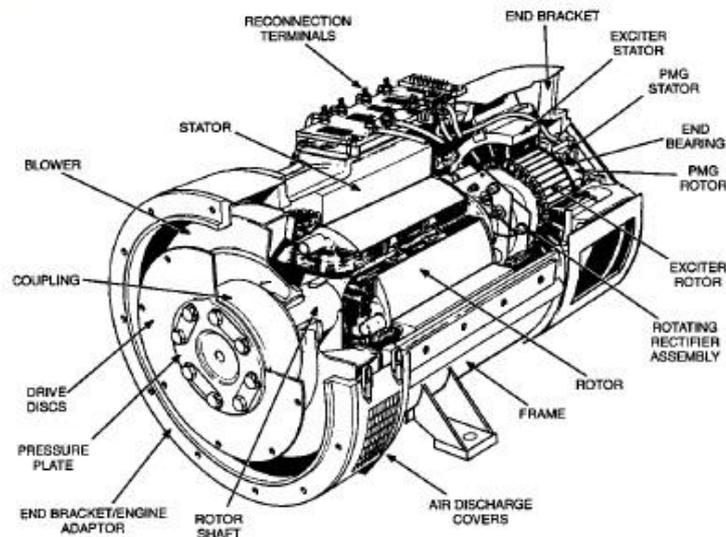


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Generator^[3]

Generator adalah sebuah mesin yang menghasilkan tenaga listrik dengan masukan tenaga mekanik. Prinsip kerja generator sinkron berdasarkan induksi elektromagnetik, setelah rotor diputar oleh penggerak mula (*prime mover*) dengan demikian kutub-kutub yang ada pada rotor akan berputar. Jika kumparan kutub disuplai oleh tegangan searah maka pada permukaan kutub akan timbul medan magnet (garis-garis gaya magnet) yang berputar kecepatannya sama dengan putaran kutub.

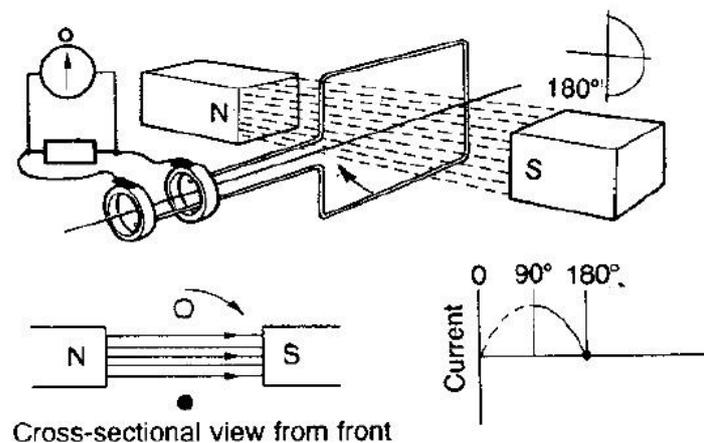


Gambar 2.1 Konstruksi Generator

Berdasarkan hukum Faraday, apabila lilitan penghantar atau konduktor diputar memotong garis-garis gaya magnet yang diam atau lilitan yang diam dipotong oleh garis-garis gaya magnet yang berputar maka pada penghantar

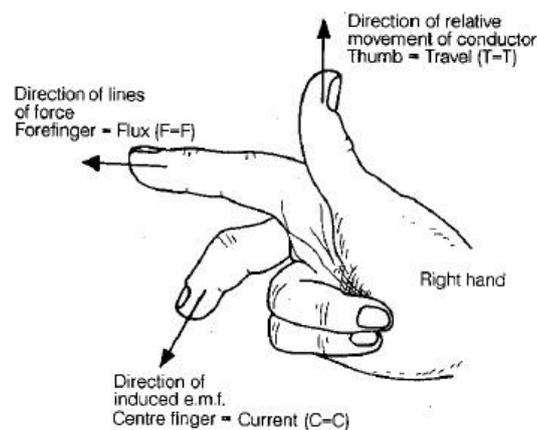
^[3] Juhari, Dipl. Eng, S.pd. 2013. *Generator Semester 3 Kelas XI*. Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia. Hal: 13 -14

tersebut timbul EMF (*Electro Motive Force*) atau GGL (*Gaya Gerak Listrik*) atau tegangan induksi. Ggl yang dibangkitkan pada penghantar jangkar adalah tegangan bolak balik, perhatikan gambar 2.2. Arus yang mengalir pada penghantar jangkar karena beban tersebut akan membangkitkan medan yang berlawanan atau mengurangi medan utama sehingga tegangan terminal turun, hal ini disebut dengan reaksi jangkar.



Gambar 2.2 GGL Yang Dibangkitkan^[3]

Dalam menentukan arah arus dan tegangan (GGL atau EMF) yang timbul pada penghantar pada setiap detik berlaku Hukum tangan kanan Flemming perhatikan gambar 2.3 berikut:



Gambar 2.3 Hukum Tangan Kanan Flemming^[3]

^[3] Juhari, Dipl. Eng, S.pd. 2013. *Generator Semester 3 Kelas XI*. Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia. Hal: 13 -14

Dimana :

1. Jempol menyatakan arah gerak F atau putaran penghantar.
2. Jari telunjuk menyatakan arah medan magnet dari kutub utara ke kutub selatan.
3. Jari tangan menyatakan arah arus dan tegangan

Ketiga arah tersebut saling tegak lurus seperti yang diperlihatkan pada gambar diatas.^[3]

2.2 Gangguan Pada Generator^[5]

Secara teknis, terdapat beberapa macam gangguan yang mungkin terjadi pada generator. Gangguan pada generator tersebut dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

2.2.1 Gangguan Kelistrikan (*Electrical Fault*)^[5]

Jenis gangguan ini adalah gangguan yang timbul dan terjadi pada bagian-bagian listrik dari generator. Gangguan-gangguan tersebut antara lain :

1. Hubung singkat 3 phasa

Terjadinya arus lebih pada stator yang dimaksud adalah arus lebih yang timbul akibat terjadinya hubungan singkat 3 phasa (*3 phase fault*). Gangguan ini akan menimbulkan loncatan bunga api dengan suhu yang tinggi yang akan melelehkan belitan dengan resiko terjadinya kebakaran, jika isolasi tidak terbuat dari bahan yang anti api atau *nonflammable*.

2. Hubung singkat 2 phasa

Gangguan hubung singkat 2 phasa (*unbalance fault*) lebih berbahaya dibanding gangguan hubung singkat 3 phasa/*balance fault*, karena disamping akan terjadi kerusakan pada belitan akan timbul pula vibrasi pada kumparan stator. Kerusakan lain yang timbul adalah pada poros/shaft dan kopling turbin akibat adanya momen puntir yang besar.

^[3] Juhari, Dipl. Eng, S.pd. 2013. *Generator Semester 3 Kelas XI*. Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia. Hal: 13 -14

^[5] Rinaldi, Saragi, Irwan. *Jurnal Sistem Proteksi Pembangkit, Sistem Proteksi Generator, dan Sistem Proteksi Trafo Pembangkit*. https://www.academia.edu/5681744/JURNAL_1_SISTEM_PROTEKSI_PEMBANGKIT.

Diakses pada 20 Maret 2016, 16:30 WIB.

3. Stator hubung singkat 1 fasa ke tanah (*stator ground fault*)

Kerusakan akibat gangguan 2 fasa atau antara konduktor kadang-kadang masih dapat diperbaiki dengan menyambung tapping atau mengganti sebagian konduktor, tetapi kerusakan laminasi besi (*iron lamination*) akibat gangguan 1 fasa ke tanah yang menimbulkan bunga api dan merusak isolasi dan inti besi adalah kerusakan serius yang perbaikannya dilakukan secara total. Gangguan jenis ini meskipun kecil harus segera diproteksi.

4. Rotor hubung tanah (*Field ground*)

Pada rotor generator yang belitannya tidak dihubungkan oleh tanah (*ungrounded system*). Bila salah satu sisi terhubung ke tanah belum menjadikan masalah. Tetapi apabila sisi lainnya terhubung ke tanah, sementara sisi sebelumnya tidak terselesaikan maka akan terjadi kehilangan arus pada sebagian belitan yang terhubung singkat melalui tanah. Akibatnya terjadi ketidakseimbangan fluksi yang menimbulkan vibrasi yang berlebihan serta kerusakan fatal pada rotor.

5. Kehilangan medan penguat (*Loss of excitation*)

Hilangnya medan penguat akan membuat putaran mesin naik, dan berfungsi sebagai generator induksi. Kondisi ini akan berakibat pada rotor dan pasak (*slot wedges*), akibat arus induksi yang bersirkulasi pada rotor. Kehilangan medan penguat dapat dimungkinkan oleh :

- a) Jatuhnya / trip saklar penguat (41AC)
- b) Hubung singkat pada belitan penguat
- c) Kerusakan kontak-kontak sikat arang pada sisi penguat
- d) Kerusakan pada sistem AVR

6. Tegangan lebih (*Over voltage*)

Tegangan yang berlebihan melampaui batas maksimum yang diijinkan dapat berakibat tembusnya (*breakdown*) design insulasi yang akhirnya akan menimbulkan hubungan singkat antara belitan.

[5] Rinaldi, Saragi, Irwan. *Jurnal Sistem Proteksi Pembangkit, Sistem Proteksi Generator, dan Sistem Proteksi Trafo Pembangkit*. https://www.academia.edu/5681744/JURNAL_1_SISTEM_PROTEKSI_PEMBANGKIT. Diakses pada 20 Maret 2016, 16:30 WIB.



Tegangan lebih dapat dimungkinkan oleh mesin putaran lebih (*overspeed*) atau kerusakan pada pengatur tegangan otomatis/AVR.

2.2.2 Gangguan Mekanis / Panas (*Mechanical/ Thermal Fault*)^[5]

Jenis gangguan ini adalah gangguan yang timbul atau terjadi akibat adanya gangguan mekanik dan panas pada Generator, antara lain :

1. Generator berfungsi sebagai motor (*motoring*)

Motoring adalah peristiwa berubah fungsi generator menjadi motor akibat daya balik (*reverse power*). Daya balik terjadi disebabkan oleh turunnya daya masukan dari penggerak utama (*prime mover*). Dampak kerusakan akibat peristiwa motoring adalah lebih kepada penggerak utama itu sendiri. Pada turbin uap, peristiwa motoring akan mengakibatkan pemanasan lebih pada sudut-sudutnya, kavitasi pada sudut-sudut turbin air, dan ketidak stabilan pada sudut turbin gas.

2. Pemanasan lebih setempat

Pemanasan lebih setempat pada sebagian stator dapat dimungkinkan oleh :

- a) Kerusakan laminasi
- b) Kendornya bagian-bagian tertentu di dalam generator seperti : pasak-pasak stator (*stator wedges*).

3. Kesalahan paralel

Kesalahan dalam memparalel generator karena syarat-syarat sinkron tidak terpenuhi dapat mengakibatkan kerusakan pada bagian poros dan kopling generator, dan penggerak utamanya karena terjadinya momen puntir. Kemungkinan kerusakan lain yang timbul, kerusakan PMT dan kerusakan pada kumparan stator akibat adanya kenaikan tegangan sesaat.

4. Gangguan pendingin stator

Gangguan pada media sistem pendingin stator (pendingin dengan media udara, hidrogen, atau air) akan menyebabkan kenaikan suhu

^[4] Rinaldi, Saragi, Irwan. *Jurnal Sistem Proteksi Pembangkit, Sistem Proteksi Generator, dan Sistem Proteksi Trafo Pembangkit*. https://www.academia.edu/5681744/JURNAL_1_SISTEM_PROTEKSI_PEMBANGKIT. Diakses pada 20 Maret 2016, 16:30 WIB.



belitan stator. Apabila suhu belitan melampaui batas ratingnya akan berakibat kerusakan belitan.

2.2.3 Gangguan Sistem (*System Fault*)^[5]

Generator dapat terganggu akibat adanya gangguan yang terjadi pada sistem. Gangguan-gangguan sistem yang terjadi umumnya adalah :

1. Frekuensi operasi yang tidak normal (*abnormal frequency operation*)

Perubahan frekuensi keluar dari batas-batas normal di sistem dapat berakibat ketidakstabilan pada turbin generator. Perubahan frekuensi sistem dapat dimungkinkan oleh tripnya unit-unit pembangkit atau penghantar (transmisi).

2. Lepas sinkron (*loss of synhchron*)

Adanya gangguan di sistem akibat perubahan beban mendadak, switching, hubung singkat dan peristiwa yang cukup besar akan menimbulkan ketidakstabilan sistem. Apabila peristiwa ini cukup lama dan melampaui batas-batas ketidakstabilan generator, generator akan kehilangan kondisi paralel. Keadaan ini akan menghasilkan arus puncak yang tinggi dan penyimpangan frekuensi operasi yang keluar dari seharusnya sehingga akan menyebabkan terjadinya stress pada belitan generator, gaya puntir yang berfluktuasi serta resonansi yang akan merusak turbin generator. Pada kondisi ini generator harus dilepas dari sistem.

3. Arus beban kumparan yang tidak seimbang (*unbalance armature current*)

Pembebanan yang tidak seimbang pada sistem/adanya gangguan 1 fasa dan 2 fasa pada sistem yang menyebabkan beban generator tidak seimbang yang akan menimbulkan arus urutan negatif. Arus urutan negatif yang melebihi batas, akan mengiduksikan arus medan yang berfrekuensi rangkap yang arahnya berlawanan dengan putaran

^[5] Rinaldi, Saragi, Irwan. *Jurnal Sistem Proteksi Pembangkit, Sistem Proteksi Generator, dan Sistem Proteksi Trafo Pembangkit*. https://www.academia.edu/5681744/JURNAL_1_SISTEM_PROTEKSI_PEMBANGKIT. Diakses pada 20 Maret 2016, 16:30 WIB.

rotor akan menyebabkan adanya pemanasan lebih dan kerusakan pada bagian-bagian konstruksi rotor.

2.3 Gangguan Hubung Singkat^[1]

Hubung Singkat adalah suatu peristiwa terjadinya hubungan bertegangan atau penghantar tidak bertegangan secara langsung tidak melalui media yang semestinya sehingga terjadi aliran arus yang tidak normal (sangat besar) yang biasa disebut arus hubung singkat. Adanya hubung singkat menimbulkan arus lebih yang pada umumnya jauh lebih besar daripada arus pengenal peralatan dan terjadi penurunan tegangan pada sistem tenaga listrik, sehingga bila gangguan tidak segera dihilangkan dapat merusak peralatan dalam sistem tersebut. Besarnya arus hubung singkat yang terjadi sangat dipengaruhi oleh jumlah pembangkit yang masuk pada sistem, letak gangguan dan jenis gangguan.

Ada 2 jenis gangguan hubung singkat berdasarkan jenis arus gangguannya, yaitu gangguan simetris dan gangguan asimetris. Gangguan simetris adalah gangguan yang arus gangguannya seimbang, dan sebaliknya gangguan asimetris adalah gangguan yang arus gangguannya tidak seimbang. Perhitungan tegangan dan arus pada titik hubung singkat dapat dilakukan apabila sistem sederhana atau seimbang. Apabila sistem tidak seimbang maka digunakan metode komponen simetri untuk menganalisanya. Tiga komponen simetris antara lain:

1. Komponen Urutan Positif (*Positive Sequence Component*)

Merupakan komponen yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa 120° dan mempunyai urutan fasa yang sama dengan fasor aslinya (biasanya ditandai dengan subscript 1).

2. Komponen Urutan Negatif (*Negative Sequence Component*)

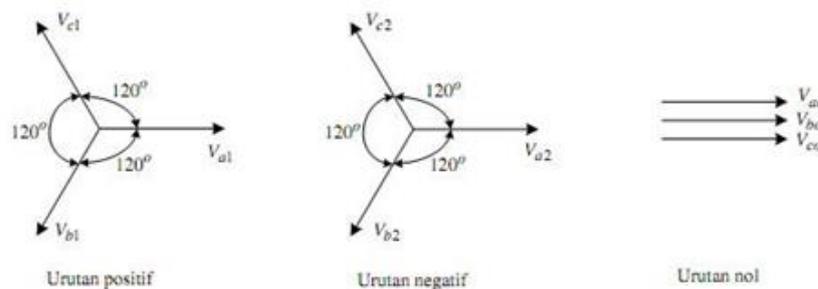
Merupakan komponen yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa 120° dan mempunyai urutan fasa yang berbeda dengan fasor aslinya (biasanya ditandai dengan subscript 2).

^[1]Ginanto, Novika. 2012. *Electric Transient Analysis Program (ETAP) Short Circuit Analysis*. <https://novikaginanto.wordpress.com/2012/03/24/etap-electric-transient-analysis-program/>Diakses pada 20 Maret 2016. 16:00 WIB



3. Komponen Urutan Nol (*Zero Sequence Component*)

Merupakan komponen yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan tidak ada pergeseran fasa antara fasor yang satu dengan yang lain (biasanya ditandai dengan subscript 0).



Gambar 2.4 Tiga Komponen Simetris^[1]

Karena generator merupakan salah satu sumber daya dan sering terjadi kesalahan atau gangguan, maka perlu ditinjau keadaan generator bila terjadi gangguan tersebut. Gangguan-gangguan hubung singkat dapat menyebabkan:

- Kerusakan pada peralatan ditempat kejadian hubung singkat
- Terganggunya stabilitas sistem pada operasi parallel
- Menurunnya tegangan dan frekuensi, sehingga menjadi tidak normal
- Terputusnya sebagian atau seluruh sistem pelayanan tenaga listrik ke konsumen

Dalam menentukan penyetelan rele system proteksi, yang pertama kali diperlukan ialah mengetahui besar arus hubung singkat yang mungkin terjadi. Perhitungan hubung singkat dapat dibatasi hanya pada kebutuhan rele yang direncanakan, tetapi perlu diketahui juga reaksi suatu rele terhadap gangguan jenis lain. Pada sirkit tiga fasa arus bolak-balik, ada empat hubung singkat yaitu:

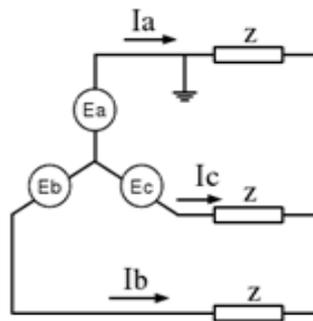
- Hubung singkat satu fasa ketanah
- Hubung singkat dua fasa ketanah
- Hubung singkat antar fasa
- Hubung singkat tiga fasa

^[1]Ginanto, Novika. 2012. *Electric Transient Analysis Program (ETAP) Short Circuit Analysis*. <https://novikaginanto.wordpress.com/2012/03/24/etap-electric-transient-analysis-program/> Diakses pada 20 Maret 2016. 16:00 WIB



2.3.1 Hubung Singkat Satu Fasa Ketanah^[1]

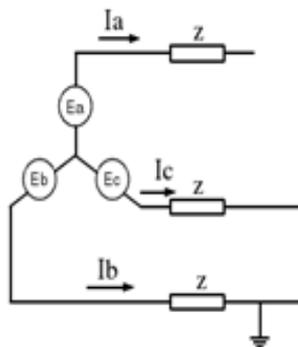
Pada sistem jaringan, gangguan satu fasa ketanah akan mengalirkan arus gangguan yang sangat besar. Pada generator, gangguan ini dapat terjadi dan dapat merusak isolasi, sehingga terjadi hubung singkat antara kawat fasa dengan beban. Dengan menggunakan teori komponen simetris, hubung singkat satu fasa ketanah ini dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.5 Hubung Singkat Satu Fasa Ketanah

2.3.2 Hubung Singkat Dua Fasa Ketanah^[1]

Hubung singkat dua fasa ketanah adalah hubung singkat antara fasa dengan fasa ketanah, arus hubung singkat besarnya ditentukan oleh komponen urutan positif, urutan negatif dan ditentukan oleh besarnyaomponn urutan nol. Menggunakan teori komponen simetris, hubung singkat dua fasa ketanah ini dapat digambarkan sebagai berikut:



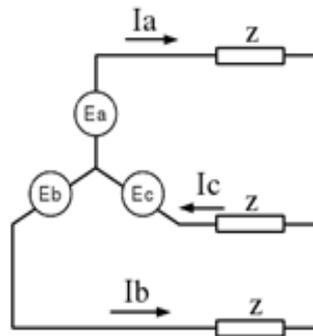
Gambar 2.6 Hubung Singkat Dua Fasa Ketanah

^[1]Ginanto, Novika. 2012. *Electric Transient Analysis Program (ETAP) Short Circuit Analysis*. <https://novikaginanto.wordpress.com/2012/03/24/etap-electric-transient-analysis-program/> Diakses pada 20 Maret 2016. 16:00 WIB



2.3.3 Hubung Singkat Antar Fasa^[1]

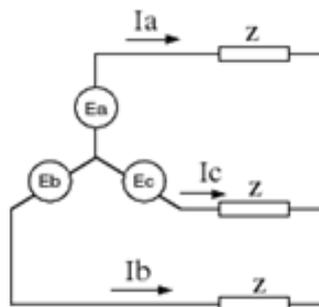
Arus gangguan hubung singkat fasa ke fasa besarnya ditentukan oleh impedansi urutan positif dan urutan negatif, dalam hal ini komponen arus urutan nol tidak ada, ini disebabkan karena pada titik gangguan tidak terdapat hubung singkat ketanah. Menggunakan teori komponen simetris, hubung singkat antar fasa ini dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.7 Hubung Singkat Antar Fasa

2.3.4 Hubung Singkat Tiga Fasa^[1]

Terjadinya arus lebih pada stator yang dimaksud adalah arus lebih yang timbul akibat terjadinya hubungan singkat 3 fasa/3 phase fault. Dimana urutan positif merupakan arus yang mengalir di impedansi yang terhubung di fasa A urutannya sama dengan urutan tegangan yang dibangkitkan di fasa A.



Gambar 2.8 Hubung Singkat Tiga Fasa

^[1]Ginanto, Novika. 2012. *Electric Transient Analysis Program (ETAP) Short Circuit Analysis*. <https://novikaginanto.wordpress.com/2012/03/24/etap-electric-transient-analysis-program/> Diakses pada 20 Maret 2016. 16:00 WIB



2.4 Tujuan Dasar Proteksi^[2]

Proteksi sistem tenaga listrik adalah sistem proteksi yang dipasang pada peralatan-peralatan listrik suatu sistem tenaga listrik, misalnya generator, transformator, jaringan dan lain-lain, terhadap kondisi abnormal operasi sistem itu sendiri. Kondisi abnormal itu dapat berupa antara lain: hubung singkat, tegangan lebih, beban lebih, frekuensi sistem rendah, asinkron dan lain-lain.

Dengan kata lain sistem proteksi itu bermanfaat untuk:

1. menghindari ataupun untuk mengurangi kerusakan peralatan-peralatan akibat gangguan (kondisi abnormal operasi sistem). Semakin cepat reaksi perangkat proteksi yang digunakan maka akan semakin sedikit pengaruh gangguan kepada kemungkinan kerusakan alat.
2. cepat melokalisir luas daerah yang mengalami gangguan, menjadi sekecil mungkin.
3. dapat memberikan pelayanan listrik dengan keandalan yang tinggi kepada konsumen dan juga mutu listrik yang baik.
4. mengamankan manusia terhadap bahaya yang ditimbulkan oleh listrik.

Pada umumnya sistem rele proteksi digunakan untuk mendeteksi dan mengamati kondisi gangguan berupa gangguan hubung singkat, dan gangguan lain yang mempengaruhi kestabilan sistem. Untuk sistem rele proteksi yang mendeteksi gangguan hubung singkat terdapat dua jenis sistem proteksi, yaitu:

1. Proteksi Utama (*Primary Protection*)

Proteksi utama merupakan pengamanan utama dimana pengamanan tersebut harus dapat bekerja terlebih dahulu apabila terjadi gangguan yang dapat merusak peralatan listrik. Adapun yang menyebabkan kegagalan proteksi utama adalah:

- a. Arus dan tegangan yang menuju rele tidak sempurna atau terdapat gangguan
- b. Kesalahan atau gangguan pada sumber
- c. Kesalahan atau gangguan pada PMT

^[2]Ir. H. Samulah, Hazairin Ph.D, M.Eng, 2004. *Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Palembang: Universitas Negeri Sriwijaya. Hal: 93-94



2. Proteksi Cadangan (*Backup Protection*)

Proteksi cadangan adalah pengaman yang digunakan untuk mengamankan gangguan apabila proteksi utama gagal mengamankan gangguan, Apabila sistem proteksi utama gagal, sistem proteksi cadangan harus bekerja untuk mengisolir gangguan yang terjadi.

2.5 Syarat Penting Rele Proteksi^[2]

Agar rele proteksi mampu bekerja mengatasi gangguan secepat mungkin, maka terdapat empat syarat penting bagi rele proteksi, yaitu sebagai berikut:

1. Kepekaan

Kepekaan atau sensitivity adalah kemampuan suatu rele proteksi untuk bekerja terhadap ketidaknormalan atau merasakan besaran gangguan yang terjadi pada sistem.

2. Selektifitas

Selektifitas adalah kemampuan suatu rele proteksi untuk bekerja hanya bilamana gangguan yang terjadi ada pada daerah proteksinya, dengan kata lain kemampuan rele untuk bekerja bersama dengan peralatan lain, hanya memisahkan bagian sistem yang terganggu saja.

3. Keandalan

Keandalan atau reliability adalah kemampuan suatu rele proteksi untuk selalu dapat bekerja dengan baik dan benar pada berbagai kondisi.

4. Kecepatan kerja

Kecepatan kerja adalah kemampuan rele proteksi untuk bekerja sesuai dengan lama waktu yang dibutuhkan. Selang waktu di deteksinya gangguan sampai dilakukan pemisahan gangguan merupakan penjumlahan dari waktu kerja rele dan waktu kerja pemutus tegangan. Memindahkan daerah terganggu secepat mungkin hal ini penting untuk:

^[2]Ir. H. Samaulah, Hazairin Ph.D, M.Eng, 2004. *Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Palembang: Universitas Negeri Sriwijaya. Hal: 93-94



- a. Menghindari kerusakan secara thermis pada peralatan yang dilalui arus gangguan serta membatasi kerusakan pada alat yang terganggu.
- b. Mempertahankan kestabilan sistem
- c. Membatasi ionisasi busur api pada gangguan disaluran udara yang berarti memperbesar kemungkinan berhasilnya penutupan balik PMT (*reclosing*) dan mempersingkat *dead end time* nya^[2]

2.6 Macam-macam Rele Proteksi Generator dan Fungsinya^[5]

Adapun beberapa macam rele yang dipakai untuk mengamankan generator dari gangguan seperti pada table berikut:

Tabel 2.1 Macam- macam Relai Proteksi Generator dan Fungsinya^[5]

No	Nama Relay	Fungsi Relay
1	Relai jarak (<i>distance relay</i>)	Untuk mendeteksi gangguan 2 phasa/ 3 phasa di muka generator sampai batas jangkauannya
2	Relai periksa sinkron (<i>synchron check relay</i>)	Pengaman bantu generator untuk mendeteksi persyaratan sinkronisasi atau parallel
3	Relai tegangan kurang (<i>undervoltage relay</i>)	Untuk mendeteksi turunnya tegangan sampai di bawah harga yang diijinkan
4	Relai daya balik (<i>reverse power relay</i>)	Untuk mendeteksi daya balik sehingga mencegah generator bekerja sebagai motor
5	Relai kehilangan medan penguat (<i>loss of excitation relay</i>)	Untuk mendeteksi kehilangan arus penguat pada rotor
6	Relai phasa urutan negatif (<i>negative phase sequence relay</i>)	Untuk mendeteksi arus urutan negatif yang disebabkan oleh beban tidak seimbang dari batas-batas yang diijinkan

^[2]Ir. H. Samaulah, Hazairin Ph.D, M.Eng, 2004. *Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Palembang: Universitas Negeri Sriwijaya. Hal: 93-94

^[5]Saragi, Rinaldi, Irwan. *Jurnal Sistem Proteksi Pembangkit, Sistem Proteksi Generator, dan Sistem Proteksi Trafo Pembangkit*. https://www.academia.edu/5681744/JURNAL_1_SISTEM_PROTEKSI_PEMBANGKIT. Diakses pada 20 Maret 2016, 16:30 WIB.



7	Relai arus lebih seketika (<i>instantaneous over current relay</i>)	Untuk mendeteksi besaran arus yang melebihi batas yang ditentukan dalam waktu seketika
8	Relai arus lebih dengan waktu tunda (<i>time over current relay</i>)	Untuk mendeteksi besaran arus yang melebihi batas dalam waktu yang ditentukan
9	Relai penguat lebih (<i>over excitation relay</i>)	Untuk mendeteksi penguat lebih pada generator
10	Relai tegangan lebih (<i>over voltage relay</i>)	Bila terpasang di titik netral generator atau trafo tegangan yang dihubungkan segitiga, untuk mendeteksi gangguan stator hubung tanah Bila terpasang pada terminal generator : untuk mendeteksi tegangan lebih
11	Relai keseimbangan tegangan (<i>voltage balance relay</i>)	Untuk mendeteksi hilangnya tegangan dari trafo tegangan ke pengatur tegangan otomatis (AVR) dan ke relay
12	Relai waktu	Untuk memperlambat/mempercepat waktu
13	Relai stator gangguan tanah (<i>stator ground fault relay</i>)	Untuk mendeteksi gangguan hubung tanah pada stator
14	Relai kehilangan sinkronisasi (<i>out of step relay</i>)	Untuk mendeteksi kondisi asinkron pada generator yang sudah paralel dengan sistem

^[5]Saragi, Rinaldi, Irwan. *Jurnal Sistem Proteksi Pembangkit, Sistem Proteksi Generator, dan Sistem Proteksi Trafo Pembangkit*. https://www.academia.edu/5681744/JURNAL_1_SISTEM_PROTEKSI_PEMBANGKIT. Diakses pada 20 Maret 2016, 16:30 WIB.

15	Relai pengunci (<i>lock out relay</i>)	Untuk menerima signal trip dari relai-relai proteksi dan kemudian meneruskan signal trip ke PMT, alarm, dan peralatan lain serta penguncinya
16	Relai frekuensi (<i>frequency relay</i>)	Untuk mendeteksi besaran frekuensi rendah/lebih di luar harga yang ditentukan
17	Relai differensial (<i>differential relay</i>)	Untuk mendeteksi gangguan hubung singkat pada daerah yang diamankan

2.7 Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*)^[2]

Rele arus lebih adalah suatu alat yang bekerjanya didasarkan adanya kenaikan arus yang melebihi suatu nilai pengaman tertentu dan dalam jangka waktu tertentu. Sehingga rele ini dapat dipakai sebagai pola pengaman arus lebih. Jika ditinjau dari prinsip kerjanya ada yang elektromekanis, dan statik. Berikut keuntungan dan fungsi dari rele arus lebih:

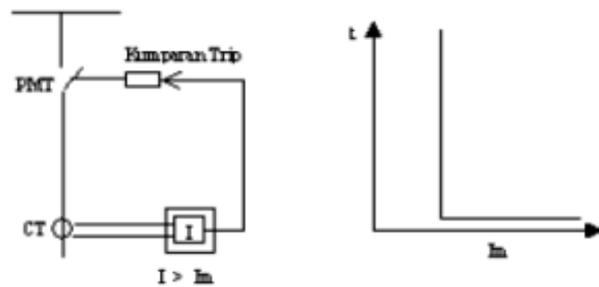
1. Sederhana dan murah.
2. Mudah penyetelannya.
3. Merupakan rele pengaman utama dan cadangan.
4. Mengamankan gangguan hubung singkat antar fasa maupun fasa ketanah.
5. Pengaman utama pada jaringan distribusi dan subtransmisi radial.
6. Pengaman cadangan untuk generator, trafo tenaga dan saluran transmisi.

2.7.1 Rele Arus Lebih Waktu Seketika (*Instantaneous Time*)^[2]

Rele arus lebih dengan karakteristik waktu kerja seketika ialah jika jangka waktu rele mulai saat rele arusnya pick up sampai selesainya kerja rele sangat singkat (20-100ms), 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 sendiri secara khusus.

^[5]Saragi, Rinaldi, Irwan. *Jurnal Sistem Proteksi Pembangkit, Sistem Proteksi Generator, dan Sistem Proteksi Trafo Pembangkit*. https://www.academia.edu/5681744/JURNAL_1_SISTEM_PROTEKSI_PEMBANGKIT. Diakses pada 20 Maret 2016, 16:30 WIB.

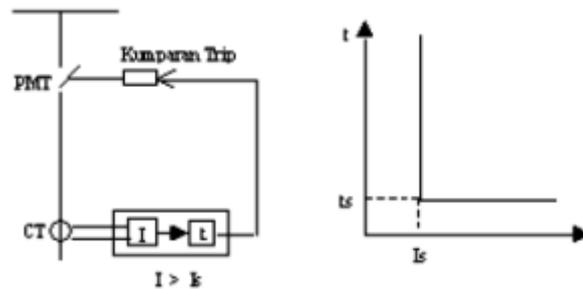
^[2]Ir. H. Samaulah, Hazairin Ph.D, M.Eng, 2004. *Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Palembang: Universitas Negeri Sriwijaya. Hal: 53



Gambar 2.9 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Seketika

2.7.2 Rele Arus Lebih Dengan Waktu Tertentu (*Definite Time*)^[2]

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



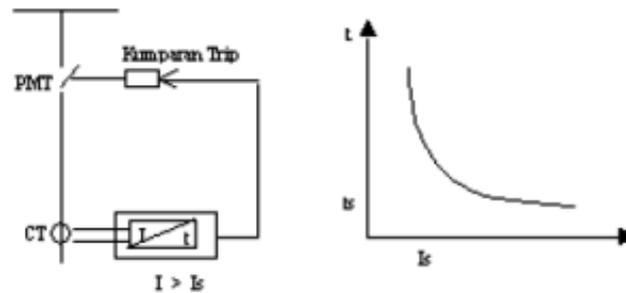
Gambar 2.10 Karakteristik Rele Arus Lebih Dengan Waktu Tertentu

2.7.3 Rele Arus Lebih Waktu Berbanding Terbalik (*Inverse Time*)^[2]

Rele dengan karakteristik waktu terbalik adalah jika jangka waktu mulai rele arus *pickup* sampai selesainya kerja rele diperpanjang dengan besarnya nilai yang berbanding terbalik dengan arus yang menggerakkan. Bentuk perbandingan waktu terbalik ini bermacam-macam tetapi dapat digolongkan menjadi:

- Berbanding terbalik (*Standard Inverse*)
- Sangat berbanding terbalik (*Very Inverse*)
- Sangat berbanding terbalik sekali (*Extremely Inverse*)

^[2]Ir. H. Samaulah, Hazairin Ph.D, M.Eng, 2004. *Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Palembang: Universitas Negeri Sriwijaya. Hal: 53-54

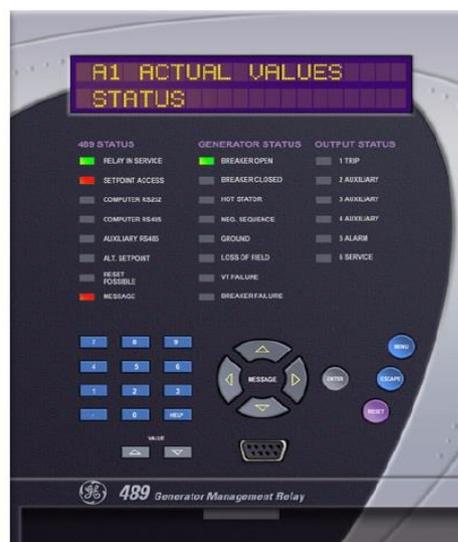


Gambar 2.11 Karakteristik Rele Arus Lebih Dengan Waktu Berbanding Terbalik

2.7.4 Rele Arus Lebih *Inverse Definite Minimum Time (IDMT)*^[2]

Rele arus lebih dengan karakteristik *inverse definite minimum time (IDMT)* ialah jika jangka waktu rele arus mulai *pickup* sampai selesainya kerja rele mempunyai sifat waktu terbalik untuk nilai arus yang kecil setelah rele *pickup* dan kemudian mempunyai sifat waktu tertentu untuk nilai arus yang lebih besar. Rele arus lebih dengan karakteristik waktu arus tertentu, berbanding terbalik dan IDMT dapat dikombinasi dengan rele arus lebih dengan karakteristik seketika.

2.8 Rele GE-SR489^[4]



Gambar 2.12 Rele GE-SR489

^[2]Ir. H. Samaulah, Hazairin Ph.D, M.Eng, 2004. *Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Palembang: Universitas Negeri Sriwijaya. Hal: 54-56

^[4]Markham, Ontario. 2010. *489 Management Relay Instruction Manual Revision 4.0X*. Canada: GE Multilin. Bab 5. Hal: 29



GE-SR489 merupakan rele digital yang di desain dengan menggunakan standar ANSI *device number* untuk memproteksi Generator dan *setpoint* untuk penyetelannya. Ada beberapa tipe kurva standar untuk arus lebih pada rele ini, diantaranya; ANSI, IEC, IAC dan yang lainnya ialah FlexCurve™ dan Definite Time. Untuk lebih jelasnya lihat bisa dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 2.2 Tipe Kurva Standar Untuk Arus Lebih^[4]

ANSI	IEC	GE Type IAC	Other
Extremely Inverse	Curve A (BS142)	Extremely Inverse	FlexCurve™
Very Inverse	Curve A (BS142)	Very Inverse	Definite Time
Normally Inverse	Curve A (BS142)	Inverse	
Moderately Inverse	Short Inverse	Short Inverse	

2.9 Arus Nominal Beban Penuh^[4]

Rele SR489 mempunyai *Definite Time* alaram dan berbagai macam kurva trip arus lebih waktu terbalik untuk melindungi rotor generator dari panas berlebihan (*Over Heating*) yang disebabkan oleh beban yang berlebihan atau penuh. Untuk mengetahui arus nominal beban penuh menggunakan rumus:

$$Generator\ FLA = \frac{Generator\ rated\ MVA}{\sqrt{3} \times Rated\ Generator\ Phase - Phase\ Voltage} \dots\dots (2.1)$$

Dimana:

Generator FLA = Arus nominal beban penuh generator (A)

Generator rate MVA = Daya pada generator (VA)

Rated Generator Phase-Phase Voltage = Tegangan pada generator (V)

2.10 Penyetelan Arus Kerja (I_{Pickup}) pada Rele GE-SR489^[4]

Untuk penyetelan Arus Kerja (I_{Pickup}) pada rele GE-SR489 ini menggunakan rumus:

$$I_{pickup} = Range\ (0,15\ to\ 20,0) \times Ratio\ CT \dots\dots\dots (2.2)$$

^[4]Markham, Ontario. 2010. *489 Management Relay Instruction Manual Revision 4.0X* . Canada: GE Multilin. Bab 5. Hal: 39, Hal:33, dan Hal: 35



Dimana:

I_{pickup} = Arus Kerja

Range = Nilai *setpoints* dari 0,15 sampai 20,0

Ratio CT = Nilai rasio pada trafo arus

2.11 Penyetelan Waktu *Trip* pada Rele GE-SR489^[4]

Untuk penyetelan waktu *trip* sendiri berbeda-beda tergantung pada standar kurva yang digunakan lihat tabel (2.2), berikut adalah penyetelan waktu *trip* sesuai dengan standarnya masing-masing.

2.11.1 Penyetelan Waktu *Trip* pada Rele GE-SR489 untuk standar ANSI^[4]

Kurva arus lebih standar ANSI merupakan bentuk kurva yang banyak dipakai untuk standar industri. Dan juga, kurva ANSI C37.90 memiliki klasifikasi untuk *Extremely*, *Very*, *Normally*, dan *Moderately Inverse*. Dengan rumus Waktu *trip* sebagai berikut:

$$T = M \times \left(A + \frac{B}{\left\{ \left(\frac{I}{I_{pickup}} \right) - C \right\}} + \frac{D}{\left\{ \left(\frac{I}{I_{pickup}} \right) - C \right\}^2} + \frac{E}{\left\{ \left(\frac{I}{I_{pickup}} \right) - C \right\}^3} \right) \dots (2.3)$$

Dimana:

T = Waktu *trip* (s)

M = *Multiplier setpoint* (Tms)

I_{pickup} = Arus Kerja (A)

A,B,C,D,E = Konstanta standar ANSI

Untuk konstanta standar ANSI bisa dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 2.3 Konstanta Standar ANSI

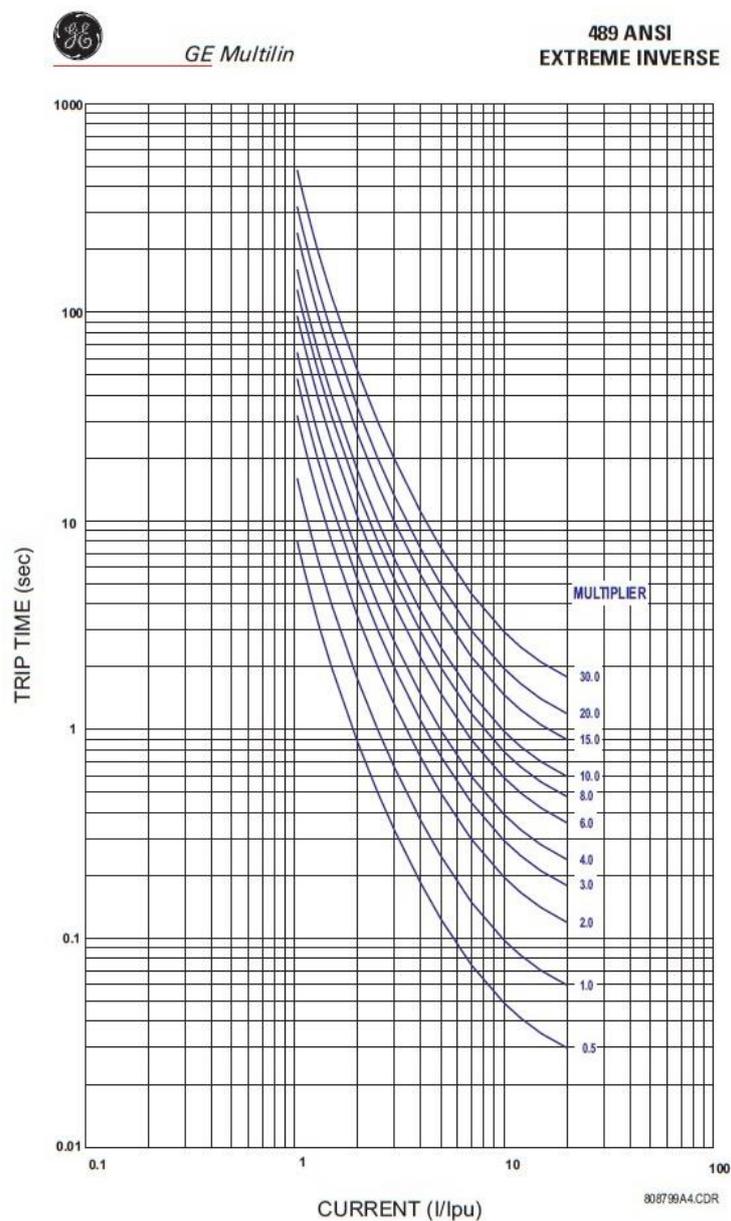
ANSI Curve Shape	Constants				
	A	B	C	D	E
Extremely Inverse	0.0399	0.2294	0.5000	3.0094	0.7222
Very Inverse	0.0615	0.7989	0.3400	-0.2840	4.0505
Normally Inverse	0.0274	2.2614	0.3000	-4.1899	9.1272

^[4]Markham, Ontario. 2010. *489 Management Relay Instruction Manual Revision 4.0X*. Canada: GE



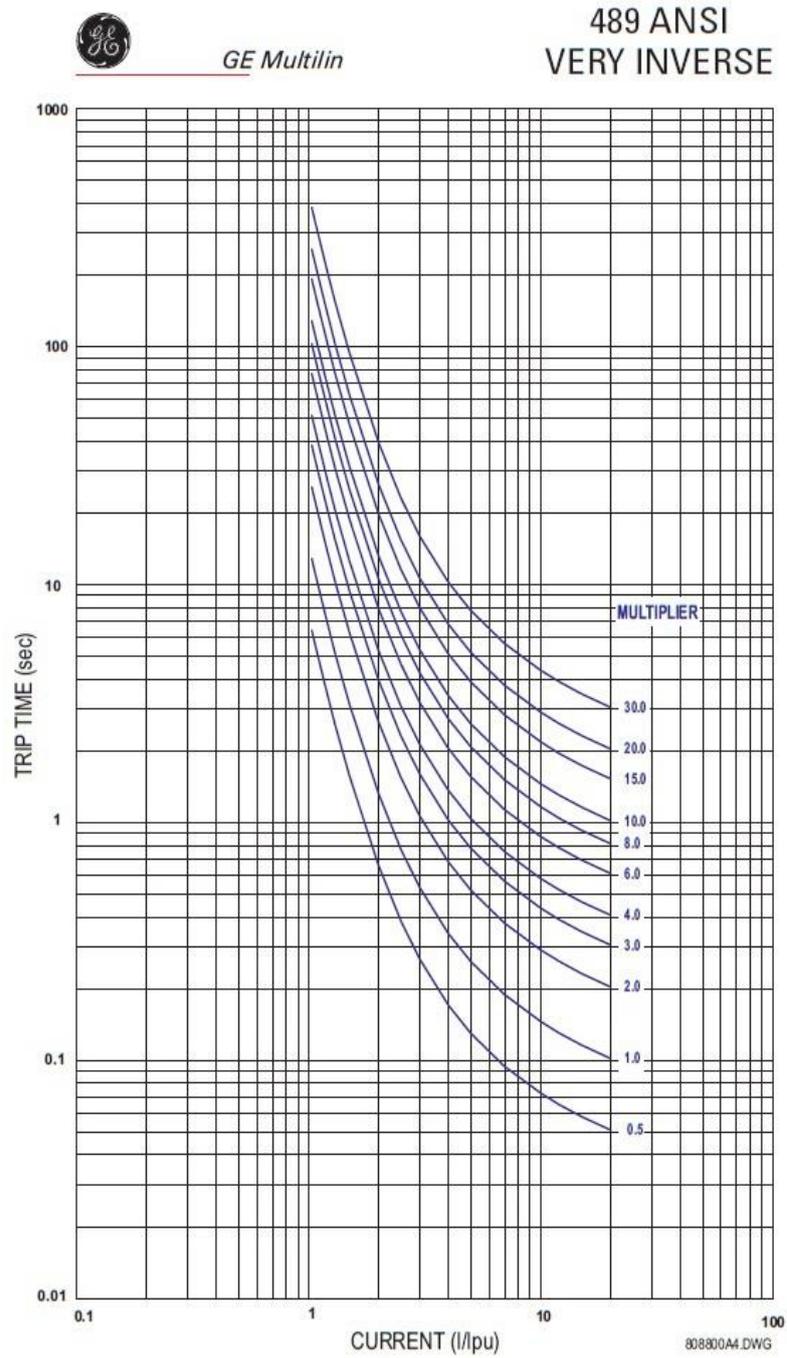
Moderately Inverse	0.1735	0.6791	0.8000	-0.8000	0.1271
--------------------	--------	--------	--------	---------	--------

Nilai konstanta standar ANSI berbeda-beda sesuai dengan klasifikasinya, begitu pula dengan karakteristik dari standar ANSI tersebut. Berikut merupakan gambar-gambar dari kurva karakteristik standar ANSI sesuai dengan klasifikasinya.



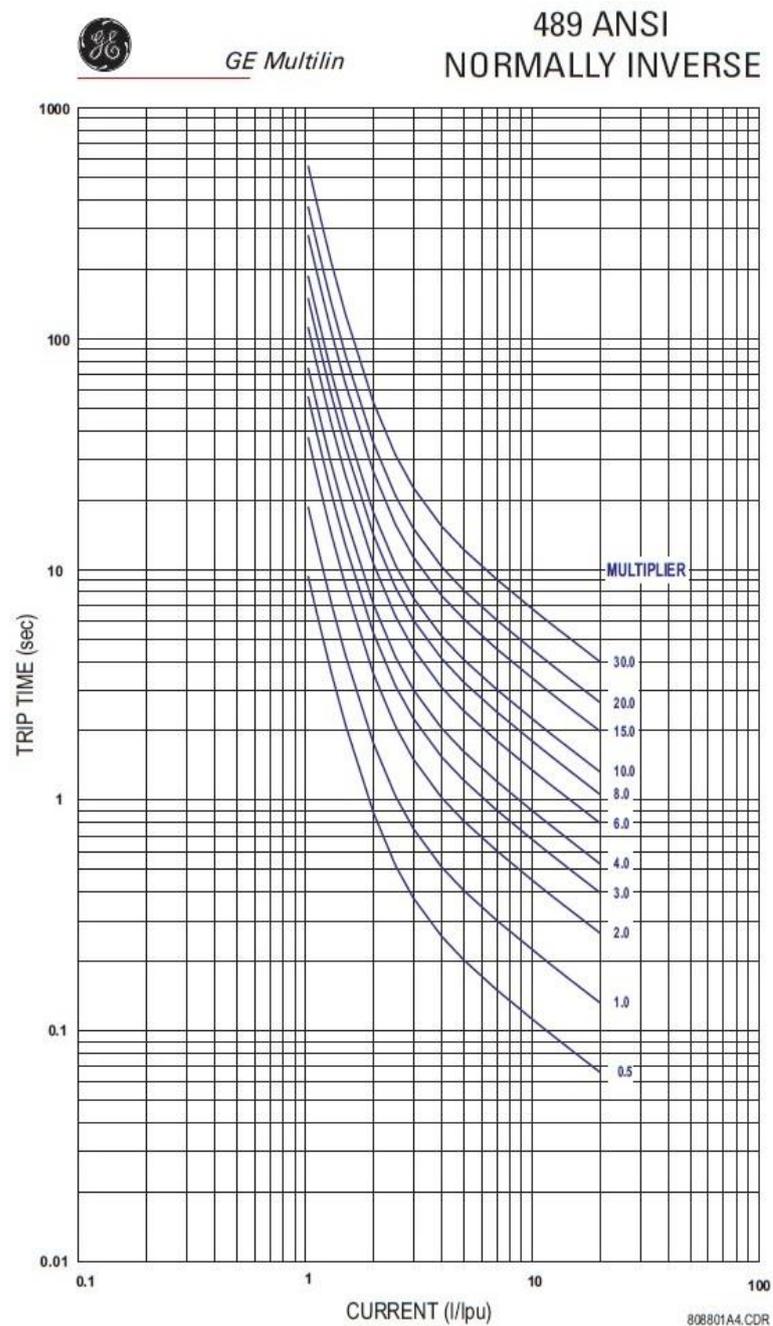
Gambar 2.13 Kurva Karakteristik Standar ANSI *Extremely Inverse*^[4]

^[4]Markham, Ontario. 2010. *489 Management Relay Instruction Manual Revision 4.0X*. Canada: GE Multilin. Bab A. Hal: 18



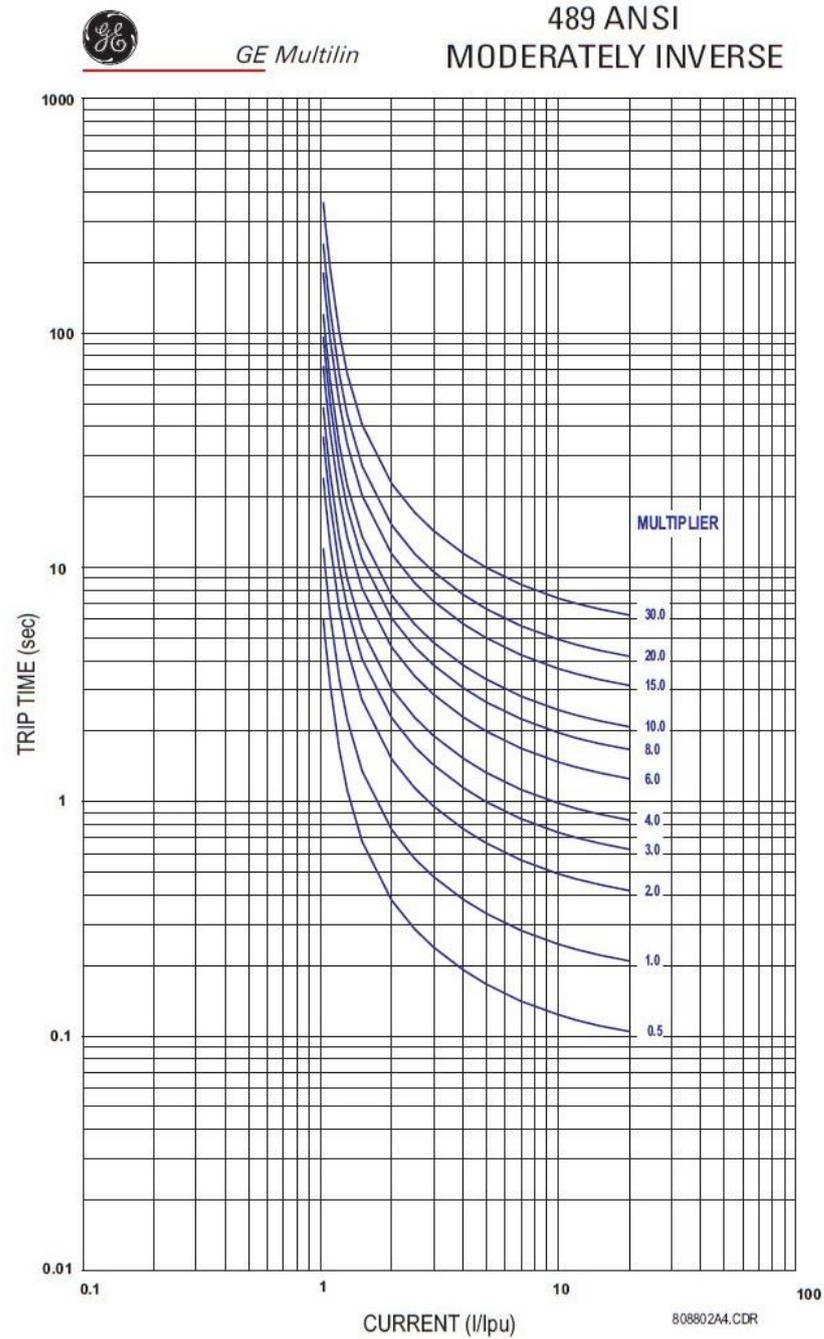
Gambar 2.14 Kurva Karakteristik Standar ANSI *Very Inverse*^[4]

^[4]Markham, Ontario. 2010. *489 Management Relay Instruction Manual Revision 4.0X*. Canada: GE Multilin. Bab A. Hal: 17



Gambar 2.15 Kurva Karakteristik Standar ANSI *Normally Inverse*^[4]

^[4]Markham, Ontario. 2010. *489 Management Relay Instruction Manual Revision 4.0X*. Canada: GE Multilin. Bab A. Hal: 16



Gambar 2.16 Kurva Karakteristik Standar ANSI *Moderately Inverse*^[4]

^[4]Markham, Ontario. 2010. *489 Management Relay Instruction Manual Revision 4.0X*. Canada: GE Multilin. Bab A. Hal: 15



2.11.2 Penyetelan Waktu *Trip* pada Rele GE-SR489 untuk standar IEC^[4]

Untuk standar eropa, rele memiliki 4 kurva standar pada IEC 255-4 dan BS142 standar british. Kurva tersebut dijabarkan menjadi, IEC Curve A, IEC Curve B, IEC Curve C dan Short Inverse. Dengan rumus Waktu *trip* sebagai berikut:

$$T = M \times \left(\frac{K}{\left(\frac{I}{I_{pickup}} \right)^E - 1} \right) \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana:

T = Waktu *trip* (s)

M = *Multiplier setpoint* (Tms)

I_{pickup} = Arus Kerja (A)

K,E = Konstanta standar IEC

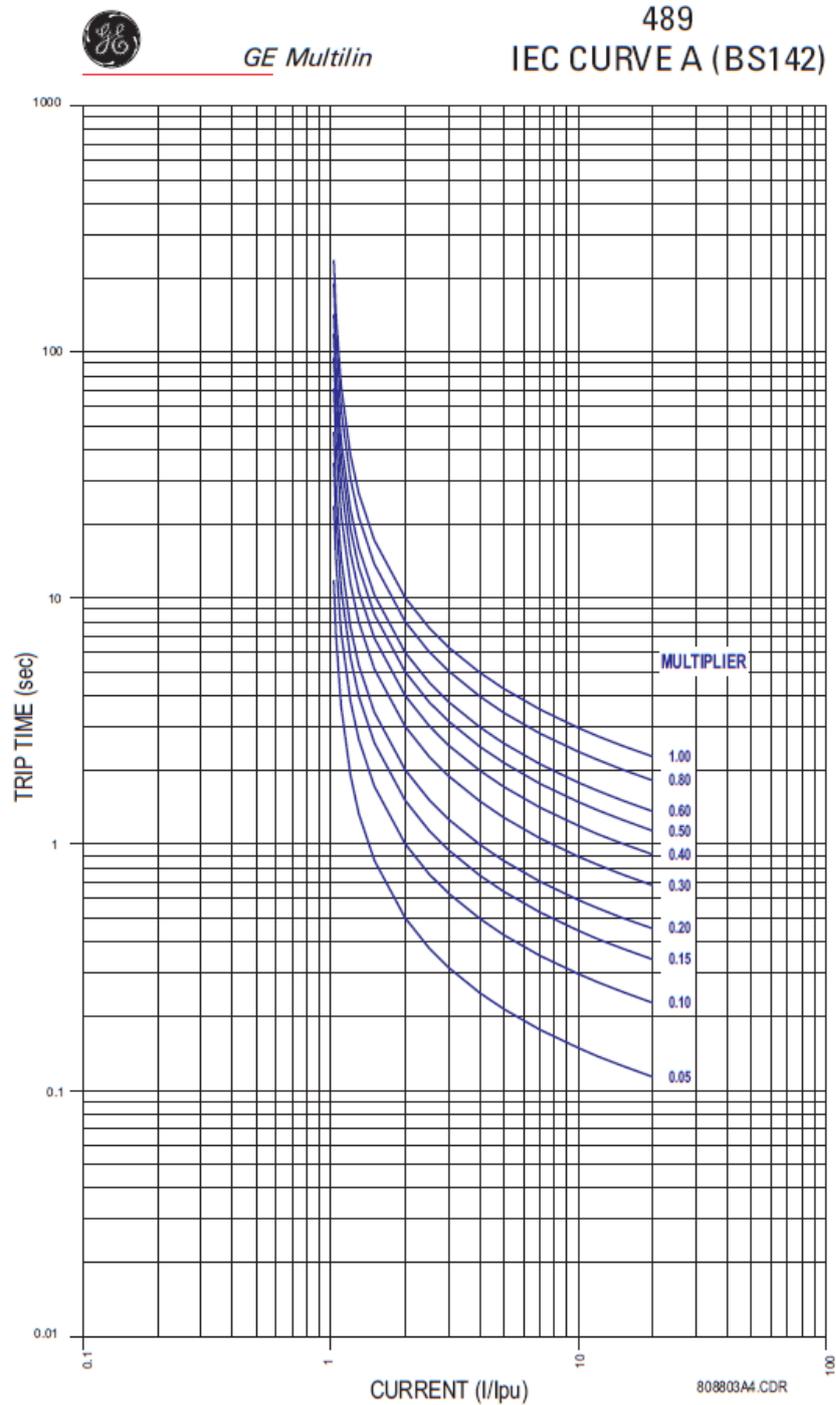
Untuk konstanta standar IEC bisa dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 2.4 Konstanta Standar IEC

IEC (BS) Curve Shape	Constants	
	K	E
IEC Curve A (BS142)	0.14	0.020
IEC Curve B (BS142)	13.500	1.000
IEC Curve C (BS142)	80.000	2.000
Short Inverse	0.050	0.040

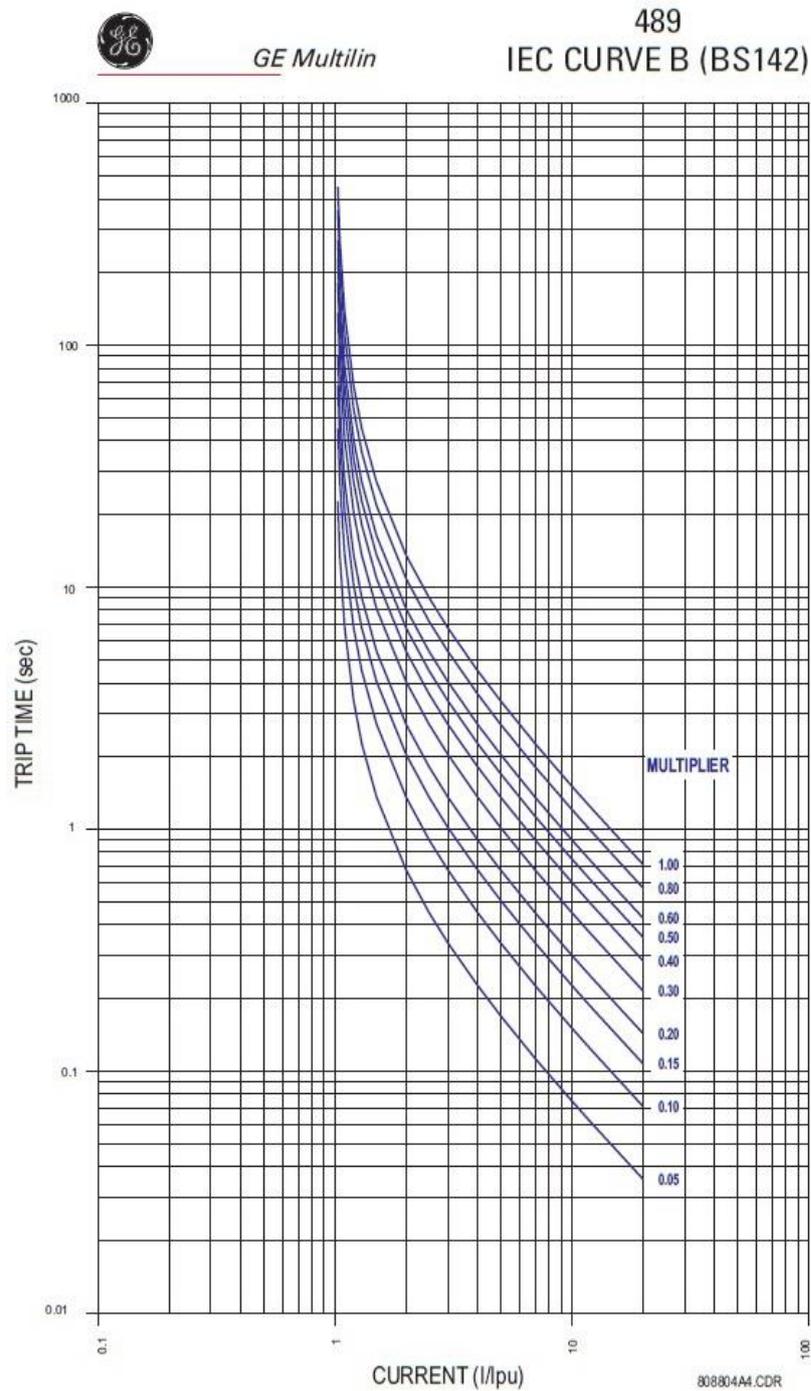
Sama halnya dengan standar ANSI, nilai konstanta standar IEC berbeda-beda sesuai dengan klasifikasinya, begitu pula dengan karakteristik dari standar IEC tersebut. Berikut merupakan gambar-gambar dari kurva karakteristik standar IEC sesuai dengan klasifikasinya.

^[4]Markham, Ontario. 2010. *489 Management Relay Instruction Manual Revision 4.0X* . Canada: GE Multilin. Bab 5. Hal: 30



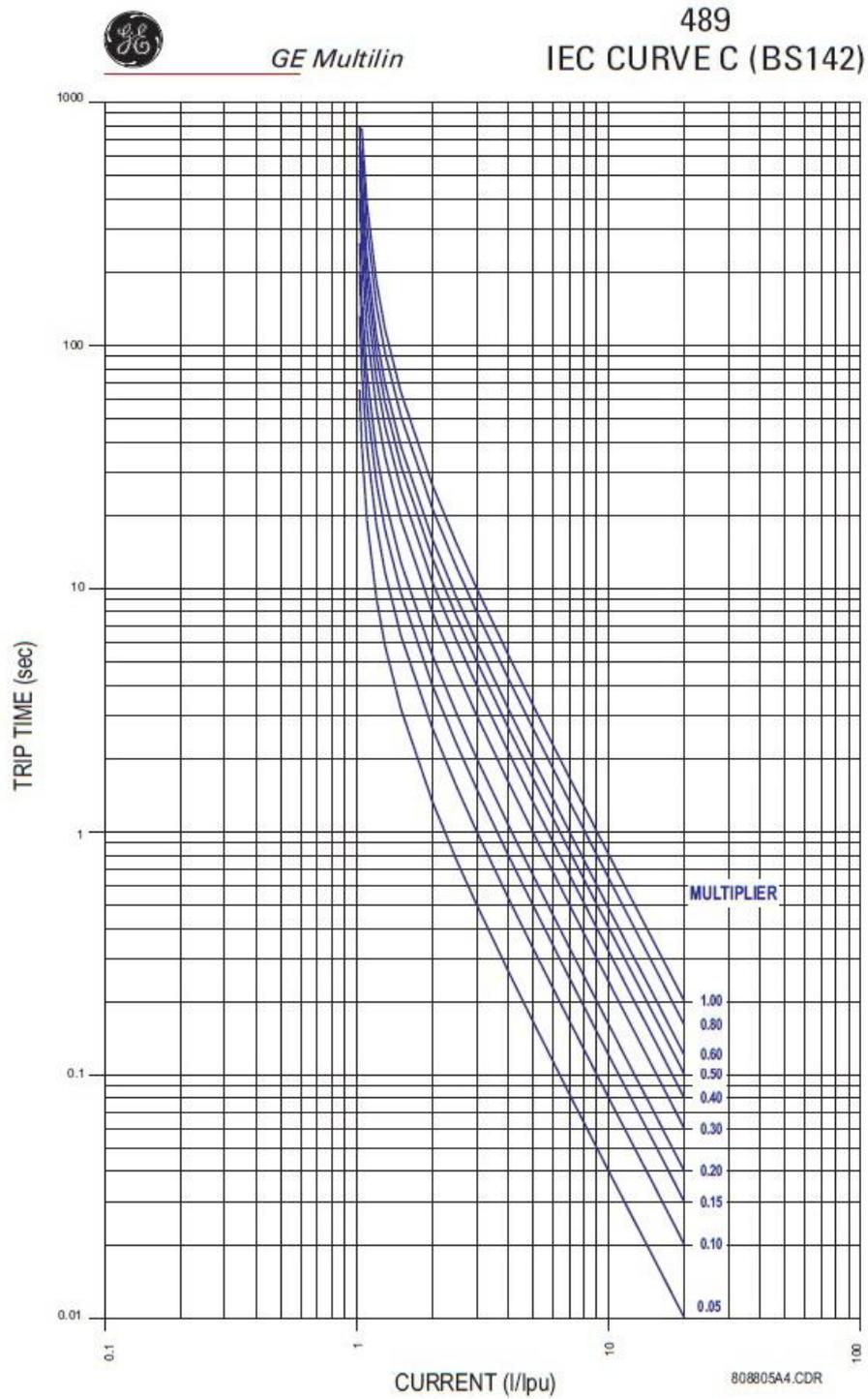
Gambar 2.17 Kurva Karakteristik Standar IEC Curve A^[4]

^[4]Markham, Ontario. 2010. *489 Management Relay Instruction Manual Revision 4.0X*. Canada: GE Multilin. Bab A. Hal: 24



Gambar 2.18 Kurva Karakteristik Standar IEC Curve B^[4]

^[4]Markham, Ontario. 2010. *489 Management Relay Instruction Manual Revision 4.0X*. Canada: GE Multilin. Bab A. Hal: 25



Gambar 2.19 Kurva Karakteristik Standar IEC Curve C^[4]

^[4]Markham, Ontario. 2010. *489 Management Relay Instruction Manual Revision 4.0X*. Canada: GE Multilin. Bab A. Hal: 26



2.11.3 Penyetelan Waktu *Trip* pada Rele GE-SR489 untuk standar IAC^[4]

Standar IAC terdiri dari 4 klasifikasi yaitu, *Extremely Inverse*, *Very Inverse*, *Inverse*, dan *Short Inverse*. Penyetelan Waktu *trip* untuk standar IAC menggunakan rumus:

$$T = M \times \left(A + \frac{B}{\left\{ \left(\frac{I}{I_{pick\ up}} \right) - C \right\}} + \frac{D}{\left\{ \left(\frac{I}{I_{pick\ up}} \right) - C \right\}^2} + \frac{E}{\left\{ \left(\frac{I}{I_{pick\ up}} \right) - C \right\}^3} \right) \dots (2.5)$$

Dimana:

T = Waktu *trip* (s)

M = *Multiplier setpoint* (Tms)

$I_{pick\ up}$ = Arus Kerja (A)

A,B,C,D,E = Konstanta standar IAC

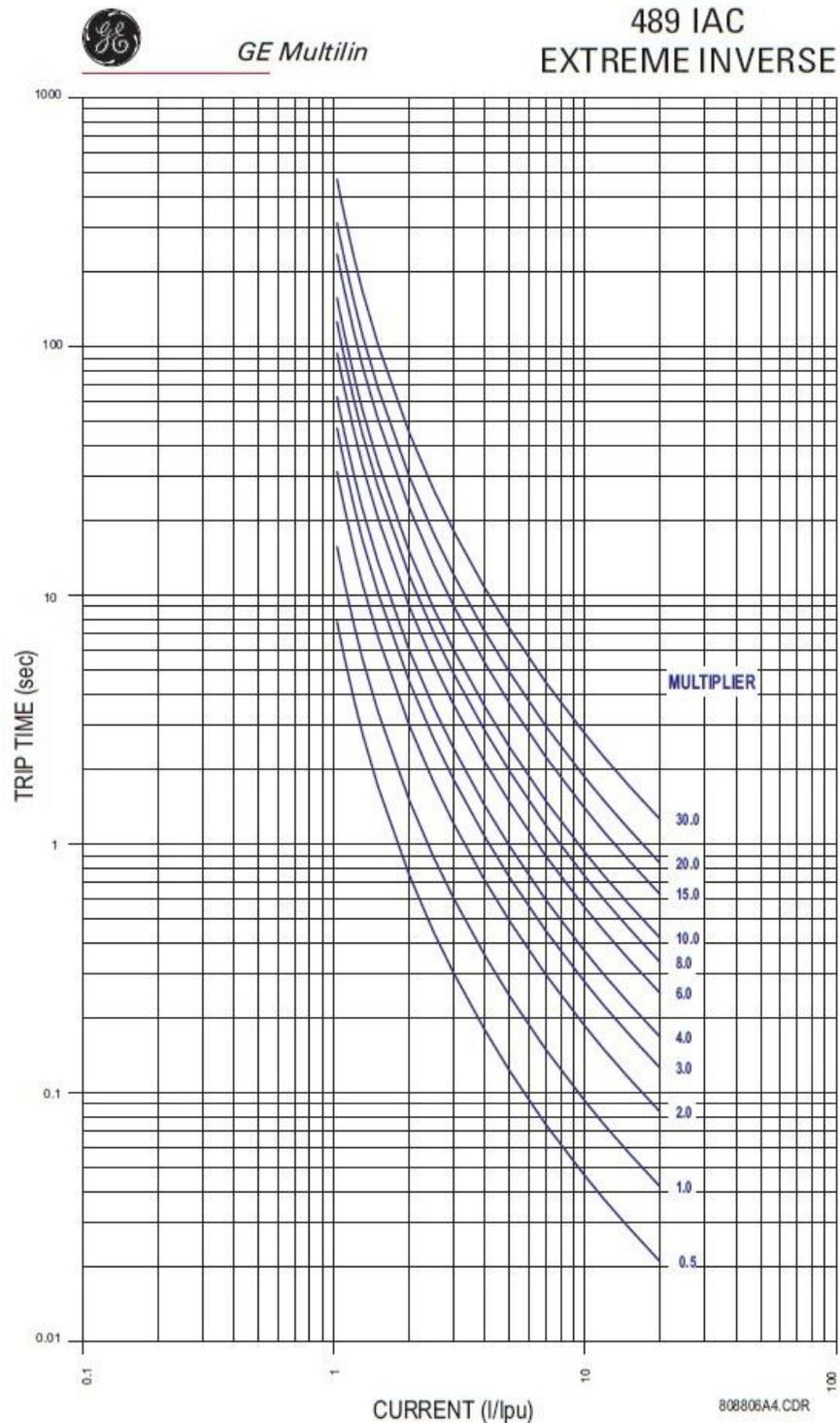
Untuk konstanta standar IAC bisa dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 2.5 Konstanta Standar IAC

IAC Curve Shape	Constants				
	A	B	C	D	E
Extremely Inverse	0.0040	0.6379	0.6200	1.7872	0.2461
Very Inverse	0.0900	0.7955	0.1000	-1.2885	7.9586
Inverse	0.2078	0.8630	0.8000	-0.4180	0.1947
Short Inverse	0.0428	0.0609	0.6200	-0.0010	0.0221

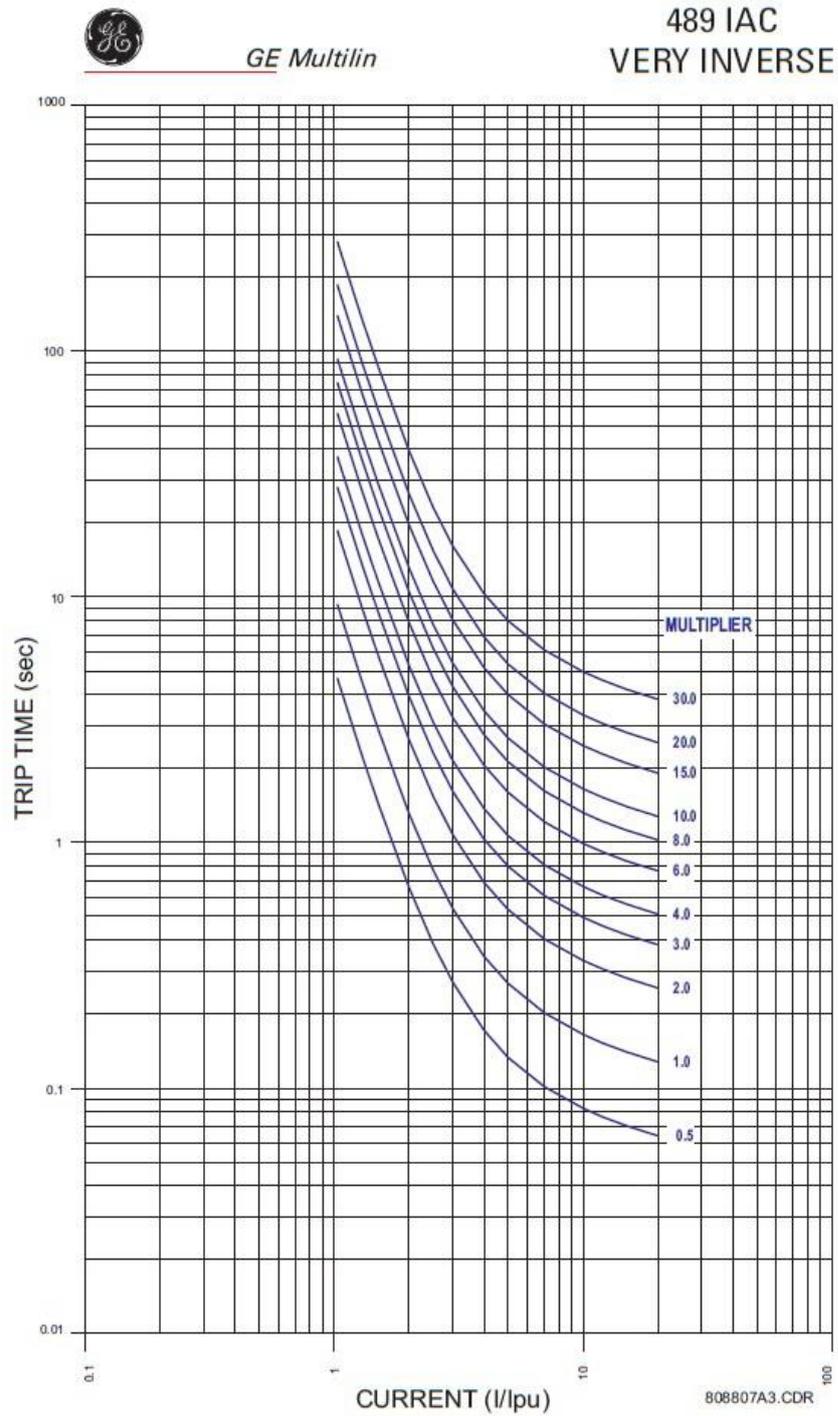
Sama halnya dengan standar ANSI dan IEC, nilai konstanta standar IAC berbeda-beda sesuai dengan klasifikasinya, begitu pula dengan karakteristik dari standar IAC tersebut. Berikut merupakan gambar-gambar dari kurva karakteristik standar IAC sesuai dengan klasifikasinya.

^[4]Markham, Ontario. 2010. *489 Management Relay Instruction Manual Revision 4.0X*. Canada: GE Multilin. Bab 5. Hal: 31



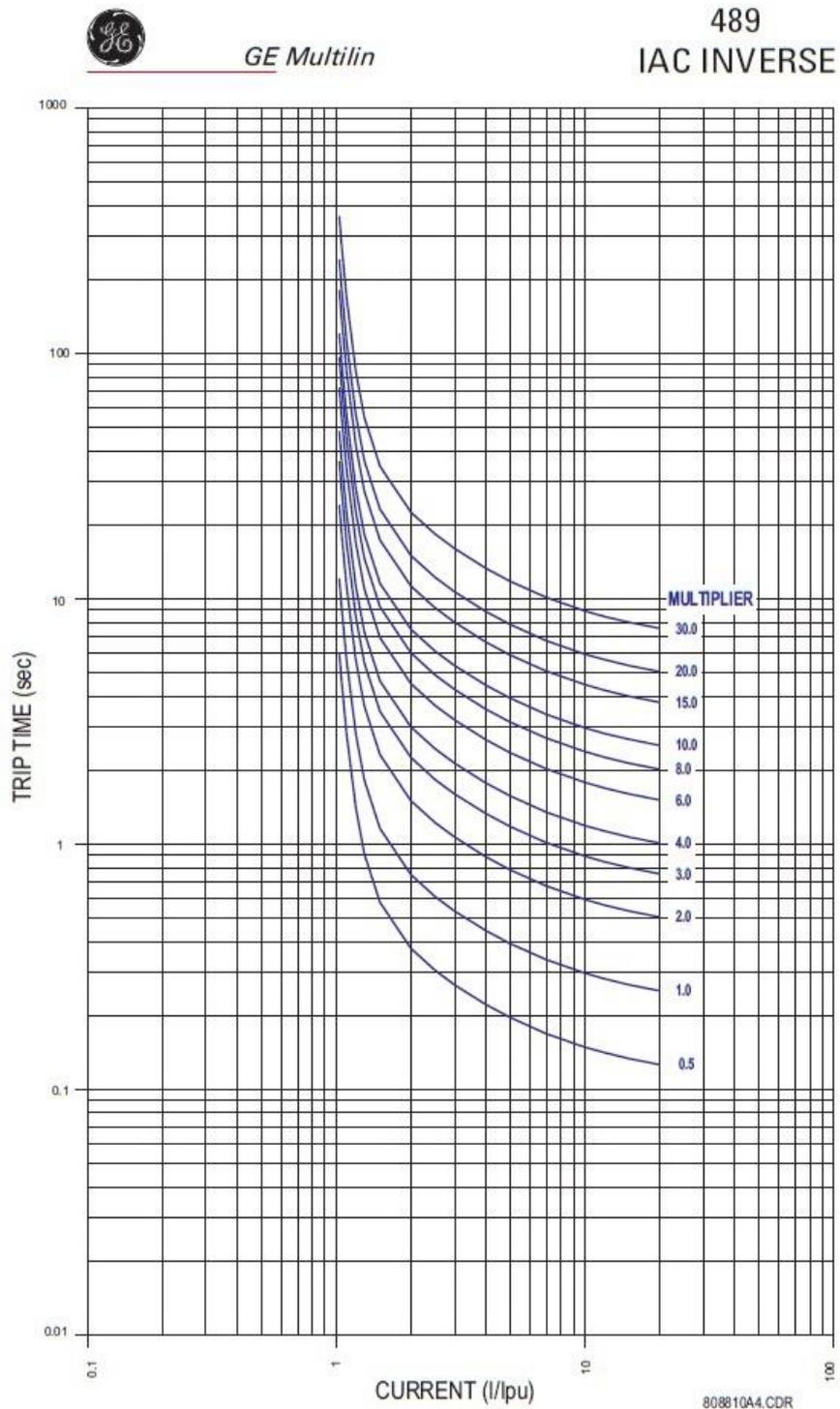
Gambar 2.20 Kurva Karakteristik Standar IAC Extremely Inverse^[4]

^[4]Markham, Ontario. 2010. *489 Management Relay Instruction Manual Revision 4.0X*. Canada: GE Multilin. Bab A. Hal: 23



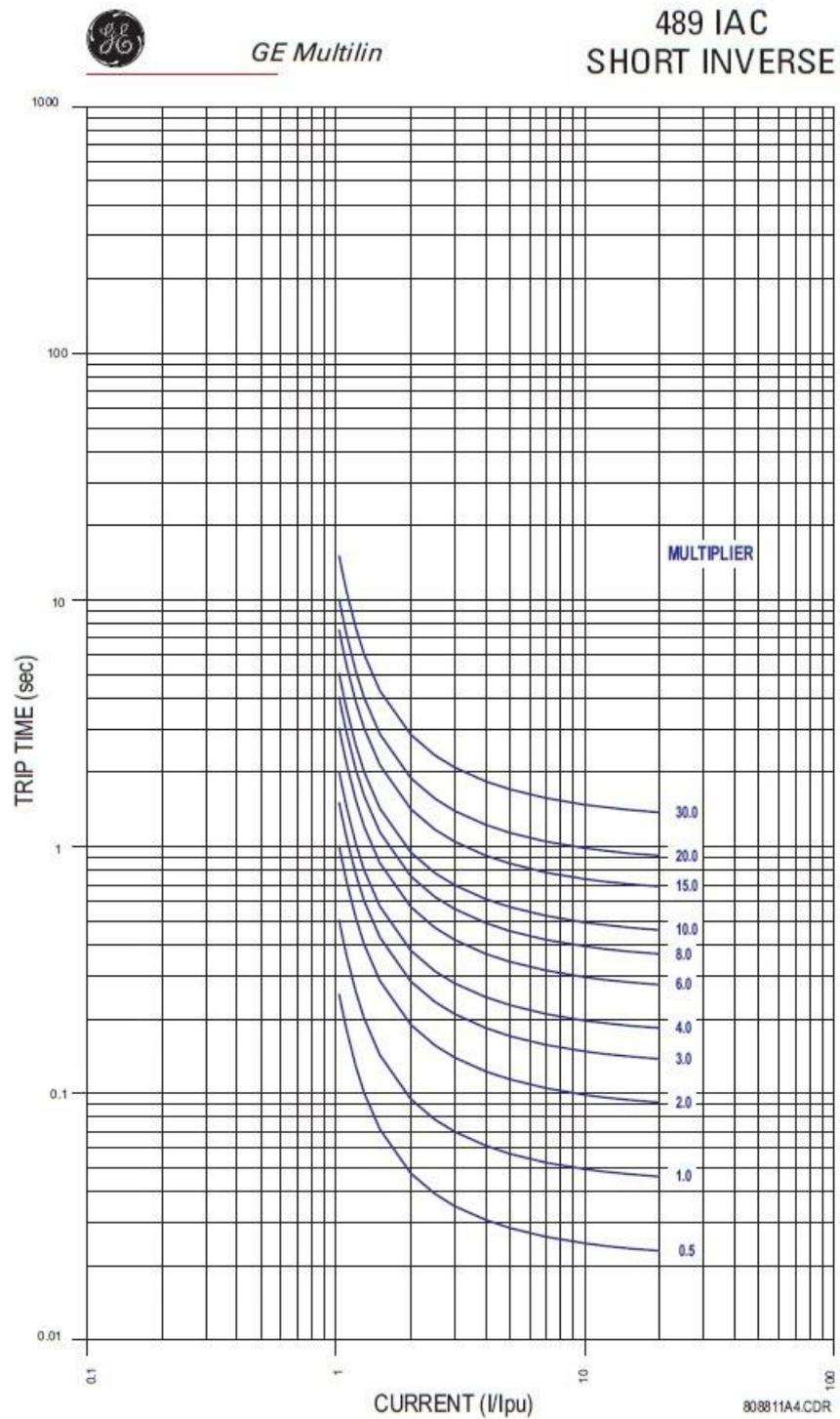
Gambar 2.21 Kurva Karakteristik Standar IAC Very Inverse^[4]

^[4]Markham, Ontario. 2010. *489 Management Relay Instruction Manual Revision 4.0X*. Canada: GE Multilin. Bab A. Hal: 22



Gambar 2.22 Kurva Karakteristik Standar IAC Inverse^[4]

^[4]Markham, Ontario. 2010. *489 Management Relay Instruction Manual Revision 4.0X*. Canada: GE Multilin. Bab A. Hal: 21



Gambar 2.23 Kurva Karakteristik Standar IAC Short Inverse^[4]

^[4]Markham, Ontario. 2010. *489 Management Relay Instruction Manual Revision 4.0X*. Canada: GE Multilin. Bab A. Hal: 20



2.11.4 Penyetelan Waktu *Trip* pada Rele GE-SR489 untuk FlexCurve™^[4]

Untuk penyetelan FlexCurve™ menggunakan *setpoints* untuk memasukkan waktu *trip* yang diikuti arus level pada: 1.03, 1.05, 1.1 sampai 6.0 untuk tahap 0.1 dan 6.5 sampai 20.0 untuk tahap 0.5. selanjutnya relay akan mengkonversi nilai ini ke kurva *continous* dengan garis *interpolation* diantara data nilai. Untuk memasukkan penyetelan FlexCurve™, baca dan pelajari setiap nilai individu dari gambar koordinasi waktu arus lebih dan masukkan seperti tabel dibawah. Selanjutnya pindahkan setiap nilai individu ke rele 489 menggunakan *software* EnerVista 489 Setup atau pada panel *Keys* dan layar.

Tabel 2.6 Waktu *Trip* untuk FlexCurve™^[4]

Pickup I/Ipkp	Trip Time (ms)						
1.03		2.9		4.9		10.5	
1.05		3.0		5.0		11.0	
1.1		3.1		5.1		11.5	
1.2		3.2		5.2		12.0	
1.3		3.3		5.3		12.5	
1.4		3.4		5.4		13.0	
1.5		3.5		5.5		13.5	
1.6		3.6		5.6		14.0	
1.7		3.7		5.7		14.5	
1.8		3.8		5.8		15.0	
1.9		3.9		5.9		15.5	
2.0		4.0		6.0		16.0	
2.1		4.1		6.5		16.5	
2.2		4.2		7.0		17.0	
2.3		4.3		7.5		17.5	
2.4		4.4		8.0		18.0	
2.5		4.5		8.5		18.5	

^[4]Markham, Ontario. 2010. *489 Management Relay Instruction Manual Revision 4.0X*. Canada: GE



2.6		4.6		9.0		19.0	
2.7		4.7		9.5		19.5	
2.8		4.8		10.0		20.0	

2.11.5 Penyetelan Waktu *Trip* pada Rele GE-SR489 untuk Definite Time^[4]

Untuk Penyetelan waktu *trip* Definite Time menggunakan rumus:

$$T = M \times 100ms, \text{ ketika } I > I_{pickup} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana :

T = Waktu *trip* (s)

M = *Multiplier setpoint* (Tms)

I = Arus Nominal (A)

I_{pickup} = Arus Kerja (A)

2.12 Penyetelan Waktu *Reset* Pada Rele GE-SR489^[4]

Untuk penyetelan Waktu *Reset* (T_{reset}) pada rele GE-SR489 ini menggunakan rumus:

$$Time \ reset = \frac{E \times M \times Cr}{100} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana:

Time Reset = Waktu *reset* (s)

E = Kapasitas Energi (100%)

M = *Time dial* (Tms)

Cr = Konstanta Karakteristik (5 untuk ANSI, IAC, Definite Time, FlexCurve™. dan 8 untuk kurva IEC)

^[4]Markham, Ontario. 2010. *489 Management Relay Instruction Manual Revision 4.0X* . Canada: GE Multilin. Bab 5. Hal: 31-32 dan Hal: 29.