

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Berikut beberapa penelitian yang pernah dilakukan sebagai rujukan dalam penelitian ini:

Zulkarnaini dan Hakim (2014) melakukan penelitian berjudul Evaluasi Koordinasi Over Current Relay (OCR) dan Ground Fault Relay (GFR) pada Feeder GH Lubuk Buaya. Jangkauan dari rele dipengaruhi oleh nilai dari arus hubung singkat (*short circuit current*), sedangkan nilai arus hubung singkat dipengaruhi oleh banyaknya pembangkit yang masuk pada jaringan, kapasitas atau impedansi transformator serta titik gangguan atau panjang jaringan. Setting TMS terpasang pada rele arus lebih GH Lubuk Buaya berbeda dengan hasil perhitungan berbeda dan perlu dilakukan *resetting* pada rele-rele tersebut.

Yanuwirawan, Pujiantara dan Wahyudi (2015) melakukan penelitian berjudul Studi Koordinasi Proteksi Rele Arus Lebih dan Ground Fault pada Sistem Eksisting PT. VICO Indonesia, Kalimantan Timur. Hasil plot koordinasi rele arus lebih pada PT VICO Indonesia terjadi miskoordinasi dan *overlapping* sehingga menyebabkan tidak optimalnya rele dalam melokalisir gangguan dan menyebabkan padam total pada pabrik. Setting rele arus lebih yang ada tidak mempertimbangkan *Damage Curve* pada transformator dan *Starting Curve* pada generator sehingga dapat merusak peralatan ketika beban penuh. Setting rele arus lebih tidak mempertimbangkan *Full Load Ampere* (FLA) transformator sehingga ketika terdapat arus maksimal pada transformator dan motor *starting* dianggap sebagai gangguan.

Zulkarnaini dan Saiful (2016) melakukan penelitian berjudul Analisa Perhitungan Setting Over Current Relay pada Transformator Daya Area Lukit di Emp Malacca Strait Sa. Dalam perhitungan nilai waktu delay maka digunakan arus hubung singkat, sedangkan untuk perhitungan nilai arus setting digunakan nilai arus nominal. Setting rele arus lebih yang terpasang pada transformator daya tersebut dianggap sangat efektif dalam mengamankan transformator dari gangguan.

Fauzan, Juningtyastuti dan Facta (2016) melakukan penelitian berjudul Analisis Resetting Rele Arus Lebih akibat Perubahan Transformator Daya dan Penambahan Penyulang di Gardu Induk Sronдол Semarang. Waktu kerja pada perhitungan dari rele-rele yang diteliti telah memenuhi standar penentuan *grading time* antar peralatan proteksi berdasarkan IEC 60255 yaitu sebesar 0,3-0,5 detik. Hasil analisis koordinasi antara peralatan proteksi rele arus lebih dengan *recloser* berjalan dengan baik dibuktikan dengan kurva karakteristik waktu terhadap arus (TCC *curve*) sistem proteksi pada tiap penyulang tidak saling memotong. Waktu kerja pada rele *incoming* minimal adalah 3 kali lebih cepat dari waktu ketahanan konduktor pada penyulang sehingga sistem proteksi mampu meminimalisir gangguan hubung singkat sebelum konduktor mengalami kerusakan.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pengertian Proteksi Sistem Tenaga Listrik

Sistem proteksi tenaga listrik merupakan upaya dalam mengurangi akibat dari gangguan dengan cara memisahkan bagian yang terganggu dengan sistem lain agar sistem tidak mengalami gangguan tetap bekerja (Hariyanto, 2009). Proteksi tenaga listrik sangat penting karena gangguan yang tidak diputus dari aliran listrik dapat menyebabkan kerusakan peralatan serta membahayakan manusia maupun hewan. Terjadinya kerusakan peralatan dapat mengganggu penyaluran tenaga listrik yang bisa menyebabkan kerugian yang lebih besar karena tidak dapat melakukan produksi.

Pemanfaatan sistem proteksi dapat meminimalisir terjadinya kerusakan peralatan listrik ketika terjadi gangguan, dengan syarat sistem proteksi bekerja secara optimal. Sistem proteksi dapat bekerja optimal ketika dapat mendeteksi gangguan dengan cepat dan tepat serta dapat berkoordinasi dengan peralatan proteksi lainnya sehingga dapat mengisolir gangguan yang terjadi.

2.2.2 Tujuan Sistem Proteksi Tenaga Listrik

Menurut Hewitson (2004), sistem proteksi tenaga listrik memiliki 3 fungsi utama:

1. Pengaman sistem untuk menjaga kontinuitas penyediaan dan penyaluran energi listrik
2. Meminimalisir bahaya dan biaya perbaikan ketika terdeteksi gangguan
3. Memastikan keamanan manusia

2.2.3 Persyaratan Sistem Proteksi

Menurut Erliwati dalam Jurnal Nasional Teknik Elektro (2015) disebutkan bahwa minimal terdapat 4 persyaratan utama sistem proteksi, yaitu:

1. Selektivitas dan Deskriminatif

Selektif berarti sistem proteksi mampu memilih bagian mana yang perlu diisolir ketika terjadi gangguan. Bagian yang diisolir tersebut merupakan bagian atau area sekecil mungkin dari daerah/ area yang terganggu. Sementara deskriminatif diartikan sebagai kemampuan sistem proteksi untuk membedakan kondisi normal dan abnormal ataupun membedakan apakah kondisi abnormal tersebut berada pada zona proteksinya atau tidak sehingga menjadikan tindakan dari sistem proteksi berjalan dengan tepat. Syafii (2016) menjelaskan bahwa suatu sistem proteksi akan memiliki kemampuan selektivitas dan deskriminatif dapat tercapai dengan mengatur tingkat setting arus (*current grade*) tingkat waktu (*time grade*), ataupun keduanya. Selain itu, dapat tercapai dengan pemilihan spesifikasi trafo arus yang benar, karakteristik rele yang tepat serta *setting* rele yang terkoordinasi dengan baik.

2. Keandalan (*Reliability*)

Keandalan berarti sistem proteksi harus mampu berfungsi pada semua gangguan dan kondisi ketidaknormalan pada sistem tenaga listrik sesuai rancangan (Furqan, 2015). Untuk memenuhi semua persyaratan sistem proteksi tersebut, maka sistem proteksi harus

a. *Dependable*

Dependable berarti peralatan proteksi mampu untuk mendeteksi dan memutus bagian sistem ketika terjadi gangguan.

b. *Secure*

Secure berarti peralatan proteksi harus mampu memberikan kepastian bahwa peralatan tidak boleh terputus ketika tidak terdapat gangguan.

3. Sensitivitas (*Sensitivity*)

Sensitivitas merupakan kemampuan rele proteksi untuk bereaksi dan bekerja merespon gangguan pada sistem (Wijayanto, 2017). Kepekaan sistem proteksi biasa dikaitkan dengan kemampuan suatu rele bekerja dengan baik pada saat besaran penggerak seperti arus, tegangan, daya maupun besaran lainnya bernilai minimum. Rele arus lebih harus memiliki kepekaan yang tinggi untuk menghindarkan peralatan terhadap gangguan termasuk gangguan yang masih dini. Kepekaan tersebut meliputi kepekaan untuk mendeteksi gangguan yang terjadi pada zona proteksinya maupun kepekaan terhadap gangguan pada zona proteksi cadangan bila proteksi utama gagal bekerja.

4. Kecepatan (*Speed*)

Kecepatan suatu sistem proteksi untuk mendeteksi, memutus dan memisahkan bagian sistem yang terganggu dengan bagian lainnya haruslah sesingkat mungkin dan dengan pertimbangan resikonya. Namun demikian, untuk menciptakan selektivitas dan deskriminatif yang baik, suatu peralatan proteksi perlu diberikan waktu tunda. Waktu total pembebasan sistem terhadap gangguan adalah waktu sejak gangguan terjadi hingga bagian sistem yang terganggu terpisah dengan bagian sistem lainnya.

Hewitson (2004) menyatakan bahwa kecepatan sistem proteksi berfungsi untuk

a. Mencegah bahaya pada lokasi gangguan

$$\text{Energi Gangguan} = I^2 R_f t \dots\dots\dots(2.1)$$

dimana

I = kuat arus listrik (A)

R_f = impedansi hubung singkat (Ω)

$t =$ waktu (s)

Jadi, dari rumus tersebut diketahui semakin besar waktu gangguan maka energinyapun semakin besar dan dapat membahayakan.

- b. Mencegah bahaya terhadap operator
- c. Mencegah terpicunya gas yang mudah terbakar pada area bahaya seperti gas metana pada pertambangan batu bara.
- d. Mencegah kemungkinan gangguan tanah menyebar ke saluran fasa yang masih baik
- e. Mencegah kerusakan mekanik dan termal pada peralatan

2.2.4 Gangguan

1. Gangguan Aktif (*Active Faults*)

Gangguan aktif merupakan gangguan dimana terdapat aliran arus faktual dari satu konduktor fasa ke konduktor fasa lainnya (*phase to phase*) atau dari satu konduktor fasa ke bumi (*phase to earth*) yang biasa dikenal dengan gangguan hubung singkat. Gangguan jenis ini dapat juga diklasifikasikan lebih lanjut menjadi dua, yaitu gangguan solid (*solid fault*) dan *incipient fault*

Gangguan solid disebabkan oleh kerusakan total isolasi secara cepat dan seketika. Hal tersebut seperti kabel bawah tanah yang tidak sengaja tergali oleh bulldoser. Pada pertambangan, jatuhnya batuan dapat merusak kabel, dan dapat menyebabkan arus gangguan sangat tinggi yang berpotensi menyebabkan ledakan.

Sementara *incipient fault* adalah gangguan yang dimulai dengan sesuatu yang kecil kemudian berkembang menjadi besar. Sebagai contoh adalah pelepasan bagian/ beban (pelepasan beban besar akan menyebabkan korona) pada ruang hampa isolasi kelebihan batas waktu kemampuannya sehingga dapat membakar isolasi yang berdekatan dan menyebar lebih jauh dan berkembang menjadi gangguan solid.

Kasus lainnya dapat terjadi karena kontak resistansi tinggi yang disebabkan oleh polusi/ debu/ kotoran pada permukaan konduktor. Ketika

tracking terjadi, udara disekeliling terionisasi sehingga memiliki karakteristik seperti konduktor dan terjadilah gangguan solid.

2. Gangguan Pasif (*Passive Faults*)

Gangguan pasif bukan merupakan gangguan dalam arti kata yang sebenarnya, namun dalam keadaan melebihi kapasitas sistem, yang dapat mengakibatkan gangguan aktif terjadi. Beberapa jenis gangguan pasif adalah:

- a. *Overload* yang diikuti dengan panas berlebih yang dapat memperburuk kualitas, mengurangi umur dan paling parah adalah kerusakan peralatan,
- b. *Overvoltage* (tegangan lebih) merupakan gangguan yang menyebabkan tegangan pada sistem melebihi tegangan yang seharusnya. Gangguan tegangan lebih dibedakan menjadi dua macam yaitu tegangan lebih *over frequency* dan *transient*. Tegangan lebih *over frequency* disebabkan oleh pembangkit yang kehilangan beban, kecepatan berlebih (*over speed*) pada generator serta gangguan pada AVR. Sedangkan penyebab gangguan tegangan lebih *transient* adalah akibat dari sambaran petir (surja petir).
- c. *Under frequency* (frekuensi jatuh) merupakan gangguan yang menyebabkan frekuensi sistem kurang dari yang seharusnya. Hal ini dapat menyebabkan peralatan tidak bekerja dengan semestinya
- d. *Power swing* merupakan gangguan dimana generator keluar dari sinkronisasi dengan yang lain.

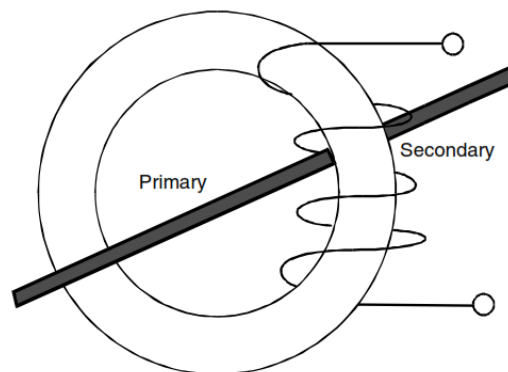
Maka dari itu, penting untuk memonitor kinerja sistem tenaga listrik untuk melindungi dari keadaan-keadaan tersebut.

2.2.5 Peralatan Proteksi

Beberapa peralatan yang dibutuhkan pada sistem proteksi tenaga listrik adalah sebagai berikut:

1. Trafo Arus

Trafo arus merupakan suatu piranti untuk menurunkan arus yang dilakukan untuk proses pengukuran. Penurunan arus dalam pengukuran sangat penting karena pada suatu sistem tenaga listrik yang memiliki arus yang tinggi, alat-alat pengukur tidak mampu membaca secara langsung arus yang melewati suatu penghantar, karena peralatan pengukur diproduksi untuk kapasitas arus yang kecil, oleh karena itu maka nilai arus perlu diturunkan dengan rasio tertentu untuk mendapatkan hasil pengukuran. Trafo arus dipasang seri terhadap beban, berbeda pada trafo pada umumnya.

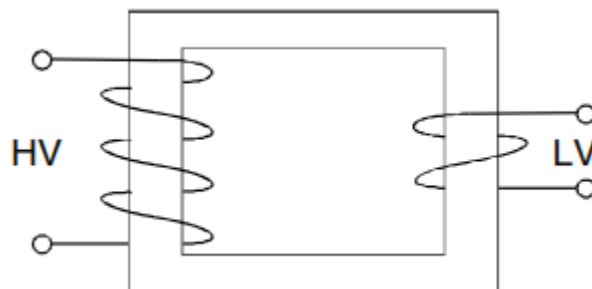


Gambar 2.1 Konstruksi trafo arus

Prinsip kerja trafo arus dijelaskan ketika arus primer (I_p) mengalir pada kumparan primer, maka akan muncul medan magnet disekeliling kumparan primer tersebut, medan magnet tersebut akan terkumpul lebih banyak pada inti besi. Medan magnet yang berputar di dalam inti besi karena arus AC menghasilkan perubahan fluks primer dan memotong lilitan sekunder sehingga menginduksi 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

Trafo tegangan merupakan sebuah piranti yang digunakan untuk menurunkan tegangan yang dilakukan untuk proses pengukuran. Penurunan nilai tegangan dalam pengukuran sangat penting karena pada suatu sistem tenaga listrik yang memiliki tegangan yang tinggi, alat-alat pengukur tidak mampu membaca secara langsung, karena peralatan pengukur diproduksi untuk tegangan yang kecil, oleh karena itu maka nilai tegangan perlu diturunkan dengan rasio tertentu untuk mendapatkan hasil pengukuran. Trafo tegangan dipasang paralel terhadap beban, berbeda dengan trafo arus yang dipasang secara seri.



Gambar 2.2 Konstruksi trafo tegangan

Prinsip kerja dari trafo tegangan adalah pada saat arus AC mengalir dari kumparan HV maka akan menimbulkan gaya gerak magnet yang akan menghasilkan fluks pada inti besi yang akan membentuk gaya gerak listrik (ggl) pada kumparan LV, apabila rangkaian pada kumparan sekunder tertutup maka arus akan mengalir dan menghasilkan gaya gerak magnetic pada kumparan LV.

3. Rele Proteksi

Rele proteksi merupakan suatu peralatan yang digunakan untuk mendeteksi keadaan tidak normalan yang tidak diinginkan pada peralatan listrik dan memberikan perintah untuk membuka rangkaian ketika terjadi gangguan. Beberapa besaran pada sistem kelistrikan 3 fasa antara lain adalah tegangan, arus, frekuensi dan daya. Semua besaran tersebut perlu ditentukan nilai keadaan normalnya, nilai-nilai yang berbeda dengan keadaan normal

akan dianggap sebagai sebuah gangguan. Rele proteksi yang digunakan dalam proteksi sistem tenaga listrik diklasifikasikan dalam beberapa jenis:

a. Berdasarkan prinsip kerja

1) Rele elektromagnetik

Rele elektromagnetik merupakan rele yang bekerja dengan prinsip elektromagnetik untuk membuka dan menutup switch. Apabila suatu kumparan dialiri arus listrik maka akan terjadi gaya magnet yang dapat menarik armatur sehingga terjadi kontak pada switch.

2) Rele Thermis

Rele thermis merupakan rele yang bekerja berdasarkan kenaikan suhu. Kenaikan suhu ini diakibatkan oleh arus yang melewati, semakin besar arus yang lewat maka suhu thermis akan lebih panas dan dapat memberikan perintah trip pada rangkaian.

3) Rele Mikroprosesor

Rele mikroprosesor merupakan rele yang paling banyak digunakan saat ini terutama untuk beban pada tegangan menengah dan tinggi. Hal ini karena rele jenis ini mudah untuk disetting nilai besaran-besaran yang ada, serta bentuknya relatif kecil. Rele ini menggunakan prosesor untuk membuka dan menutup switch.

b. Berdasarkan fungsi

1) Rele arus lebih

Rele arus lebih merupakan suatu rele yang berdasarkan besarnya arus masukan, apabila nilai arus masukan melebihi suatu nilai tertentu yang dapat diset maka rele bekerja (Wijayanto, 2012).

2) Rele jarak

Rele jarak merupakan rele yang bekerja dengan mengukur tegangan dan arus pada penghantar kemudian menghitung besar impedansinya. Jika nilai impedansi pada sistem lebih kecil dari nilai impedansi yang disetting, maka rele bekerja.

3) Rele *under frequency*

Rele *under frequency* merupakan rele yang bekerja dengan mengukur frekuensi. Rele ini bekerja apabila frekuensi yang terdeteksi kurang dari frekuensi yang telah disetting pada rele.

4) Rele *over frequency*

Rele *over frequency* merupakan rele yang bekerja dengan mengukur frekuensi. Rele ini bekerja apabila frekuensi yang terdeteksi lebih dari frekuensi yang telah disetting pada rele.

5) Rele *under voltage*

Rele *under voltage* merupakan rele yang bekerja dengan mengukur tegangan pada sistem. Rele ini bekerja ketika tegangan pada sistem kurang dari tegangan yang telah disetting pada rele.

6) Rele *over voltage*

Rele *over voltage* merupakan rele yang bekerja dengan mengukur tegangan pada sistem. Rele ini bekerja ketika tegangan pada sistem lebih dari tegangan yang telah disetting pada rele.

7) Rele arah

Rele arah merupakan rele yang digunakan untuk mendeteksi adanya gangguan hubung singkat yang mempunyai sumber lebih dari satu dan mempunyai jaring berbentuk loop.

4. Pemutus tenaga (*Circuit Breaker*)

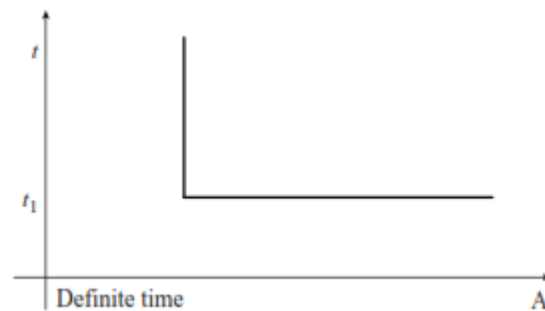
Pemutus tenaga merupakan piranti yang digunakan untuk melepaskan titik ganggana dari sistem (Tiyono, 2013). Pemutus tenaga menjadi perangkat utama dalam menghubungkan dan memutuskan rangkaian listrik untuk boleh/tidaknya aliran daya disalurkan dari sumber ke beban. Pada keadaan normal, pemutus tenaga dapat dinonaktifkan (rangkaiannya terbuka) secara manual. Sedangkan ketika dalam kondisi gangguan, pemutus tenaga akan terbuka ketika mendapat instruksi dari perangkat monitoring seperti rele.

2.2.6 Proteksi Rele Arus Lebih

Rele arus lebih merupakan peralatan proteksi yang melindungi sistem dari gangguan arus lebih dimana waktu kerjanya tergantung dari besar dari nilai arusnya. Gangguan arus lebih merupakan nilai arus yang melebihi dari nilai yang telah disetting pada rele. Rele ini tidak bekerja ketika nilai arus kurang dari nilai yang telah disetting dan akan bekerja ketika arus primer pada trafo arus melebihi nilai arus yang telah disetting pada rele tersebut. Beberapa karakteristik dari rele arus lebih:

1. *Definite time*

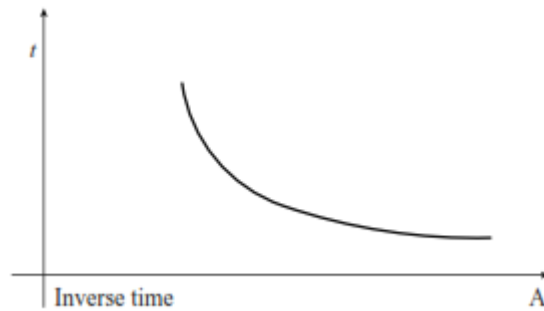
Rele dengan karakteristik *definite time* merupakan rele yang bekerja apabila arus gangguan melebihi arus setting (I_s) maka rele akan memerintahkan pemutus tenaga untuk *trip* setelah selang waktu tertentu yang telah disetting (T_s) yang tetap.



Gambar 2.3 Kurva *Definite Time*

2. *Inverse time*

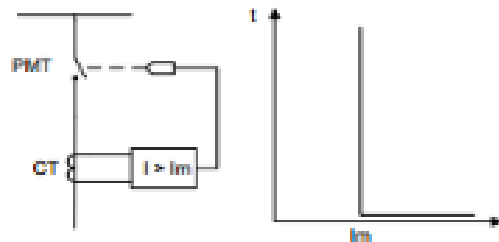
Rele dengan karakteristik *inverse time* merupakan rele yang bekerja apabila arus gangguan melebihi arus setting (I_s) maka rele akan memerintahkan pemutus tenaga untuk *trip* namun dengan selang waktu tidak tetap tergantung besarnya arus gangguan. Semakin besar nilai dari arus gangguan maka nilai delay (waktu tunda) dari rele akan semakin cepat. Pada rele ini terdapat tiga jenis yaitu *standard inverse time*, *very inverse time*, *extremely inverse time* yang hubungannya ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Kurva *Inverse Time*

3. *Instantaneous time*

Rele dengan karakteristik instantaneous time merupakan rele yang tidak mempunyai waktu tunda dalam bekerja. Rele bekerja pada gangguan yang paling dekat dengan lokasi.



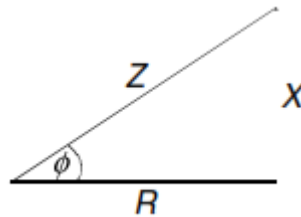
Gambar 2.5 Kurva *Instantaneous Time*

2.2.7 Pengaturan rele arus lebih

Terdapat beberapa langkah untuk memperoleh setting nilai dari rele arus lebih. Berikut adalah langkah-langkah

2.2.7.1 Perhitungan impedansi

Impedansi merupakan AC ekivalen terhadap resistansi pada sistem DC dengan penambahan efek reaktansi. Impedansi disimbolkan dengan huruf Z dan merupakan penjumlahan vektor antara resistansi dan reaktansi.



Gambar 2.6 Diagram Hubungan Impedansi

Dengan persamaan rumus:

$$Z = R + jX \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana,

Z = Impedansi (Ω)

R = Resistansi (Ω)

X = Reaktansi (Ω)

Reaktansi merupakan fenomena pada sistem AC yang terdiri dari reaktansi induktif dan kapasitif. Energi dibutuhkan komponen untuk bereaksi terhadap sumber dan berakibat menurunkan ketersediaan daya yang dapat digunakan.

1. Perhitungan impedansi kabel

Impedansi kabel dipengaruhi oleh panjang, luas penampang dan jenis penghantar yang digunakan. Perhitungan impedansi kabel bergantung pada nilai dari resistansi kabel yang terdapat pada *data sheet* pabrikan. Pada dasarnya persamaan yang digunakan untuk mencari impedansi kabel sama dengan persamaan impedansi umum yaitu:

$$Z = R + jX \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana: Z = Impedansi

R = Resistansi

X = Reaktansi

2. Perhitungan impedansi transformator

Perhitungan impedansi transformator dapat dilakukan dengan mengamati *nameplate* transformator yang menampilkan spesifikasi dari transformator. Persamaan yang digunakan untuk memperoleh nilai impedansi dari transformator adalah:

$$Z_{trafo} = Z\% \frac{V_P^2}{S} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana: Z_{trafo} = impedansi transformator (Ω)
 $Z\%$ = presentase impedansi transformator
 V_p = Tegangan primer transformator (V)
 S = Daya maksimal transformator (VA)

3. Perhitungan impedansi feeder

Perhitungan impedansi sumber dilakukan dengan persamaan:

$$Z_S = \frac{V^2}{P_{sc}} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana, Z_s = impedansi sumber (Ω)
 V = tegangan sumber (V)
 P_{sc} = daya hubung singkat (VA_{sc})

(Pranayuda dkk, 2012)

4. Perhitungan impedansi generator

Pada perhitungan impedansi generator, nilai yang digunakan adalah nilai dari reaktansi subtransient (X''_d). Langkah yang digunakan adalah:

$$X_g = \%X''_d \times \frac{V^2}{S} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana, X_g = Impedansi generator (Ω)
 $\%X''_d$ = Presentase reaktansi sub transient
 V = tegangan generator (V)
 S = kapasitas daya generator (VA)

Sedangkan nilai resistansi generator diperoleh dengan persamaan:

$$R_g = \frac{X_g}{X/R} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana, R_g = Resistansi generator (Ω)

X_g = Reaktansi generator (Ω)

X/R = Rasio X/R , digunakan nilai 20 untuk kapasitas generator ≥ 100 MVA, nilai 14,29 untuk kapasitas ≤ 100 MVA dan 6,67 untuk semua generator dibawah 1 kV.

(IEC 606909, dalam Syafii, 2017)

5. Perhitungan impedansi motor induksi

Berikut merupakan perhitungan impedansi, reaktansi dan resistansi pada motor:

$$Z_m = \frac{1}{\frac{I_{LRC}}{I_{FLC}}} \times \frac{V^2 \cos \phi_m}{P_m} \dots\dots\dots(2.8)$$

$$R_m = \frac{P_m \times \frac{I_{LRC}}{I_{FLC}} \times \cos \phi_s}{3 I_{LRC}^2 \cos \phi_s} \dots\dots\dots(2.9)$$

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2} \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana, Z_m = nilai impedansi motor (Ω)

X_m = reaktansi moror (Ω)

R_m = resistansi motor (Ω)

I_{LRC} = nilai arus *lock* rotor motor (A)

I_{FLC} = nilai arus beban penuh motor (A)

V_m = tegangan nominal motor (V)

P_m = rating daya motor (W)

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

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

2.2.7.2 Perhitungan Arus Nominal (*Full Load Ampere*)

Arus nominal merupakan arus maksimal yang digunakan beban dalam keadaan normal. Arus nominal dapat dihitung dengan:

1. Diketahui daya semu beban

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana, I_n = kuat arus nominal (A)

S = daya semu (VA)

V = tegangan (V)

2. Diketahui daya aktif beban

$$I_n = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times \text{eff} \times \text{pf}} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana, I_n = arus nominal (A)

P = daya aktif (w)

V = tegangan (V)

Eff = efisiensi motor

Pf = faktor daya motor

3. Perhitungan arus nominal transformator sisi primer

$$I_n = \frac{S_{\text{trafo}}}{\sqrt{3} \times V_p} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana, I_n = arus nominal (A)

S_{trafo} = kapasitas daya trafo (VA)

V_p = tegangan primer trafo (V)

4. Perhitungan arus nominal transformator sisi sekunder

$$I_n = \frac{S_{\text{trafo}}}{\sqrt{3} \times V_s} \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana, I_n = arus nominal (A)

S_{trafo} = kapasitas daya trafo (VA)

V_s = tegangan sekunder trafo (V)

Perhitungan pada bidang kelistrikan banyak diturunkan dari suatu persamaan yang sangat dasar yaitu hukum ohm. Hukum ohm menyatakan bahwa nilai arus akan berbanding lurus dengan tegangan dan berbanding terbalik dengan

2.2.7.3 Perhitungan arus hubung singkat

Pada umumnya perhitungan arus hubung singkat merupakan penjabaran dari hukum ohm pada sistem DC:

$$I = \frac{V}{R} \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana pada AC nilai R (resistansi) digantikan dengan nilai Z yang merupakan penjumlahan vektor antara R (resistansi) dan X (reaktansi). Sehingga diperoleh persamaan:

$$I = \frac{V}{Z} \dots\dots\dots(2.16)$$

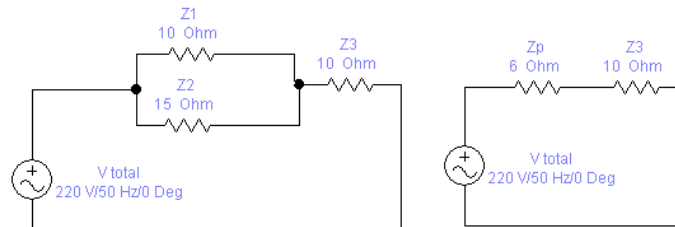
Dari persamaan dasar tersebut didapatkan persamaan untuk menghitung arus hubung singkat yang terjadi pada busbar, yaitu:

$$I_{sc} = \frac{cV_{L-N}}{Z_{ekivalen}} \dots\dots\dots(2.17)$$

$$I_{sc} = \frac{cV_{L-L}}{\sqrt{3} \times Z_{ekivalen}} \dots\dots\dots(2.18)$$

| | | |
|--------|--------------|--|
| Dimana | I_{sc} | = kuat arus hubung singkat (A) |
| | I | = Arus (A) |
| | V_{L-L} | = Tegangan fasa ke fasa (V) |
| | V_{L-N} | = Tegangan fasa ke netral (V) |
| | R | = Resistansi (Ω) |
| | V_p | = Tegangan primer (V) |
| | Z_{kabel} | = Impedansi kabel (Ω) |
| | Z_{trafo} | = Impedansi transformator (Ω) |
| | Z_{sumber} | = Impedansi sumber (Ω) |
| | C | = Faktor tegangan (bernilai 1,05 untuk tegangan dibawah 1 kV dan 1,1 untuk tegangan diatas 1 kV) |

Rumus dasar dimana impedansi/ hambatan yang dipasang secara seri merupakan rangkaian pembagi tegangan sedangkan impedansi/ hambatan yang dipasang secara paralel merupakan rangkaian pembagi arus.



Gambar 2.7 Rangkaian Ekivalen 1 fasa

Dimana rangkaian tersebut dapat disederhanakan menjadi gambar b. Untuk memperoleh nilai V_{Zp} dihitung dengan rumus

$$V_{Zp} = I_{total} \times Z_p$$

Pada rangkaian paralel untuk mencari nilai arus yang melewati Z1 adalah

$$I_{Z1} = \frac{V_p}{Z1} = \frac{I_{total} \times Z_p}{Z1}$$

2.2.7.4 Perhitungan nilai *pick up low set*

Pick up setting digunakan untuk menentukan arus yang diterima rele agar rele mulai bekerja. Menurut British BS 142-1983 *range* penyetelan arus merupakan 1,05 hingga 1,5 kali arus nominal.

$$Pick\ up\ setting = \frac{(OLF \times I_n)}{r_{CT}} \dots\dots\dots(2.19)$$

- Dimana
- OLF = Overload factor
 - I_n = arus nominal (arus maksimal) (A)
 - r_{CT} = rasio trafo arus

(Gers & Holmes, 2005)

Overload factor yang direkomendasikan untuk motor adalah 1,05 sedangkan untuk *line*, transformator dan generator biasanya 1,25 hingga 1,5. Pada sistem distribusi dimana dimungkinkan untuk penambahan beban pada *feeder* dalam keadaan gawat darurat, overload factor dapat diset hingga 2, namun demikian arus nominal harus lebih kecil dari kapasitas trafo arus dan konduktor.

2.2.7.5 Perhitungan *time dial low set*

Perhitungan dari *time dial* akan menentukan kecepatan suatu rele bekerja. Untuk menentukan nilai dari *time dial* masing-masing kurva dapat digunakan persamaan berikut:

$$t = \frac{k\beta}{\left(\frac{I_{sc}}{I_{set}}\right)^{\alpha} - 1} + L \dots\dots\dots(2.20)$$

- Dimana
- k = *Time dial/ time multiple setting*
 - t = waktu trip (s)
 - I_{sc} = arus hubung singkat bus (A)
 - I_{set} = arus pickup lowset primer
 - α = konstanta karakteristik rele
 - β = konstanta karakteristik rele
 - L = konstanta karakteristik rele

Nilai konstanta α , β dan L dapat dilihat pada tabel 2.1 dibawah ini:

Tabel 2.1 Konstanta Karakteristik Rele Arus Lebih Standar ANSI/IEEE dan IEC

| Tipe kurva | Standard | α | β | L |
|--------------------|-----------------|----------------------------|---------------------------|----------|
| Moderately inverse | IEEE | 0,02 | 0,0515 | 0,114 |
| Very inverse | IEEE | 2,0 | 19,61 | 0,491 |
| Extremely inverse | IEEE | 2,0 | 28,2 | 0,1217 |
| Inverse | CO8 | 2,0 | 5,95 | 0,18 |
| Short-time inverse | CO2 | 0,02 | 0,0239 | 0,0169 |
| Strandard inverse | IEC | 0,02 | 0,14 | 0 |
| Very inverse | IEC | 1,0 | 13,5 | 0 |
| Extremely inverse | IEC | 2,0 | 80,0 | 0 |
| Long-time inverse | UK | 1,0 | 120 | 0 |

Sumber: Gers, Juan M. (2004:73)

Dilihat pada tabel tersebut bahwa nilai L dari standard IEC adalah 0, maka persamaan diatas dapat ditulis

$$t = \frac{k\beta}{\left(\frac{I_{sc}}{I_{set}}\right)^\alpha - 1}$$

Sehingga,

$$\frac{1}{k} = \frac{\beta}{\left(\left(\frac{I_{sc}}{I_{set}}\right)^\alpha - 1\right)t}$$

$$k = \frac{\left(\left(\frac{I_{sc}}{I_{set}}\right)^\alpha - 1\right)t}{\beta} \dots\dots\dots(2.21)$$

Pada jaringan yang memiliki lebih dari satu rele pada feeder yang sama maka harus diberikan *grading time* supaya tidak terjadi trip dalam waktu yang sama. Standar IEEE Std 242-2001 menyatakan bahwa nilai *grading time* sebesar 0.2-04 detik. Hal ini dipengaruhi oleh:

1. Kesalahan kerja rele
2. Faktor keamanan
3. Waktu pembukaan PMT hingga hilang bunga api

2.2.7.6 Perhitungan nilai *high set instantaneous*

Rele arus lebih juga dilengkapi dengan setelan arus seketika (*instantaneous*) dimana ini digunakan untuk menanggulangi arus yang besar dengan waktu yang singkat. Hal ini akan mengurangi risiko kerusakan pada peralatan yang dilindungi. Kriteria setting *instantaneous* bervariasi tergantung dari lokasi dan tipe dari elemen yang diproteksi. Tiga grup elemen dapat dibagi menjadi:

1. Jaringan antara gardu induk

Setting *instantaneous* pada jaringan antar gardu induk setidaknya 125 persen dari arus rms simetris untuk gangguan maksimum pada gardu induk selanjutnya. Prosedur dimulai dari gardu induk terjauh lalu dilanjutkan hingga ke sumber.

2. Jaringan distribusi

Penyetelan *instantaneous* pada jaringan distribusi yang disuplai hanya oleh *pole-mounted MV/LV* transformator berbeda dengan kasus pertama karena jaringan ini merupakan akhir dari sistem tegangan menengah. Oleh karena itu, tidak harus dilakukan kondisi koordinasi pada jaringan antar gardu

induk. Berikut merupakan dua nilai yang dapat digunakan untuk mensetting *instantaneous*

- a. 50 persen dari arus hubung singkat maksimum pada titik koneksi CT yang menyuplai ke rele
- b. Antara 6 hingga 10 kali dari rating maksimum rangkaian.

3. Transformator

Penyetelan *instantaneous* rele arus lebih pada sisi primer transformator harus diset antara 125 hingga 150 persen dari nilai arus hubung singkat yang terdapat pada busbar tegangan rendah menunjuk pada sisi tegangan tinggi. Nilai tersebut lebih tinggi dari yang sudah disebutkan sebelumnya untuk mencegah kurangnya koordinasi dengan arus yang lebih tinggi yang bertemu tepat pada arus magnetik ketika transformator dalam keadaan *energize*.

2.2.7.7 Setting waktu *instantaneous*

Rele utama dan rele cadangan tidak diperbolehkan memiliki waktu kerja bersamaan. Oleh karena itu, diperlukan *time delay* yang berbeda pada setting *instantaneous*.

2.2.7.8 Setting Long Time

Trip device pada *circuit breaker* tegangan rendah memiliki karakteristik tersendiri yang berbeda dengan model kurva yang ada pada rele arus lebih digital pada umumnya. Memiliki bentuk kurva yaitu *long time* dan *short time*. Untuk pengaturan *long time* adalah:

$$1,05 \times I_n < I_{set} < 1,4 \times I_n \dots \dots \dots (2.22)$$

2.2.7.9 Setting Short Time

Kurva jenis *short time* akan memiliki kurva yang lebih curam daripada long time, sehingga perintah untuk trip ke CB akan semakin cepat. Berikut persamaan setting nilai *short time*.

$$1,6 \times I_n < I_{set} < 0,5 \times I_{sc \max} \dots \dots \dots (2.23)$$