

BAB II

TINJUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Rujukan Penelitian Yang Pernah Dilakukan untuk mendukung penulisan tugas akhir ini antara lain:

- (Hardiansyah, 2016) melakukan penelitian mengenai Analisis Koordinasi Proteksi Pada Sistem Distribusi Radial. Dari penelitian ini disimpulkan bahwa prinsip kerja relai arus lebih akan bekerja apabila relai tersebut merasakan besar arus yang melebihi setting arus dari relai tersebut, maka dari itu relai akan bekerja dengan memerintahkan CB untuk trip.
- (Afandi, 2009) melakukan penelitian mengenai Analisis Setting Relai Arus Lebih dan Relai Gangguan Tanah Pada Penyulang Sadewa di GI Cawang. Dari penelitian ini disimpulkan bahwa besarnya arus hubung singkat dipengaruhi oleh jarak titik gangguan, semakin jauh jarak titik gangguan maka semakin kecil arus gangguan hubung singkatnya, begitu pula sebaliknya.
- (Sidabutar, 2010) melakukan penelitian mengenai Analisis Hubung Singkat dan Motor *Starting* dengan Menggunakan ETAP *Power Station* 4.0. Dari penelitian ini disimpulkan bahwa besar arus hubung singkat bergantung pada besar sumber yang membangkitkan sistem, nilai reaktansi 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.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik adalah bagian dari sistem perlengkapan elektrik antara sumber daya besar (*bulk power source*, BPS) dan peralatan hubung pelanggan (*customers service switches*). Sistem distribusi tenaga listrik dibagi menjadi dua, yaitu:

1. Sistem Distribusi Primer

Sistem distribusi primer adalah bagian dari sistem perlengkapan elektrik antara gardu induk distribusi dan transformator distribusi, atau biasanya disebut “sistem primer”. Dalam rangkainnya, sistem primer dikenal sebagai penyulang primer atau penyulang distribusi primer.

2. Sistem distribusi sekunder

Sistem distribusi sekunder adalah bagian dari sistem perlengkapan elektrik antara sistem distribusi primer dan beban. Sistem distribusi sekunder biasa disebut sistem sekunder. Sistem distribusi sekunder meliputi transformator distribusi yang berfungsi sebagai penurun tegangan (*step-down*).

(Syahputra: *Transmisi Distribusi*, 2005).

2.2.2 Sistem Proteksi Tenaga Listrik

2.2.2.1 Pengertian Sistem Proteksi Tenaga Listrik

Sistem proteksi tenaga listrik adalah sistem proteksi yang dilakukan pada peralatan-peralatan listrik yang terpasang pada suatu sistem tenaga listrik, misalnya generator, transformator jaringan dan peralatan listrik lainnya terhadap kondisi abnormal. Kondisi abnormal pada sistem tenaga listrik adalah hubung singkat, tegangan lebih, beban lebih, frekuensi sistem rendah, asinkron dan lain-lain.

2.2.2.2 Tujuan Sistem Proteksi Tenaga Listrik

Berikut adalah tujuan dari sistem proteksi tenaga listrik:

1. Untuk menghindari atau mengurangi kerusakan akibat gangguan pada peralatan yang terganggu atau peralatan yang dilalui oleh arus gangguan.
2. Untuk melokalisir (mengisolir) daerah gangguan menjadi sekecil mungkin.
3. Untuk dapat memberikan pelayanan listrik dengan keandalan yang tinggi kepada konsumen.
4. Meminimalisir bahaya bagi manusia.

2.2.2.3 Persyaratan Sistem Proteksi Tenaga Listrik

Sistem proteksi tenaga listrik yang baik adalah sistem proteksi yang memenuhi persyaratan sebagai berikut:

a. Kepekaan (*Sensitivity*)

Sensitivitas adalah istilah yang sering dikaitkan dengan harga besaran penggerak minimum, seperti level arus minimum, tegangan, daya dan besaran lain dimana relai atau skema proteksi masih dapat bekerja dengan baik.

Pada prinsipnya relai arus lebih harus cukup peka sehingga dapat mendeteksi gangguan di daerah proteksinya, termasuk daerah proteksi cadangan jauhnya. Untuk relai arus lebih yang memiliki tugas tambahan sebagai relai cadangan jauh untuk daerah proteksi lain, relai tersebut harus dapat mendeteksi arus gangguan hubung singkat dua fasa yang terjadi pada ujung jaringan daerah proteksi lain dalam kondisi pembangkitan minimum.

Relai arus lebih yang ditujukan sebagai pengaman peralatan seperti motor, generator, dan trafo harus memiliki kepekaan yang tinggi, karena dengan relai yang peka dapat mendeteksi gangguan pada tingkatan yang masih dini sehingga dapat meminimalisir kerusakan. Relai arus lebih dengan kepekaan tinggi dibutuhkan karena jika gangguan sampai mengakibatkan kerusakan pada besi laminasi stator atau inti trafo, maka perbaikannya akan sukar dan mahal.

b. Keandalan (*Reliability*)

Suatu sistem proteksi dapat dikatakan andal jika selalu berfungsi sebagaimana yang diharapkan. Sistem proteksi disebut tidak andal bila gagal bekerja pada saat dibutuhkan dan bekerja pada saat proteksi itu tidak seharusnya bekerja. Keandalan relai dikatakan baik bila mempunyai harga 90-99 %.

$$\text{Keandalan relai} = \frac{y}{x} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

x = Jumlah gangguan yang terjadi pada jaringan,

y = Jumlah relai bekerja ketika terjadi gangguan.

(Alawiy: *Proteksi Sistem Tenaga Listrik Seri Relay Elektromagnetis*, 2006).

Ada 3 aspek keandalan yang harus dipenuhi dalam sistem proteksi, aspek keandalan tersebut adalah :

a. *Dependability*

Dependability adalah tingkat kepastian dari kemampuan suatu pengaman dalam bekerja. Pada prinsipnya pengaman tidak diperbolehkan gagal dalam bekerja ketika terjadi gangguan.

b. *Security*

Security adalah tingkat kepastian pengaman untuk tidak mengalami kesalahan dalam bekerja. Salah bekerja adalah kondisi dimana pengaman bekerja pada kondisi yang tidak seharusnya untuk bekerja, misalnya bekerja ketika terjadi gangguan di luar daerah proteksinya, bekerja ketika tidak terjadi gangguan sama sekali, bekerja terlalu cepat, dan bekerja terlalu lambat.

c. *Availability*

Availability adalah perbandingan antara waktu pada saat pengaman dalam keadaan berfungsi/siap kerja dan waktu total dalam operasinya.

Terdapat beberapa faktor yang dapat memengaruhi keandalan sistem proteksi tenaga listrik, yaitu sebagai berikut:

a. Perancangan

Desain atau perancangan sistem proteksi adalah tahapan atau proses yang sangat penting dalam menentukan baik tidaknya suatu sistem proteksi. Pada waktu perancangan, sistem proteksi harus dapat dipastikan bahwa sistem proteksi bekerja sesuai parameter operasi dan konfigurasi jaringan yang telah ditetapkan sebelumnya. Faktor-faktor yang perlu diperhatikan pada waktu perancangan sistem proteksi adalah semua parameter sistem tenaga, karakteristik sumber daya, sistem pentanahan, jenis-jenis gangguan, metode operasi dan jenis prangkat proteksi yang akan digunakan.

b. Setelan Relai

Setelan relai (arus dan waktu) juga merupakan salah satu faktor yang sangat penting dalam penerapan sistem proteksi tenaga listrik. Seorang teknisi sistem proteksi tenaga listrik harus mampu menentukan setelan yang tepat terhadap setiap relai proteksi sesuai dengan daerah proteksinya dan mampu memperhitungkan semua parameter sistem tenaga, seperti level arus gangguan, beban normal, dan berbagai parameter lain yang dibutuhkan sistem kinerja dinamis. Secara periodik relai proteksi harus ditinjau secara berkala dan ditata ulang mengikuti perkembangan sistem sehingga proteksi senantiasa siap kerja sesuai dengan kebutuhan sebenarnya.

c. Instalasi

Instalasi sistem proteksi harus dilakukan secara benar dan rapi mengikuti prosedur instalasi sesuai standar instalasi yang berlaku. Instalasi harus dibuat dengan menggunakan gambar dan diagram yang menunjukkan setiap fungsi *wiring*, sehingga operator tidak mengalami kesulitan pada waktu pengetesan (*commissioning*) dan pemeliharaan. Instalasi sistem proteksi harus dipastikan bahwa *wiring* dalam kondisi benar dan dipastikan bahwa alat proteksi yang terpasang dalam kondisi bebas dari kerusakan.

d. Pengetesan

Pengetesan sistem proteksi harus dilakukan secara lengkap mencakup semua aspek skema proteksi khususnya sebelum jaringan sistem tenaga dioperasikan. Pengetesan harus dilakukan pada kondisi yang mirip dan mendekati keadaan sebenarnya pada jaringan yang akan diproteksi. Pengetesan meliputi relai, trafo arus, trafo tegangan, dan semua perangkat penunjang lain yang menjadi komponen proteksi sistem tenaga listrik.

e. Pemburukan

Seiring perjalanan waktu, peralatan proteksi mengalami penurunan kinerja yang disebabkan periode waktu kerja peralatan proteksi yang dapat berlangsung dalam waktu tahunan. Oleh karena itu peralatan proteksi selama periode tersebut bisa mengalami kerusakan yang tidak terdeteksi. Berdasarkan hal tersebut, perlu dilakukan pengetesan secara periodik untuk mengantisipasi kegagalan kerja yang disebabkan oleh kerusakan yang tidak terdeteksi.

f. Kinerja Proteksi

Kinerja sistem proteksi perlu dinilai secara statistik dan dilakukan secara periodik. Gangguan pada sistem tenaga listrik yang mungkin terjadi harus diklasifikasikan. Klasifikasi gangguan digunakan sebagai parameter dalam penentuan setting peralatan proteksi, sehingga diharapkan kinerja proteksi dapat bekerja dengan baik dan benar.

(Pandjaitan: *Praktik-Praktik Proteksi Sistem Tenaga Listrik*, 2012)

c. Kecepatan (*Speed*)

Sistem proteksi harus memiliki kecepatan dalam menangani suatu gangguan, hal ini bertujuan untuk meminimalisir kerugian atau kerusakan akibat gangguan. Waktu total pembebasan sistem dari gangguan adalah waktu sejak munculnya gangguan sampai dengan bagian yang terganggu terpisah dari bagian sistem lainnya. Untuk menciptakan selektifitas yang baik, suatu pengaman terpaksa diberi waktu tunda (td). Waktu tunda yang diberikan dalam suatu sistem proteksi harus sesingkat mungkin dan harus dengan memperhitungkan resiko yang ditimbulkan.

Fungsi dari kecepatan pada sistem proteksi tenaga listrik adalah sebagai berikut:

- a. Menghindari kerusakan secara thermis pada peralatan yang dilalui arus gangguan serta membatasi kerusakan pada alat yang terganggu.
- b. Mempertahankan kestabilan sistem.
- c. Membatasi ionasi (busur api) pada gangguan disaluran udara yang akan memperbesar kemungkinan berhasilnya penutup balik PMT (*reclosing*) dan mempersingkat *dead time* (interval waktu antara buka dan tutup).

d. Selektifitas dan Diskriminatif

Selektif adalah kemampuan sistem proteksi untuk dapat memisahkan daerah yang terganggu sekecil mungkin, yaitu daerah yang hanya terjadi gangguan saja. Diskriminatif berarti suatu sistem proteksi harus mampu membedakan antara kondisi normal dan kondisi abnormal. Ataupun membedakan apakah kondisi abnormal tersebut terjadi di dalam atau di luar daerah proteksinya. Dengan demikian, segala tindakannya akan tepat dan akibatnya gangguan dapat diminimalisir menjadi sekecil mungkin. Selektifitas dan diskriminatif pada suatu sistem proteksi dapat tercapai dengan mengatur peningkatan waktu (*time grading*), peningkatan setting arus (*current grading*), atau gabungan dari keduanya. Selain itu, selektifitas dan diskriminatif dapat tercapai dengan melakukan pemilihan karakteristik relai yang tepat, spesifikasi trafo arus yang benar, serta penentuan setting relai yang terkoordinasi dengan baik.

e. Ekonomis

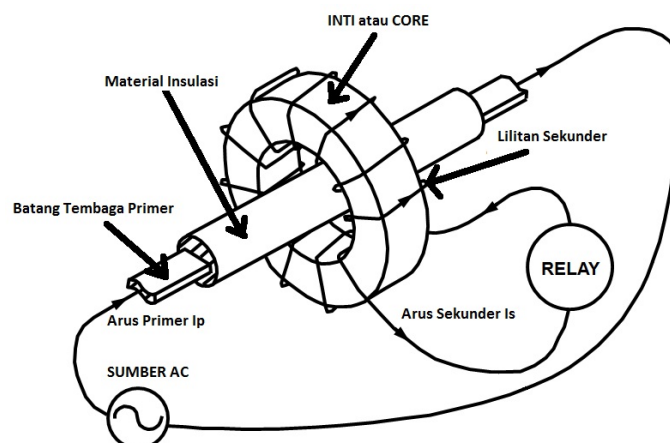
Perancangan proteksi yang baik adalah perancangan yang tetap memperhitungkan aspek ekonomis tanpa mengesampingkan kemampuan dari sistem proteksi yang akan dihasilkan.

2.2.2.4 Peralatan Proteksi Sistem Tenaga Listrik

Peralatan yang dibutuhkan dalam proteksi sistem tenaga listrik adalah sebagai berikut:

1. Trafo Arus (*Current Transformer / CT*)

Trafo arus adalah suatu peralatan listrik yang berfungsi menurunkan arus yang besar menjadi arus dengan ukuran yang lebih kecil. Trafo arus di gunakan karena dalam pengukuran arus pada sistem tenaga listrik tidak mungkin di lakukan langsung pada arus beban atau arus gangguan, hal ini di sebabkan arus sangat besar dan bertegangan sangat tinggi. Karakteristik trafo arus di tandai oleh *current transformer ratio* (CT) yang merupakan perbandingan antara arus yang di lewatkan oleh sisi primer dengan arus yang di lewatkan oleh sisi sekunder.

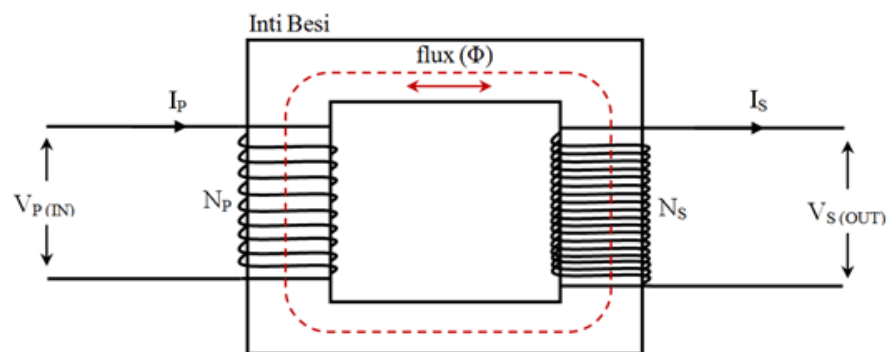


Gambar 2.1 Prinsip Kerja Trafo Arus

Prinsip kerja trafo arus ditunjukkan pada gambar 2.1. Pada saat arus primer (I_p) mengalir pada lilitan primer akan muncul medan magnet disekeliling lilitan primer. Medan magnet akan berkumpul pada inti besi. Medan magnet yang berputar pada inti besi menghasilkan perubahan flux primer dan memotong lilitan sekunder sehingga menginduksikan tegangan pada lilitan sekunder sesuai hukum faraday. Karena lilitan sekunder membentuk loop tertutup, maka akan mengalir arus sekunder I_s yang akan membangkitkan medan magnet untuk melawan flux magnet yang dihasilkan oleh belitan primer sesuai hukum lenz.

2. Trafo Tegangan (*Potential Transformer / PT*)

Potensial Transformer adalah suatu peralatan listrik yang berfungsi menurunkan tegangan yang tinggi menjadi tegangan yang lebih rendah. Trafo tegangan dapat memungkinkan relai dapat mendeteksi tegangan yang sangat tinggi tanpa merusak komponen dari relai itu sendiri. Trafo ini juga memiliki angka perbandingan lilitan/tegangan primer dan sekunder yang menunjukkan kelasnya.



Gambar 2.2 Prinsip Kerja Trafo Tegangan

Prinsip kerja trafo tegangan ditunjukkan gambar 2.2. Trafo tegangan bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik. Jika pada kumparan primer mengalir arus I_p , maka pada kumparan primer timbul gaya gerak magnet. Gaya gerak magnet ini memproduksi fluks pada inti, kemudian membangkitkan gaya gerak listrik (GGL) pada kumparan sekunder. Jika terminal kumparan sekunder tertutup, maka pada kumparan sekunder mengalir arus I_s , arus ini menimbulkan gaya gerak magnet pada kumparan sekunder.

3. Relai Proteksi

Relai Proteksi adalah peralatan listrik yang berfungsi untuk mendeteksi kondisi tidak normal pada suatu sistem tenaga listrik. Relai proteksi dapat mengetahui adanya gangguan pada peralatan yang diamankan dengan mengukur atau membandingkan besaran-besaran yang diterima. Besaran-besaran tersebut adalah arus, tegangan, daya, sudut fasa, frekuensi dan lain sebagainya. Pada prinsipnya relai proteksi yang dipasang pada sistem tenaga listrik memiliki fungsi sebagai berikut:

- a. Merasakan adanya gangguan pada jaringan sistem tenaga listrik.
- b. Mengukur besarnya gangguan yang terjadi pada sistem jaringan.
- c. Memerintahkan pemutus tenaga (PMT) untuk membuka agar gangguan tidak semakin meluas.

Relai proteksi yang terpasang pada sistem tenaga listrik, diklasifikasikan menjadi beberapa klasifikasi yaitu:

- a. Berdasarkan prinsip kerjanya:

1. Relai elektromagnetik

Relai elektromagnetik adalah jenis relai yang menggunakan gaya elektromagnetik untuk membuka atau menutup switch. Bila suatu kumparan diberi listrik maka akan timbul gaya elektromagnetik yang akan menarik armatur sehingga terjadi kontak dengan switch.

2. Relai thermis

Relai thermis adalah jenis relai yang menggunakan energi panas untuk membuka atau menutup switch.

3. Relai Mikroprosesor

Relai mikroprosesor adalah jenis relai yang menggunakan mikroprosesor untuk membuka atau menutup switch.

- b. Berdasarkan fungsinya:

1. Relai arus lebih (*Overcurrent Relai*)

Relai arus lebih adalah relai yang bekerja terhadap arus lebih. Relai arus lebih akan bekerja apabila arus yang mengalir pada sistem melebihi nilai arus yang disetting pada relai arus lebih.

2. Relai tegangan jatuh (*Undervoltage Relai*)

Relai tegangan jatuh adalah relai yang bekerja terhadap tegangan jatuh. Relai tegangan jatuh akan bekerja apabila tegangan yang ada pada sistem kurang dari tegangan yang disetting pada relai tegangan jatuh.

3. Relai jarak (*Distance Relai*)

Relai jarak adalah relai yang bekerja dengan cara mengukur tegangan dan arus pada penghantar kemudian menghitung besar impedansinya. Jika nilai

impedansi pada sistem lebih kecil dari nilai impedansi yang disetting pada relai jarak, maka relai jarak akan bekerja.

4. Relai frekuensi jatuh (*Underfrequency Relai*)

Relai frekuensi jatuh adalah relai yang bekerja terhadap frekuensi jatuh. Relai frekuensi jatuh akan bekerja apabila frekuensi yang ada pada sistem kurang dari frekuensi yang disetting pada relai frekuensi jatuh

5. Relai Arah (*Directional Relai*)

Relai arah adalah relai yang digunakan untuk mendeteksi adanya gangguan hubung singkat pada sistem yang mempunyai sumber lebih dari satu dan mempunyai jaring yang membentuk loop.

3. *Circuit Breaker* (CB)

Circuit Breaker (CB) adalah salah satu peralatan pemutus daya yang berguna untuk memutuskan dan menghubungkan rangkaian listrik dalam kondisi terhubung ke beban secara langsung dan aman, baik pada kondisi normal maupun saat terdapat gangguan.

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.

Klasifikasi *Circuit Breaker* berdasarkan prinsip kerja adalah sebagai berikut :

a. *CB Thermal*

Prinsip kerja *CB thermal* adalah saat terjadi arus berlebih, temperatur bimetal akan dengan cepat meningkat. Bimetal akan melengkung apabila berada pada suhu yang tinggi. Bimetal yang melengkung menyebabkan hubungan terminal yang dihubungkan melalui plat bimetal menjadi terputus.

b. *CB Magnetic*

Prinsip kerja dari *CB Magnetic* adalah saat arus mengalir dituas kontak akan timbul magnet pada tuas tersebut. Namun pada keadaan normal kuat medan magnet masih lemah. Pada saat terjadi arus lebih, medan magnet menguat dan menarik tuas penghubung terminal sehingga hubungan antar terminal terputus.

c. *CB Solid State* atau *Electronic*

Prinsip kerja dari *CB Solid State* atau *Electronic* saat terjadi arus berlebih adalah mengandalkan trafo arus. *CB* akan mendeteksi arus yang dialirkan dari sisi sekunder trafo arus. Mikroprosesor akan mengevaluasi berdasarkan karakteristik yang telah disetting. *Output* dari mikroprosesor akan mengirim arus ke koil. Koil akan menghasilkan medan magnet yang kemudian menarik tuas penghubung terminal sehingga hubungan antar terminal terputus.

Klasifikasi *Circuit Breaker* berdasarkan media pemutus listrik / pemadam bunga api adalah sebagai berikut:

a. *Air Circuit Breaker (ACB)*

Air Circuit Breaker adalah *circuit breaker* yang memadamkan busur api menggunakan media udara. *ACB* tergolong sebagai *circuit breaker thermal*. *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 *circuit breaker* yang memadamkan busur api menggunakan media berupa vakum. VCB tergolong *circuit breaker thermal*. VCB digunakan untuk memutus rangkaian bertegangan hingga 38 kV.



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 memadamkan busur api menggunakan media minyak. 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 cut out atau sekring adalah perangkat pengaman yang melindungi jaringan terhadap arus beban lebih (*over load current*) yang mengalir melebihi dari batas maksimum, yang disebabkan karena hubung singkat (*short circuit*) atau beban lebih (*over load*).

Prinsip kerja sekring adalah ketika terjadi arus lebih pada sistem, kawat perak didalam tabung porselin akan terputus. Pasir putih yang berada didalam porselin akan menyerap panas dan memadamkan busur api. Pasir putih berfungsi untuk meminimalisir kemungkinan terjadinya ledakan yang disebabkan proses pemutusan jaringan. Busur api menimbulkan hentakan yang membuat tabung porselin akan terlempar keluar dari kontakannya.

Pemilihan sekring untuk pelindung motor harus dilakukan dengan teliti. Kesalahan pemilihan kapasitas sekring untuk pelindung motor akan mengakibatkan sekring mudah terputus ketika motor melakukan *starting*. Hal ini disebabkan arus yang mengalir pada saat *starting* motor adalah lebih besar dibanding dengan arus nominalnya. Menurut standar NEC 430.52, besar kapasitas kemampuan sekring

yang digunakan untuk melindungi motor harus memiliki kemampuan menahan arus sebesar 150 persen, 175 persen, 225 persen, atau sekitar 300 hingga 400 persen dari arus nominal motor yang akan dilindungi. (Mullin & Simmons: *Electrical Wiring Commercial*, 2012).



Gambar 2.7 Model Sekring

5. DC System Power Supply

DC System Power Supply merupakan pencatu daya cadangan yang terdiri dari *Battery* dan *Charger*. *Charger* berfungsi sebagai peralatan yang mengubah tegangan AC ke DC dan *Battery* berfungsi sebagai penyimpan daya cadangan. Sebagai peralatan proteksi, DC System Power Supply merupakan peralatan yang sangat vital karena jika terjadi gangguan dan kontak telah terhubung, maka DC System Power Supply akan bekerja yang menyebabkan CB membuka. *Charger* adalah sumber utama dari DC system power supply, karena charger adalah alat untuk merubah AC power menjadi DC power (*rectifier*).

2.2.2.5 Jenis-Jenis Gangguan Pada Sistem Tenaga Listrik

1. Gangguan Beban Lebih

Gangguan beban lebih adalah jenis gangguan yang tidak murni. Gangguan ini mengakibatkan adanya kenaikan arus yang mengalir pada sistem yang disebabkan oleh beban berlebih. Meskipun gangguan beban lebih adalah bukan gangguan yang murni, namun jika gangguan ini dibiarkan terus-menerus

berlangsung maka gangguan ini dapat merusak peralatan yang terhubung pada sistem tenaga listrik.

2. Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat adalah gangguan yang mengakibatkan adanya lonjakan arus sangat besar yang terjadi pada sistem tenaga listrik. Ditinjau dari lama berlangsungnya, gangguan hubung singkat terdiri dari dua macam, yaitu:

a. Gangguan Hubung Singkat Permanen

Gangguan hubung singkat permanen adalah gangguan hubung singkat yang berlangsung dengan waktu yang lama. Gangguan hubung singkat ini disebabkan oleh hubung singkat pada kabel, belitan trafo, dan generator.

b. Gangguan Hubung Singkat Temporer

Gangguan hubung singkat temporer adalah gangguan hubung singkat yang berlangsung sementara. Gangguan hubung singkat ini disebabkan oleh flashover karena sambaran petir, flashover dengan pohon, dan pada SUTM dapat disebabkan karena tiupan angin.

3. Gangguan Tegangan Lebih

Gangguan tegangan lebih adalah gangguan yang menyebabkan tegangan pada sistem bernilai lebih dari tegangan yang seharusnya. Gangguan tegangan lebih dapat dibedakan menjadi dua, yaitu tegangan lebih dengan *power* frekuensi dan tegangan lebih *transient*. Penyebab gangguan tegangan lebih dengan *power* frekuensi disebabkan oleh pembangkit yang kehilangan beban, *over speed* pada generator, dan gangguan pada AVR. Sedangkan penyebab gangguan tegangan lebih *transient* disebabkan oleh surja petir atau surja hubung.

4. Gangguan Frekuensi Jatuh

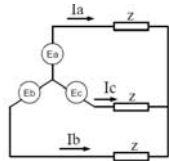
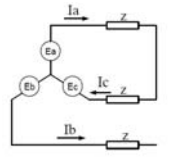
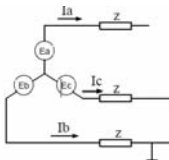
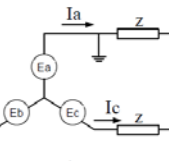
Gangguan frekuensi jatuh adalah gangguan yang menyebabkan frekuensi pada sistem bernilai lebih rendah dibandingkan dengan frekuensi yang seharusnya. Gangguan ini dapat disebabkan karena lepasnya pembangkit akibat adanya gangguan di sisi pembangkit.

2.2.3 Hubung Singkat

2.2.3.1 Jenis Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat yang mungkin terjadi pada sistem tenaga listrik terdiri dari gangguan hubung singkat 3 fasa, hubung singkat 2 fasa, hubung singkat 2 fasa ke tanah, dan hubung singkat 1 fasa ke tanah. Berdasarkan analisis gangguan hubung singkat, Arus gangguan hubung singkat 3 fasa adalah gangguan hubung singkat yang menghasilkan arus hubung singkat terbesar. Tabel 2.1 berikut menunjukkan berbagai jenis gangguan hubung singkat dalam sistem tenaga listrik

Tabel 2.1 Jenis Gangguan Hubung Singkat

No.	Jenis Gangguan Hubung Singkat	Gambar Rangkaian
1	3 Fasa	
2	2 Fasa	
3	2 Fasa ke tanah	
4	1 Fasa ke tanah	

2.2.3.3 Perhitungan Arus Hubung Singkat

Penentuan rating peralatan pengaman (proteksi) pada suatu sistem tenaga listrik dimulai dengan studi hubung singkat. Tujuan dari perhitungan ini adalah untuk menghasilkan peralatan proteksi dengan rating pengamanan yang tepat dan akurat.

Semua gangguan hubung singkat dihitung dengan menggunakan rumus dasar yaitu:

$$I = \frac{V}{Z} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana:

I = Arus yang mengalir pada hambatan Z (A)

V = Tegangan Sumber (V)

Z = Impedansi jaringan, nilai ekivalen dari seluruh impedansi di dalam jaringan dari sumber tegangan sampai titik gangguan (Ohm)

(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:

$$\begin{aligned} Z \text{ untuk gangguan tiga fasa,} & \quad Z = Z1 \\ Z \text{ untuk gangguan dua fasa,} & \quad Z = Z1 + Z2 \\ Z \text{ untuk gangguan satu fasa ke tanah,} & \quad Z = Z1 + Z2 + Z3 \dots \dots \dots (2.3) \end{aligned}$$

Dimana:

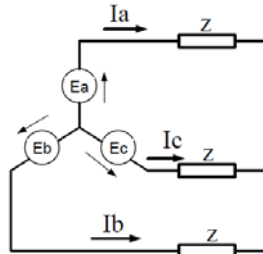
Z1 = Impedansi urutan positif (Ohm)

Z2 = Impedansi urutan negatif (Ohm)

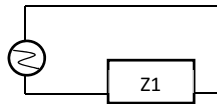
Z3 = Impedansi urutan nol (Ohm)

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 Ekivalen 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:

$$I_{3\text{fasa}} = \frac{C \cdot V_{\text{ln}}}{Z_{1\text{eki}}} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana:

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

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

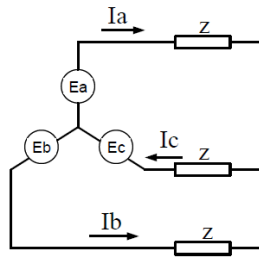
$Z_{1\text{eki}}$ = Impedansi ekivalen urutan positif (Ohm)

C = Faktor Tegangan (1.05 untuk tegangan kurang dari 1kV, 1.1 untuk tegangan lebih dari 1kV)

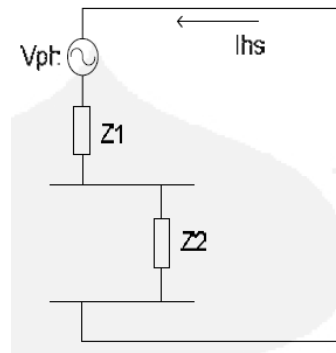
(IEC 60909: *Calculation Of Short-Circuit Currents*).

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:

$$V_s = V_t \dots\dots\dots (2.5)$$

$$I_s = -I_t \dots\dots\dots (2.6)$$

$$I_r = 0 \dots\dots\dots (2.7)$$

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

$$I_{2\text{fasa}} = \frac{C.V_{1l}}{Z_{1eki} + Z_{2eki}} \dots\dots\dots (2.8)$$

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

$$I_{2\text{fasa}} = \frac{C.V_{1l}}{2Z_{1eki}} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$I_{2\text{fasa}} = \frac{\sqrt{3} \cdot C.V_{1n}}{2Z_{1eki}} \dots\dots\dots (2.10)$$

$$I_{2\text{fasa}} = \frac{0,866 \cdot C.V_{1n}}{Z_{1eki}} \dots\dots\dots (2.11)$$

$$I_{2\text{fasa}} = 0,866 \times I_{3\text{fasa}} \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana:

$I_{2\text{fasa}}$ = 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)

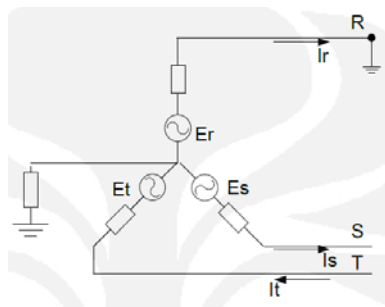
$Z_{2\text{eki}}$ = Impedansi ekivalen urutan negatif (Ohm)

C = Faktor Tegangan (1.05 untuk tegangan kurang dari 1kV, 1.1 untuk tegangan lebih dari 1kV)

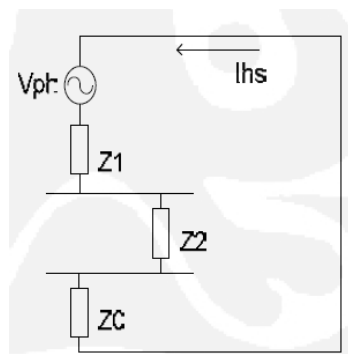
(IEC 60909: *Calculation Of Short-Circuit Currents*).

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 :

$$I_{1\text{fasa}} = \frac{3 \times V_{\text{ln}}}{Z_{1\text{eki}} + Z_{2\text{eki}} + Z_{0\text{eki}}} \dots\dots\dots (2.13)$$

Karena $Z_{1\text{eki}} = Z_{2\text{eki}}$, maka :

$$I_{1\text{fasa}} = \frac{3 \times V_{\text{ln}}}{2Z_{1\text{eki}} + Z_{0\text{eki}}} \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana:

- $I_{1\text{fasa}}$ = Arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah (A)
- V_{ln} = Tegangan fasa-netral (V)
- $Z_{1\text{eki}}$ = Impedansi ekivalen urutan positif (Ohm)
- $Z_{2\text{eki}}$ = Impedansi ekivalen urutan negatif (Ohm)
- $Z_{0\text{eki}}$ = 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:

$$X_g \text{ (pada 100\%)} = \frac{kV^2}{MVA} \dots\dots\dots (2.15)$$

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).

Untuk menghitung reaktansi urutan positif dan negatif ($X_{g1} = X_{g2}$) dihitung menggunakan persamaan:

$$X_g = \%X''_d \times X_g \text{ (pada 100\%)} \dots\dots\dots (2.16)$$

Dimana:

X_g = Impedansi Generator (Ohm)

$\%X''_d$ = Presentase Reaktansi Sub Transient pada spesifikasi (%)

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

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

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

Dimana:

R_g = Resistansi dari generator (Ohm)

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

(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:

$$X_t (\text{pada } 100\%) = \frac{kV^2}{MVA} \dots\dots\dots (2.17)$$

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:

$$X_t = \%X''_t \times X_t (\text{pada } 100\%) \dots\dots\dots (2.18)$$

Dimana:

X_t = Impedansi Trafo (Ohm)

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

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

c. Impedansi Motor Induksi

Perhitungan impedansi, reaktansi dan resistansi dapat diperoleh dengan persamaan berikut:

$$Z_m = \left(\frac{1}{\left(\frac{ILRC}{IFLC} \right)} \right) \times \left(\frac{V_m^2 \cos \phi_m}{P_m} \right) \dots\dots\dots (2.19)$$

$$R_m = \frac{P_m \times \frac{ILRC}{IFLC} \times \cos \phi_s}{3I_{LRC}^2 \times \cos \phi_m} \dots\dots\dots (2.20)$$

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 + R_m^2} \dots\dots\dots (2.21)$$

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 φ_m = Nilai faktor daya motor saat beban penuh.

cos φ_s = Nilai faktor daya motor saat starting.

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

d. Impedansi Penyulang

Untuk perhitungan impedansi penyulang, perhitungan tergantung dari besarnya impedansi per km dari penyulang yang akan dihitung. Besar nilai impedansi tergantung pada jenis bahan, diameter dan panjang penghantar. Persamaan dari impedansi penyulang adalah sebagai berikut:

$$z_1 = z_2 = \text{Impedansi kabel per km} \times \frac{\text{panjang penyulang}}{1000} \dots\dots (2.22)$$

Dimana:

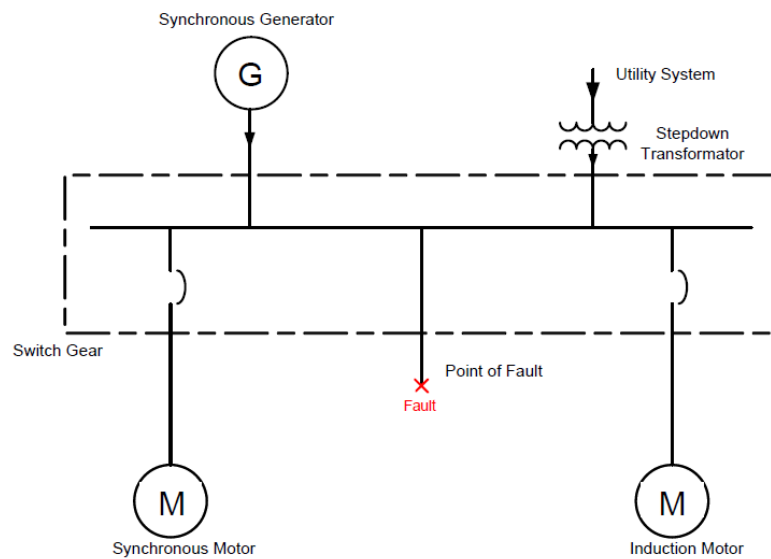
Z₁ = Impedansi urutan positif

Z₂ = 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)

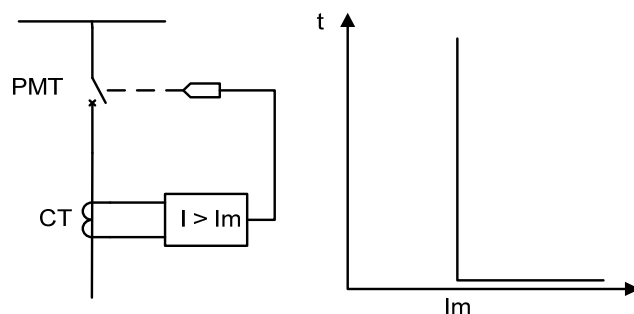
Relai arus lebih atau yang lebih dikenal dengan OCR (*Over Current Relay*) merupakan peralatan yang mensinyalir adanya arus lebih, baik yang disebabkan oleh adanya gangguan hubung singkat atau *overload* yang dapat merusak peralatan sistem tenaga yang berada dalam wilayah proteksinya.

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*)

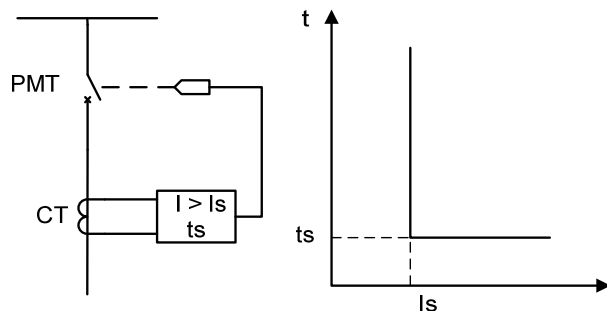
Relai arus lebih sesaat adalah relai arus lebih yang tidak mempunyai tunda waktu dalam bekerja. Relai bekerja pada gangguan yang paling dekat dengan lokasi.



Gambar 2.15 Karakteristik Relai Arus Lebih Sesaat

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

Relai arus lebih waktu tertentu adalah relai dengan tunda waktu yang tetap, tidak tergantung pada besarnya arus gangguan. Jika arus gangguan telah melebihi arus settingnya, maka relai akan bekerja dengan tunda waktu tetap dan tidak memperdulikan besar dari arus tersebut.



Gambar 2.16 Karakteristik Relai Arus Lebih Waktu Tertentu

Keuntungan dari relai arus lebih waktu tertentu yaitu:

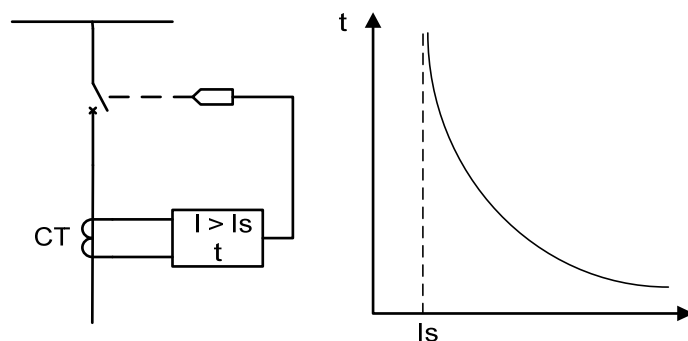
- a. Relai arus lebih waktu tertentu mudah dikoordinasikan.
- b. Waktu kerja relai arus lebih tidak tergantung pada kapasitas pembangkit.

Kelemahan dari relai arus lebih waktu tertentu yaitu:

- a. Terjadi akumulasi waktu pada relai dihilu. Akumulasi waktu tidak direkomendasikan untuk sistem tenaga listrik besar.
- b. Bila diterapkan pada pengaman gangguan tanah jaringan distribusi radial, bisa menimbulkan *simpatetik tripping*.

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

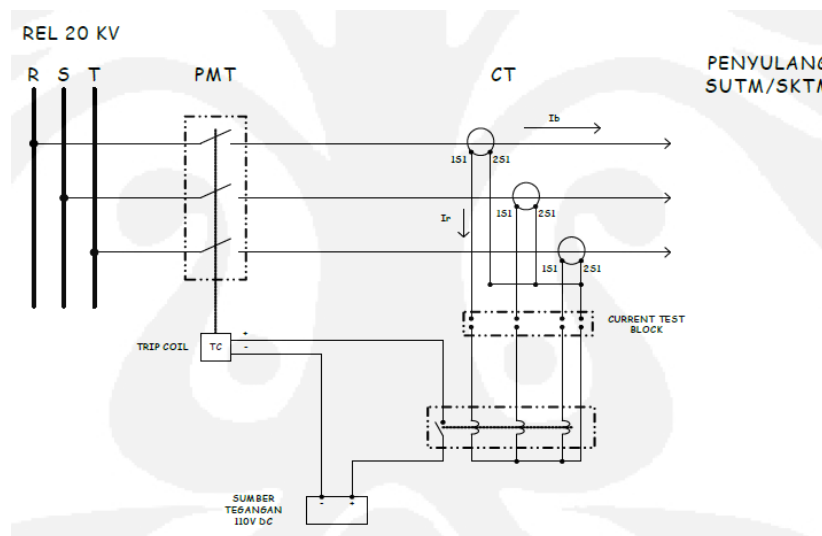
Relai arus lebih waktu terbalik adalah relai yang memiliki karakteristik dengan tunda waktu yang dipengaruhi oleh besar arus hubung singkat yang terjadi. Hubungan antara tunda waktu dan arus hubung singkat adalah terbalik. Jadi semakin besar arus gangguan maka waktu kerja relai akan semakin cepat, dan juga sebaliknya.



Gambar 2.17 Karakteristik Relai Arus Lebih Waktu Terbalik

2.2.5.3 Prinsip Kerja Relai Arus Lebih

Prinsip kerja relai arus lebih adalah berdasarkan adanya arus lebih yang dirasakan relai. Arus lebih yang dirasakan relai adalah arus lebih yang disebabkan oleh gangguan hubung singkat dan arus lebih yang disebabkan beban lebih (*overload*). Jika relai arus lebih merasakan adanya arus lebih, maka relai arus lebih akan memberikan perintah trip kepada PMT sesuai dengan karakteristik waktunya.



Gambar 2.18 Rangkaian Pengawatan Relai Arus Lebih (OCR)

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

- 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.
- Pada kondisi terjadi gangguan, arus beban (I_b) akan meningkat. Meningkatnya arus beban (I_b) menyebabkan arus sekunder (I_r) juga meningkat. Arus (I_r) melewati kumparan relai. Jika Arus (I_r) bernilai lebih besar dari nilai setting pada relai, maka relai akan bekerja dan memerintahkan PMT untuk trip

2.2.5.4 Setting Relai Arus Lebih

Untuk melakukan setting pada relai arus lebih, maka perlu dilakukan 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

$$I_{set\ primer} \leq 0,8 I_{sc\ Minimum} \dots\dots\dots (2.23)$$

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

b. Setting Sekunder

$$I_{set\ sekunder} = I_{set\ primer} \times \frac{1}{Ratio\ CT} \dots\dots\dots (2.24)$$

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

c. Setting Waktu

Relai pengaman utama dan relai *backup* tidak boleh bekerja secara bersamaan. Oleh karena itu diperlukan adanya *time delay* antara relai utama dan relai *backup*. *Time delay* ini sering dikenal sebagai setting kelambatan waktu (Δt) atau *grading time*. Berdasarkan IEEE std 242-1986, perbedaan waktu kerja minimal antara relai utama dan relai *backup* adalah 0.2 – 0.35 detik.

2. Setting Arus Lebih *Invers*

Pada dasarnya batas penyetelan relai arus lebih adalah relai tidak boleh bekerja pada saat beban maksimum. Arus settingnya harus lebih besar dari arus beban maksimumnya. Arus penyetelan harus memperhatikan kesalahan *pick up* sesuai dengan *British Standard Pick Up* = 1.05 s/d 1.3 (Hawitson et al: *Practical Power System Protection*, 2004).

Persamaan yang digunakan untuk setting relai arus lebih *invers* adalah sebagai berikut.

a. Setting Primer

$$\text{Iset primer} = 1.05 \text{ s/d } 1.3 \times \text{FLA} \dots\dots\dots (2.25)$$

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

FLA adalah arus maksimum beban yang mengalir pada sistem.

b. Setting Sekunder

$$\text{Iset sekunder} = \text{Iset primer} \times 1/(\text{Ratio CT}) \dots\dots\dots (2.26)$$

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

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

Persamaan yang digunakan untuk menentukan settingan waktu pada relai *invers* adalah:

$$t = \frac{k \times b}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^a - 1} + L \dots\dots\dots (2.27)$$

$$k = \frac{(t-L) \times \left(\left(\frac{I}{I_s}\right)^a - 1\right)}{b} \dots\dots\dots (2.28)$$

Dimana :

t = Waktu dalam detik

I = Arus gangguan

I_s = Arus *setting*

k = *Time multiplier Setting / TMS*

L, b dan a memiliki nilai yang berbeda tergantung dari karakteristik relai yang digunakan. Nilai setiap karakteristik ditunjukkan oleh tabel 2.2.

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

Langkah-langkah dalam menghitung TMS dari suatu koordinasi proteksi relai arus lebih adalah sebagai berikut:

1. Diasumsikan bahwa relai 1 adalah relai terdekat dengan beban, relai 2 adalah relai terdekat kedua dengan beban, relai 3 adalah relai terdekat ketiga dengan beban, dan seterusnya.

2. Menentukan nilai TMS pada relai 1 dengan nilai TMS terkecil yang bisa disetting pada relai 1 dan selanjutnya menghitung waktu kerja yang dibutuhkan relai 1 (t_{b1}) untuk memberikan isyarat kepada PMT.
3. Menentukan waktu mulai relai 2 untuk bekerja (t_{a2}) dengan memberikan *time grading* dari lama waktu bekerja relai sebelumnya (t_{b1}). Setelah nilai t_{a2} didapatkan selanjutnya menghitung TMS pada relai 2 dengan parameter besar arus gangguan hubung singkat pada zona proteksi relai 1 yang juga dirasakan pada relai 2.
4. Setelah nilai TMS didapatkan, langkah selanjutnya adalah menghitung waktu kerja yang dibutuhkan relai 2 (t_{b2}) untuk memberikan isyarat PMT *trip* dengan parameter arus gangguan hubung singkat pada zona proteksi relai 2 yang dirasakan oleh relai 2.
5. Untuk setting relai selanjutnya dilakukan dengan cara yang sama hingga relai yang terletak paling dekat dengan sumber daya.

(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