, 2004), Hal 53 – 56.



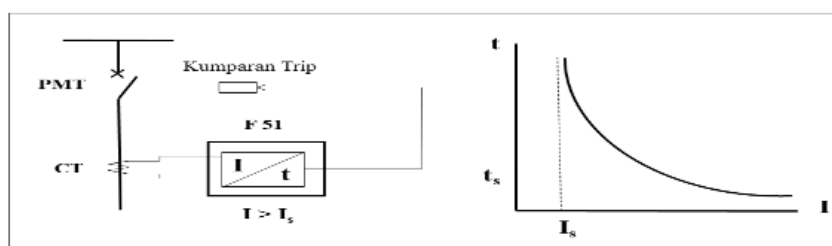
Gambar 2.5 Gambar Karakteristik Rele Arus Lebih Definite Time

- **Rele Arus Lebih Waktu Terbalik (*Inverse Time Overcurrent Relay*)**

Rele arus lebih dengan karakteristik waktu terbalik adalah jika jangka waktu mulainya Rele pick up sampai selesainya kerja Rele diperpanjang dengan besar relay yang besarnya berbanding terbalik dengan arus yang menggerakkannya.

Bentuk perbandingan terbalik dari waktu arus ini sangat bermacam – macam :

- 1) Berbanding terbalik (*Inverse*)
- 2) Sangat berbanding terbalik (*Very Inverse*)
- 3) Sangat berbanding terbalik sekali (*Extremely Inverse*)



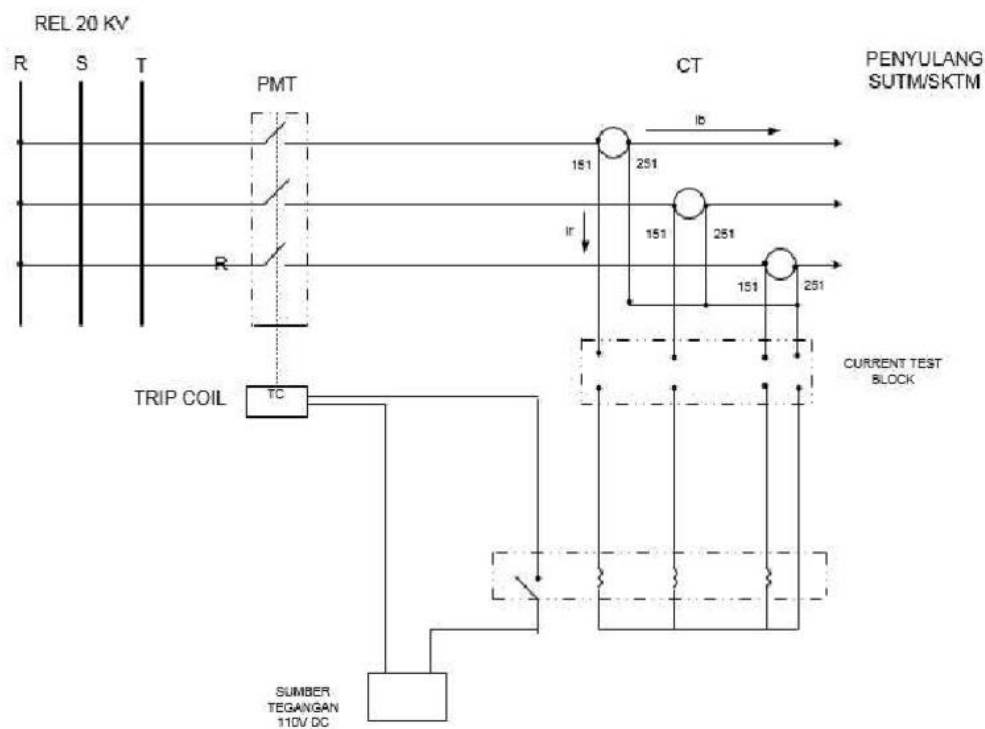
Gambar 2.6 Gambar Karakteristik Rele Arus Lebih Inverse Time

- **Rele Arus Lebih Terbalik dan Terbatas Waktu Minimum (*inverse definite minimum time / IDMT*)**

Rele arus lebih dengan karakteristik inverse definite minimum time (IDMT) ialah jika jangka waktu rele arus mulai pick up sampai selesainya kerja rele mempunyai sifat waktu terbalik untuk nilai arus yang kecil setelah pick up dan kemudian mempunyai sifat waktu tertentu untuk nilai arus yang lebih besar.

2.4.2 Prinsip Kerja Rele Arus Lebih

Prinsip kerja rele arus lebih adalah berdasarkan pengukuran arus, yaitu rele akan bekerja apabila merasakan arus diatas nilai settingnya. 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.^[8]



Gambar 2.7 Gambar Rangkaian Pengawatan OCR

2.4.3 Setting Rele Arus Lebih

Rele OCR harus di setting sedemikian rupa sehingga dapat bekerja secepat mungkin dan meminimalkan bagian dari system yang harus padam. Hal ini diterapkan dengan cara mengatur waktu kerja relay agar bekerja lambat ketika

⁸ Tim PLN PUSDIKLAT. Perhitungan Setting Relai Proteksi Gardu Induk. (Jakarta: PUSDIKLAT, 2009), hlm 10.



terjadi arus gangguan kecil, dan bekerja semakin cepat apabila arus gangguan semakin besar

2.4.3.1 Setting Arus

Berikut ini merupakan parameter yang perlu dicari untuk penyetelan rele arus lebih :

Arus nominal dari suatu peralatan listrik adalah :

$$I_N = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \dots\dots\dots (2.1)$$

Ratio CT yang ditentukan dari arus nominal peralatan adalah :

$$\text{Ratio CT} = \frac{\text{Primer}}{\text{Sekunder}} \dots\dots\dots (2.2)$$

Setting arus kerja untuk Rele OCR berdasarkan kemampuan trafo adalah:

$$I_{s1} = 1,05 \times I_{nom} \text{ trafo} \dots\dots\dots (2.3)$$

Setting arus kerja berdasarkan kemampuan peralatan terkecil (CT) adalah :

$$I_{s2} = 1,2 \times I_N \text{ Peralatan Terkecil} \dots\dots\dots (2.4)$$

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

Nilai tersebut adalah nilai primer, untuk mendapatkan nilai setelan sekunder yang dapat disetkan pada relay OCR, maka harus dihitung dengan menggunakan ratio trafo (CT) yang terpasang pada sisi primer maupun sisi sekunder transformator tenaga.

Arus yang mengalir pada rele dapat ditentukan dengan persamaan :

$$I_{set \text{ sekunder}} = I_s \times \frac{1}{\text{ratio CT}} \text{ (A sekunder)} \dots\dots\dots (2.5)$$

Arus kerja rele dengan standard rele arus lebih 110%

$$I_{set} = 1,1 \times I_N \dots\dots\dots (2.6)$$

2.4.3.2 Setting Waktu

Untuk menentukan nilai waktu kerja (TMS), diperlukan hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat.

Rumus TMS sesuai pada standar karakteristik IEC 60255.

Tabel 2.1. Tabel Setelan waktu (TMS) berdasarkan tipe rele.

Tipe Relay	Setelan Waktu (TMS)
<i>Standar Inverse</i>	$TMS = \frac{\left(\left(\frac{I_f}{I_{set}}\right)^{0,02} - 1\right)}{0,14} xt$
<i>Very Inverse</i>	$TMS = \frac{\left(\left(\frac{I_f}{I_{set}}\right)^1 - 1\right)}{13,5} xt$
<i>Extremely Inverse</i>	$TMS = \frac{\left(\left(\frac{I_f}{I_{set}}\right)^2 - 1\right)}{80} xt$
<i>Long Inverse</i>	$TMS = \frac{\left(\left(\frac{I_f}{I_{set}}\right)^1 - 1\right)}{120} xt$

Waktu operasi (t) untuk karakteristik kurva Standard Inverse :

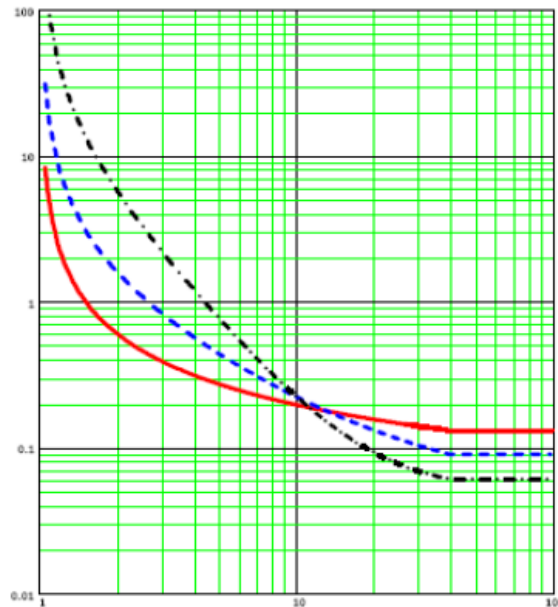
$$t = \frac{tms \times 0,14}{\left(\frac{I_{fs}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \dots\dots\dots (2.7)$$

2.5 Rele Gangguan Tanah / *Ground Fault Relay (GFR)*¹

Gangguan yang sering terjadi di sistem tenaga listrik ialah gangguan fasa ke tanah. Oleh karena itu perlu dipasang rele pengaman untuk mengamankan sistem dari terjadinya gangguan tersebut. Rele yang berfungsi untuk mengamatkannya ialah Groud Fault Relay(GFR). Ground Fault Relay (GFR) pada dasarnya mempunyai prinsip kerja yang sama denga Rele arus lebih (OCR) namun memiliki perbedaan dalam kegunaanya. GFR mendeteksi melalui binary input yang ada pada

¹ Dermawan Erwin, Dimas Nugroho. “Analisa Koordinasi Over Current Relay Dan Ground Fault Relay Di Sistem Proteksi Feeder Gardu Induk 20 kV Jababeka”. Jurnal Elektum Vol. 14 No. 2, 2017, hal. 45.

Rele sehingga memerintahkan binary output agar memberikan perintah jika adanya hubungan singkat ke tanah.



Gambar 2.8 Karakteristik Rele Gangguan Tanah

Karakteristik Waktu Kerja terdiri dari :

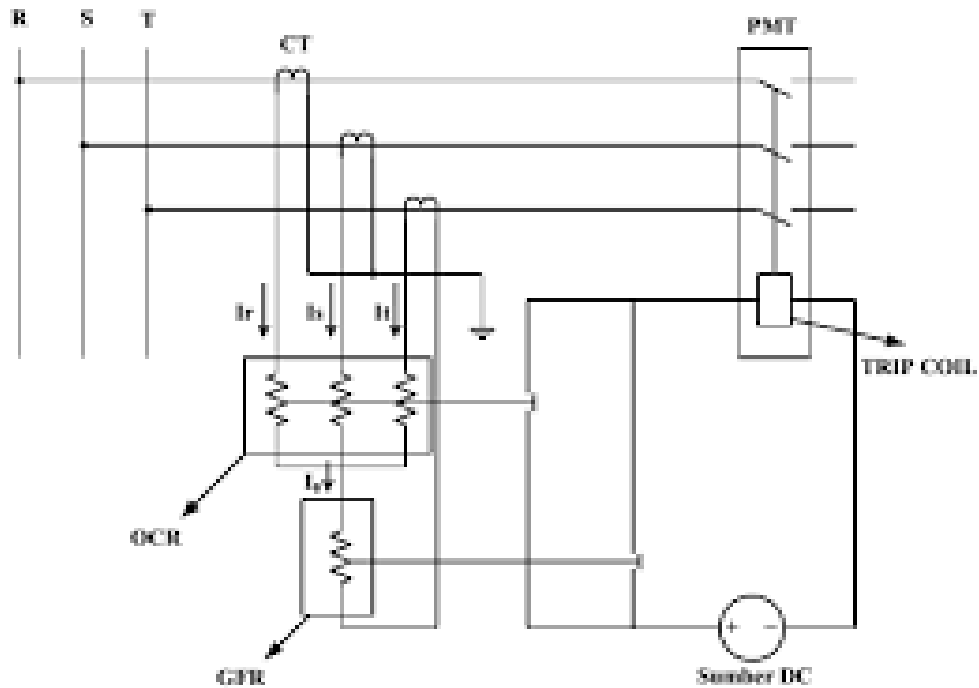
- Definite —
- Normal / Standard Inverse —
- Very Inverse - - -
- Long time Inverse - . - .

2.5.1 Prinsip Kerja Rele Gangguan Tanah⁸

Prinsip kerja GFR sama dengan OCR yaitu berdasarkan pengukuran arus, dimana relai 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

⁸ Tim PLN PUSDIKLAT. Perhitungan Setting Relai Proteksi Gardu Induk. (Jakarta: PUSDIKLAT, 2009), Hal. 12.

(external fault). Setting arus GFR lebih kecil daripada OCR, karena nilai arus hubung singkatnya pun lebih kecil dari pada arus hubung singkat fasa-fasa.



Gambar 2.9 Gambar Rangkaian Pengawatan GFR

2.5.2 Setting Rele Gangguan Tanah

Sama halnya dengan rele OCR, GFR harus di setting sedemikian rupa sehingga dapat bekerja secepat mungkin dan meminimalkan bagian dari system yang harus padam. Hal ini diterapkan dengan cara mengatur waktu kerja relay agar bekerja lambat ketika terjadi arus gangguan kecil, dan bekerja semakin cepat apabila arus gangguan semakin besar

2.5.2.1 Setting Arus

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

Setting arus kerja untuk Rele GFR diset 10% x arus gangguan tanah terkecil di penyulang:

$$I_{set\ primer} = 10\% \times (\text{gangguan } 100\% \text{ panjang penyulang} \dots \dots \dots) \quad (2.8)$$

Nilai tersebut adalah nilai primer, untuk mendapatkan nilai *setting* sekunder yang dapat disetkan pada relay GFR, maka harus dihitung dengan menggunakan rasio trafo arus (CT) yang terpasang pada sisi primer maupun sisi sekunder transformator tenaga. Cara yang sama juga digunakan pada *setting* OCR.

$$I_{set\ sekunder} = I_{set\ primer} \times \frac{1}{Ratio\ CT} \dots\dots\dots (2.9)$$

dimana :

$I_{set\ sekunder}$ = nilai arus setting pada sisi sekunder CT 20 kV

$I_{set\ primer}$ = nilai arus setting pada sisi primer CT 20 kV

2.5.2.2 *Setting* Waktu

Hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat, selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai *setting* waktu kerja relay (TMS). Sama halnya dengan OCR, relay GFR menggunakan rumus penyetingan TMS yang sama dengan relay OCR. Tetapi waktu kerja relay yang diinginkan berbeda. Relay GFR cenderung lebih sensitive dari pada relay OCR. Untuk menentukan nilai TMS yang akan disetkan pada relay GFR sisi incoming 20 kV dan sisi 150 kV transformator tenaga diambil arus hubung singkat 1 fasa ke tanah.

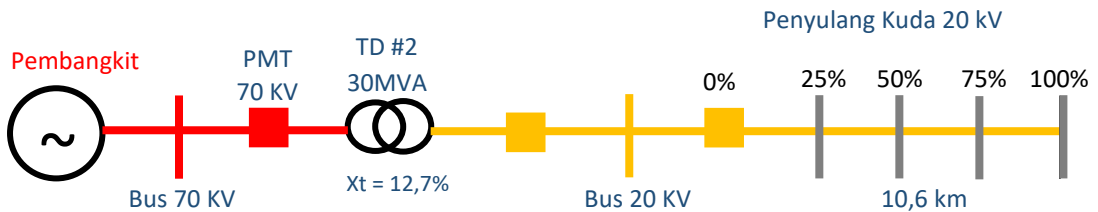
2.6 Menghitung Impedansi

Dalam menghitung impedansi dikenal tiga macam impedansi urutan, yaitu :

- Impedansi urutan positif (Z_1), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan positif
- Impedansi urutan negatif (Z_2), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan negatif.
- Impedansi urutan nol (Z_3), 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 2.11 Gambar Sketsa Penyulang

Dimana :

X_s = Impedansi sumber (ohm)

X_t = Impedansi transformator (ohm)

a. Impedansi Transformator

Untuk menghitung impedansi transformator, maka harus mengetahui nilai dari arus hubung singkat pada transformator daya per bulan :

$$MVA_{sc3\phi} = \sqrt{3} \times V \times I_{hs} \dots \dots \dots (2.10)$$

b. Impedansi Dasar

Untuk menghitung impedansi dasar dapat digunakan rumus sebagai berikut :

- Impedansi dasar sisi 70 kV dan 20 kV :

$$I_{base} = \frac{MVA_{base}}{\sqrt{3} \times kV_{base}} \dots \dots \dots (2.11)$$

c. Impedansi Sumber

Untuk menghitung sumber di sisi bus 20 kV, maka harus dihitung dulu impedansi sumber di bus 70 kV. Impedansi sumber di bus 70 kV diperoleh dengan rumus :

$$X_1 = X_2 = \frac{kV^2}{MVA_{SC\ 3\phi}} \dots \dots \dots (2.12)$$

Sedangkan untuk menghitung impedansi sumber di bus 20 kV diperoleh dengan rumus :



$$X_1 = X_2 = \frac{kV^2(\text{sisi sekunder trafo})}{kV^2(\text{sisi primer trafo})} \times X_1(\text{sisi primer}) \dots\dots\dots (2.13)$$

d. Nilai Reaktansi

$$X_t (\text{pada } 100\%) = \frac{kV(\text{sekunder})^2}{MVA \text{ Transformator}} \dots\dots\dots (2.14)$$

dimana :

X_t = Reaktansi Transformator (Ω)

kV = Nilai tegangan pada sisi sekunder trafo (V)

MVA = Nominal Rating Trafo (MVA)

- Reaktansi urutan positif – negatif (X_{t1} / X_{t2})

$$X_{t1} = X_{t2} = \% \text{ yang diketahui } \times X_t \text{ } 100\% \dots\dots\dots (2.15)$$

- Reaktansi urutan nol (X_{t0})

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

- Untuk transformator tenaga dengan hubungan belitan ΔY dimana kapasitas belitan delta sama besar dengan kapasitas belitan Y, maka $X_{t0} = X_{t1}$
- Untuk transformator 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 ditanahkan, maka nilai $X_{t0} = 3 \times X_{t1}$
- Untuk transformator tenaga dengan hubungan belitan YY dan tidak mempunyai belitan delta di dalamnya, maka untuk menghitung besarnya berkisar antara 9 sampai dengan 14 dikali $X_{t1} = X_{t2}$

$$X_0 = 9 \text{ s/d } 10 \times X_{t1} = X_{t2} \dots\dots\dots (2.16)$$

e. Impedansi Penyulang

$$Z = (R+jX) \dots\dots\dots (2.17)$$

Sehingga untuk impedansi penyulang dapat ditentukan dengan menggunakan rumus :

- Urutan positif dan urutan negatif

$$Z_1 = Z_2 = \% \text{ panjang penyulang (km)} \times Z_1 / Z_2 \dots\dots\dots (2.18)$$

Di mana :

Z_1 = Impedansi urutan positif (ohm)

Z_2 = Impedansi urutan negatif (ohm)

- Urutan nol

$$Z_0 = \% \text{ panjang penyulang (km)} \times Z_0 \dots\dots\dots (2.19)$$

Di mana :

Z_0 = Impedansi urutan nol (ohm)

h. Impedansi Ekuivalen Jaringan

Untuk menghitung impedansi ekuivalen jaringan dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

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

$$Z_{1eq} = Z_{2eq} = Z_{s1} + Z_{t1} + Z_1 \text{ penyulang} \dots\dots\dots (2.20)$$

Di mana :

Z_{1eq} = Impedansi ekuivalen jaringan urutan positif (ohm)

Z_{2eq} = Impedansi ekuivalen jaringan urutan negatif (ohm)

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

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

- Urutan nol

$$Z_{0eq} = Z_{t0} + 3RN + Z_1 \text{ penyulang} \dots\dots\dots (2.21)$$

Di mana :

Z_{0eq} = Impedansi ekuivalen jaringan nol (ohm)

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

RN = Tahanan transformator tenaga (ohm)

Z_0 = Impedansi urutan nol (ohm)

2.7 Gangguan

Gangguan adalah suatu ketidaknormalan (interferes) dalam sistem tenaga listrik yang mengakibatkan mengalirnya arus yang tidak seimbang dalam sistem tiga fasa. Gangguan dapat juga didefinisikan sebagai setiap kesalahan dalam suatu rangkaian yang menyebabkan terganggunya aliran arus yang normal (Suhadi, 2008).

Gangguan dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kelompok, yaitu :

A. Berdasarkan kesimetrisannya

1. Gangguan asimetris, merupakan gangguan yang mengakibatkan tegangan dan arus yang mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang, gangguan ini terdiri dari:
 - Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah, yakni gangguan yang disebabkan karena salah satu fasa terhubung singkat ke tanah atau ground.
 - Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa, yakni gangguan yang disebabkan karena fasa dan fasa antar kedua fasa terhubung singkat dan tidak terhubung ke tanah.
 - Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah, yakni gangguan yang terjadi ketika kedua fasa terhubung singkat ke tanah.
2. Gangguan simetris, merupakan gangguan yang terjadi pada semua fasanya sehingga arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Gangguan ini terdiri dari:
 - Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa, yakni gangguan yang terjadi ketika ketiga fasa saling terhubung singkat



- Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah, yakni gangguan yang terjadi ketika ketiga fasa terhubung singkat ke tanah.

Gangguan hubung singkat dapat didefinisikan sebagai gangguan yang terjadi akibat adanya penurunan kekuatan dasar isolasi antara sesama kawat fasa dengan tanah yang menyebabkan kenaikan arus secara berlebihan. Analisis gangguan hubung singkat diperlukan untuk mempelajari sistem tenaga listrik baik waktu perencanaan maupun setelah beroperasi.

2.7.1 Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa

Rumus dasar yang digunakan untuk menghitung besarnya arus gangguan hubung singkat 3 fasa adalah :

$$I = \frac{V}{Z} \dots\dots\dots (2.22)$$

Sehingga arus gangguan hubung singkat 3 fasa dapat dihitung sebagai berikut dengan persamaan :

$$I_{3\text{fasa}} = \frac{V_{\text{ph}}}{Z_{1\text{eq}}} \dots\dots\dots (2.23)$$

2.7.2 Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa

Rumus dasar yang digunakan untuk menghitung besarnya arus gangguan hubung singkat 2 fasa adalah :

$$I = \frac{V}{Z} \dots\dots\dots (2.24)$$

Sehingga arus gangguan hubung singkat 2 fasa dapat dihitung sebagai berikut dengan persamaan :

$$I_{2\text{fasa}} = \frac{V_{\text{ph-ph}}}{2 \times Z_{1\text{eq}}} \dots\dots\dots (2.25)$$

2.7.3 Gangguan Hubung Singkat 1 Fasa ke Tanah

Pada gangguan satu fasa ke tanah misal fasa A mengalami gangguan akan menyebabkan kenaikan arus pada fasa A dan drop tegangan di fasa A (menjadi nol) sedangkan arus pada fasa yang lain menjadi nol yang diikuti dengan kenaikan tegangan fasa yang lain. Sehingga arus gangguan hubung singkat 1 Fasa ke tanah dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$I_{\text{fasa}} = \frac{3 \times V_{\text{ph}}}{2 \times Z_{1\text{eq}} + Z_{0\text{eq}}} \dots\dots\dots (2.26)$$

2.8 Pengujian Rele Arus Lebih (OCR) dan Rele Gangguan Tanah (GFR) pada Pwnyulang

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui arus kerja, arus reset/kembali, waktu kerja dan karakteristik dari relai OCR/GFR Kopel dengan nilai settingnya.

1. Arus kerja minimum (pick-up) dan arus reset (drop-off)

Pengujian ini dilakukan dengan menginjeksikan arus pada relai OCR/GFR di bawah nilai setting arusnya kemudian dinaikkan secara bertahap hingga didapatkan nilai arus kerja minimum yang membuat relai OCR/GFR pickup/starting. Setelah itu, arus injeksi diturunkan secara bertahap hingga didapatkan besaran arus yang membuat relai OCR/GFR Kopel reset (dropoff).

2. Karakteristik waktu kerja relai

Pengujian karakteristik relai dilakukan dengan menginjeksikan arus pada relai OCR/GFR sebesar $2 \times I_{\text{set}}$, $3 \times I_{\text{set}}$ dan $5 \times I_{\text{set}}$ serta mengukur waktu kerja relai. Catat nilai arus uji dan waktu kerja relai OCR/GFR tersebut ke dalam blangko pengujian.

Pengujian individu relai OCR/GFR Kopel dilakukan setiap:

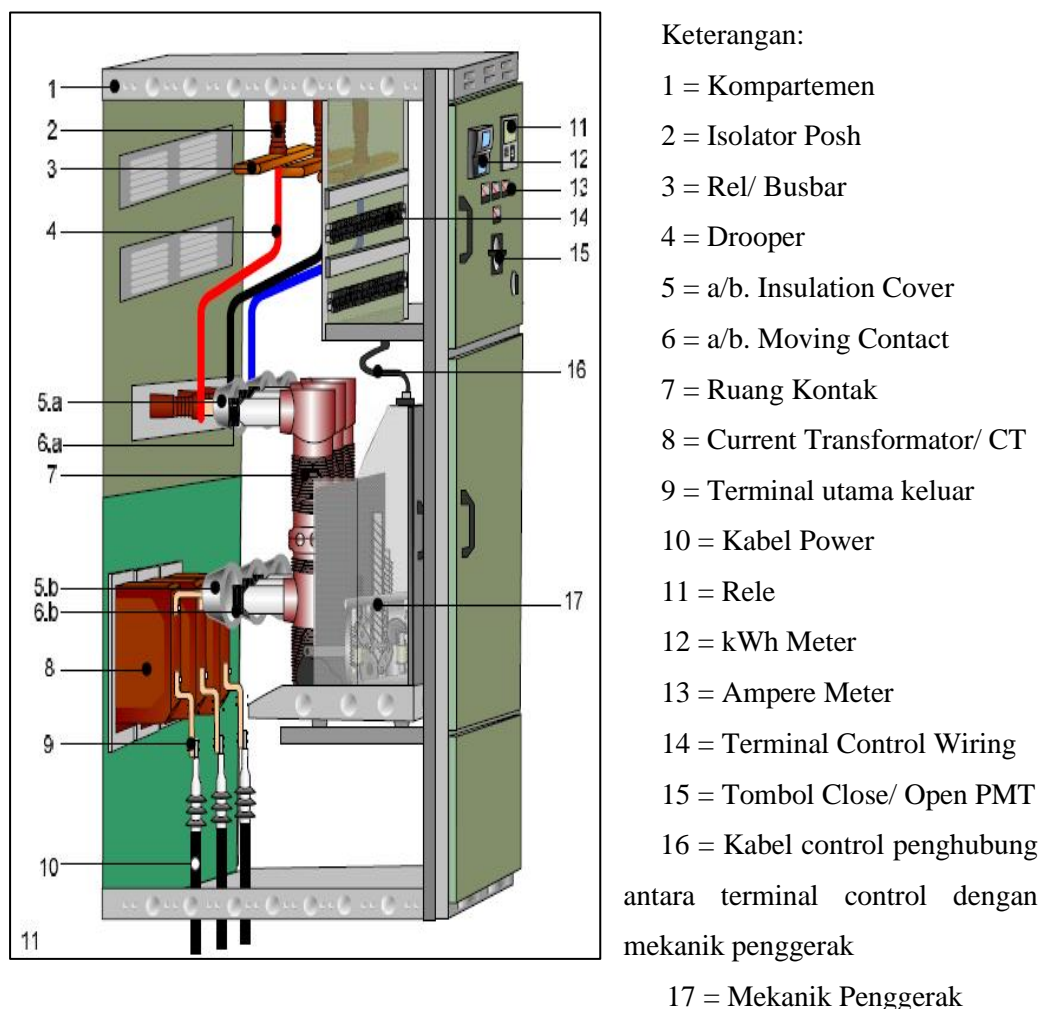
- Secara rutin 2 tahun sekali untuk relai elektromekanik dan elektrostatik dan 6 tahun untuk relai numerik/digital.

- Setiap dilakukan perubahan setting relai, logic relai atau penggantian modul di relai.

2.9 Kubikel Tegangan Menengah⁴

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

Bagian-bagian kubikel dapat dijelaskan seperti gambar di bawah ini:



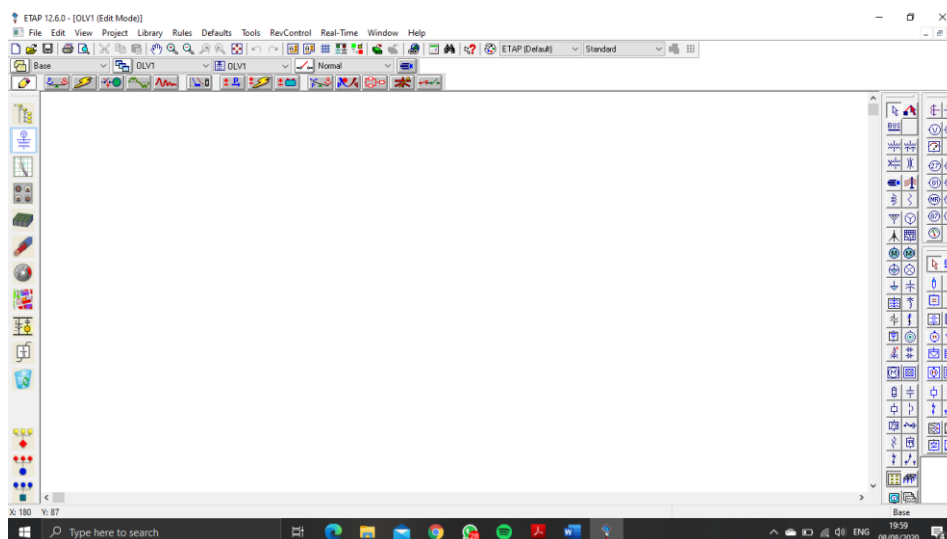
Gambar 2.12 Gambar Bagian – bagian Kubikel Tegangan Menengah

⁴ PT. PLN (Persero). 2014. Buku Pedoman Pemeliharaan Kubikel Tegangan Menengah. Jakarta : PT. PLN (Persero).

2.10 ETAP (Electric Transient and Analysis Program)²

Dalam perancangan dan analisa sebuah sistem tenaga listrik, sebuah software aplikasi sangat dibutuhkan untuk merepresentasikan kondisi real sebelum sebuah sistem direalisasikan. ETAP (Electric Transient and Analysis Program) merupakan salah satu software aplikasi yang digunakan untuk mensimulasikan sistem tenaga listrik. ETAP mampu bekerja dalam keadaan offline untuk simulasi tenaga listrik, dan online untuk pengelolaan data real-time atau digunakan untuk mengendalikan sistem secara realtime. Fitur yang terdapat di dalamnya pun bermacam-macam antara lain fitur yang digunakan untuk menganalisa pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik. Analisa sistem tenaga listrik yang dapat dilakukan ETAP antara lain :

- Analisa aliran daya
- Analisa hubung singkat
- Arc Flash Analysis
- Starting motor
- Koordinasi proteksi
- Analisa kestabilan transien, dll.



Gambar 2.13 Gambar Kerja Editor pada ETAP 12.6.0

² Multa Lestanto, Restu Prima Aridani. 2013. *Modul Pelatihan ETAP*. Yogyakarta: Megatrika.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam bekerja dengan ETAP PowerStation adalah :

- One Line Diagram, menunjukkan hubungan antar komponen/peralatan listrik sehingga membentuk suatu sistem kelistrikan.
- Library, informasi mengenai semua peralatan yang akan dipakai dalam sistem kelistrikan. Data elektris maupun mekanis dari peralatan yang detail/lengkap dapat mempermudah dan memperbaiki hasil simulasi/analisa.
- Standar yang dipakai, biasanya mengacu pada standar IEC atau ANSI, frekuensi sistem dan metode – metode yang dipakai.
- Study Case, berisikan parameter – parameter yang berhubungan dengan metode studi yang akan dilakukan dan format hasil analisa.

2.10.2 Elemen – elemen Sistem Tenaga Listrik pada ETAP

Suatu sistem tenaga terdiri atas sub-sub bagian, salah satunya adalah aliran daya dan hubung singkat. Untuk membuat simulasi aliran daya dan hubung singkat, maka data-data yang dibutuhkan untuk menjalankan program simulasi antara lain:

1. Data Generator
2. Data Transformator
3. Data Kawat Penghantar
4. Data Beban
5. Data Bus



Gambar 2.14 Gambar Elemen – elemen yang ada pada ETAP 12.6.0

Program analisis ketidakseimbangan aliran daya pada software ETAP dapat menghitung tegangan pada tiap-tiap cabang, aliran arus pada sistem tenaga listrik, dan aliran daya yang mengalir pada sistem tenaga listrik. Metode perhitungan ketidakseimbangan aliran daya pada software ETAP menggunakan metode Current Injection.



Gambar 3.15 Gambar Toolbar Unbalanced Load Flow di ETAP 12.6.0

Gambar dari kiri ke kanan menunjukkan toolbar aliran daya, yaitu:

1. Run Unbalanced Load Flow adalah icon toolbar aliran daya yang menghasilkan atau menampilkan hasil perhitungan aliran daya sistem distribusi tenaga listrik dalam diagram satu garis.
2. Fault Insertion Open Phase A adalah icon untuk membuat beban tak seimbang.



3. Display Option adalah bagian tombol untuk menampilkan hasil aliran daya.
4. Alert View adalah icon untuk menampilkan batas kritis dan marginal dari hasil keluaran aliran daya sistem distribusi tenaga listrik.
5. Report Manager adalah icon untuk menampilkan hasil aliran daya dalam bentuk report yang dapat dicetak.