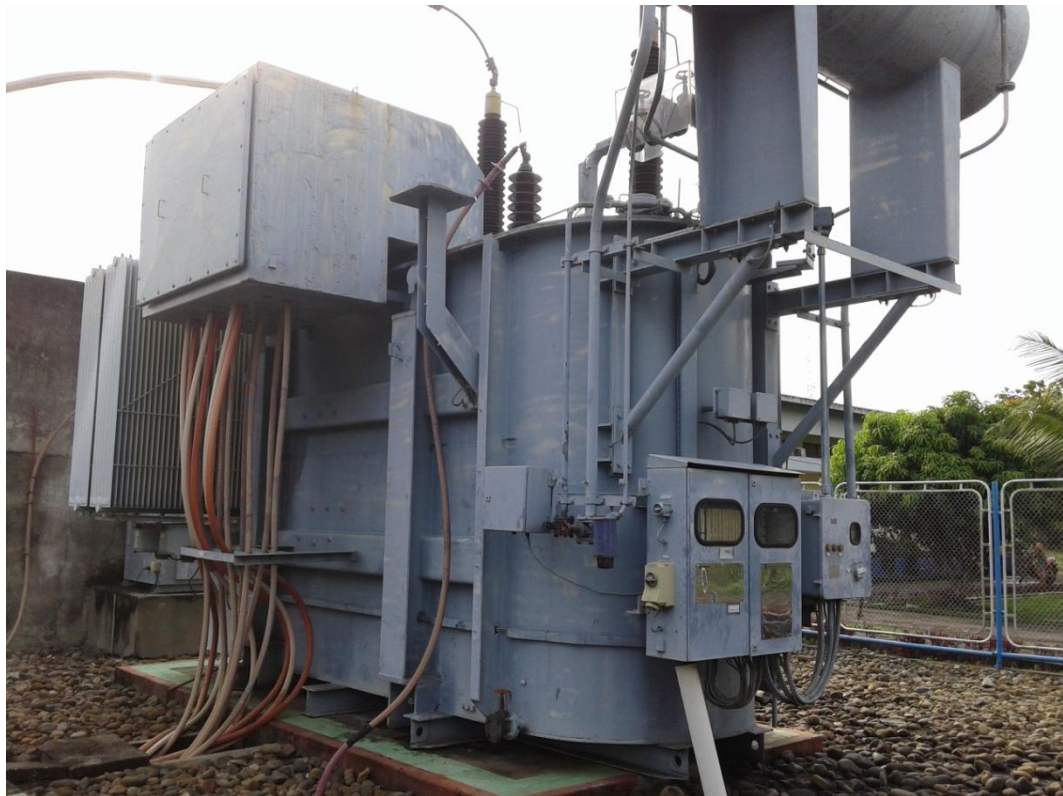


## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Transformator<sup>1</sup>

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**

---

<sup>1</sup> Zuhail. 1995. Dasar Teknik Tenaga Listrik Dan Elektronika Daya, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta. Hal 43

Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi:

1. transformator daya;
2. transformator distribusi;
3. 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 Proteksi<sup>2</sup>

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 masing-masing bagian sistem dapat dipisahkan sedemikian rupa sehingga sistem

---

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

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 :

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

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

1. Dapat diandalkan (*reliable*)
2. Selektif
3. Waktu kerja rele cepat
4. Peka (*sensitif*)
5. Ekonomis dan sederhana

### 2.3 Persyaratan Sistem Proteksi<sup>3</sup>

Tujuan utama sistem proteksi adalah :

1. Mendeteksi kondisi abnormal (gangguan)
2. Mengisolir peralatan yang terganggu dari sistem.

---

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

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 pengamanan 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 peka menyebabkan banyak gangguan tanah, dalam bentuk sentuhan dengan pohon yang tertiup angin, yang tidak bisa terdeteksi. Akibatnya, busur apinya berlangsung lama dan dapat menyambar ke fasa lain, maka relay hubung-singkat yang akan bekerja. Gangguan sedemikian bisa terjadi berulang kali di tempat yang sama yang dapat mengakibatkan kawat cepat putus. Sebaliknya, jika terlalu peka, relay akan terlalu sering trip untuk gangguan yang sangat kecil yang mungkin bisa hilang sendiri atau risikonya 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 terlalu lambat. 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:

1. Gangguan terletak di kawasan pengamanan utamanya dimana ia harus bekerja cepat.
2. Gangguan terletak di seksi berikutnya dimana ia harus bekerja dengan waktu tunda (sebagai pengaman cadangan) atau menahan diri untuk tidak trip.

3. 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:

1. Menghindari kerusakan secara *thermis* pada peralatan yang dilalui arus gangguan serta membatasi kerusakan pada alat yang terganggu.
2. Mempertahankan kestabilan sistem
3. Membatasi ionisasi (busur api) pada gangguan disaluran udara yang akan berarti memperbesar kemungkinan berhasilnya penutupan balik PMT (*reclosing*) dan mempersingkat *dead timenya* (interval waktu antara 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 resikonya.

## 2.4 Fungsi Rele Proteksi<sup>4</sup>

Rele proteksi berfungsi untuk mengamankan peralatan listrik dari kondisi kerja yang kurang normal atau kondisi gangguan. Jika terjadi kondisi tidak normal pada peralatan yang diproteksi maka sistem rele proteksi yang digunakan akan merasakan kondisi tadi dan kemudian member tanda bahaya atau mengerjakan pemutus CB (*Circuit Breaker*).

Pemutus beban atau (*circuit breaker*) merupakan satau rangkaian dengan peralatan rele pengaman. Oleh sebab itu pemutuss beban harus mempunyai kemampuan memutuskan arus hubung singkat sesaat maksimum, yang dapat mengalir melaluinya. Pemutus beban harus mampu juga terhadap penutup pada “kondisi hubung singkat” yang kemudian diputuskan sesuai dengan sinyal yang diterima rele.

Fungsi lain dari rele pengaman adalah untuk mengetahui letak dan jenis gangguan. Sehingga data-data tersebut dapat dipakai untuk pedoman perbaikan peralatan yang rusak dengan membandingkan data-data yang diperoleh dari pengaman orang dan hasil pengukuran otomatis. Biasanya semua data tersebut dianalisa secara efektif guna langkah pencegahan gangguan dan juga mengetahui apa kekurangan-kekurangan yang terjadi pada sistem pengaman termasuk rele itu sendiri.

Jika dirumuskan maka fungsi rele proteksi adalah sebagai berikut :

1. Membunyikan alarm sebagai tanda adanya gangguan dan memberikan informasi mengenai jenis gangguan yang terjadi pada sistem.
2. Membuat semimum mungkin bahaya kerusakan pada peralatan-peralatan lain.
3. Memblok rele-rele lain agar tidak bekerja untuk suatu kondisi tertentu.

---

<sup>4</sup> Arismunandar, A dan S. Kuwahara. 2004. *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik Jilid III*, PT. Pradnya Paramita, Jakarta. Hal : 59

Dengan demikian suatu sistem rele proteksi mempunyai peranan yang penting didalam emngurangu pengaruh kesalahan dan mengurangi kerusakan pada saat terjadi gangguan pada sistem tenaga listrik.

**Tabel 2.1 Contoh Pengaman Transformator Dalam Gardu Induk**

| Jenis Pengaman                                                                                                                                                                          | Persyaratan                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 1. Pencegahan gangguan isolasi<br>a. Karena sutja petir<br>b. Karena beban lebih<br>c. Karena bahan pendingin                                                                           | Arrester<br>Rele Termis<br>Thermometer, Indikator aliran        |
| 2. Pengaman terhadap gangguan dari dalam<br>d. Perlindungan terhadap hubung singkat fasa, antara gulungan dan terhadap tanah :<br>Transformator kecil<br>Transformator besar dan sedang | Rele Bruchhloz<br><br>Rele arus lebih waktu<br>Rele diferensial |

**Pengaman Sistem**

| Jenis Pengaman                                                                                                                                                                             | Persyaratan                                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 1. Pencegahan gangguan isolasi<br>a. Karena surja petir<br>b. Karena beban lebih (kabel)                                                                                                   | Arrester<br>Rele Termis                                       |
| 2. Bila terjadi kerusakan isolasi<br>c. Perlindungan terhadap gangguan ke tanah.<br>d. Perlindungan terhadap hubung singkat dua atau satu fasa untuk pembumian efektif.<br>Jaringan Radial | Gulungan Petersen, Rele Arah<br><br><br>Rele arus lebih waktu |

|                               |                                                                                                      |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Jaringan Tertutup<br>Jaringan | Rele arus lebih dengan Elemen<br>Rele jarak kecepatan tinggi<br>dengan atau tanpa penutup<br>kembali |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## 2.5 Penyebab Kegagalan Proteksi

Sistem proteksi tidak dapat sempurna walaupun sudah diusahakan pemilihan jenis rele yang baik dan penyetelan yang baik, tetapi adakalanya masih gagal bekerja.

Hal yang menimbulkan kegagalan pengaman dapat dikelompokkan sebagai berikut :

- Kegagalan pada rele sendiri.
- Kegagalan suplai arus ke rele. Rangkaian suplai ke rele dari trafo tersebut terbuka atau terhubung singkat.
- Kegagalan sistem suplai arus daerah untuk tripping pemutus tenaga. Hal ini dapat disebabkan baterai lemah karena kurang perawatan, terbukanya atau terhubung singkat rangkaian arus searah.
- Kegagalan pada pemutus tenaga. Kegagalan ini dapat disebabkan karena kumparan trip tidak menerima suplai, kerusakan mekanis ataupun kegagalan pemutusan arus karena besarnya arus hubung singkat melampaui kemampuan dari pemutus tenaganya.

Karena adanya kemungkinan kegagalan pada sistem pengaman maka harus dapat diatasi yaitu dengan penggunaan pengaman cadangan (*Back Up Protection*).

## 2.6 Jenis-Jenis Rele Pengaman

Rele pengaman yang terpasang pada gardu induk, secara umum dapat dibagi menjadi 5 golongan :

- Pengamanan saluran Transmisi.
- Pengamanan Ril.
- Pengamanan transformator.
- Pengamanan alat pengubah fasa.

5. Pengamanan alat-alat pembantu dan rangkain transformator tegangan dan arus.

### **2.6.1 Pengaman Saluran Transmisi dan Distribusi**

Fungsi saluran transmisi dan distribusi adalah sebagai penyalur tenaga listrik dari pusat pembangkit ke gardu induk, atau gardu induk ke gardu induk dan sampai pada akhirnya dapat digunakan oleh konsumen.

Tujuan proteksi saluran transmisi dan distribusi adalah

1. Untuk mengamankan peralatan terhadap kerusakan akibat gangguan.
2. Melokalisir gangguan sehingga pemadaman bagi konsumen di usahakan sekecil mungkin dan sesingkat mungkin.
3. Mencegah jatuhnya sistem sehingga pemadaman total dapat dihindari.

Macam-macam gangguan pada saluran transmisi dan distribusi adalah :

1. Hubung singkat antar fasa
2. Hubung singkat fasa ke tanah
3. Kawat putus

Ditinjau dari lamanya gangguan, ada jenis gangguan :

1. Gangguan Temporer, yaitu yang berlangsung singkat dan dapat hilang dengan sendirinya.
2. Gangguan Permanen, yaitu gangguan yang berlangsung lama dan tidak dapat hilang dengan sendirinya.

Jenis-jenis rele yang terdapat pada proteksi saluran transmisi dan distribusi adalah:

1. Rele jarak, berfungsi untuk pengamanan terhadap gangguan antar fasa maupun gangguan hubung tanah.
2. Rele Differensial Pilot kabel, berfungsi terhadap gangguan antar fasa, maupun gangguan hubung singkat.
3. Rele arus berarah, berfungsi terhadap gangguan antar fasa dan hanya

bekerja pada satu arah saja. Karena rele ini dapat membedakan arah arus gangguan.

4. Rele arus lebih, berfungsi gangguan antar fasa maupun gangguan hubung tanah.
5. Rele gangguan tanah berarah, berfungsi terhadap gangguan hubung tanah.
6. Rele gangguan tanah selektif, berfungsi terhadap gangguan hubung tanah.
7. Rele tegangan lebih, berfungsi terhadap tegangan lebih.
8. Rele penutup balik, ( *Recloser* ), berfungsi untuk menormalkan kembali saluran transmisi dan distribusi akibat gangguan hubung singkat yang temporer.
9. Rele Frekuensi kurang, berfungsi untuk melepas saluran bila terjadi penurunan frekuensi sistem.

### 2.6.2 Pengamanan Ril

Disini, jika rele salah kerja, pengaruhnya terhadap sistem sangat besar (tidak seperti pada pengaman terhadap alat atau saluran). Oleh karena itu perlu diusahakan sungguh-sungguh agar rele tidak salah kerja. Untuk ini perlu dipakai sebagai tambahan rele lain yang mampu mendeteksi gangguan ril, atau rele gangguan ril jenis lain, dan memutuskan ril bila kedua rele bekerja. Persoalan yang meminta perhatian adalah bagaimana mengatasi salah kerja ( *misoperation* ) akibat kejenuhan transformator arus. Usaha-usaha untuk mengatasi hal ini dapat dilakukan baik pada relenya sendiri, dengan memilih prinsip kerja yang sesuai ataupun pada transformator arusnya.

Kesalahan transformator akibat mengalirnya arus yang sangat besar pada waktu terjadi gangguan di luar G.I. harus lebih kecil daripada kepekaan rele yang ada hubungannya dengan arus gangguan minimum pada saat terjadi gangguan didalam G.I. untuk maksud ini rele dan transformator arusnya harus diperiksa bersama-sama sebelumnya.

Cara-cara yang dipakai untuk mengatasi salah kerja adalah sebagai berikut:

- a. Cara differensial tegangan, dengan menaikkan arus shunt yang mengalir

melalui transformator yang jenuh pada saat gangguan diluar, dan menurunkan arus rangkaian differensial.

- b. Cara Menghambat oleh komponen arus searah dan komponen harmonis, disinikekuatan menghambat oleh komponen arus searah dan komponen harmonis yang terkandung didalam arus lilitan tegangan rendah dipakai untuk menahan agar rele tidak bekerja akibat kesalahan transformator arus, dengan demikian maka hal ini memperkuat kekuatan penghambat terhadap gangguan di luar G.I.
- c. Cara perbandingan fasa, jika ada arus gangguan mengalir keluar dari ril maka dengan membandingkan fasanya dapat dilihat apakah gangguan itu terjadi di luar atau di dalam daerah yang dilindungi.
- d. Cara komponen gelombang dasar, karena seperti dalam arus rangkaian differensial dari transformator arus rangkaian differensial dari transformator arus, komponen arus dasarnya sangat besar pada saat terjadi gangguan di ril, maka dipakai rele yang bekerjanya hanya oleh gelombang dasar, atau sdengan rele dengan filter yang melewatkan gelombang dasar.

Supaya hanya ril yang terganggu saja yang jatuh sehingga sistem dapat terus bekerja, diperlukan cara pemutusan secara selektif dari ril yang terganggu tadi, untuk maksud ini dipakai cara-cara berikut :

- a. Cara dengan rele arah arus ( *Current Directional Relay* ) yang mendeteksi arah arus pada rangkaian penghubung ril.
- b. Dalam hal du aril bekerja secara terpisah, dipakai suatu cara dengan memasang rele gangguan ril dengan masing-masing ril, dengan memasang rele perbandingan tegangan di antara ril yang saling berdekatan.

### 2.6.3 Pengamanan Transformator

Rele differensial perbandingan dipakai untuk pengaman hubung singkat antar fasa pada Transformator. Karena hubungannya trafo sisi tegangan tinggi dan sisi tegangan rendah sering berbeda, sehingga terjadi pergeseran fasa, maka hubungan rangkainan sekunder dari trasformatornya arusnya harus dibuat

sedemikian sehingga perubahan fasa itu dikompensasikan.

Salah satu kekhususan dari rele differensial untuk transformator adalah kemungkinan untuk dapat mencegah salah kerja akibat arus serbu ( *in rush* ) pada eksitasi. Sering arus ini melebihi arus kerja dari rele differensial pada awal eksitasinya, dan arus serbu ini hanya mengalir pada salah satu sisi transformator saja, seperti halnya arus gangguan.

#### 2.6.4 Pengamanan Alat Pengubah Fasa

Untuk pengaman kondensator statis dapat digunakan :

- a. Rele beda tegangan, pada kumparan pelepasan dipasang lilitan sekunder, lalu tegangan antara blok di setiap fasa dibandingkan, dan beda tegangan yang timbul pada waktu gangguan pada elemen kondensator dideteksi oleh rele tegangan.
- b. Rele beda arus, disini gangguan dideteksi dengan membandingkan arus antara fasa yang satu dengan fasa yang lain.
- c. Rele tekanan, rele ini mendeteksi perubahan tekanan yang mendadak di dalam tangki kondensator. Untuk mengatasi salah kerja akibat variasi tekanan yang biasa, cara yang dipakai adalah dengan mendeteksi pemuaian yang abnormal dari minyak di dalam tangki.

#### 2.6.5 Pengamanan Alat-alat Pembantu dan Transformator Tegangan

Untuk pengaman transformator pemakaian sendiri dengan sistem pengetahanan netral tidak efektif dipakai rele arus lebih untuk gangguan arus hubung singkat, dan rele tegangan lebih untuk gangguan satu fasa ke tanah.

Untuk pengaman motor tegangan rendah sering dipakai saklar dengan pengjatuhan oleh arus lebih yang mempunyai karakteristik kerja penundaan waktu. Juga banyak dipakai rele beban lebih thermis dan tegangan tak seimbang.

Keadaan abnormal pada transformator tegangan terjadi bila ada hubung singkat pada lilitan, kawat terputus atau pengamanan lumer terputus. Semua ini menyebabkan salah kerja atau gagal kerjanya rele yang mempunyai elemen tegangan dan pengatur tegangan. Oleh karena itu, untuk mengatasi salah kerja

rangkaian rele perlu di cegah bekerjanya bila terjadi keadaan abnormal di atas. Keadaan abnormal itu data dideteksi dengan melihat perbedaan antara tegangan sekunder dari dua transformator tegangan yang dihubungkan dengan ril yang sama dengan menggunakan rele keseimbangan tegangan atau rele beda tegangan.

Pada alat tegangan kapasitansi jika terjadi gangguan hubung singkat pada sisi sekundernya, tegangan terminal dari setiap elemennya akan naik. Ini mungkin dapat merusak isolasinya dan mungkin pula menimbulkan osilasi harmonis. Karena itu tidak hanya perlu dipasang pengaman lumen, tapi arus hubung singkatnya juga perlu dibatasi. Untuk itu sebaiknya dipakai alat tegangan kapasitansi yang sudah dilengkapi dengan pengamanannya.

## 2.7 Rele Arus Lebih ( Over Current Relay)<sup>5</sup>

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 :

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

---

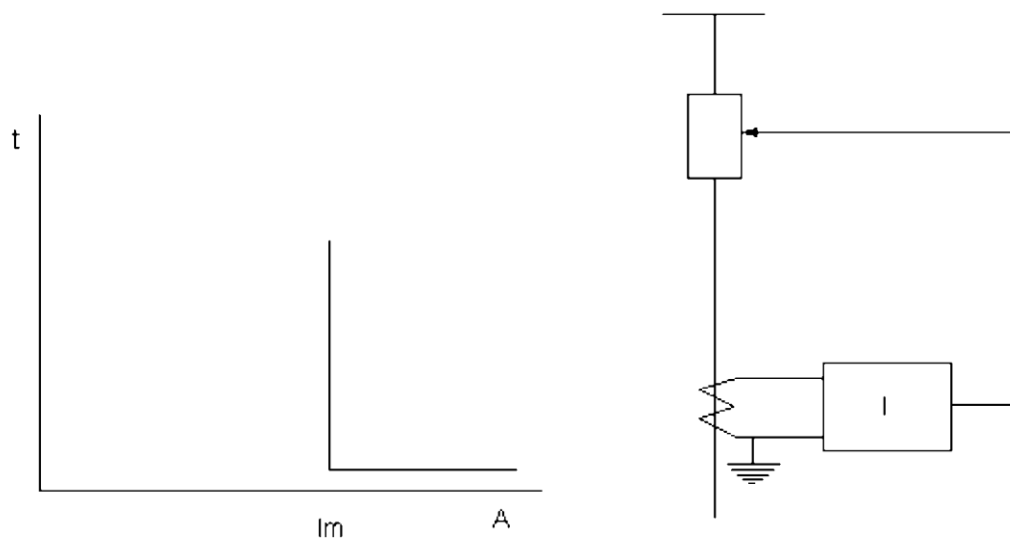
<sup>5</sup> Samaulah, Hazairin. Op. Cit, Hal : 53

### 2.7.1 Karakteristik Waktu Kerja Rele

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

#### 2.7.1.1 Rele Arus Lebih Sesaat (*Moment*)

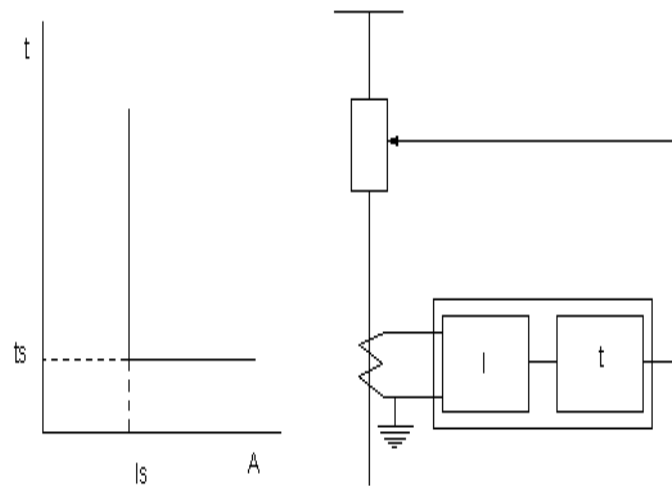
Rele arus lebih dengan karakteristik waktu kerja seketika (*moment*) ialah jika jangka waktu rele mulai saat rele arusnya pick up sampai selesainya kerja rele sangat singkat (20 – 100 ms), yaitu tanpa penundaan waktu. Rele ini umumnya dikombinasikan dengan rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu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



Gambar 2.2 Karakteristik Rele Arus Lebih Sesaat

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

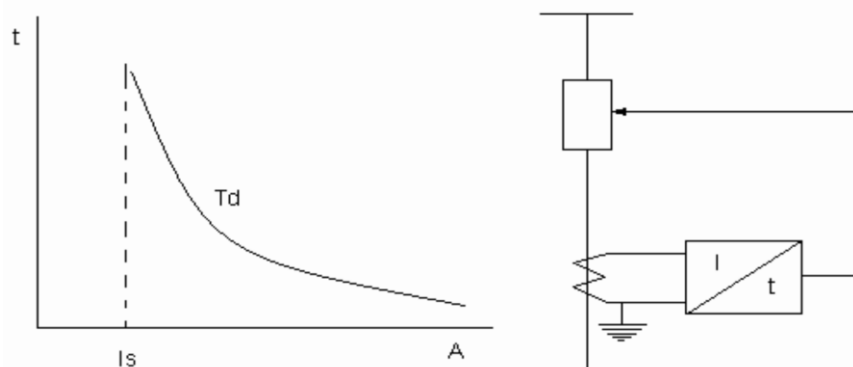
Rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu ialah jika jangka waktu mulai rele arus pick up sampai selesainya kerja rele diperpanjang dengan nilai tertentu dan tidak tergantung dari besarnya arus yang menggerakkan.



Gambar 2.3 Karakteristik Rele Arus Lebih *Definite Time*

#### 2.7.1.3 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*

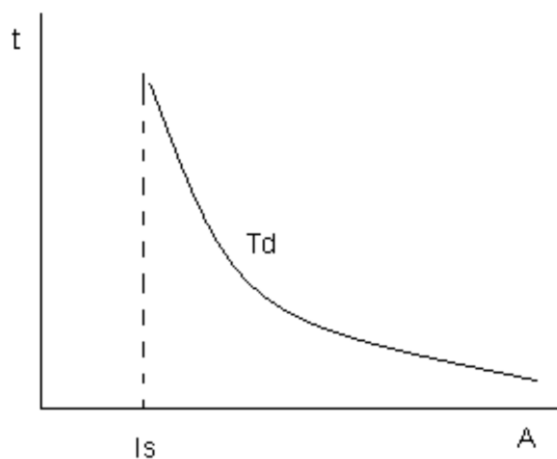
Bentuk perbandingan terbalik dari waktu arus ini sangat bermacam-macam tetapi dapat digolongkan menjadi :

- Berbanding terbalik (*inverse*)
- Sangat berbanding terbalik (*very inverse*)

- c. Sangat berbanding terbalik sekali (*extremely inverse*)

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

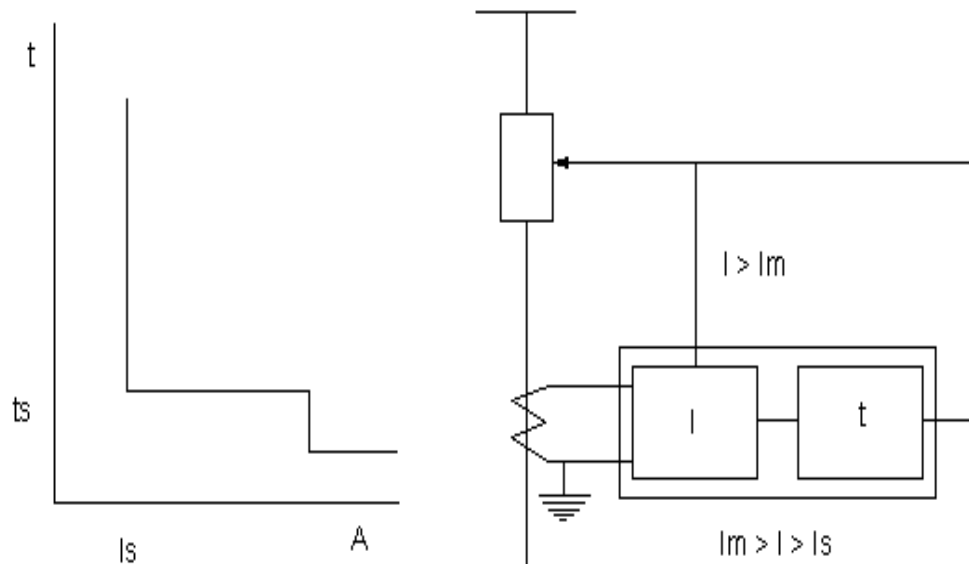
Relay arus lebih dengan karakteristik IDMT ( *Inverse Definite Minimum Time* ) mempunyai karakteristik kombinasi antara *relay* arus lebih waktu terbalik dan waktu tertentu. Didaerah awal seperti *relay* arus lebih waktu terbalik dan kemudian menjadi waktu tertentu.



Gambar 2.5 Karakteristik Rele Arus Lebih IDMT

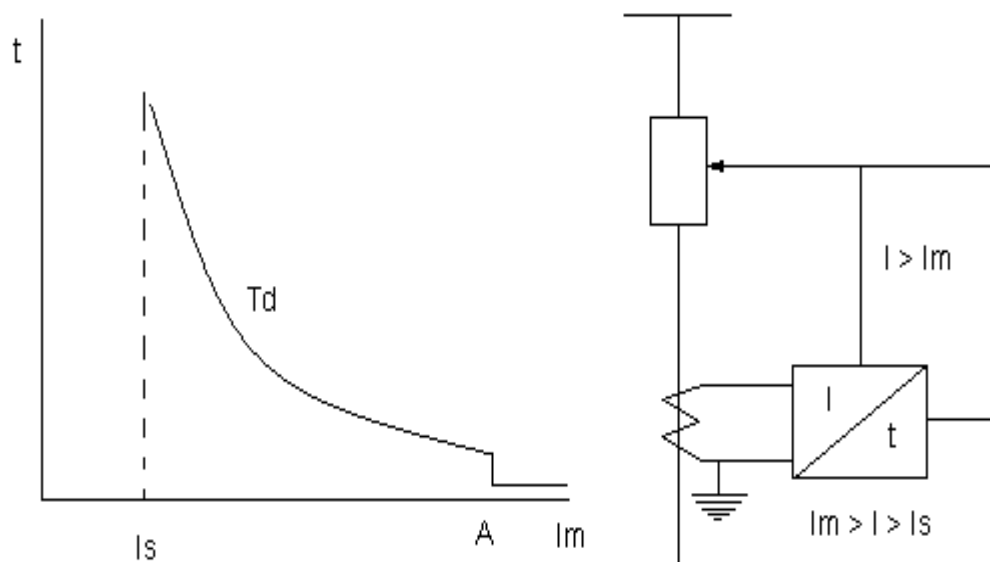
#### 2.7.1.5 Kombinasi Relay Arus Lebih Waktu tertentu, Terbalik dan IDMT Dengan Waktu Seketika

Relay arus lebih waktu seketika umumnya tidak berdiri sendiri tetapi digabung 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.

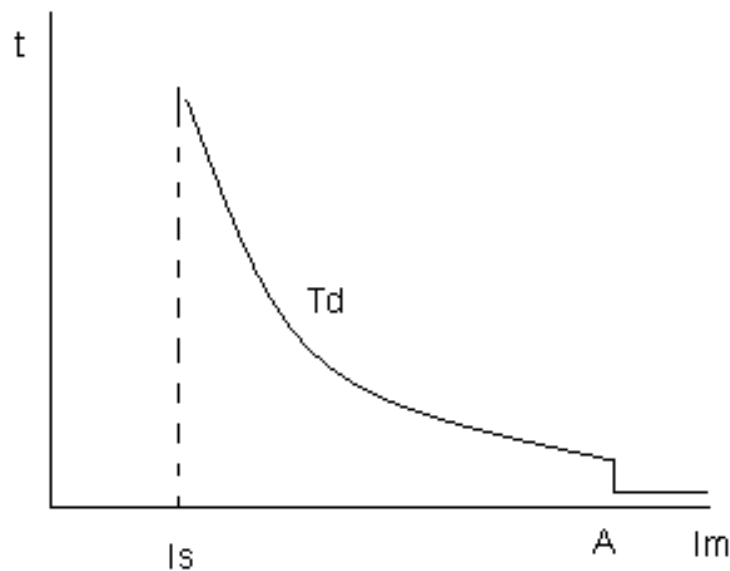


**Gambar 2.6 Kombinasi Karakteristik Waktu Tertentu dan Seketika**

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**

### 2.7.2 Setting Over Current Relay<sup>6</sup>

#### 1. 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:

$$I_{set} \text{ (prim)} = I_{set} \times I_{beban} \dots\dots\dots (2.1)$$

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.

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

Dimana :

$I_{set} \text{ (prim)}$  = Arus yang disetting di primer

$I_{set} \text{ (sek)}$  = Arus yang disetting di sekunder

$I_{beban}$  = Arus tertinggi pada beban di penyulang

<sup>6</sup> Sarimun, Wahyudi.2012. Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik, Garamond, Depok. Hal 178

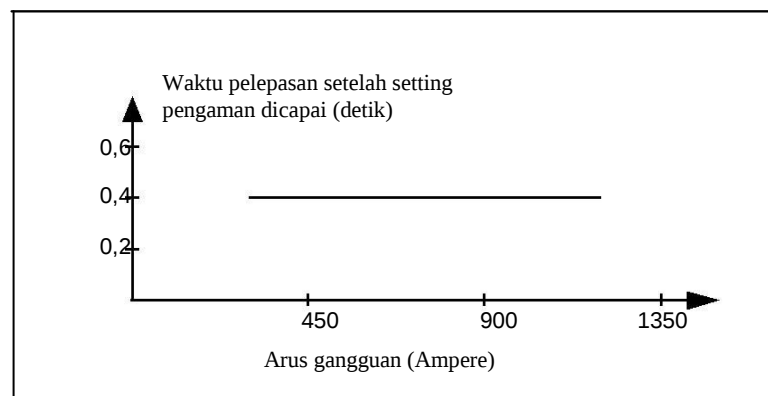
### 2.7.3 Prinsip Dasar Perhitungan Penyetelan Waktu

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 :

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

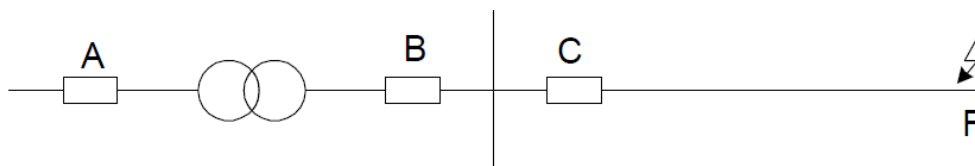
Untuk rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu, waktu kerjanya tidak dipengaruhi oleh besarnya arus. Biasanya, setting waktu kerja pada rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu adalah sebesar 0,2 - 0,4 detik.



**Gambar 2.9 Karakteristik Rele dengan Waktu Tetap**

Dari gambar 2.11 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 2.10 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 pengamananan yang baik, yang terpenting adalah menentukan beda waktu ( $\Delta$ ) antara dua tingkat pengaman agar pengamananan 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  $\Delta t$  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  $\Delta t$  ditentukan sebesar 0,4 – 0,5 detik dan untuk rele dengan ketelitian yang lebih nilai  $\Delta t$  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 :

$$tms = \frac{t_{set} \times \left( \frac{I_{fault}}{I_{set}} \right)^{\alpha} - 1}{\beta} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana :

tms = factor pengali terhadap waktu

$I_{fault}$  = Arus gangguan (Ampere)

$I_{set}$  = Arus setting (Ampere)

$t_{set}$  = Waktu setting (detik)

$\alpha$  = 0,02

$\beta$  = Konstanta inverse (0.14)

Untuk menyesuaikan perhitungan penyetelan rele arus lebih, maka persamaan untuk menyetel  $t$  adalah:<sup>7</sup>

$$t = \frac{tms \times \beta}{\left(\frac{I_{fault}}{I_{set}}\right)^{\alpha} - 1} \dots\dots\dots(2.4)$$

**Dimana :**

$t$  = Waktu setting

$tms$  = Factor pengali terhadap waktu

$\beta$  = Konstanta inverse (0.14)

$I_{fault}$  = Arus gangguan (Ampere)

$I_{set}$  = Arus Setting (Ampere)

$\alpha$  = 0,02

## 2.8 Gangguan Hubung Singkat

Analisa hubung singkat (yang mungkin terutama pada setiap titik di dalam sistem) yang di pelajari terutama adalah besarnya kontribusi arus gangguan hubung singkat setiap cabang (bisa di Transmisi, Distribusi, Trafo maupun dari sumber pembangkit) disamping perlu diketahuinya pula besar tegangan pada setiap node. Besar arus dan atau tegangan inilah yang diperlukan untuk penyetelan proteksi, sehingga bila gangguan hubung singkat itu benar-benar terjadi di dalam sistem, peralatan proteksi dapat bekerja mengamankan bagian sistem yang terganggu sesuai yang diharapkan.

---

<sup>7</sup> ibid, Hal : 178

Gangguan yang mungkin terjadi didalam sistem 3 fasa adalah :

1. Gangguan 3 fasa.
2. Gangguan 2 fasa (ke tanah).

Gangguan 3 fasa, kemungkinan terjadinya adalah dari sebab putusnya salah satu kawat fasa yang letaknya paling atas pada Transmisi / Distribusi dengan konfigurasi kawat antar fasanya disusun secara vertical. Kemungkinan terjadinya memang sangat kecil, tetapi dalam analisisnya tetap harus diperhitungkan. Kemungkinan lainnya adalah akibat pohon yang cukup tinggi berayun sewaktu tertiup angin kencang sehingga menyentuh ketiga kawat fasa transmisi atau distribusi.

Gangguan 2 fasa, kemungkinan terjadinya bisa disebabkan oleh putusnya kawat fasa tengah pada kawat transmisi atau distribusi dengan konfigurasi tersusun vertical. Kemungkinan lain adalah dari sebab rusaknya isolator di transmisi distribusi sekaligus dua fasa. Gangguan ini biasanya menjadi gangguan dua fasa ke tanah. Atau bisa juga akibat *back flashover* antara tiang dan dua kawat fasa sekaligus sewaktu transmisi distribusi yang mempunyai tahanan kaki tiang yang tinggi tersambar petir, dan lain-lain.

### 2.8.1 Gangguan 3 Fasa<sup>8</sup>

Rumus dasar yang digunakan untuk menghitung besarnya arus gangguan hubung singkat 3 Fasa adalah :

$$I = \frac{V}{Z} \text{ (A)} \dots\dots\dots (2.5)$$

dimana :

I = Arus gangguan 3 fasa,

V = Tegangan Fasa netral sistem (kV) =  $\frac{kV}{\sqrt{3}} = V_{ph}$

Z = Impedansi urutan positif ( $Z_{1eq}$ )

---

<sup>8</sup> Arismunandar, A dan S. Kuwahara. 2004. *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik Jilid II*, PT. Pradnya Paramita, Jakarta. Hal : 73

Sehingga arus gangguan hubung singkat 3 fasa dapat dihitung sebagai berikut :

$$I_{3\phi} = \frac{V_{ph}}{Z_{1eq}} \text{ (A)} \dots\dots\dots (2.6)$$

dimana,

$I_{3\text{ fasa}}$  = Arus yang mengalir pada setiap fasa sewaktu terjadi gangguan hubung singkat disuatu titik di dalam sistem (dalam Ampere).

$V_{ph}$  = Besar tegangan tiap fasa terhadap netral sistem (dalam Volt).

$Z_{1eq}$  = Impedansi ekivalen urutan positif.

Setelah mendapatkan impedansi ekivalen sesuai dengan lokasi gangguan, selanjutnya perhitungan arus gangguan hubung singkat dapat dihitung dengan menggunakan rumus dasar seperti yang sudah dijelaskan, hanya saja impedansi ekivalen mana yang dimasukkan ke dalam rumus dasar tersebut adalah tergantung dari jenis gangguan hubung singkatnya, dimana gangguan hubung singkat itu bisa gangguan hubung singkat 3 fasa.

Gangguan-gangguan tersebut dihitung untuk lokasi gangguan terjadi pada 25%, 50%, 75%, 100% panjang feeder. Dalam hal ini dianggap nilai  $Z_{1eq} = Z_{2eq}$ .

## 2.8.2 Menghitung Impedansi

Dalam menghitung impedansi dikenal tiga macam impedansi urutan yaitu :

1. Impedansi urutan positif (  $Z_1$  ), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan positif.
2. Impedansi urutan negatif (  $Z_2$  ), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan negatif.
3. 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)

### 2.8.2.1 Impedansi sumber<sup>9</sup>

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:

$$X_{sc} = \frac{kV^2}{MVA_{sc}} \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana :

$X_{sc}$  = Impedansi sumber (ohm).

$kV^2$  = 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 :

$$X_{sc}(\text{sisi } 20 \text{ kV}) = \frac{20}{150^2} \cdot X_s(\text{sisi } 150 \text{ kV}) \dots\dots\dots (2.8)$$

### 2.8.2.2 Reaktansi Transformator

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.

---

<sup>9</sup> Sarimun, Wahyudi. Op. Cit., Hal : 164

Langkah pertama mencari nilai ohm pada 12,40% untuk trafo pada 20 kV, yaitu dengan menggunakan rumus :

$$X_t (\text{ pada } 100\% ) = \frac{kV^2}{MVA} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana :

$Z_B$  = 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 :

$$X_{t1} = X_{t1} (\%) \times X_{t1} (\text{Ohm})$$

- 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  $\Delta Y$  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  $9 \text{ s/d } 14 \times X_{t1}$

### 2.8.2.3 Impedansi Feeder

Data impedansi feeder bisa didapat dengan cara dihitung dan tabel



Impedansi yang akan dihitung disini tergantung dari besarnya impedansi /km dari feeder yang bersangkutan, dimana besar nilainya ditentukan dari konfigurasi tiang yang digunakan untuk jaringan SUTM atau dari jenis kabel tanah untuk jaringan SKTM.

Dengan demikian nilai impedansi feeder untuk lokasi 25%, 50%, 75%, 100% panjang feeder, sehingga dapat di hitung sebagai berikut :

$$\text{Impedansi Feeder} = \text{Panjang Feeder} \times Z \text{ per km} \dots\dots\dots (2.10)$$

Simulasikan lokasi gangguan.

$$\text{Per 25\% 50\% 75\% 100\%} \times \text{panjang Feeder} \times Z \text{ per km} \dots\dots\dots (2.11)$$

#### 2.8.2.4 Impedansi Ekvivalen Jaringan

Perhitungan yang akan dilakukan disini adalah besarnya nilai impedansi tersambung seri, maka perhitungan  $Z_{1eq}$  dan  $Z_{2eq}$  dapat langsung menjumlahkan impedansi-impedansi tersebut.

Perhitungan  $Z_{1eq}$  dan  $Z_{2eq}$  adalah :

$$Z_{1eq} = Z_{2eq} = Z_s = Z_{tl} = Z_{1 \text{ feeder}} \dots\dots\dots (2.12)$$