

BAB II

TINJUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Ada beberapa rujukan penelitian yang akan dijadikan sebagai pendukung untuk penulisan tugas akhir ini antara lain:

- Sidabutar, 2010 melakukan penelitian mengenai analisi hubung singkat dan motor *starting* dengan menggunakan ETAP *power station* 4.0. Dari penelitian ini bisa disimpulkan besaran arus suatu hubung singkat bergantung pada besaran sumber yang membangkitkan sistem tersebut, dan nilai reaktansi peralatan serta nilai reaktansi sistem keseluruhan sampai dengan ke titik gangguan. Suatu sumber arus hubung singkat akan berasal dari generator, motor induksi, motor sinkron dan sistem pembangkit (PLN).
- Rezky Fajrian, 2015 melakukan penelitian mengenai Analisis Koordinasi Proteksi *Overcurrent* relay pada jaringan distribusi SUTM 20 kV dengan menggunakan software ETAP. Dari penelitian ini bisa disimpulkan bahwa prinsip kerja dari suatu relay akan bekerja ketika relay yang terpasang didaerah tersebut merasakan adanya gangguan yang terjadi dan gangguan tersebut memiliki besar arus yang melebihi setting arus dari relay yang terpasang, maka dari itu relay akan bekerja dengan memerintahkan CB untuk trip.
- Hardiansyah, 2016 melakukan penelitian mengenai Analisi Koordinasi Proteksi pada sistem distribusi radial. Dari penelitian ini bisa disimpulkan bahwa prinsip kerja relai arus lebih akan bekerja apabila relai relai tersebut merasakan besar arys yang melebihi dari settingan yang dipasang direlai tersebut, maka karena besar arus yang melebihi settingan relai akan bekerja dengan memerintahkan CB untuk trip.

- Nanda Dicky Wijayanto, 2012 melakukan penelitian mengenai Koordinasi Proteksi tegangan kedip dan arus lebih pada sistem kelistrikan industry nabati. Dari penelitian ini bisa disimpulkan jika terjadi gangguan hubung singkat maka rele arus lebih yang terlebih dahulu mensensing gangguan. Jikan rele arus lebih tidak dapat mengamankan gangguan maka rele *under voltage* akan bekerja hal ini disebabkan karena pada saat terjadi hubung singkat tegangan akan terus menurun yang menyebabkan rele *under voltage* bekerja.
- Gisa Gumilang, 2013 melakukan penelitian mengenai evaluasi kelayakan rele pengaman pada sistem kelistrikan pabrik semen di Jawa Barat. Dari penilitian yang dilakukan bisa disimpulkan terdapat beberapa overlapping dan miss coordination anantara rele utama yang terpaang dan juga rele cadangan yang berhasil dilakukan pengaturan ulang sehingga bisa dikatakan koordinasi kerja antar rele bisa berjalan dengan baik.
- Hanna Septian widata, 2015 melakukan penelitian mengenai analisis koordinasi proteksi jaringan distribusi 20 kV pada penyulang tambak wedi akibat gangguan arus lebih (over Current). Pada penilitian ini bisa disimpulkan bahwa untuk penempatan recloser sangatlah penting karena suatu recloser disini membantu agar bisa mendapatkan gangguan di titik terjauh dari penyulang.
- Afandi, 2009 melakukan penelitian mengenai analisis setting relai arus lebih dari relai gangguan tanah pada penyulang sadewa di GI cawing. Pada penilitian ini bisa ditarik kesimpulan bahwa besarnya suatu arus hubung singkat dipengaruhi oleh jarak titik gangguan, semakin jauh gangguan maka semakin kecil pula arus gangguan hubung singkatnya dan begitu pula sebaliknya semakin dekat dekat titik gangguan maka semakin besar pula arus gangguan hubung singkat yang terjadi.
- Erliwati, Syafii, dan Muhammad Nurdin, 2015 melakukan penelitian koordinasi proteksi arus lebih pada penyulang distribusi

20 kV GI Pauh Limo. Pada penelitian ini bisa ditarik kesimpulan semakin jauh lokasi gangguan dari lokasi relai, semakin kecil arus gangguan yang dirasakan relai.

- Yoyok Triyono, Ontoseno Penangsang, Sjamsjul Anam, 2013 melakukan penelitian tentang analisis studi rele pengaman (Over Current Relay dan Ground fault Relay) pada distribusi daya sendiri dari PLTU Rembang. Pada penelitian ini bisa ditarik kesimpulan dengan adanya rele yang belum tepat dan koordinasi yang tidak baik hal ini bisa menyebabkan rele tersebut trip meski tidak terjadi gangguan.
- Novie Elok Setiawati, 2016 melakukan penelitian koordinasi proteksi Directional Overcurrent Relay dengan mempertimbangkan gangguan arah arus di Pabrik PT. Petrokimia Gresik. Pada penelitian ini dapat ditarik kesimpulan ressetting koordinasi proteksi menambahkan rele arus lebih (DOCR) dengan waktu yang lebih cepat. *Ressetting* ini bertujuan agar sistem menjadi lebih stabil dan juga selektif dalam melakukan trip pada daerah yang dilindungi.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan suatu proses penyaluran energi listrik dari jaringan transmisi ke pelanggan yang membutuhkan energi listrik. Sistem distribusi tenaga listrik dibagi menjadi dua bagian yaitu :

1. Sistem Distribusi Primer

Sistem distribusi primer ialah jaringan distribusi tegangan menengah dimana berasal dari jaringan transmisi yang diturunkan tegangannya dari gardu induk menjadi tegangan 20 kV atau jaringan menengah lalu di salurkan ke semua lokasi pelanggan listrik.

2. Sistem Distribusi Sekunder

Sistem distribusi sekunder ialah jaringan distribusi yang disalurkan ke pelanggan setelah diturunkan tegangannya menjadi tegangan rendah yaitu 220 V atau 380 V. Sistem distribusi sekunder akan meliputi transformator yang dimana transformator berfungsi sebagai penurun tegangan untuk disalurkan ke pelanggan listrik.

(Syahputra: *Transmisi Distribusi*, 2005).

2.2.2 Sistem Proteksi Tenaga Listrik

2.2.2.1 Pengertian Sistem Proteksi Tenaga Listrik

Sistem proteksi tenaga listrik ialah sistem proteksi yang terpasang pada semua peralatan-peralatan tenaga listrik, seperti pada generator, transformator, jaringan distribusi/transmisi, isolasi dan lain-lain pada peralatan sistem tenaga listrik. Agar semua sistem proteksi berada pada kondisi abnormal, yang dimaksud abnormal pada sistem proteksi tenaga listrik ialah hubung singkat, tegangan lebih/kurang, beban lebih, frekuensi sistem naik/turun, dan lain-lain.

2.2.2.2 Tujuan Sistem Proteksi Tenaga Listrik

Adapun tujuan dari sistem proteksi tenaga listrik:

1. Untuk menjaga dan mengurangi kerusakan peralatan listrik yang ditimbulkan dari gangguan yang terjadi.
2. Untuk mengisolir gangguan yang terjadi agar tidak melebar menjadi semakin luas.
3. Memberikan sistem pelayanan listrik dengan keandalan yang tinggi dan handal untuk disalurkan kekonsumen.
4. Mengamankan dari bahaya yang ditimbulkan listrik terhadap manusia,

2.2.2.3 Persyaratan Sistem Proteksi Tenaga Listrik

1. Kepekaan (*Sensitivity*)

Kepekaan atau sensitifitas ialah suatu kepekaan rele proteksi terhadap gangguan apa aja yang terjadi di daerah sistem proteksi tenaga listrik. Kepekaan atau sensitifitas ditentukan oleh nilai terkecil dari besaran penggerak pada saat mulai beroperasinya peralatan proteksi tersebut. Pada dasarnya relai arus lebih yang terpasang sebagai pengaman peralatan motor, generator dan juga trafo harus memiliki kepekaan yang sangat baik dan tinggi agar bisa mendeteksi gangguan yang sedang terjadi supaya bisa meminimalisir keruakan yang terjadi.

2. Keandalan (*Reliability*)

Suatu sistem proteksi tenaga listrik bisa dikatakan andal jika dimana dalam cara kerjanya sesuai dengan yang diharapkan. Ketika sistem proteksi tenaga listrik tidak andal dan gagal kerjanya pada saat seharusnya dibutuhkan dan bekerja saat tidak seharusnya bekerja, diaman keandalan relai bisa dikatakan handal bila mempunyai harga 90-99 %. Adapun aspek yang harus dipenuhi dalam sistem proteksi, yaitu :

a. *Dependability*

Dependability adalah tingkat kepastian agar mampu mengamankan bila terjadi gangguan tinggi dan bisa bekerja untuk mendeteksi serta melepaskan bagian yang terkena gangguan.

b. *Security*

Security adalah tingkat kepastian agar bisa bekerja bila terjadi gangguan dan tidak salah kerja tinggi.

c. *Availability*

Availability adalah suatu perbandingan antara waktu total pada beroperasi dengan waktu saat pengaman siap bekerja.

3. Selektivitas dan Diskriminatif

Selektif ialah suatu kemampuan pada sistem proteksi tenaga listrik agar dapat memisahkan daerah yang mengalami gangguan. Sedangkan deskriminatif ialah suatu sistem proteksi tenaga listrik agar mampu melihat atau merasakan kondisi mana yang kondisi abnormal dan kondisi normal. Selektivitas dan deskriminatif pada sistem proteksi tenaga listrik bisa tercapai dengan mengatur peningkatan waktu, peningkatan setting arus dan juga dengan memilih relai dengan karakteristiknya tepat dan terkoordinasi dengan baik.

4. Kecepatan (*Speed*)

Suatu sistem proteksi tenaga listrik harus memperhatikan tingkat kecepatan dalam menangani terjadinya gangguan, hal ini agar ketika terjadi gangguan bisa diminimalisir kerusakan yang terjadi agar meluas. Untuk memperkecil kerusakan yang diakibatkan oleh gangguan maka bagian yang terkena gangguan agar dilepaskan dan dipisahkan secepat mungkin. Dengan begini bisa meningkatkan mutu pelayanan, keamanan bagi manusia dan peralatan-peralatan tenaga listrik.

5. Ekonomis

Dalam segi perancangan proteksi tenaga listrik yang baik adalah dengan melihat atau memperhitungkan dari segi aspek ekonomis tanpa mengesampingkan dari keandalan sistem proteksi yang terpasang memiliki kehandalan yang dihasilkan.

2.2.2.4 Jenis-Jenis Gangguan Pada Sistem Tenaga Listrik

Beberapa jenis gangguan yang terjadi dalam sistem tenaga listrik, yaitu sebagai berikut :

1. Gangguan beban lebih (*Overload*)

Gangguan beban lebih adalah gangguan yang diakibatkan dari tegangan yang terpasang atau tersetting dialapangan lebih besar dari yang telah diterapkan. Gangguan ini bisa disebut bukan gangguan murni, tetapi gangguan ini bila dibiarkan dapat merusak peralatan sistem tenaga listrik yang dialiri arus tersebut.

2. Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat ialah gangguan hubung singkat yang bisa terjadi dua fasa maupun tiga fasa. Gangguan ini bisa menyebabkan arus lebih pada fasa yang terganggu dan juga akan dapat memberi kenaikan tegangan pada fasa yang tidak terganggu, hamper semua gangguan yang ada di sistem tenaga listrik ialah gangguan yang tidak simetri. Gangguan tidak semetri terjadi karena gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah dan dua fasa.

3. Gangguan Tegangan Lebih (*Over Voltage*)

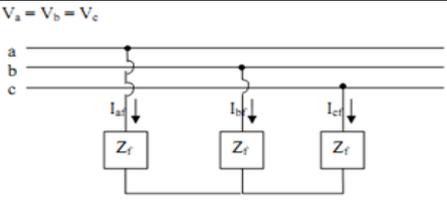
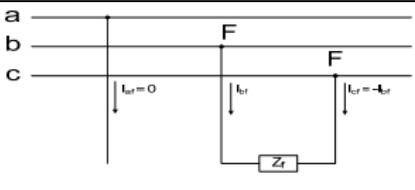
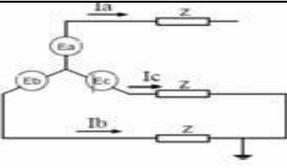
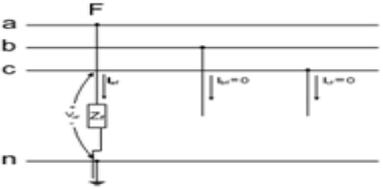
Gangguan tegangan lebih ialah gangguan yang terjadi karena kelainan pada sistem tenaga listrik , gangguan ini terjadi karena adanya gangguan petir, gangguan karena isolasi akibat perubahan yang mendadak dari kondisi di rangkaian. Pada perindustrian gangguan tegangan lebih biasanya terjadi power frekuensi disebabkan oleh pembangkit *over speed* pada generator, kehilangan beban dan gangguan pada AVR.

2.2.3 Hubung Singkat

2.2.3.1 Jenis Gangguan Hubung Singkat

Pada gangguan hubung singkat yang mungkin bisa terjadi pada sistem tenaga listrik dibagi atas beberapa jenis hubugng sigkat yang ada diantaranya ada hubung singkat 3 fasa, 2 fasa, 2 fasa ketanah dan juga 1 fasa ke tanah. Pada intinya arus gangguan yang memiliki arus paling besar yaitu pada gangguan hubung singkat 3 fasa. Adapun digambarkan jenis-jenis gangguan hubung singkat sebagai berikut:

Tabel 2.1 Jenis-jenis hubung singkat

No	Gangguan Hubung Singkat	Gambar Rangkaian
1.	Hubung singkat 3 fasa	
2.	Hubung singkat 2 fasa	
3.	Hubung singkat 2 fasa ke tanah	
4.	Hubung singkat 1 fasa ke tanah	

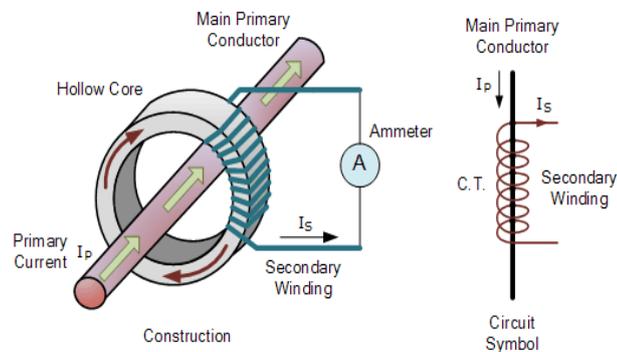
2.2.3.1 Peralatan Proteksi Sistem Tenaga Listrik

Didalam proteksi sistem tenaga listrik memiliki beberapa peralatan proteksi sistem tenaga listrik, yaitu:

1. Trafo arus

Trafo arus ialah trafo yang ada didalam peralatan listrik yang berguna untuk menurunkan arus yang sangat besar menjadi arus yang lebih kecil.

Trafo ini berkarateristik jika ditandai oleh *current transformer ratio* (CT) yang merupakan perbandingan antara arus yang dilewatkan pada sisi primer dan sekunder.

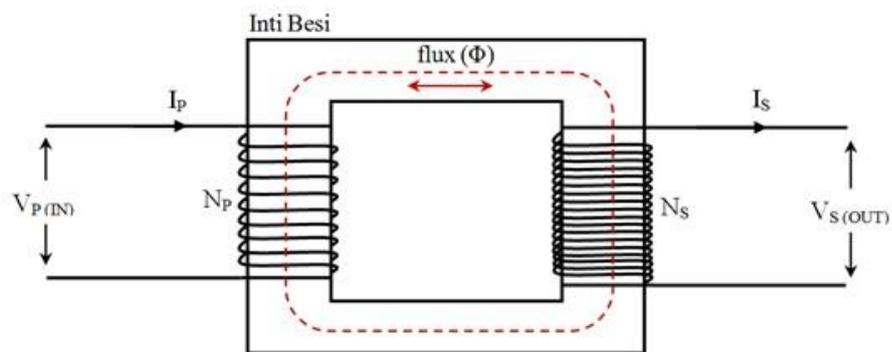


Gambar 2.1 Prinsip Kerja Trafo Arus

Prinsip kerja trafo arus ialah pada saat pada sisi primer mengalir pada lilitan primer akan muncul medan dan akan berkumpul pada inti besi. Medan magnet tersebut akan menghasilkan flux primer dan akan memotong lilitan sekunder dan nantinya akan menginduksi tegangan tegangan pada lilitan sekunder.

2. Trafo Tegangan

Trafo tegangan ialah suatu peralatan sistem tenaga listrik yang sama seperti trafo biasanya yaitu menurunkan tegangan yang tinggi ke lebih rendah. Tetapi teafu ini memiliki transformasinya, dimana pada trafo tegangan memiliki ketelitian yang sangat tinggi dibandingkan trafo biasanya.



Gambar 2.2 Prinsip Kerja Trafo Tegangan

Prinsip kerja trafo tegangan ialah jadi seperti yang diliatkan pada gambar 2.2 dimana jika pada kumparan primer mengalir arus I_p maka akan menimbulkan gaya gerak pada maghnet dan akan memproduksi fluks pada intinya setelah itu akan membangkitkan gerak listrik pada bagian sekundernya. Dan pada kumparan sekunder tertutup maka akan mengalir arus I_s .

2. Relai Proteksi

Relai proteksi ialah sebuah peralatan listrik yang dimana dirancang untuk berfungsi mendeteksi bila terjadi gangguan, dimana rele pengaman ini sangat diperlukan agar kelangsungan kerja suatu sistem tenaga listrik bisa berjalan dengan baik dan bisa mengisolir daerah yang mengalami gangguan agar tidak menyebar luas.

3. *Circuit Breaker* (CB)

Circuit Breaker (CB) ialah suatu alat pemutus arus listrik yang otomatis dikarenakan lebhnya arus yang melewati circuir breaker tersebut. Dan juga berfungsi selai memutus juga bisa menghubungkan rangkaian listrik yang terhubung ke baban secara aman.

Berikut ini adalah syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh suatu peralatan untuk menjadi pemutus daya :

- a. Mampu menyalurkan arus maksimum sistem secara kontinu.
- b. Mampu memutuskan atau menutup jaringan dalam keadaan berbeban ataupun dalam keadaan hubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus daya itu sendiri.
- c. Mampu memutuskan arus hubung singkat dengan kecepatan tinggi.

Macam-macam *Circuit Breaker* berdasarkan media pemutus listrik adalah sebagai berikut:

- a. *Air Circuit Breaker* (ACB)

Air Circuit Breaker merupakan jenis CB dengan sarana pemadam busur api berupa udara dimana bisa digunakan ditegangan menengah dan rendah.

ACB digunakan untuk memutus arus hingga 40 kA dan digunakan pada rangkaian hingga tegangan 765 kV.



Gambar 2.3 Model Air Circuit

b. *Vacum Circuit Breaker (VCB)*

Vacum Circuit Breaker (VCB) adalah CB yang memiliki ruang hampa untuk memadamkan busur api, jadi apabila terjadi CB open maka akan segera diisolir hubungan setelah busur api tersebut terjadi.



Gambar 2.4 Model Vacum Circuit Breaker

c. *Gas Circuit Breaker (GCB)*

Gas Circuit Breaker (GCB) adalah *circuit breaker* yang memadamkan busur api menggunakan media berupa gas SF₆. GCB tergolong *circuit breaker thermal*. GCB digunakan untuk memutus arus hingga 40 kA dan digunakan pada rangkai bertegangan hingga 765 kV.



Gambar 2.5 Model Gas Circuit Breaker

d. *Oil Circuit Breaker (OCB)*

Oil Circuit Breaker (OCB) adalah *circuit breaker* yang menggunakan minyak sebagai sarana memadamkan busur api ketika terjadi gangguan. Maka OCB tergolong *circuit breaker thermal*. OCB digunakan untuk memutus arus hingga 10 kA dan pada rangkaian bertegangan hingga 500 kV.



Gambar 2.6 Model Oil Circuit Breaker

4. *Fuse Cut Out (Sekring)*

Fuse adalah komponen yang memiliki fungsi sebagai pengaman rangkaian listrik akibat gangguan ataupun korsleting dan daya berlebih dan bila terjadi gangguan seperti tersebut fuse akan memutus arus.



Gambar 2.7 Model Sekring

2.2.3.3 Perhitungan Arus Hubung Singkat

Perhitungan arus hubung singkat dengan cara penentuan rating peralatan pengaman pada suatu sistem tenaga listrik dimulai dengan studi hubung singkat agar mendapatkan peralatan proteksi yang handal dan baik.

Rumus hubung singkat yaitu:

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

Dimana:

I = Arus yang mengalir pada hambatan Z (A)

V = Tegangan Sumber (V)

Z = Impedansi jaringan (Ohm)

(Heri: *Proteksi Penyulang Tegangan Menengah*, 2004).

Hal yang membedakan antara gangguan hubung singkat tiga fasa, hubung singkat dua fasa, dan hubung singkat satu fasa ke tanah adalah impedansi ekivalen yang terbentuk. Impedansi ekivalen yang terbentuk dapat ditunjukkan seperti berikut ini:

$$Z \text{ gangguan 3 fasa} \quad Z = Z_1$$

$$Z \text{ gangguan 2 fasa} \quad Z = Z_1 + Z_2$$

$$Z \text{ gangguan 1 fasa ketanah} \quad Z = Z_1 + Z_2 + Z_3$$

Dimana ;

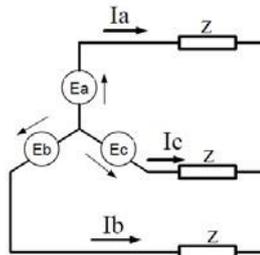
Z₁ = Impedansi urutan positif (Ohm)

Z₂ = Impedansi urutan negatif (Ohm)

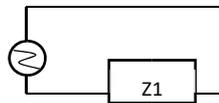
Z₃ = Impedansi urutan nol (Ohm)

a. Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Rangkaian gangguan tiga fasa pada suatu jaringan dengan hubungan transformator tenaga YY pada gambar 2.8 dan gambar 2.9.



Gambar 2.8 Rangkaian Ekuivalen Hubung Singkat Tiga Fasa



Gambar 2.9 Hubungan Jala-Jala Urutan untuk Hubung Singkat Tiga Fasa

Dari gambar 2.7 dan gambar 2.8 didapatkan persamaan arus hubung singkat tiga fasa adalah:

$$I_{3\text{ fasa}} = \frac{C \times V_{in}}{Z_{1eki}}$$

Dimana:

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

V_{in} = Tegangan fasa-netral (V)

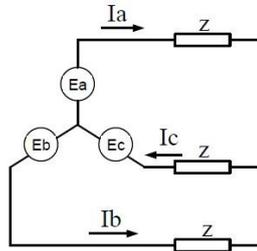
Z_{1eki} = Impedansi ekuivalen urutan positif (Ohm)

C = Faktor Tegangan

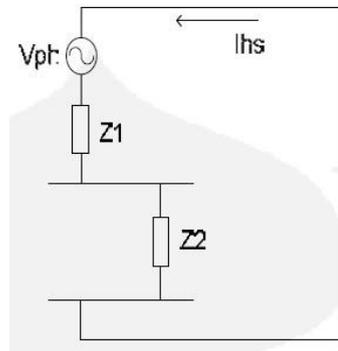
(IEC 60909: *Calculation Of Short-Circuit Currents*).

b. Perhitungan Arus Hubung Sngkat Dua Fasa

Rangkaian hubungan singkat dua fasa pada saluran tenaga dengan hubungan transformator YY ditunjukkan pada gambar 2.10 dan gambar 2.11.



Gambar 2.10 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa



Gambar 2.11 Hubungan Jala-Jala Urutan untuk Hubung Singkat Dua Fasa

Persamaan pada kondisi gangguan hubung singkat 2 fasa adalah sebagai berikut:

$$V_s = V_t$$

$$I_s = I_t$$

$$I_r = 0$$

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

$$I_{2\text{ fasa}} = \frac{C \times V_{11}}{Z_{1eki} + Z_{2eki}}$$

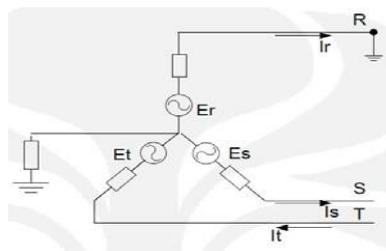
$$I_{2\text{ fasa}} = 0,866 X I_{3\text{ fasa}}$$

- $I_{2\text{fasa}}$ = Arus gangguan hubung singkat dua fasa (A)
 $I_{3\text{fasa}}$ = Arus gangguan hubung singkat tiga fasa (A)
 V_{ll} = Tegangan fasa-fasa (V)
 V_{ln} = Tegangan fasa-netral (V)
 $Z_{1\text{eki}}$ = Impedansi ekivalen urutan positif (Ohm)
 $Z_{2\text{eki}}$ = Impedansi ekivalen urutan negatif (Ohm)
 C = Faktor Tegangan (1.05 untuk tegangan kurang dari 1kV, 1.1 untuk tegangan lebih dari 1kV)

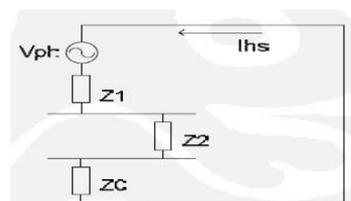
(IEC 60909: *Calculation Of Short-Circuit Currents*).

c. Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Rangkaian hubung singkat satu fasa ke tanah pada sistem tenaga dengan hubungan transformator YY dengan netral ditanahkan ditunjukkan pada gambar 2.12 dan gambar 2.13.



Gambar 2.12 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah



Gambar 2.13 Hubungan Jala-Jala Urutan untuk Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Persamaan pada kondisi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah adalah sebagai berikut :

$$I_{1\text{fasa}} = \frac{3 \times V_{ln}}{2Z_{1eki} + Z_{0eki}}$$

Dimana:

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

V_{ln} = Tegangan fasa-netral (V)

Z_{1eki} = Impedansi ekivalen urutan positif (Ohm)

Z_{2eki} = Impedansi ekivalen urutan negatif (Ohm)

Z_{0eki} = Impedansi ekivalen urutan nol (Ohm)

(Heri: *Proteksi Penyulang Tegangan Menengah*, 2004).

2.2.3.4 Perhitungan Impedansi

a. Impedansi Generator

Pada perhitungan impedansi generator nilai yang dipakai adalah harga reaktansi subtransient (X''_d). Langkah pertama untuk mencari nilai reaktansi subtransient adalah dengan mencari nilai impedansi pada 100%, yaitu menggunakan persamaan:

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

Dimana:

X_g = Impedansi Generator (Ohm)

kV^2 = Tegangan Pembangkitan Generator (kV)

MVA = Kapasitas Daya Pembangkitan Generator (MVA)

(Mets-Noblat et al: *Cahier Technique Schneider Electric*, 2005).

Sedangkan untuk nilai resistansi dari generator, diperoleh menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$R_g = \frac{X''_d}{\frac{X}{R}}$$

Dimana:

R_g = Resistansi dari generator (Ohm)

X/R = Rasio X/R , 20 untuk kapasitas generator 100MVA, 14.29 untuk kapasitas generator 100MVA, dan 6.67 untuk semua generator yang memiliki tegangan 1kV.

(IEC 60909: *Calculation Of Short-Circuit Currents*).

b. Impedansi Trafo

Pada perhitungan impedansi trafo nilai yang dipakai adalah harga reaktansi. Langkah pertama untuk mencari nilai reaktansi adalah dengan mencari nilai impedansi pada 100%, yaitu menggunakan persamaan:

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

Dimana:

X_t = Impedansi Trafo (Ohm)

kV^2 = Tegangan sisi primer/sekunder trafo (kV)

MVA = Kapasitas Daya Trafo (MVA)

(Heri: *Proteksi Penyulang Tegangan Menengah*, 2004).

Untuk menghitung reaktansi urutan positif dan negatif ($X_{t1} = X_{t2}$) dihitung menggunakan persamaan:

Dimana:

X_t = Impedansi Trafo (Ohm)

$\%X_t$ = Presentase Reaktansi Trafo pada spesifikasi (%)

(Heri: *Proteksi Penyulang Tegangan Menengah*, 2004).

c. Impedansi Motor Induksi

Untuk mencari impedansi motor menggunakan perhitungan impedansi, reaktansi dan resistansi dapat diperoleh dengan persamaan berikut:

$$Z_m = \left(\frac{1}{\left(\frac{ILRC}{IFLC} \right)} \right) X \left(\frac{v^2 m \cos}{p_m} \right)$$

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 + R_m^2}$$

Dimana :

Z_m = Nilai impedansi motor (Ohm).

X_m = Reaktansi motor (Ohm).

R_m = Resistensi motor (Ohm).

$ILRC$ = Nilai arus *lock* rotor motor (A).

$IFLC$ = Nilai arus *full load* (beban penuh) motor (A).

V_m = Nilai tegangan nominal motor (V).

P_m = Nilai rating daya motor (W).

$\cos \phi_m$ = Nilai faktor daya motor saat beban penuh.

$\cos \phi_s$ = Nilai faktor daya motor saat starting.

(IEC 60909: *Calculation Of Short-Circuit Currents*).

d. Impedansi Penyulang

Untuk perhitungan impedansi penyulang menggunakan perhitungan impedansi per km dari penyulang yang akan kita hitung.

$$Z_1 = Z_2 = \text{impedansi kabel per km} \times \frac{\text{panjang penyulang}}{1000}$$

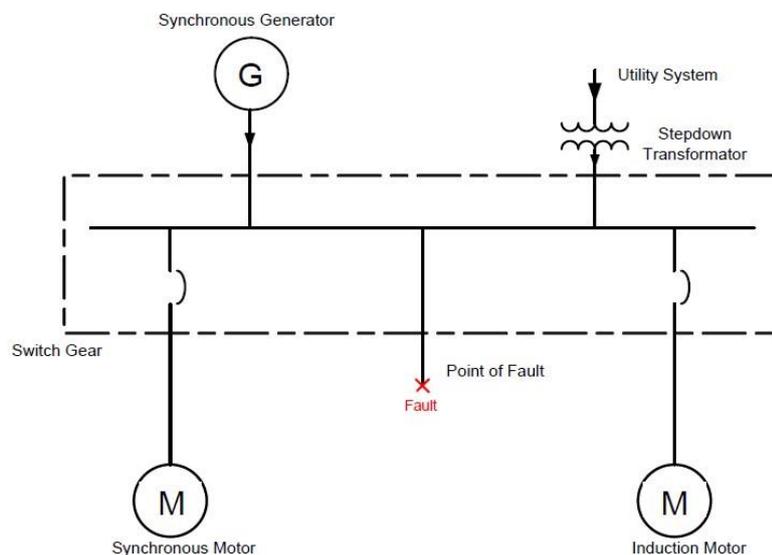
Z_1 = Impedansi urutan positif

Z_2 = Impedansi urutan negatif

(IEC 60909: *Calculation Of Short-Circuit Currents*).

2.2.4 Sumber Arus Gangguan

Besar arus hubung singkat bergantung pada besar sumber yang membangkitkan sistem, nilai resistansi peralatan dan nilai reaktansi sistem keseluruhan sampai ke titik gangguan. Sumber arus hubung singkat dapat berasal dari sistem pembangkit (PLN), generator, motor sinkron dan motor induksi.



Gambar 2.14 Kontribusi Arus Hubung Singkat

1. Sistem Pembangkit PLN

PLN memberikan suplai daya pada pelanggan khususnya industri melalui trafo (step down) dari jaringan distribusi tegangan menengah ke tegangan yang dipakai oleh konsumen. Trafo sering sekali dimengerti sebagai sumber hubung

singkat, tentu saja hal ini sama sekali tidak benar. Trafo Distribusi hanya mengubah (menaikkan/menurunkan) level tegangan dan besar arus. Arus hubung singkat yang melewati trafo bergantung pada besar tegangan sekundernya dan persen reaktansinya.

2. Generator

Generator adalah alat pembangkit energi listrik yang bekerja mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Selain mendapat suplai daya dari PLN sebagai sistem pembangkit listrik utama, beberapa industri besar juga memiliki suplai daya sendiri dari generator yang dapat berfungsi :

- a. Sebagai unit cadangan (*emergency*) yang dijalankan pada saat keadaan darurat atau saat terjadi pemadaman pada sistem pembangkit utama (PLN).
- b. Sebagai unit pembangkit bantuan yang dapat membantu suplai daya listrik dari PLN pada saat beban puncak (*peak load*).

Pada saat terjadi gangguan hubung singkat, generator memberi kontribusi terhadap besar arus hubung singkat yang terjadi. Generator digerakkan oleh penggerak mula (*prime mover*). Ketika hubung singkat terjadi, generator akan terus dikendalikan oleh *prime mover* dan tetap menghasilkan tegangan selama medan eksitasinya tetap dipertahankan dan selama putaran generator pada kecepatan normal. Tegangan yang dihasilkan ini menghasilkan arus besar yang mengalir ke titik gangguan. Arus yang mengalir ini hanya dibatasi oleh impedansi generator dan impedansi rangkaian dari generator sampai ke titik gangguan.

Reaktansi generator berganti secara *transient* seiring dengan waktu setelah awal terjadinya gangguan. Adapun jenis nilai reaktansinya adalah sebagai berikut:

- a. X''_d = Reaktansi Sub transient / Sub transient Reactance

X''_d adalah nilai reaktansi yang menentukan besar arus hubung singkat sesaat setelah terjadi gangguan.

b. $X'd$ = Reaktansi Transient / Transient Reactance

$X'd$ berlangsung sekitar 2 detik dan meningkat hingga mencapai nilai reaktansi akhir.

c. X_d = Reaktansi Sinkron / Synchronous Reactance

Adalah nilai reaktansi yang menentukan besar arus mengalir setelah kondisi steady state tercapai. Ini tercapai setelah beberapa detik setelah hubung singkat terjadi.

3. Motor Sinkron

Motor Sinkron memiliki karakteristik yang hampir sama dengan generator sinkron. Ketika gangguan terjadi, tegangan sistem menurun hingga menjadi sangat kecil. Motor sinkron berhenti mencatu daya dari sistem untuk berputar menggerakkan bebannya dan mulai melambat. Tetapi momen inersia dari beban cenderung mencegah motor melambat secara cepat. Inersia ini mengambil peran sebagai *prime mover* dan dengan eksitasi yang tetap disuplai, menjadikan motor berfungsi sebagai generator yang juga mensuplai arus hubung singkat untuk beberapa *cycle* setelah hubung singkat terjadi.

Sama seperti generator, besarnya arus hubung singkat juga ditentukan oleh nilai reaktansi X''_d , $X'd$ dan X_d Motor Sinkron. Besarnya arus hubung singkat yang dikontribusi oleh motor sinkron juga bergantung pada besar dayanya (HP), rating tegangan serta reaktansi sistem sampai ke titik gangguan.

4. Motor Induksi

Motor induksi juga memberikan kontribusi arus hubung singkat akibat inersia beban dan rotor tetap berputar menggerakkan motor setelah terjadinya gangguan. Tetapi ada perbedaan kontribusi arus hubung singkat antara motor induksi dengan mesin sinkron. Medan fluksi motor induksi dihasilkan oleh induksi di stator dan bukan berasal dari medan fluks DC. Karena fluksi ini tiba – tiba menghilang setelah terjadi gangguan, kontribusi arus hubung singkat dari motor induksi juga drop secara cepat setelah beberapa *cycle*. Sehingga tidak ada

kontribusi arus gangguan *steady state*. Besar arus hubung singkat yang terbesar adalah terjadi pada saat $1 \frac{1}{2}$ *cycle* pertama dan selanjutnya menurun setelah beberapa *cycle* berikutnya. Setelah 1 atau 2 *cycle*, kontribusi motor induksi segera menghilang.

2.2.5 Relai Arus Lebih (OCR)

2.2.5.1 Pengertian Relai Arus Lebih (OCR)

Relai arus lebih ialah relai yang berguna untuk mendeteksi besaran arus yang melalui suatu jaringan dengan bantuan trafo arus.

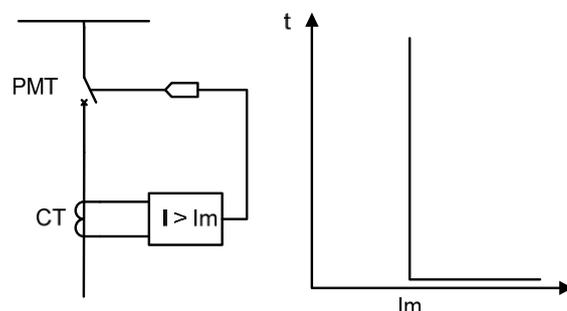
2.2.5.2 Jenis relai arus lebih berdasarkan karakteristik waktu

Berdasarkan karakteristik waktu, relai arus lebih dibagi menjadi 3 jenis.

Jenis-jenis relai tersebut adalah:

1. Relai Arus Lebih Sesaat (*Instantaneous*)

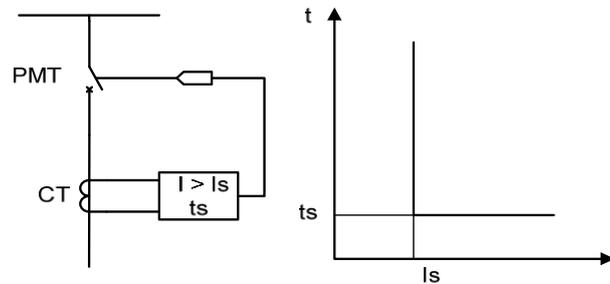
Relay waktu seketika ialah relai yang bekerja tanpa ada waktu tunda, jadi ketika suatu arus yang mengalir didapatkan melebihi settingan yang terpasang relay akan bekerja dan memutus



Gambar 2.15 Karakteristik Relai Arus Lebih Sesaat

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

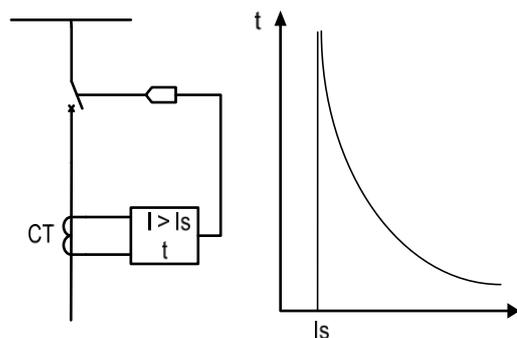
Relai arus lebih waktu tertentu ialah relai ini bekerja ketika terjadinya hubung singkat dan memiliki besarnya arus yang terdeteksi melebihi batas setingan dan relai akan memutus untuk langsung memberikan perintah ke PMT.



Gambar 2.14 Karakteristik Relai Arus Lebih Waktu Tertentu

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

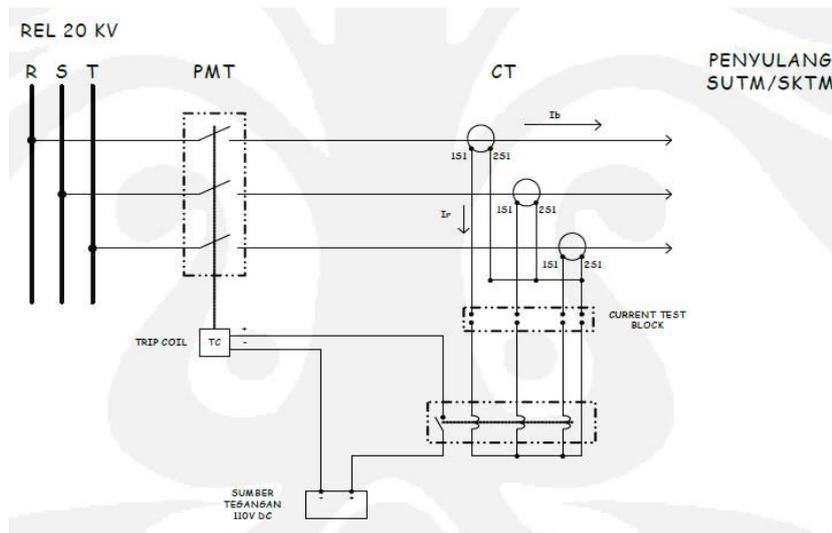
Relai arus lebih waktu terbalik ialah relai ini bekerja dengan waktu tunda tergantung dari besarnya arus, bisa dijelaskan ketika arus nyabesar maka akan kecil waktu tundanya dan begitu sebaliknya semakin kecil arus maka akan besar waktu tundanya. Didalam kareteristik waktunya dibedakan atas beberapa kelompok yaitu: *standard inverse*, *very inverse*, dan *extremely inverse*.



Gambar 2.14 Relai Arus Lebih Waktu Terbalik

2.2.5.3 Prinsip Kerja Relai Arus Lebih

Prinsip kerja relai arus lebih adalah dimana dia akan bekerja berdasarkan yang diasakan oleh relai dan yang akan dirasakan relai adalah arus lebih disebabkan oleh gangguan hubung singkat, beban lebih da ketika relai arus lebih dirasakan maka PMT akan memutus.



Gambar 2.18 Rangkaian Pengawatan Relai Arus Lebih (OCR)

Sesuai dengan gambar 2.19, prinsip kerja relai arus lebih dapat dijelaskan sebagai berikut:

- a. Pada kondisi normal, arus beban (I_b) mengalir pada SUTM / SKTM. Arus beban mengalir melewati trafo arus dan ditransformasikan ke besaran sekunder (I_r). Arus (I_r) mengalir pada kumparan relai, tetapi karena arus yang mengalir pada kumparan relai masih lebih kecil dari nilai setting dari relai, maka relai tidak bekerja.

2.2.5.4 Setting Relai Arus Lebih

Untuk melakukan setting pada relai arus lebih, dipakai perhitungan sebagai berikut :

1. Setting Arus Lebih *Instantaneous*

Relai arus lebih instan akan bekerja seketika jika ada arus lebih yang mengalir melebihi batas yang diizinkan. Dalam menentukan setelan *pickup* instan ini digunakan I_{sc} minimum yaitu arus hubung singkat 2 fasa pada pembangkitan minimum (Makruf et al: *Studi Koordinasi Proteksi Sistem Kelistrikan di Project Pakistan Deep Water Container Port*, 2014). Persamaan yang digunakan untuk setting relai arus lebih *instantaneous* adalah sebagai berikut:

a. Setting Primer

$$I_{set \text{ primer}} \leq 0,8 I_{sc \text{ minimum}}$$

(Gers & Holmes: *Protection of electricity distribution 2nd Edition*, Juan M. Gers and Edward J. Holmes, 2004).

b. Setting Sekunder

$$I_{set \text{ sekunder}} = I_{set \text{ primer}} \times \frac{1}{RatioCT}$$

(Gers & Holmes: *Protection of electricity distribution 2nd Edition*, Juan M. Gers and Edward J. Holmes, 2004).

c. Setting Waktu

Relai utama dan cadangan tidak boleh memiliki kerja yang bersamaan. Maka diperlukan time delay yang berbeda dari relai utama dan backup. Berdasarkan IEEE memiliki relai waktu kerja minimal 0,2-0,35 detik.

2. Setting Arus Lebih *Invers*

Untuk melakukan setting relai arus lebih *invers* di sistem tenaga listrik diperlukan perhitungan sebagai berikut :

a. Setting Primer

Iset primer = 1.05 s/d 1.3 FLA

(Hawitson et al: *Practical Power System Protection*, 2004).

b. Setting Sekunder

Iset sekunder = Iset primer \times 1/(Ratio CT)

(Gers & Holmes: *Protection of electricity distribution 2nd Edition*, Juan M. Gers and Edward J. Holmes, 2004).

c. Setting Waktu (*Time Multiplier Setting / TMS*)

Pada setting waktu persamaan yang digunakan adalah :

$$t = \frac{k \times b}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^a - 1} + L$$

$$k = \frac{(t - L) \times \left(\left(\frac{I}{I_s}\right)^a - 1\right)}{b}$$

Dimana :

t = waktu dalam detik

I = Arus gangguan

I_s = Arus Setting

K = TMS

Dan pada l,b, dan a berbeda pada semua relai tergantung pada karakteristik yang dipakai.

(Gers & Holmes: *Protection of electricity distribution 2nd Edition*, Juan M. Gers and Edward J. Holmes, 2004).

Tabel 2.2 Karakteristik Relai sesuai standar ANSI/IEEE dan IEC

<i>Curve Description</i>	<i>Standar</i>	a	b	L
<i>Moderately Inverse</i>	IEEE	0,02	0,0515	0,114
<i>Very Inverse</i>	IEEE	2	19,61	0,491
<i>Inverse</i>	IEEE	2	28,2	0,1217
<i>Extermely Inverse</i>	CO8	2	5,95	0,18
<i>Short-time Inverse</i>	CO2	0,02	0,0239	0,0169
<i>Standar Inverse</i>	IEC	0,02	0,14	0
<i>Very Inverse</i>	IEC	1,0	13,5	0
<i>Extermely Inverse</i>	IEC	2,0	80	0
<i>Long-time Inverse</i>	UK	1,0	120	0