

BAB II

TINJUAN PUSTAKA

2.1. Switchgear¹

Switchgear adalah panel distribusi yang mendistribusikan beban kepanel-panel yang lebih kecil kapasitasnya. Dalam bahasa Indonesia artinya Panel Tegangan Menengah (PTM) atau juga disebut MVMDB (Medium Voltage Main distribution Board) dan sedangkan untuk tegangan rendah disebut LVMDB (Low Voltage Main Distribution Board).

Adapun berikut fungsi dari switchgear yaitu :

- a) Fungsi Switching. Yang dimana melalui Circuit Breaker atau Load Break Switch atau Disconnecting Switch, dll;
- b) Fungsi Proteksi. Yaitu switchgear dilengkapi dengan fuse atau relay untuk proteksibeban seperti overcurrent, overload, reverse power, under/over voltage, dll;
- c) Fungsi pengukuran. yaitu switchgear dilengkapi dengan meter untuk pengukuran besaran listrik seperti arus, tegangan, kwh, frekwensi, Power Factor, dll;
- d) Fungsi Monitoring. Yaitu switchgear dilengkapi dengan pilot indicator/fasilitas monitoring untuk memonitor status seperti status on/off maupun abnormal/trip),bisa untuk remote monitoring melalui PLC/DCS/SCADA



¹ Amalia, Dewi. *Operasi dan Pemeliharaan Switchgear*. 2015.



Gambar 2.1 Switchgear

Sumber : <https://www.eaton.com/>

2.2. Bagian-Bagian Switchgear

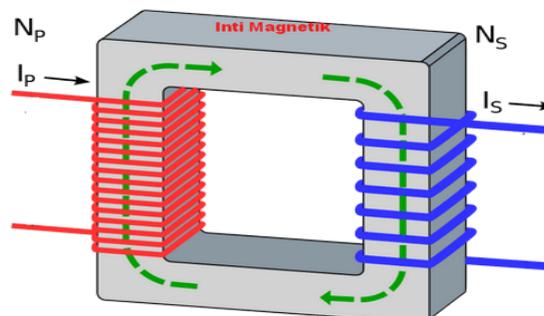
Terdapat beberapa komponen penting pada bagian-bagian switchgear yang harus diketahui sebelum melakukan pengoperasian. Komponen pada switchgear ini harus dipahami sebelum mengetahui bagaimana cara beroperasinya. Komponen pada switchgear tersebut antara lain adalah :

- a) Transformator Ukur (trafo arus dan tegangan)
- b) Relai Proteksi (OV, OCR)
- c) Peralatan penghubung dan pemutus (*Circuit Breaker, Fuse, Switch*);
- d) Bus-Bar
- e) Peralatan Ukur

2.2.1 Transformator²

Transformator merupakan seperangkat alat peralatan statis yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Transformator akan mentransformasikan tegangan dan arus bolak balik diantara dua belitan atau lebih pada frekuensi yang sama besar namun dengan nilai arus dan tegangan yang berbeda.

Pengertian transformator menurut IEEE std C57.111.80, 2010 yaitu transformator merupakan perangkat listrik statis yang terdiri dari dua kumparan atau lebih. Transformator banyak digunakan dalam sistem tenaga listrik untuk mentransfer daya melalui elektromagnetik pada frekuensi yang sama, namun dengan nilai voltase dan arus yang berbeda



Gambar 2.2 Transformator

Sumber : <https://rumushitung.com/2015/03/14/tansformator-dan-rumusny/>

² Kadir, Abdul.1989. *Transformator*. Jakarta: Elex Media Komputindo.

2.2.1.1 Jenis-Jenis Transformator

Transformator berdasarkan penggunaannya pada sistem penyaluran tenaga listrik dapat dibagi menjadi:

1. Trafo penaik tegangan (*Step up*), untuk menaikkan tegangan pembangkit menjadi tegangan transmisi.
2. Trafo penurun tegangan (*Step down*), untuk menurunkan tegangan transmisi menjadi tegangan distribusi.
3. Trafo instrument/ukur, untuk pengukuran yang terdiri dari trafo tegangan dan trafo arus, dipakai menurunkan tegangan dan arus agar dapat masuk ke meter-meter pengukuran

Dikesempatan kali ini penulis akan memfokuskan kepada Transformator Ukur merupakan suatu peralatan yang dapat mentransformasikan (merubah) suatu besaran listrik (arus dan tegangan) ke besaran yang sama dengan harga yang berbeda. Transformator ukur memiliki belitan primer dan belitan sekunder. Belitan primer dihubungkan ke jaringan sistem tenaga listrik dan belitan sekunder dihubungkan ke peralatan ukur dan peralatan pengaman. Oleh karena itu pada sistem tenaga listrik memiliki besaran dengan nilai yang cukup besar maka transformator ukur berfungsi untuk menurunkan nilai besaran. Berdasarkan besaran yang ditransformasikan. Transformator ukur terdiri dari :

A. Transformator Arus (*Current Transformer/CT*) :

Transformator arus berfungsi untuk mentransformasikan arus yang besar menjadi arus yang kecil. Arus yang kecil ini disebut sebagai arus sekunder dan dihubungkan ke peralatan ukur atau rele pengaman. Penerapan arus sekunder pada transformator arus dengan nilai nominal 1 A atau 5 A. Konstruksi dari trafo arus ini terdiri dari :

- Kumparan
Berfungsi untuk mentransformasikan besaran arus besar menjadi arus yang kecil.
- Pendingin

Merupakan bahan yang bersifat isolator seperti minyak atau udara. Berfungsi untuk mendinginkan kumparan dan sekaligus mengisolasi bagian bertegangan.

- Porselen

Sebagai pelindung (*body*) merupakan bagian luar dari transformator yang berfungsi untuk memisahkan bagian bertegangan.

- *Dehydrating Breather*

Sebagai pernafasan transformator yang berfungsi untuk menyerap udara lembab yang timbul dalam ruang transformator sehingga dapat mencegah rusaknya isolasi transformator.

- Terminal

Berfungsi untuk penyambungan dari sisi primer atau sekunder ke peralatan listrik lain yang membutuhkannya.

B. Transformator Tegangan (*Potential Transformer/PT*) :

Transformator tegangan berfungsi untuk mentransformasikan tegangan yang tinggi menjadi tegangan yang rendah, tegangan yang rendah ini disebut tegangan sekunder dan dihubungkan ke peralatan ukur atau rele pengaman. Penerapan tegangan sekunder pada transformator tegangan dengan nilai nominal $100 \sqrt{3}$ V atau $110 \sqrt{3}$ V. Konstruksi transformator tegangan terdiri dari :

- Kumparan

Berfungsi untuk mentransformasikan besaran arus besar menjadi arus yang kecil.

- Pendingin

Merupakan bahan yang bersifat isolator seperti minyak atau udara. Berfungsi untuk mendinginkan kumparan dan sekaligus mengisolasi bagian bertegangan.

- Porselen

Sebagai pelindung (*body*) merupakan bagian luar dari transformator yang berfungsi untuk memisahkan bagian bertegangan.

- *Dehydrating Breather*
Sebagai pernafasan transformator yang berfungsi untuk menyerap udara lembab yang timbul dalam ruang transformator sehingga dapat mencegah rusaknya isolasi transformator.
- Terminal
Berfungsi untuk penyambungan dari sisi primer atau sekundur ke peralatan listrik lain yang membutuhkannya.

2.2.2.2 Transformator berdasarkan jenis sistem pendinginannya

A. Dry type transformers (Transformator tipe kering)

Trafo Kering (*Dry Type Transformer*), trafo yang satu ini termasuk jenis yang agak baru. Transformator tipe kering memiliki kumparan di udara terbuka. dan trafo jenis ini diclaim sebagai trafo free maintenance karena tidak menggunakan oil sebagai bahan pendinginnya melainkan menggunakan fan yang berada didalam unit trafo namun karena panasnya yang lumayan tinggi sehingga biasanya membutuhkan AC (*Air conditioning*) sebagai pendingin tambahan (Ahmadi, 2009).

B. Gas immersed transformers (GIT)

GIT (*Gas Immersed Transformers*) menggunakan pendingin Gas (biasanya SF₆) yang tidak mudah terbakar dan tidak eksplosif membuat GIT lebih aman dan lebih ramah lingkungan dibanding minyak terisolasi transformer, yang membawa risiko bahaya kebakaran, ledakan, dan kebocoran minyak yang bisa mencemari sumber daya alam.

C. Oil immersed Transformers

Seiring dengan meningkatnya kemampuan daya suatu transformator, maka masalah yang muncul adalah bagaimana mendisipasikan panas yang dibangkitkan oleh inti dan belitan transformator secara aman dan efektif. Solusi yang sangat umum digunakan untuk transformator-transformator distribusi yaitu dengan menempatkan transformator dalam suatu wadah yang dengan minyak (oil) trafo yang melingkupi inti dan belitan secara menyeluruh. Minyak ini berfungsi ganda yaitu sebagai pendingin sekaligus media isolasi untuk inti transformator. Transformator dalam keadaan berbadan tempertunya

akan meningkat dan membangkitkan aliran konveksi sirkulasi minyak transformator.

Trafo jenis ini merupakan jenis lama yang sampai saat ini masih banyak digunakan. Trafo jenis terendam minyak ini memiliki harga yang masih lebih murah daripada jenis yang lain.

Transformator berdasarkan sistem pendinginannya seperti *Dry Type Transformers*, *Gas Immersed Transformers*, dan *Oil Immersed Transformers* di atas memiliki macam-macam media pendingin dan cara pengalirannya tersendiri. Media pendingin dan cara pengalirannya dapat diklasifikasikan seperti pada Tabel 2.1.

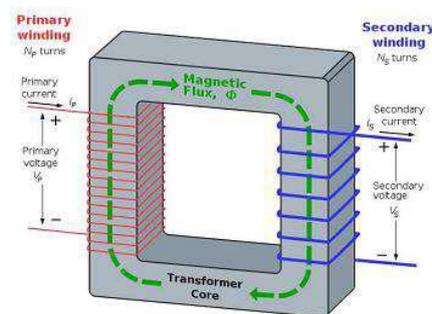
Tabel 2.1 Macam-macam sistem pendingin

No.	Macam Sistem Pendingin	Media			
		Dalam Transformator		Luar Transformator	
		Sirkulasi Alamiyah	Sirkulasi Paksa	Sirkulasi Alamiyah	Sirkulasi Paksa
1.	AN	-	-	Udara	-
2.	AF	-	-	-	Udara
3.	ONAN	Minyak	-	Udara	-
4.	ONAF	Minyak	-	-	Udara
5.	OFAN	-	Minyak	Udara	-
6.	OFAF	-	Minyak	-	Udara
7.	OFWF	-	Minyak	-	Air
8.	ONAN/ONAF	Kombinasi 3 dan 4			
9.	ONAN/OFAN	Kombinasi 3 dan 5			
10.	ONAN/OFAF	Kombinasi 3 dan 6			
11.	ONAN/OFWF	Kombinasi 3 dan 7			

2.2.2.3 Prinsip Kerja Transformator

Transformator yang sederhana pada dasarnya terdiri dari dua lilitan kumparan kawat, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Kumparan kawat ini dililitkan pada sebuah besi yang diberi nama inti besi (*core*). Kumparan primer yang terus dialiri oleh arus AC menimbulkan medan magnet di sekitarnya. Kekuatan medan magnet ini dipengaruhi oleh seberapa besarnya arus listrik yang dialiri. Semakin besar arus listriknya, semakin besar pula medan magnetnya. Fluktuasi medan magnet yang terjadi di sekitar kumparan primer akan menginduksi GGL (Gaya Gerak Listrik) dalam kumparan sekunder. Selanjutnya terjadi pelimpahan daya dari kumparan primer ke kumparan sekunder.

Dengan demikian, terjadilah pengubahan taraf tegangan listrik, baik dari tegangan rendah menjadi tegangan yang lebih tinggi maupun dari tegangan tinggi menjadi tegangan yang rendah



Gambar 2.3 Prinsip Kerja Transformator

Sumber : <https://www.belajaronline.net/2020/06/pengertian-transformator-prinsip-kerja-transformator.html>

2.2.2 Relay Pengaman³

Relay pengaman atau relay Proteksi adalah susunan peralatan yang berfungsi untuk mendeteksi atau merasakan adanya gangguan atau mulai merasakan adanya ketidknormalan pada peralatan atau bagian sistem listrik. Relay pengaman dapat mendeteksi atau merasakan adanya gangguan pada peralatan yang diamankan dengan mengukur atau membandingkan besaran-besaran yang diterimanya, misalnya arus, tegangan, daya, sudut fasa, frekuensi, impedansi, dan sebagainya dengan besaran yang ditentukan.

Relay secara otomatis membuka Pemutus Tenaga (PMT) atau *Circuit Breaker* (CB) untuk memisahkan peralatan atau bagian dari sistem yang terganggu dan

³ Wulandari, Nurul Suci. *Koordinasi Rele Arus Lebih Pada Interbus Transformator 100 MV A Dengan Sisi 150kV/70kV di Gardu Induk Keramasan*. 2014

memberi isyarat berupa lampu atau alarm (bel) yang menandakan sistem telah terjadi gangguan. Adapun fungsi relay proteksi ini pada sistem tenaga listrik, yaitu :

1. Merasakan, mengukur, dan menentukan bagian sistem yang terganggu serta memisahkan secepatnya sehingga sistem lainnya tidak terganggu dan dapat beroperasi secara normal ;
2. Mengurangi kerusakan yang lebih parah dari peralatan atau bagian sistem yang terganggu ;
3. Mengurangi pengaruh gangguan terhadap bagian sistem lain yang tidak terganggu di dalam sistem tersebut serta mencegah meluasnya gangguan ;
4. Memperkecil bahaya bagi aspek kehidupan.

Adapun jenis-jenis pembagian relay proteksi berdasarkan besaran ukur yang sering ditemukan dalam pengamanan sistem tenaga listrik, diantaranya yaitu:

1. Relay Arus

Adalah relay yang bekerja berdasarkan pengaturan arus yang akan bekerja pada sistem. Adapun yang relay arus yang sering ditemukan pada sistem tenaga listrik yaitu relay arus lebih atau *Over current Relay* (OCR). Relay arus lebih adalah suatu relay yang bekerja berdasarkan kenaikan arus yang melebihi suatu nilai pengamanan tertentu dan dalam jangka waktu tertentu, sehingga relay ini dapat dipakai sebagai pola pengamanan arus lebih. Relay ini pada dasarnya mengamankan adanya arus lebih yang diakibatkan oleh hubung singkat dan beban lebih. Relay arus lebih ini memberi syarat kepada PMT (Pemutus Tenaga) bila terjadi gangguan untuk membuka rangkaian sehingga kerusakan alat akibat gangguan pada sistem tenaga listrik dapat dihindari.

2. Relay Tegangan

Adalah relay yang bekerja berdasarkan pengaturan tegangan yang ada pada sistem. Terdapat dua jenis relay tegangan yang digunakan pada sistem tenaga listrik sebagai proteksi. Yaitu relay tegangan lebih (*Over Voltage Relay*) dan relay tegangan jatuh (*Under Voltage Relay*). relay ini bekerja melindungi apabila terjadi tegangan lebih atau tegangan jatuh akibat sambaran petir, selisih parameter beban yang digunakan

sehingga dapat menimbulkan kerusakan pada peralatan sistem tenaga listrik. kepada PMT (Pemutus Tenaga) bila terjadi gangguan untuk membuka rangkaian sehingga kerusakan alat akibat gangguan pada sistem tenaga listrik dapat dihindari.

3. Relay Gangguan Tanah

Adalah relay yang bekerja apabila terjadi gangguan hubungan singkat fasa ke tanah. Prinsip kerja dari relay gangguan tanah (*Ground Fault Relay*) ini sama dengan prinsip kerja dari relay arus lebih (*Over Current Relay*). Yang membedakannya yaitu jika relay arus lebih mendeteksi adanya hubung singkat antara fasa dengan fasa, sedangkan relay gangguan tanah antara fasa dengan tanah. Dikarenakan arus gangguan yang timbul akibat kebocor mengalir ke tanah dengan nilainya kecil dan tidak bias terdeteksi oleh relay arus lebih, dengan demikian diperlukan relay gangguan tanah (*Ground Foult Relay*)

2.2.3. Pemutus Tenaga

⁴Circuit Breaker atau Sakelar Pemutus Tenaga (PMT) adalah suatu peralatan pemutus rangkaian listrik pada suatu sistem tenaga listrik, yang mampu untuk membuka dan menutup rangkaian listrik pada semua kondisi, termasuk arus hubung singkat, sesuai dengan ratingnya. Juga pada kondisi tegangan yang normal ataupun tidak normal.

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

Syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh suatu Circuit Breaker (CB) agar dapat melakukan hal-hal diatas, adalah sebagai berikut :

- Mampu menyalurkan arus maksimum sistem secara terus menerus.

⁴ Alfianto, Rico.. *Evaluasi Penggunaan Pemutus Tenaga (PMT) Pada Gardu induk Sungai Juaro Palembang*. 2015. Hal. 6-25.

- Mampu memutuskan dan menutup jaringan dalam keadaan berbeban maupun terhubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus tenaga itu sendiri.
- Dapat memutuskan arus hubung singkat dengan kecepatan tinggi agar arus hubung singkat tidak sampai merusak peralatan sistem, sehingga tidak membuat sistem kehilangan kestabilan, dan merusak pemutus tenaga itu sendiri

Setiap Circuit Breaker dirancang sesuai dengan tugas yang akan dipikulnya, ada beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam rancangan suatu CB, yaitu :

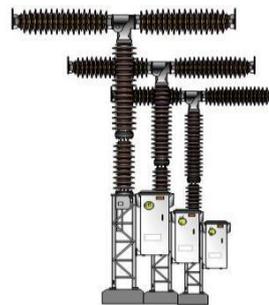
1. Tegangan efektif tertinggi dan frekuensi daya jaringan dimana pemutus daya itu akan dipasang. Nilainya tergantung pada jenis pentanahan titik netral sistem.
2. Arus maksimum continue yang akan dialirkan melalui pemutus daya. Nilai arus ini tergantung pada arus maksimum sumber daya atau arus nominal beban dimana pemutus daya tersebut terpasang.
3. Arus hubung singkat maksimum yang akan diputuskan pemutus daya tersebut.
4. Lamanya maksimum arus hubung singkat yang boleh berlangsung. hal ini berhubungan dengan waktu pembukaan kontak yang dibutuhkan.
5. Jarak bebas antara bagian yang bertegangan tinggi dengan objek lain disekitarnya.
6. Jarak rambat arus bocor pada isolatornya.
7. Kekuatan dielektrik media isolator sela kontak.
8. Iklim dan ketinggian lokasi penempatan pemutus daya.



PMT 20KV



PMT 150KV



PMT 500KV

Gambar 2.4 Jenis-Jenis PMT

Sumber : <https://www.google.com/eprints/polsri.ac.id>

2.2.4 Bus – Bar

Bus –bar (rel) adalah susunan konduktor yang digunakan dalam sebuah panel. Bus-bar untuk menghantarkan listrik dari incoming feeder ke seluruh cabang sirkuit perlindungan dalam instalasi listrik. Tentunya menggunakan alat ini untuk mempermudah instalasi maupun perubahan. Selain itu juga plat bus-bar efektif dalam mengantisipasi panas berlebih karena dilewati arus yang cukup besar. Alat ini salah satu komponen utama dari *Switchgear* yang berfungsi sebagai tempat atau mediator untuk menghubungkan beberapa rangkaian atau peralatan.

Bahan untuk bus-bar umumnya terbuat dari tembaga, aluminium, dan alloy. Material bus-bar yang berfungsi sebagai konduktor listrik memiliki peranan penting agar biaya yang dikeluarkan sebanding dengan umur hidup panel listrik. *Bus-bar* ada yang berbahan tembaga dan juga ada yang berbahan aluminium. Tembaga lebih baik dibandingkan aluminium dari segi konduktivitas dan kekuatan. Namun tembaga memiliki berat lebih besar dibandingkan aluminium. Tembaga memiliki tingkat kekerasan yang lebih tinggi sehingga memberikan resistensi yang lebih besar daripada aluminium sehingga bus-bar yang terbuat dari tembaga lebih tahan terhadap kerusakan.



Gambar. 2.5 Busbar

Sumber : <https://www.icecet.com/busbar-sizing-calculations/>

2.2.5 Peralatan Pengukuran⁵

Adapun alat ukur yang terdapat pada alat *switchgear* yaitu diantaranya seperti

:

1. Ampere Meter

Ampere meter adalah sebuah alat untuk mengukur kuat arus listrik dalam rangkaian tertutup. Ampere meter biasanya dipasang secara seri dengan elemen listrik. Alat ini sering digunakan oleh teknisi yang biasanya menjadi satu dalam multitester atau avometer. Cara penggunaannya yaitu dengan menghubungkan secara seri antara rangkaian yang akan diukur arusnya dengan amperemeter. Karena didalam ampere meter terdapat kumparan sebagai pelaku untuk menghasilkan putaran. Ampere meter bekerja berdasarkan prinsip gaya magnetik. Ketika arus mengalir melalui kumparan yang dilengkapi oleh medan magnet timbul gaya magnetik atau gaya Lorentz yang menggerakkan jarum penunjuk menyimpang.

2. Frekuensi Meter

Tujuan alat ini adalah untuk mengetahui banyaknya getaran listrik dengan kesatuan Hertz (Hz) dari sumber pembangkit tenaga listrik. Mengapa getaran ini perlu diketahui, hal ini menyangkut permasalahan dari alat yang dipergunakan, dalam hal ini adalah alat-alat listrik karena alat-alat tersebut sudah mempunyai spesifikasi tertentu untuk getarannya. Biasanya yang dipakai rata-rata 48 Hz sampai dengan 60 Hz.

3. Volt meter

Adalah alat untuk mengukur besar tegangan listrik dalam suatu rangkaian listrik. Volt meter disusun secara paralel terhadap letak komponen yang diukur dalam rangkaian. Prinsip kerjanya adalah adanya fluks magnetik yang memiliki bentuk gelombang sinus dengan frekuensi yang sama dan masuk ke dalam suatu kepingan logam secara

⁵ Sapiie, Soedjana. *Pengukuran dan Alat-Alat Ukur Listrik*. Jakarta. 1982.



pararel. Antara fluks yang satu dengan fluks yang lain terdapat suatu perbedaan fasa. Fluks bolak-balik akan membangkitkan tegangan-tegangan dalam kepingan logam yang akan menyebabkan terjadinya arus-arus putar di kepingan logam.

2.3 Gangguan Pada Switchgear⁶

Gangguan yang terjadi pada Switchgear Pada suatu jaringan transmisi pasti banyak terjadi hal-hal yang dapat mengganggu kerja dari suatu switchgear dengan kata lain kondisi abnormal pada switchgear baik gangguan yang berasal dari dalam (internal) maupun gangguan dari luar (eksternal).

Gangguan-gangguan tersebut yang biasa terjadi pada switchgear yaitu terjadinya panas, sering trip tanpa sebab yang diketahui dengan pasti, dan sistem kerjanya tidak dapat dioperasikan. Pelacakan penyebab gangguan tersebut dapat dilakukan diantaranya :

1. Terjadinya panas
 - Periksa arus beban.
 - Periksa sambungan-sambungan.
 - Periksa kotoran yang menempel / debu.
 - Periksa sistem pendingin dan suhu ruangan.
2. Sering trip (tanpa sebab yang jelas)
 - Periksa atau acak pada kabel-kabel pada rangkaian
 - pengontrolan sesuai gambar diagram rangkaian control.
 - Periksa penyetelan/setting dari relay proteksi.
 - Periksa tegangan catu daya rangkaian control.
 - Periksa kondisi/spesifikasi peralatan proteksi dan pemutus (switchgear).
 - Periksa hubungan ke beban.
3. Gagal dioperasikan (on/off)
 - Periksa kondisi fisik switchgear
 - Periksa atau melacak kabel-kabel control
 - Periksa komponen rangkaian kontrol dan karakteristik atau spesifikasi
 - Periksa hubungannya ke beban

⁶ Amalia, Dewi. *Operasi dan Pemeliharaan Switchgear*. 2015.

2.4. Hubung Singkat (Short Circuit)⁷

Gangguan ini timbul yang diakibatkan adanya hubung singkat, sehingga timbulnya arus baik itu dari fasa ke fasa maupun fasa ke tanah. Gangguan arus hubung singkat ini berakibat secara thermis maupun mekanis terhadap peralatan yang dilaluinya. Gangguan hubung singkat yang mungkin terjadi dalam jaringan yaitu ada 3 jenis :

- Gangguan hubung singkat 3 fasa
- Gangguan hubung singkat 2 fasa
- Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah

Dalam menghitung gangguan hubung singkat (*short circuit*), arus gangguannya dihitung dengan menggunakan rumus dasar yaitu :

$$I_{faut} = \frac{V}{Z} = (A) \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana :

V = Tegangan sumber (V)

Z = Impedansi jaringan, nilai ekuivalen dari seluruh impedansi di dalam jaringan dari sumber tegangan sampai ke titik gangguan (ohm/ Ω)

2.5. Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa⁸

Dalam melakukan perhitungan arus gangguan hubung singkat 3 fasa dapat dihitung dengan menggunakan rumus dasar, yang dimana impedansi ekuivalen jaringan dimasukkan ke dalam rumus dasar tersebut. rangkaian gangguan tiga fasa pada suatu jaringan dengan hubungan transformator daya dengan netral ditanahkan melalui suatu tahanan. Sehingga arus gangguan hubung singkat tiga fasa dapat dihitung berdasarkan rumus dasar seperti persamaan (2.1) diatas dengan menggunakan rumus :

$$I_{3fasa} = \frac{V_{ph}}{Z_{eq}} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana :

⁷ Yonner Hutapea, Surya. *Perhitungan Setting Rele Arus Lebih Pada Trafo Sisi 20 kV di Gardu Induk Bukit Asam*. 2014 Hal 21

⁸ Ibid., Hal.28

I 3fasa : Arus gangguan hubung singkat 3 fasa (A)

V_{ph} : Tegangan fasa – netral sistem (kV) = $\frac{\text{Tegangan yang diketahui}}{\sqrt{3}}$

Z_{eq} : Impedansi ekivalen urutan Positif (ohm/ Ω)

sebelum melakukan perhitungan arus hubung singkat, maka kita harus memulai perhitungan pada rel daya sumber masukan untuk berbagai jenis gangguan, kemudian menghitung pada titik-titik lainnya. Untuk itu diperlukan pengetahuan mengenai dasar impedansi urutan rel daya tegangan tinggi atau bisa juga disebut sebagai impedansi sumber, impedansi transformator, dan impedansi penyulang (penghantar).

a) Impedansi Sumber

Untuk menghitung impedansi sumber, maka dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$Z_s = \frac{(kV)^2}{MVA} \dots\dots\dots(2.3)^9$$

Dimana :

Z_s = Impedansi Sumber (ohm/ Ω)

kV^2 = Tegangan pada suplay *Incoming* / tegangan pada sisi primer trafo daya (kV)

MVA = Kapasitas dari suplay *Incoming* (MVA)

b) Impedansi Transormator

Pada perhitungan impedansi suatu transformator yang diambil adalah nilai harga reaktansinya, sedangkan tahanannya diabaikan karena nilainya kecil. Untuk mencari reaktansi trafo dalam ohm dihitung dengan cara sebagai berikut :

- Langkah pertama mencari nilai ohm pada 100% untuk trafo yang diketahui (kV). Yaitu dengan menggunakan rumus :

$$X_t \text{ pada } 100\% = \frac{(kV_{sisi \text{ sekunder}})^2}{MVA} \dots\dots\dots(2.4)^{10}$$

⁹ Ibid., Hal. 23

¹⁰ Ibid., Hal. 24

- Lalu tahap selanjutnya yaitu mencari nilai reaktansi tenaganya dengan menggunakan rumus:

$$X_t = \% \text{ impedansi transformator} \times X_t \text{ pada } 100\%$$

Dimana :

X_t = impedansi trafo tenaga (ohm/ Ω)

kV^2 = Tegangan pada sisi sekunder trafo daya (kV)

MVA = Kapasitas pada trafo daya (MVA)

c) Impedansi Penghantar

Untuk perhitungan impedansi penghantar, perhitungannya tergantung dari besarnya impedansi perunit yang diasumsikan dengan titik-titik gangguan yang terjadi, yaitu pada titik asumsi 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% dari panjang penghantar yang akan dihitung, dimana nilainya tergantung pada jenis penghantarnya, yaitu dari bahan apa penghantar tersebut dibuat dan juga tergantung dari besar kecilnya penampang dan panjang penghantarnya. Sehingga untuk impedansi penghantar dapat ditentukan dengan menggunakan rumus :

$$Z_{\text{penghantar}} = \% \text{ panjang penghantar} \times Z / (\text{ohm}) \dots \dots \dots (2.5)^{11}$$

Dimana :

$Z_{\text{penghantar}}$: Impedansi penghantar (per unit)

% panjang penghantar : Persen % x panjang penghantar

Z : Nilai Impedansi (per unit)

d) Impedansi Ekuivalen Jaringan

Setelah dihitung impedansi dari setiap unit, maka perhitungan yang akan dilakukan selanjutnya adalah perhitungan besar nilai impedansi ekuivalen atau total, dari titik gangguan sampai suplay masukan daya atau sumber. Karena dari sejak sumber ke titik gangguan yang ingin dicari terbentuk adalah tersambung seri. Maka perhitungannya dapat langsung dengan cara

¹¹ Ibid., Hal. 25

menjumlah impedansi yang telah dihitung per unit tersebut. sehingga untuk impedansi ekivalen jaringan dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$Z_{eq} = Z_s + Z_t + Z \text{ (penghantar) (ohm/ } \Omega \text{) } \dots\dots\dots(2.6)^{12}$$

Dimana :

Z_{eq} : Nilai Impedansi Ekivalen Jaringan

Z_s : Nilai Impedansi Sumber

Z_t : Nilai Impedansi Trafo daya

Z (penghantar) : Nilai Impedansi Penghantar

2.6. Relay Proteksi¹³

Relay proteksi atau relay pengaman adalah susunan peralatan yang berfungsi untuk mendeteksi atau merasakan adanya gangguan atau mulai merasakan adanya ketidak normalan pada peralatan atau bagian sistem tenaga listrik. Relay proteksi dapat mendeteksi atau merasakan adanya gangguan pada peralatan yang diamankan dengan mengukur atau membandingkan besaran- besaran yang diterimanya, misalnya arus, tegangan, daya, sudut fasa, frekuensi, impedansi dan sebagainya dengan besaran yang telah ditentukan. Relay secara otomatis membuka Pemutus Tenaga (PMT) atau Circuit Breaker (CB) untuk memisahkan peralatan atau bagian dari sistem yang terganggu dan memberi isyarat berupa lampu atau alarm (bel) yang menandakan sistem telah terjadi gangguan. Adapun fungsi dari relay proteksi pada sistem tenaga listrik, yaitu :

- Merasakan, mengukur dan menentukan bagian sistem yang terganggu serta memisahkan secepatnya sehingga sistem lainnya tidak terganggu dan dapat beroperasi secara normal;
- Mengurangi kerusakan yang lebih parah dari peralatan atau bagian sistem yang terganggu;

¹² Ibid., Hal. 26

¹³ Wulandari, Nurul Suci. *Koordinasi Rele Arus Lebih Pada Interbus Transformator 100 MV A Dengan Sisi 150kV/70kV di Gardu Induk Keramasan. 2014*

- Mengurangi pengaruh gangguan terhadap bagian sistem lain yang tidak terganggu di dalam sistem tersebut serta mencegah meluasnya gangguan;
- Memperkecil bahaya bagi manusia.

2.6.1. Syarat-Syarat Relay Proteksi

Relay proteksi dirancang untuk dapat merasakan atau mengukur adanya gangguan atau mulai merasakan adanya ketidak normalan pada peralatan atau bagian sistem tenaga listrik. Maka dari itu relay proteksi harus memenuhi syarat- syarat sebagai berikut :

- Dapat diandalkan (*Reliable*)
Dalam keadaan normal (tidak ada gangguan) relay tidak boleh bekerja. Tetapi bila suatu saat terjadi gangguan yang mengharuskan relay bekerja, maka relay tidak boleh gagal bekerja untuk mengatasi gangguan tersebut. Disamping itu relay tidak boleh salah bekerja, sehingga menimbulkan pemadaman yang tidak seharusnya ataupun menyulitkan analisa gangguan yang terjadi. Relay pengaman diharapkan mempunyai jangka waktu pemakaian yang lama.
- Selektif
Relay bertugas mengamankan peralatan atau bagian sistem dalam daerah pengamanannya. Dengan kata lain pengamanan dinyatakan selektif bila relay dan PMT yang bekerja hanyalah pada daerah yang terganggu saja.
- Waktu kerja relai cepat (*Responsive*)
Relay pengaman harus dapat bekerja dengan cepat segera setelah merasakan adanya gangguan pada sistem guna mengurangi kerusakan yang lebih parah dari peralatan atau bagian sistem yang terganggu.
- Peka (*Sensitive*)
Relay harus dapat bekerja dengan kepekaan yang tinggi, artinya harus cukup sensitif terhadap gangguan didaerahnya meskipun gangguan tersebut minimum.
- Ekonomis dan sederhana
Penggunaan relay pengaman harus dipertimbangkan sisi ekonomisnya tanpa mempengaruhi fungsi relay tersebut.

2.6.2 Jenis-Jenis Relay Proteksi

a. Berdasarkan prinsip kerjanya:

➤ Relay Elektromagnetis

Relay elektromagnetis atau yang disebut dengan *electromechanical* relay. Relay ini menghubungkan rangkaian beban ON dan OFF dengan pemberian energi elektromagnetis, yang membuka dan menutup kontak pada rangkaian listrik maupun elektronis. Relay ini dapat digunakan untuk mengontrol rangkaian beban tegangan tinggi dengan control tegangan rendah.

➤ Relay Thermis

menggunakan panas sebagai pembatas arus, khususnya pada motor. Relay ini biasanya disebut *Thermal Overload Relay* (TOR). Cara kerja relay ini adalah dengan mengkonversi arus yang mengalir menjadi panas untuk mempengaruhi bimetal. Bimetal akan menggerakkan tuas untuk menghentikan aliran listrik

➤ Relay Elektronik

relay elektronik adalah bekerja karena adanya medan magnet yang digunakan untuk menggerakkan saklar. Saat kumparan diberikan tegangan sebesar tegangan kerja relay maka akan timbul medan magnet pada kumparan karena adanya arus yang mengalir pada lilitan kawat. Kumparan yang bersifat sebagai elektromagnet ini kemudian akan menarik saklar dari kontak NC (Normally Close) ke kontak NO (Normally Open). Jika tegangan – tegangan pada kumparan dimatikan maka medan magnet pada kumparan akan hilang, sehingga pegas akan menarik saklar ke kontak NC.

b. Berdasarkan konstruksinya :

- Tipe angker tarikan;
- Tipe batang seimbang;
- Tipe cakram induksi;
- Tipe kumparan bergerak;

c. Berdasarkan besar yang diukur :

- Relay Tegangan, adalah relay yang bekerja berdasarkan pengaturan tegangan yang ada pada sistem.
 - Relay Arus, adalah relay yang bekerja berdasarkan pengaturan arus yang akan bekerja pada sistem.
 - Relay Impedansi, adalah relay yang bekerja berdasarkan batasan impedansi pada sistem.
 - Relay Frekuensi, adalah relay yang bekerja berdasarkan pengaturan frekuensi yang telah ditentukan.
- d. Berdasarkan cara kerja kontrol elemen :
- *Direct acting* : Bagian elemen kontrol yang bekerja langsung memutuskan aliran.
 - *Indirect acting* : Bagian kontrol elemen hanya digunakan untuk menutup kontak suatu peralatan lain yang digunakan untuk memutuskan rangkaian.

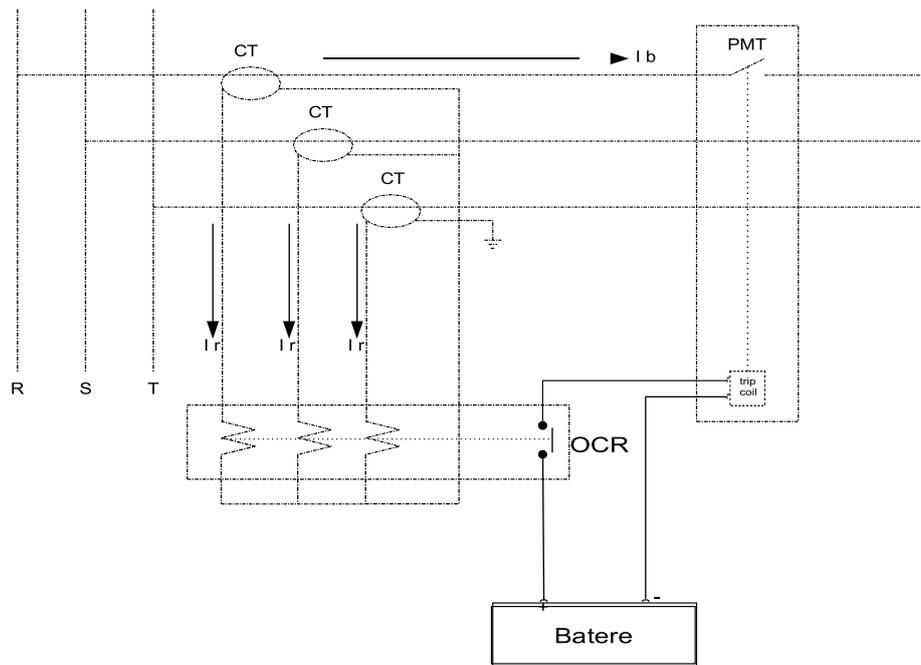
2.7. Relay Arus Lebih (OCR)¹⁴

Relay arus lebih adalah suatu relay yang bekerjanya berdasarkan kenaikan arus yang melebihi suatu nilai pengamanan tertentu dan dalam jangka waktu tertentu, sehingga relay ini dapat dipakai sebagai pola pengamanan arus lebih. Relay ini pada dasarnya mengamankan adanya arus lebih yang disebabkan oleh gangguan hubung singkat atau beban lebih. Relay arus lebih akan bekerja bila besarnya arus input melebihi suatu harga tertentu (arus kerja) yang dapat diatur dan dinyatakan menurut kumparan sekunder dari trafo arus. Relay arus lebih akan memberi isyarat kepada PMT (Pemutus Tenaga) bila terjadi gangguan hubung singkat untuk membuka rangkaian sehingga kerusakan alat dapat dihindari.

Proteksi arus lebih meliputi proteksi gangguan hubung singkat yang dapat berupa gangguan hubung singkat fasa-fasa, satu fasa ke tanah serta hubung singkat antar fasa. Proteksi terhadap hubung singkat antar fasa dikenal sebagai proteksi arus

¹⁴ Wulandari, Nurul Suci. *Koordinasi Rele Arus Lebih Pada Interbus Transformator 100 MV A Dengan Sisi 150kV/70kV di Gardu Induk Keramasan. 2014*

lebih dan relay yang digunakan rela arus lebih (*over current relay*).



Gambar 2.6 Rangkaian Relay Arus Lebih

Sumber : <https://www.google.com/jurnal.uisu.ac.id>

Kondisi normal arus beban (I_b) mengalir pada jaringan tenaga dan oleh trafo arus besaran arus ini ditransformasikan ke besaran sekunder (I_r). Arus I_r mengalir pada kumparan relay, tetapi karena arus ini masih lebih kecil dari pada suatu harga yang ditetapkan (*setting*), maka relay 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 coil untuk bekerja dan membuka PMT, sehingga jaringan yang terganggu dipisahkan dari jaringan.

2.7.1 Prinsip Kerja Relay Arus Lebih (OCR)

Relay arus lebih adalah relay yang bekerja terhadap arus lebih, ia akan bekerja bila arus yang mengalir melebihi nilai settingnya (Iset) atau relay arus lebih merupakan pengaman yang bekerja karena adanya besaran arus dan terpasang pada jaringan tegangan tinggi, tegangan menengah juga pada pengaman transformator tenaga. Pada dasarnya relay 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.

2.7.2 Karakteristik Relay Arus Lebih (OCR)

Karakteristik kerja relay arus lebih (*Over Current Relay*) didasarkan pada waktu kerjanya, yaitu:

1. Relay Arus Lebih Waktu Seketika (*Moment-Instantaneous*)

Relay ini akan memberi perintah kepada Pemutus Tenaga (PMT) pada saat terjadi gangguan bila arus gangguan besarnya melampaui penyetelannya, dan jangka waktu kerja relay mulai pick-up sampai kerja relay sangat singkat tanpa penundaan waktu yaitu 20 – 60 ms.

2. Relay Arus Lebih Waktu Tertentu (*Definite time*)

Relay ini akan memberi perintah kepada Pemutus Tenaga (PMT) pada saat terjadi gangguan bila besarnya arus gangguan melampaui penyetelannya, dan jangka waktu kerja relay mulai pick-up sampai kerja relay waktunya ditunda dengan harga tertentu tidak dipengaruhi oleh besarnya arus gangguan.

3. Relay Arus Berbanding Terbalik (*Inverse*)

Relay ini akan memberi perintah kepada Pemutus Tenaga (PMT) pada saat terjadi gangguan bila besarnya arus gangguan melampaui penyetelannya, dan jangka waktu kerja relay mulai pick-up sampai

kerja relay waktu tundanya berbanding terbalik dengan besarnya arus gangguan. Terdapat 4 macam relay *inverse* yaitu :

- *Standard Inverse Time* (SIT)

Yaitu karakteristik yang menunjukkan perbandingan antara besar arus dengan waktu kerja relai yang standar, ditulis dengan rumus :

- *Very Inverse Time* (VIT)

Yaitu karakteristik yang menunjukkan perbandingan antara besar arus dengan waktu kerja relay yang lebih cepat/tinggi dari standar *inverse*, ditulis dengan rumus :

- *Extremelly Inverse Time* (EIT)

Yaitu karakteristik yang menunjukkan perbandingan antara besar arus dengan waktu kerja relay yang lebih cepat/tinggi dari *standard* dan *very inverse*, ditulis dengan rumus :

- *Long Time Inverse* (LTI)

Yaitu karakteristik yang menunjukkan perbandingan antara besar arus dengan waktu kerja relai yang lebih lambat/rendah diantara karakteristik yang lain, ditulis dengan rumus :

Tabel 2.2 Koefisien *invers time dial*

Type Kurva	Koefisien (k)	Koefisien (α)
<i>Standard Inverse</i>	0,14	0,02
<i>Very Inverse</i>	13,5	1
<i>Extremely Inverse</i>	80	2

2.7.3 Penyetelan Relay Arus Lebih (OCR)¹⁵

Relay arus lebih pada dasarnya lebih memiliki fungsi sebagai pengaman gangguan hubung singkat. Pada dasarnya penyetelan pengaman arus lebih dilakukan penyetelan atas besaran arus dan waktu. Sebelum melakukan penyetelan relay tersebut, terlebih dahulu harus dihitung arus nominalnya (I_n). kemudian barulah bisa melakukan penyetelan. Berikut tata cara melakukan penyetelan relay arus lebih dengan perhitungan-perhitungan dibawah ini :

1. Menghitung besarnya arus nominal :

$$I_n = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana :

I_n : Arus nominal

kVA : Daya base sebagai acuan (kVA)

2. Menghitung arus penyetelan :

$$I_s = \frac{Kfk}{Kd} \times \frac{1}{Ratio CT} \times I_n \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana :

I_s : Nilai *setting* arus

Kfk : Faktor keamanan

Kd : Faktor arus kembali

Ratio CT : Ratio arus yang tertera pada CT

I_n : Arus nominal

- (untuk arus lebih dengan karekteristik waktu tertentu (*definite time*) nilai Kfk sebesar 1,1-1,2 dan Kd sebesar 0.8)
- (untuk arus lebih dengan karekteristik waktu terbalik (*inverse time*) nilai Kfk sebesar 1,1 dan Kd sebesar 1.0)

¹⁵ Yonner Hutapea, Surya. op. cit. 17-20

3. Menentukan TMS (*time multiplier setting*) :

$$tms = \left\{ \frac{t \times \left(\left(\frac{I_f}{I_s} \right)^\alpha - 1 \right)}{\beta} \right\} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana :

- tms : Faktor pengali terhadap waktu
- t : Waktu operasi (yang dimana waktu kerja pada relay arus lebih ditentukan dengan kisaran nilai 0,2 – 0,4 untuk mendapatkan pengamanan yang selektif)
- If : Arus gangguan (A)
- Is : Arus penyetelan (*setting*) (A)
- α dan β : Konstanta Invers

4. Menentukan waktu *setting* :(2.10)

$$tset = \left\{ \frac{(tms \times \beta)}{\left(\left(\frac{I_f}{I_s} \right)^\alpha - 1 \right)} \right\}$$

dimana :

- tset : Waktu setting
- tms : Faktor pengali terhadap waktu
- If : Arus gangguan (A)
- Is : Arus penyetelan (*setting*) (A)
- α dan β : Konstanta Invers