

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator¹

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energy listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi-elektomagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai, dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh.



Gambar 2.1 Transformator

¹Zuhal. 1995. Dasar Teknik Tenaga Listrik Dan Elektronika Daya, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta. Hal 43

Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi:

- transformator daya;
- transformator distribusi;
- frekuensi pengukuran: yang terdiri dari atas transformator arus dan transformator tegangan.

Kerja transformator yang berdasarkan induksi-elektromagnet, menghendaki adanya gandengan magnet antara rangkaian primer dan sekunder. Gandengan magnet ini berupa inti besi tempat melakukan fluks bersama.

2.2 Dasar-Dasar Sistem Proteksi²

Secara umum rele proteksi harus bekerja sesuai dengan yang diharapkan dengan waktu yang cepat sehingga tidak akan mengakibatkan kerusakan, ataupun kalau suatu peralatan terjadi kerusakan secara dini telah diketahui, atau walaupun terjadi gangguan tidak menimbulkan pemadaman bagi konsumen. Hal ini dapat dijabarkan sebagai fungsi dan persyaratan rele pengaman seperti penjelasan berikut.

Rele proteksi adalah susunan peralatan yang direncanakan untuk dapat merasakan atau mengukur adanya gangguan atau mulai merasakan adanya ketidaknormalan pada peralatan atau bagian sistem tenaga listrik dan segera secara otomatis member perintah untuk membuka pemutus tenaga untuk memisahkan peralatan atau bagian dari sistem yang terganggu dan member isyarat berupa lampu dan bel. Rele proteksi dapat merasakan atau melihat adanya gangguan pada peralatan yang diamankan dengan mengukur atau membandingkan besaran-besaran yang diterimanya, misalnya arus, tegangan, daya, sudut fase, frekuensi, impedansi dan sebagainya, dengan besaran yang telah ditentukan, kemudian mengambil keputusan untuk seketika ataupun dengan perlambatan waktu membuka pemutus tenaga. Pemutus tenaga umumnya dipasang pada generator, transformator daya, saluran transmisi, saluran distribusi dan sebagainya supaya

² Samaulah, Hazairin. 2004. Dasar-Dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik. Unsri, Palembang. Hal : 5

masing-masing bagian sistem dapat dipisahkan sedemikian rupa sehingga sistem lainnya tetap dapat beroperasi secara manual.

Tugas rele proteksi juga berfungsi menunjukkan lokasi dan macam gangguannya. Dengan data tersebut memudahkan analisa dari gangguannya. Dalam beberapa hal rele hanya member tanda adanya gangguan atau kerusakan, jika dipandang gangguan atau kerusakan tersebut tidak segera membahayakan.

Dari uraian diatas maka rele proteksi pada sistem tenaga listrik berfungsi untuk :

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

Untuk melaksanakan fungsi di atas maka rele pengaman harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

- Dapat diandalkan (*reliable*)
- Selektif
- Waktu kerja rele cepat
- Peka (sensitif)
- Ekonomis dan sederhana

2.3 Persyaratan Sistem Proteksi³

Tujuan utama sistem proteksi adalah :

- Mendeteksi kondisi abnormal (gangguan)

³Affandi, Irfan. 2009. Analisa Setting Relai Arus Lebih dan Relai Gangguan Tanah Pada Penyulang Sadewa di GI Cawang. UI, Depok. Hal : 16

- Mengisolir peralatan yang terganggu dari sistem.

Persyaratan terpenting dari sistem proteksi yaitu :

2.3.1 Kepekaan (*sensitivity*)

Pada prinsipnya relay harus cukup peka sehingga dapat mendeteksi gangguan di kawasan pengamanannya, termasuk kawasan pengaman cadangan-jauhnya, meskipun dalam kondisi yang memberikan deviasi yang minimum.

Untuk relay arus-lebih hubung-singkat yang bertugas pula sebagai pengaman cadangan jauh bagi seksi berikutnya, relay itu harus dapat mendeteksi arus gangguan hubung singkat dua fasa yang terjadi diujung akhir seksi berikutnya dalam kondisi pembangkitan minimum.

Sebagai pengaman peralatan seperti motor, generator atau trafo, relay yang peka dapat mendeteksi gangguan pada tingkatan yang masih dini sehingga dapat membatasi kerusakan. Bagi peralatan seperti tsb diatas hal ini sangat penting karena jika gangguan itu sampai merusak besi laminasi stator atau inti trafo, maka perbaikannya akan sangat sukar dan mahal.

Sebagai pengaman gangguan tanah pada SUTM, relay yang kurang pekamenyebabkan banyak gangguan tanah, dalam bentuk sentuhan denganpohon yang tertiuip angin, yang tidak bisa terdeteksi. Akibatnya, busurapinya berlangsung lama dan dapat menyambar ke fasa lain, maka relayhubung-singkat yang akan bekerja. Gangguan sedemikian bisa terjadiberulang kali di tempat yang sama yang dapat mengakibatkan kawat cepatputus. Sebaliknya, jika terlalu peka, relay akan terlalu sering trip untukgangguan yang sangat kecil yang mungkin bisa hilang sendiri ataorisikonya dapat diabaikan atau dapat diterima.

2.3.2 Keandalan (*Reliability*)

Ada 3 aspek keandalan:

2.3.2.1 Dependability

Yaitu tingkat kepastian bekerjanya (Keandalan kemampuan bekerjanya). Pada prinsipnya pengaman harus dapat diandalkan bekerjanya (dapat mendeteksi dan melepaskan bagian yang terganggu), tidak boleh gagal bekerja. Dengan kata lain perkataan dependability-nya harus tinggi.

2.3.2.2 Security

Yaitu tingkat kepastian untuk tidak salah kerja (keandalan untuk tidak salah kerja). Salah kerja adalah kerja yang semestinya tidak harus kerja, misalnya karena lokasi gangguan di luar kawasan pengamanannya atau sama sekali tidak ada gangguan atau kerja yang terlalu cepat atau terlambat. Salah kerja mengakibatkan pemadaman yang sebenarnya tidak perlu terjadi. Jadi pada prinsipnya pengaman tidak boleh salah kerja, dengan lain perkataan security-nya harus tinggi.

2.3.2.3 Availability

Yaitu perbandingan antara waktu di mana pengaman dalam keadaan berfungsi/siap kerja dan waktu total dalam operasinya. Dengan relay elektromekanis, jika rusak/tak berfungsi, tak diketahui segera. Baru diketahui dan diperbaiki atau diganti. Disamping itu, sistem proteksi yang baik juga dilengkapi dengan kemampuan mendeteksi terputusnya *sirkuit trip*, sirkuit sekunder arus, dan sirkuit sekunder tegangan serta hilangnya tegangan serta hilangnya tegangan searah (*DC voltage*), dan memberikan alarm sehingga bisa diperbaiki, sebelum kegagalan proteksi dalam gangguan yang sesungguhnya, benar-benar terjadi. Jadi *availability* dan keandalannya tinggi.

2.3.2.4 Selektifitas (*Selectivity*)

Pengaman harus dapat memisahkan bagian sistem yang terganggu sekecil mungkin yaitu hanya seksi atau peralatan yang terganggu saja yang termasuk dalam kawasan pengamanan utamanya. Pengamanan sedemikian disebut pengaman yang selektif.

Jadi relay harus dapat membedakan apakah:

- Gangguan terletak di kawasan pengamanan utamanya dimana ia harus bekerja cepat.
- Gangguan terletak di seksi berikutnya dimana ia harus bekerja dengan waktu tunda (sebagai pengamanan cadangan) atau menahan diri untuk tidak trip.
- Gangguannya diluar daerah pengamanannya, atau sama sekali tidak ada gangguan, dimana ia tidak harus bekerja sama sekali.

Untuk itu relay-relay, yang didalam sistem terletak secara seri, di koordinir dengan mengatur peningkatan waktu (time grading) atau peningkatan setting arus (*current grading*), atau gabungan dari keduanya.

Untuk itulah rele dibuat dengan bermacam-macam jenis dan karakteristiknya. Dengan pemilihan jenis dan karakteristik rele yang tepat, spesifikasi trafo arus yang benar, serta penentuan setting rele yang terkoordinir dengan baik, selektifitas yang baik dapat diperoleh.

Pengaman utama yang memerlukan kepekaan dan kecepatan yang tinggi, seperti pengaman transformator tenaga, generator, dan busbar pada sistem tegangan ekstra tinggi (TET) dibuat berdasarkan prinsip kerja yang mempunyai kawasan pengamanan yang batasnya sangat jelas dan pasti, dan tidak sensitif terhadap gangguan diluar kawasannya, sehingga sangat selektif, tapi tidak bisa memberikan pengamanan cadangan bagi seksi berikutnya. Contohnya pengaman differensial.

2.3.2.5 Kecepatan (*speed*)

Untuk memperkecil kerugian/kerusakan akibat gangguan, maka bagian yang terganggu harus dipisahkan secepat mungkin dari bagian sistem lainnya. Waktu total pembebasan sistem dari gangguan adalah waktu sejak munculnya gangguan, sampai bagian yang terganggu benar-benar terpisah dari bagian sistem lainnya.

Kecepatan itu penting untuk:

- Menghindari kerusakan secara termis pada peralatan yang dilalui arus gangguan serta membatasi kerusakan pada alat yang terganggu.

- Mempertahankan kestabilan sistem
- Membatasi ionisasi (busur api) pada gangguan disaluran udara yang akan berarti memperbesar kemungkinan berhasilnya penutupan balikPMT (*reclosing*) dan mempersingkat dead timenya (interval waktuantara buka dan tutup). Untuk menciptakan selektifitas yang baik, mungkin saja suatu pengaman terpaksa diberi waktu tunda (td) namun waktu tunda tersebut harus sesingkat mungkin (seperlunya saja) dengan memperhitungkan risikonya.

2.4 Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*)⁴

Adalah suatu rangkaian peralatan rele pengaman yang memberikan respon terhadap kenaikan arus yang melebihi harga arus yang telah ditentukan pada rangkaian yang diamankan, sehingga bila terjadi gangguan maka pengaman proteksi pada relay arus lebih akan bekerja berdasarkan karakteristik operasinya.

Keuntungan dari penggunaan proteksi rele arus lebih ini antara lain :

- Sederhana dan murah.
- Mudah penyetelannya.
- Merupakan rele pengaman utama dan cadangan.
- Mengamankan gangguan hubung singkat antar fasa maupun satu fasa ke tanah dan dalam beberapa hal digunakan untuk proteksi beban lebih (*overload*).
- Pengaman utama pada jaringan distribusi dan subtransmisi radial.
- Pengaman cadangan untuk generator, trafo, dan saluran transmisi.

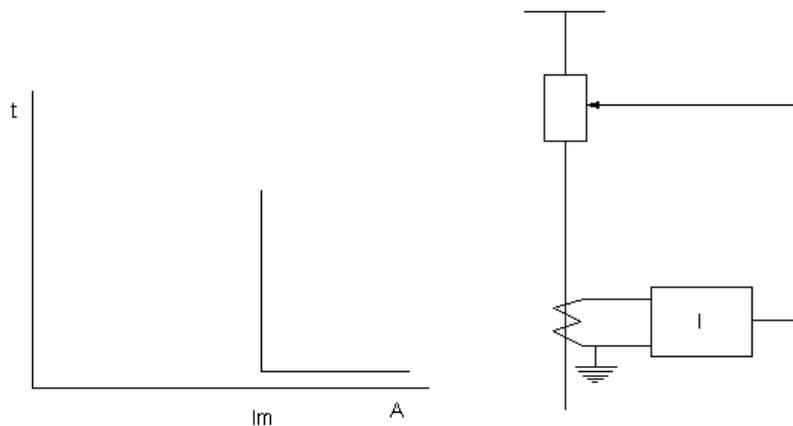
2.4.1 Karakteristik Waktu Kerja Rele

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

⁴Samaulah, Hazairin. Op. Cit, Hal : 53

2.4.1.1 Rele Arus Lebih Sesaat (*Moment*)

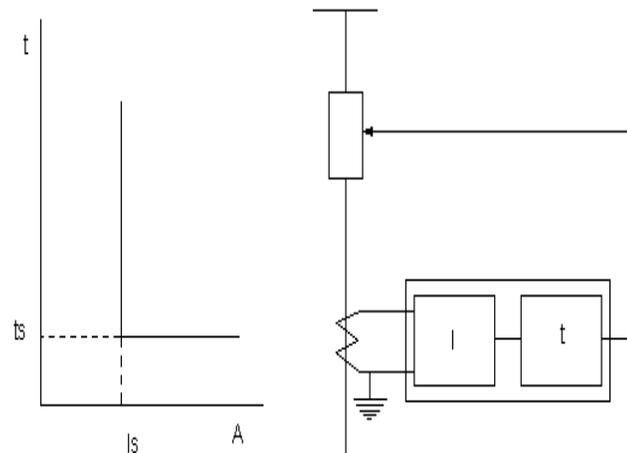
Rele arus lebih dengan karakteristik waktu kerja seketika (*moment*) ialah jika jangka waktu rele mulai saat rele arusnya pick up sampai selesainya kerja rele sangat singkat (20 – 100 ms), yaitu tanpa penundaan waktu. Rele ini umumnya dikombinasikan dengan rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu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



Gambar 2.2 Karakteristik Rele Arus Lebih Sesaat

2.4.1.2 Rele Arus Lebih dengan Karakteristik Waktu Tertentu (*definite time*)

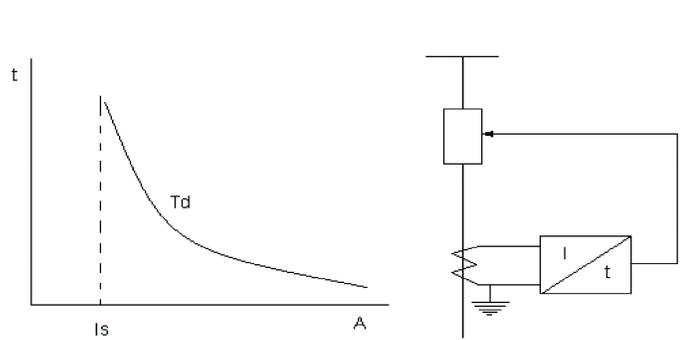
Rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu ialah jika jangka waktu mulai rele arus pick up sampai selesainya kerja rele diperpanjang dengan nilai tertentu dan tidak tergantung dari besarnya arus yang menggerakkan.



Gambar 2.3 Karakteristik Rele Arus Lebih *Definite Time*

2.4.1.3 Rele Arus Lebih dengan Waktu Terbalik (*inverse time overcurrent relay*)

Relay dengan karakteristik waktu terbalik adalah jika jangka waktu mulai rele arus pick up sampai selesainya kerja rele diperpanjang dengan besarnya nilai yang berbanding terbalik dengan arus yang menggerakkan.



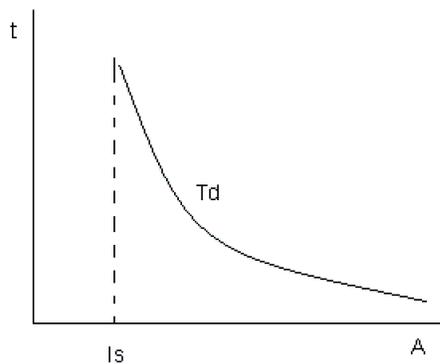
Gambar 2.4 Karakteristik Rele Arus Lebih *Inverse Time*

Bentuk perbandingan terbalik dari waktu arus ini sangat bermacam-macam tetapi dapat digolongkan menjadi :

- a. Berbanding terbalik (*inverse*)
- b. Sangat berbanding terbalik (*very inverse*)
- c. Sangat berbanding terbalik sekali (*extremely inverse*)

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

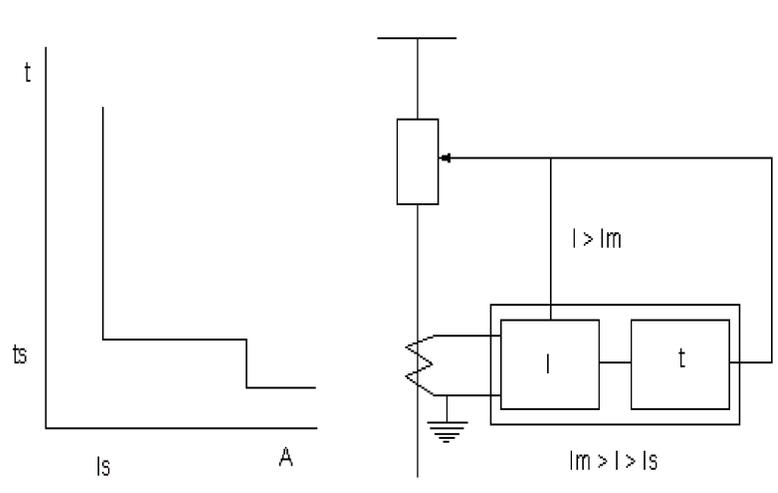
Relay arus lebih dengan karakteristik IDMT (*Inverse Definite Minimum Time*) mempunyai karakteristik kombinasi antara *relay* arus lebih waktu terbalik dan waktu tertentu. Didaerah awal seperti *relay* arus lebih waktu terbalik dan kemudian menjadi waktu tertentu.



Gambar 2.5 Karakteristik Rele Arus Lebih IDMT

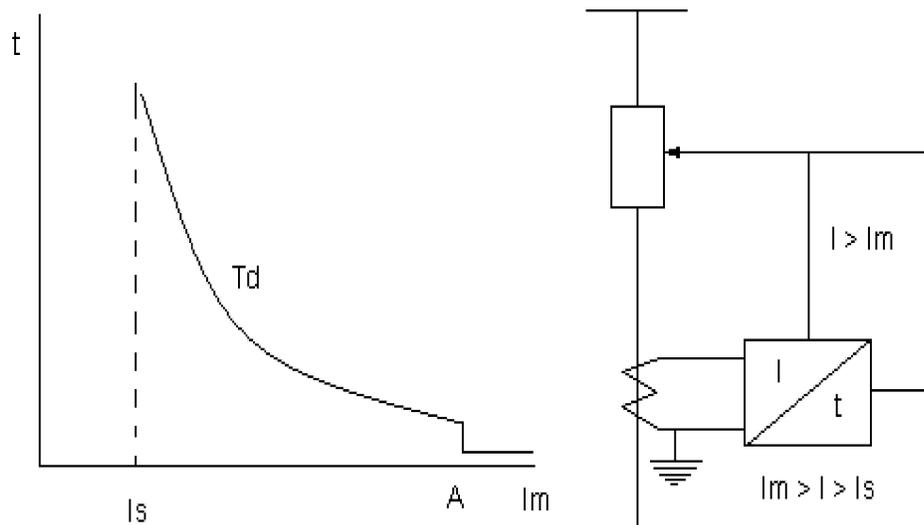
2.4.1.5 Kombinasi Relay Arus Lebih Waktu tertentu, Terbalik dan IDMT Dengan Waktu Seketika

Relay arus lebih waktu seketika umumnya tidak berdiri sendiri tetapi digabungkan dengan *relay* arus lebih waktu tertentu atau waktu terbalik atau IDMT. Dalam hal ini bila arus yang melewati relay lebih dari arus seting I_s , tetapi lebih kecil dari arus seting seketika I_m , waktu kerjanya mengikuti karakteristik waktu tertentu, terbalik atau IDMT.

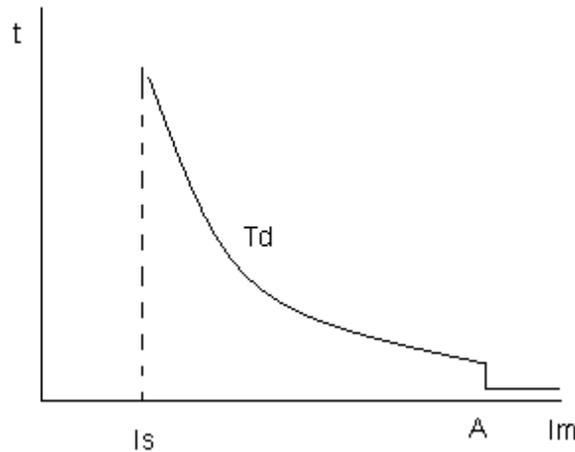


Gambar 2.6 Kombinasi Karakteristik Waktu Tertentu dan Seketika

Sedangkan bila arus yang melewati relai lebih besar dari arus seting seketika, relai akan bekerja seketika, masing – masing.



Gambar 2.7 Kombinasi Karakteristik Waktu Terbalik dan Seketika



Gambar 2.8 Kombinasi Karakteristik IDMT dan Seketika

2.4.2 Setting Over Current Relay⁵

- Arus setting OCR

Penyetelan relay OCR pada sisi primer dan sisi sekunder transformator tenaga terlebih dahulu harus dihitung arus nominal transformator tenaga. Arus setting untuk relay OCR baik pada sisi primer maupun pada sisi sekunder transformator tenaga adalah:

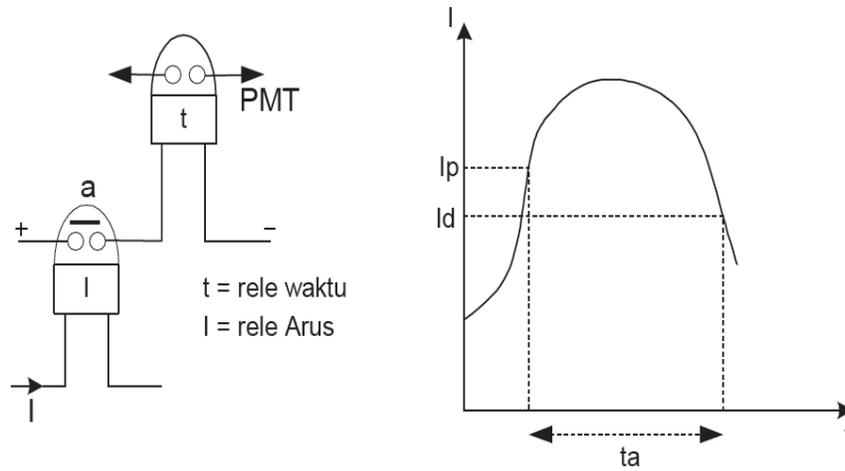
$$I_{set}(\text{prim}) = 1,05 \times I_{\text{nominal trafo}} \dots \dots \dots (2.1)$$

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

$$I_{set}(\text{sek}) = I_{set}(\text{prim}) \times \frac{1}{\dots} \dots \dots (2.2)$$

Arus kerja atau arus pick up (I_p) adalah arus yang memerintahkan rele arus untuk bekerja dan menutup kontak sehingga rele waktu bekerja. Sedangkan arus kembali atau drop off (I_d) adalah nilai arus dimana rele arus berhenti bekerja dan kontak kembali membuka, sehingga rele waktu berhenti bekerja.

⁵Affandi, Irfan. Op. Cit., Hal : 33



Gambar 2.9 Arus Kerja dan Arus kembali (drop off)

Pada dasarnya penyetelan pengaman arus lebih dilakukan penyetelan atas besaran arus dan waktu. Batasan dalam penyetelan arus yang harus diperhatikan adalah :

- Batas penyetelan minimum arus kerja yang tidak boleh bekerja pada saat arus baban maksimum.⁶

$$I_s = \frac{\dots}{\dots} \dots \dots \dots (2.3)$$

- Batas penyetelan maksimum arus kerja yang harus bekerja pada saat arus gangguan minimum.

$$I_s \leq I_{hs} \dots$$

- Secara umum Batasan dalam penyetelan arus dapat dituliskan sebagai berikut :

$$I_{max} < I_s < I_{hs} \dots$$

- Arus maksimum yang diinginkan untuk alat yang diinginkan pada peralatan umumnya di ambil arus nominalnya

$$I_{max} = \sqrt{3} \dots \dots \dots (2.4)$$

⁶Samaulah, Hazairin. Op. Cit., Hal : 59

Cara arus penyetelan :

$$I_s = \frac{1}{K_{FK} \cdot K_d} \cdot I_{max} \quad \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana :

I_s = Nilai setting arus

K_{FK} = Faktor keamanan (safety factor) sebesar 1,1 – 1,2

K_d = Faktor arus kembali

I_{max} = Arus beban maksimum yang diizinkan untuk alat yang diamankan.

$I_{hs \ min} = I_{hs} (2 \cdot)_{min}$ pada pembangkitan minimum

Keterangan :

- Untuk arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu (*definite time*) nilai K_{FK} sebesar 1,1 – 1,2 dan K_d sebesar 0,8.
- Untuk arus lebih dengan karakteristik waktu terbalik (*inverse time*) nilai K_{FK} sebesar 1,1 – 1,2 dan K_d sebesar 0,9

2.4.3 Prinsip Dasar Perhitungan Penyetelan Waktu⁷

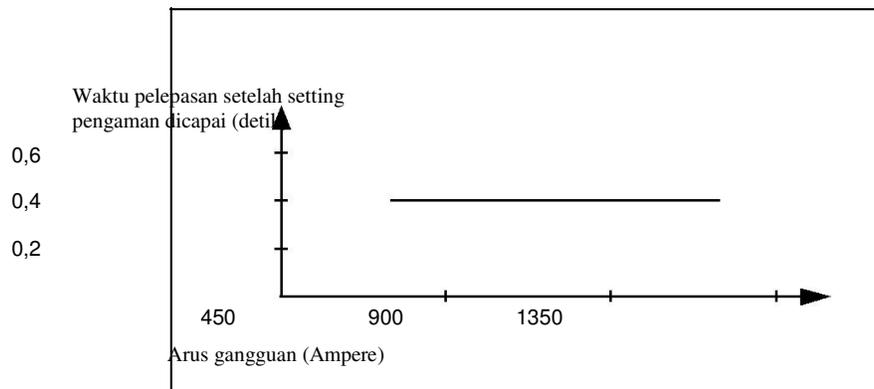
Untuk mendapatkan pengamanan yang selektif maka penyetelan waktunya dibuat bertingkat agar bila ada gangguan arus lebih di beberapa seksi rele arus akan bekerja.

Cara penyetelan waktu :

- Rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu (*definite time*)

Untuk rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu, waktu kerjanya tidak dipengaruhi oleh besarnya arus. Biasanya, setting waktu kerja pada rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu adalah sebesar 0,2 - 0,4 detik.

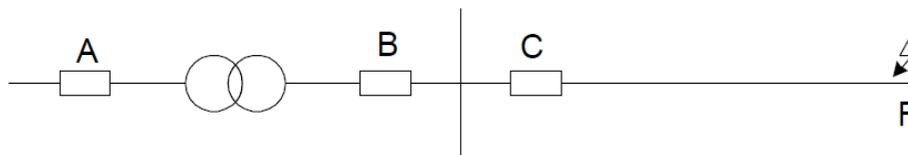
⁷Affandi, Irfan. 2009. Analisa Setting Relai Arus Lebih dan Relai Gangguan Tanah Pada Penyulang Sadewa di GI Cawang. UI, Depok. Hal : 18



Gambar 2.10 Karakteristik rele dengan waktu tetap

Dari gambar 2.10 di atas dapat diketahui kelambatan waktu rele selalu menunjukkan waktu yang tetap. Misalnya untuk kelebihan beban sebesar 450 Ampere, pelepasan beban baru dilaksanakan 0,4 detik kemudian.

b. Rele arus lebih dengan karakteristik waktu terbalik (*inverse time*)



Gambar 2.11 Gangguan pada sistem tenaga

Akibat gangguan di F, maka :

$$I_f \text{ di } F > I_f \text{ di } A > I_f \text{ di } B > I_f \text{ di } C$$

Sehingga rele arus di A, B, dan C akan pick up, dimana $t_A > t_B > t_C$.

Penyetelan waktu untuk karakteristik waktu terbalik dihitung berdasarkan besarnya arus gangguan dimana waktu (t) pada sisi penyulang ditentukan sebesar 0,2 - 0,4 detik. Dan untuk mendapatkan pengamanan yang baik, yang terpenting

adalah menentukan beda waktu (Δ) antara dua tingkat pengaman agar pengamanan selektif tetapi waktu untuk keseluruhannya tetap singkat.

Jadi, waktu penyetelan arusnya dapat ditentukan sebagai berikut :

$$t_C = t_1$$

$$t_B = t_1 + \Delta t$$

$$t_A = t_B + \Delta t$$

Hal – hal yang mempengaruhi Δt adalah :

- Kesalahan rele waktu di C dan B adalah 0,2 detik
- Waktu pembukaan PMT sampai hilangnya bunga api 0,06 – 0,14 detik
- Faktor keamanan sebesar 0,05 detik
- Kelambatan rele arus lebih pembantu dan arus over travel 0,005 detik.

Sehingga nilai Δt ditentukan sebesar 0,4 – 0,5 detik dan untuk rele dengan ketelitian yang lebih nilai Δt ditentukan sebesar 0,2 – 0,4 detik.

Setelan waktu kerja standar inverse didapat dengan menggunakan kurva waktu dan arus. Secara matematis dapat ditentukan dengan rumus :

$$= \frac{\left(\frac{I_{fault}}{I_{set}} \right)^{\alpha} - 1}{\beta} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana :

t_{ms} = factor pengali terhadap waktu

I_{fault} = Arus gangguan (Ampere)

I_{set} = Arus setting (Ampere)

t_{set} = Waktu setting (detik)

α dan β = konstanta

2.4.4 Penyetelan Pada Rele SEPAM 1000

Untuk menyesuaikan perhitungan penyetelan rele arus lebih pada Rele SEPAM 1000 , maka persamaan untuk menyetel Iset adalah:

$$= \frac{1}{\left(\left(\frac{I_{\text{fault}}}{I_{\text{set}}} \right)^{\beta} - 1 \right)^{\alpha}} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana :

- t_{set} = waktu setting
- β = konstanta Inverse (0.14)
- I_{fault} = Arus Gangguan (Ampere)
- I_{set} = Arus Setting (Ampere)
- α = 0.02

Semua parameter yang siap dihitung kecuali Iset setting, dimana nilai arus akan mengaktifkan fungsi waktu arus lebih pada Rele SEPAM 1000, dan akan menggunakan rumus:

$$= \frac{1}{0,02 \sqrt{\left(\frac{I}{I_s} \right)^2 + 1}} \dots \dots \dots (2.8)$$

Dimana :

- I_s = Arus penyetelan
- I = Arus
- T = TMS (Time Multiple Setting)
- K = 0,14
- t = Waktu setting

2.4.5 Sistem Satuan Per Unit⁸

Satuan perunit untuk setiap harga didefinisikan sebagai nilai sebenarnya

⁸Panjaitan, Bonar. Praktik-praktik Proteksi Sistem Tenaga Listrik, Andi, Yogyakarta, 2012. Hal : 30

yang ada dari besaran tersebut dibagi dengan nilai dasar (nilai base) yang dipilih. Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\text{Sistem per unit (pu)} = \frac{\text{h}}{\text{() h}} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana :

$$\text{Base Arus (I}_{\text{base}}) = \sqrt{3} \dots\dots\dots(2.10)$$

$$\text{Base Impedansi (Z}_{\text{base}}) = \frac{\text{()}^2}{\dots\dots\dots(2.11)}$$

2.5 Gangguan Hubung Singkat⁹

Gangguan hubungan singkat yang mungkin terjadi dalam jaringan (Sistem kelistrikan) yaitu:

1. Gangguan hubung singkat tiga fasa
2. Gangguan hubung singkat dua fasa
3. Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah

Semua gangguan hubungan singkat diatas, arus gangguannya dihitung dengan menggunakan rumus dasar yaitu :

$$= - \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana

I = Arus yang mengalir pada hambatan Z (A)

V = Tegangan sumber (V)

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

Yang membedakan antara gangguan hubungan singkat tiga fasa, dua fasa dan satu fasa ke tanah adalah impedansi yang terbentuk sesuai dengan macam gangguan itu sendiri, dan tegangan yang memasok arus ke titik gangguan.

⁹Affandi, Irfan. Op. Cit., Hal : 19

Impedansi yang terbentuk dapat ditunjukkan seperti berikut ini :

Z untuk gangguan tiga fasa, $Z = Z_1$

Z untuk gangguan dua fasa, $Z = Z_1 + Z_2$

Z untuk gangguan satu fasa, $Z = Z_1 + Z_2 + Z_0$ (2.13)

Dimana:

Z_1 = Impedansi urutan positif (ohm)

Z_2 = Impedansi urutan negatif (ohm)

Z_0 = Impedansi urutan nol (ohm).

2.5.1 Menghitung Impedansi¹⁰

Dalam menghitung impedansi dikenal tiga macam impedansi urutan yaitu :

- Impedansi urutan positif (Z_1), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan positif.
- Impedansi urutan negatif (Z_2), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan negatif.
- Impedansi urutan nol (Z_0), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh urutan nol.

Sebelum melakukan perhitungan arus hubung singkat, maka kita harus memulaibelum melakukan perhitungan arus hubung singkat, maka kita harus memulai perhitungan pada rel daya tegangan primer di gardu induk untuk berbagai jenis gangguan, kemudian menghitung pada titik – titik lainnya yang letaknya semakin jauh dari gardu induk tersebut. Untuk itu diperlukan pengetahuan mengenai dasar impedansi urutan rel daya tegangan tinggi atau bisa juga disebut sebagai impedansi sumber, impedansi transformator, dan impedansi penyulang.

Dimana :

X_S = Impedansi sumber (ohm)

X_t = Impedansi Transformator (ohm)

2.5.1.1 Impedansi sumber¹¹

¹⁰Ibid., Hal : 21

Untuk menghitung impedansi sumber di sisi bus 20 kV, maka harus dihitung dulu impedansi sumber di bus 150 kV. Impedansi sumber di bus 150 kV diperoleh dengan rumus:

$$X_{sc} = \frac{V^2}{S} \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana :

X_{sc} = Impedansi sumber (ohm).

V^2 = Tegangan sisi primer trafo tenaga (kV).

MVA = Data hubung singkat di bus 150 kV(MVA).

Arus gangguan hubung singkat di sisi 20 kV diperoleh dengan cara mengkonversikan dulu impedansi sumber di bus 150 kV ke sisi 20 kV. Untuk mengkonversikan Impedansi yang terletak di sisi 150 kV ke sisi 20 kV, dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$X_{sc}(\text{sisi } 20 \text{ kV}) = \frac{20^2}{150^2} \cdot X_s(\text{sisi } 150 \text{ kV}) \dots\dots\dots (2.15)$$

2.5.1.2 Impedansi Transformator¹²

Pada perhitungan impedansi suatu transformator yang diambil adalah harga reaktansinya, sedangkan tahananannya diabaikan karena harganya kecil. Untuk mencari nilai reaktansi trafo dalam Ohm dihitung dengan cara sebagai berikut

Langkah pertama mencari nilai ohm pada 100% untuk trafo pada 20 kV, yaitu dengan menggunakan rumus :

$$Z_t(\Omega) = \frac{(\%Z)^2}{100} \cdot \left(\frac{S}{V^2} \right) \dots\dots\dots(2.16)$$

¹¹Panjaitan, Bonar. Op. Cit., Hal : 27

¹²Aris Munandar, 1993, A. Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik Jilid II, PT. Pradnya Paramita, Jakarta. Hal : 71

Dimana :

$Z_t (\Omega)$ = Impedansi trafo tenaga (Ohm)

kV^2 = Tegangan sisi sekunder trafo tenaga (kV)

MVA = Tapasitas daya trafo tenaga (MVA)

Lalu tahap selanjutnya yaitu mencari nilai reaktansi tenaganya :

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

$$X_t = \% \text{ yang diketahui } \times X_t \text{ pada } 100\%$$

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

1. Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan ΔY dimana kapasitas belitan delta sama besar dengan kapasitas belitan Y, maka $X_{t0} = X_{t1}$
2. Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan Y_{yd} dimana kapasitas belitan delta (d) biasanya adalah sepertiga dari kapasitas belitan Y (belitan yang dipakai untuk menyalurkan daya, sedangkan belitan delta tetap ada di dalam tetapi tidak dikeluarkan kecuali satu terminal delta untuk ditanahkan), maka nilai $X_{t0} = 3 \times X_{t1}$
3. Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan YY dan tidak mempunyai belitan delta di dalamnya, maka untuk menghitung besarnya X_{t0} berkisar antara $9 \text{ s/d } 14 \times X_{t1}$

2.5.1.3 Impedansi penyulang

Untuk perhitungan impedansi penyulang, perhitungannya tergantung dari besarnya impedansi per km dari penyulang yang akan dihitung, dimana besar nilainya tergantung pada jenis penghantarnya, yaitu dari bahan apa penghantar tersebut dibuat dan juga tergantung dari besar kecilnya penampang dan panjang penghantarnya.

Disamping itu penghantar juga dipengaruhi perubahan temperatur dan konfigurasi dari penyulang juga sangat mempengaruhi besarnya impedansi penyulang tersebut. Contoh besarnya nilai impedansi suatu penyulang : $Z = (R + jX)$ Sehingga untuk impedansi penyulang dapat ditentukan dengan menggunakan rumus¹³ :

- Urutan positif dan urutan negatif:

$$Z_1 = Z_2 = \% \text{ panjang} \times \text{panjang penyulang (km)} \times Z_1 / Z_2 (\text{ohm}) \dots (2.17)$$

Dimana :

Z_1 = Impedansi urutan positif (ohm)

Z_2 = Impedansi urutan negatif (ohm)

- Urutan nol

$$Z_0 = \% \text{ panjang} \times \text{panjang penyulang (km)} \times Z_0 (\text{ohm}) \dots (2.18)$$

Dimana :

Z_0 = Impedansi urutan nol (ohm)

2.5.1.4 Impedansi Ekuivalen Jaringan

Perhitungan yang akan dilakukan di sini adalah perhitungan besarnya nilai impedansi ekuivalen positif, negatif dan nol dari titik gangguan sampai ke sumber. Karena dari sejak sumber ke titik gangguan impedansi yang terbentuk adalah tersambung seri maka perhitungan Z_{1eq} dan Z_{2eq} dapat langsung dengan cara menjumlahkan impedansi tersebut, sedangkan untuk perhitungan Z_{0eq} dimulai dari titik gangguan sampai ke trafo tenaga yang netralnya ditanahkan. Akan tetapi untuk menghitung impedansi Z_{0eq} ini, harus diketahui dulu hubungan belitan trafonya.

Sehingga untuk impedansi ekuivalen jaringan dapat dihitung dengan menggunakan rumus¹⁴:

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

¹³ Affandi, Irfan. 2009. Analisa Setting Relai Arus Lebih dan Relai Gangguan Tanah Pada Penyulang Sadewa di GI Cawang. UI, Depok. Hal : 23

¹⁴ Ibid. Hal : 24

$$Z_{1eq} = Z_{2eq} = Z_s + Z_{t1} + Z_{i1}(\text{penyulang}) \dots \dots \dots (2.19)$$

Dimana :

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

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

Z_s = Impedansi sumber sisi 20 kV (ohm)

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

Z_{i1} = Impedansi urutan positif dan negatif (ohm)

- Urutan nol $Z_{0eq} = Z_{t0} + 3R_N + Z_{penyulang} \dots \dots \dots (2.20)$

Dimana :

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

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

R_N = Tahanan tanah trafo tenaga (ohm).

Z_0 = Impedansi urutan nol (ohm).

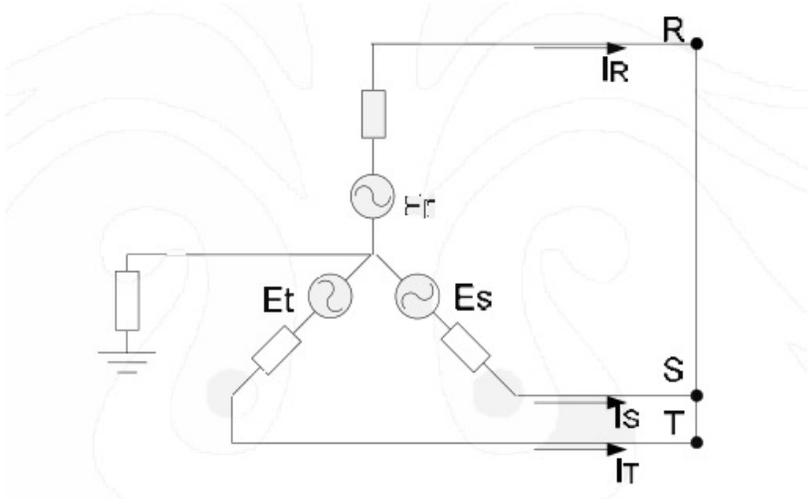
2.5.1.5 Menghitung Arus Gangguan Hubung Singkat

Perhitungan arus gangguan hubung singkat dapat dihitung dengan menggunakan rumus dasar, impedansi ekivalen mana yang dimasukkan ke dalam rumus dasar tersebut adalah jenis gangguan hubung singkat tiga fasa, dua fasa, atau satu fasa ke tanah. Sehingga formula yang digunakan untuk perhitungan arus hubung singkat tiga fasa, dua fasa, dan satu fasa ketanah berbeda¹⁵.

a) Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Rangkaian gangguan tiga fasa pada suatu jaringan dengan hubungan transformator tenaga YY dengan netral ditanahkan melalui suatu tahanan.

¹⁵ Ibid. Hal :25



Gambar 2.12 Gangguan hubung singkat 3 fasa

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

$$I_{3f} = \frac{E_{f}}{Z_{1eq}} \dots\dots\dots(2.21)$$

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

$$I_{3f} = \frac{E_{f}}{Z_{1eq}} \dots\dots\dots(2.22)$$

Dimana :

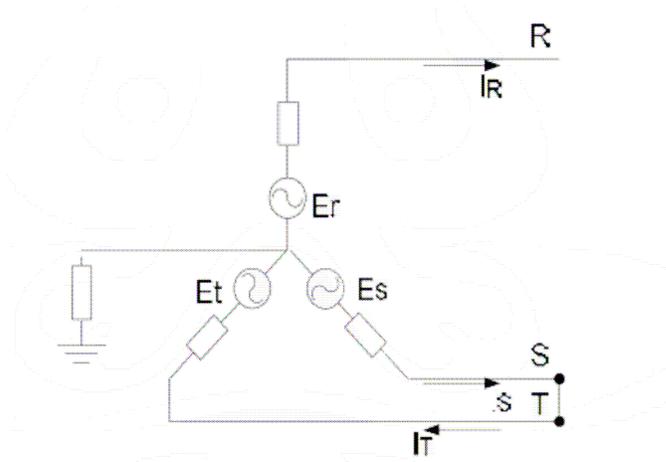
I_{3f} = Arus gangguan hubung singkat tiga fasa (A)

V_{ph} = Tegangan fasa - netral sistem 20kV = $\frac{20000}{\sqrt{3}}$

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

b) Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa

Gangguan hubung singkat 2 fasa pada saluran tenaga dengan hubungan transformator YY dengan netral ditanahkan melalui RNGR., yang ditunjukkan pada gambar 2.14



Gambar 2.13 Gangguan hubung singkat 2 fasa

Persamaan pada kondisi gangguan hubung singkat 2 fasa ini adalah :

$$V_S = V_T$$

$$I_R = 0$$

$$I_S = - I_T$$

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

$$= - \dots\dots\dots(2.23)$$

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

$$z = \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \dots\dots\dots(2.24)$$

Karena $z_1 = z_2$, maka :

$$z = \frac{z_1 - z_2}{2 z_1} \dots\dots\dots(2.26)$$

Dimana :

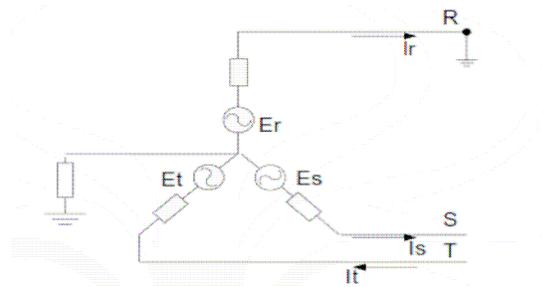
$I_{2 \text{ fasa}}$ = Arus gangguan hubung singkat dua fasa (A)

$$V_{\text{ph-ph}} = \text{Tegangan fasa - fasa sistem } 20 \text{ kV} = \frac{20000}{\sqrt{3}}$$

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

c) Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah

Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah pada saluran tenaga dengan hubungan transformator YY dengan netral ditanahkan melalui RNGR, ditunjukkan pada gambar 2.15



Gambar 2.14 Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah

Persamaan pada kondisi gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah ini adalah:

$$V_T = 0$$

$$I_S = 0$$

$$I_T = 0$$

Rumus dasar yang digunakan untuk menghitung besarnya arus gangguan hubung singkat 1 fasa:

$$I_1 = \dots\dots\dots(2.27)$$

Sehingga arus hubung singkat 1 fasa ke tanah dapat dihitung dengan rumus:

$$I_1 = \frac{3 E}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \dots\dots\dots(2.28)$$

Karena $Z_1 = Z_2$, maka :

$$I_1 = \frac{3 E}{2 Z_1 + Z_0} \dots\dots\dots(2.29)$$

Dimana :

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

V_{ph} = Tegangan fasa - netral sistem 20 kV = $\frac{20000}{\sqrt{3}}$

$Z_{1\text{eq}}$ = Impedansi urutan positif (ohm)

$Z_{0\text{eq}}$ = Impedansi urutan nol (ohm)