

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Sistem Proteksi**

Sistem proteksi tenaga listrik merupakan sistem pengamanan pada peralatan peralatan yang terpasang pada sistem tenaga listrik, seperti generator, busbar, transformator, saluran udara tegangan tinggi, saluran kabel bawah tanah, dan lain sebagainya terhadap kondisi abnormal operasi sistem tenaga listrik tersebut.

##### **2.1.1. Fungsi sistem proteksi**

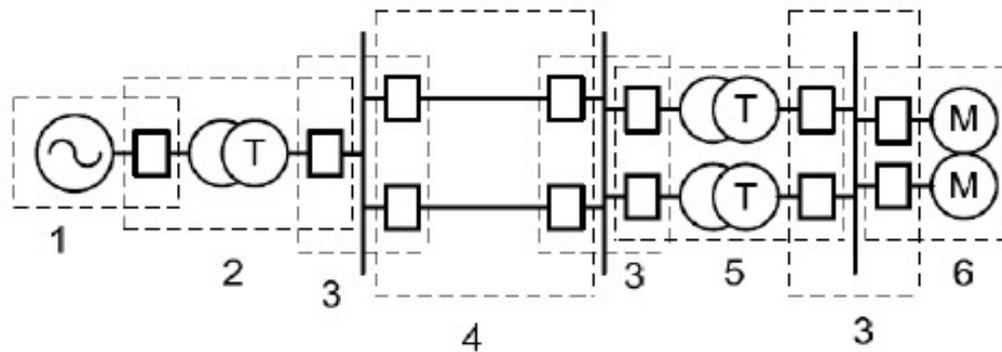
Kegunaan sistem proteksi tenaga listrik, antara lain untuk :

- a. Mencegah kerusakan peralatan-peralatan pada sistem tenaga listrik akibat terjadinya gangguan atau kondisi operasi sistem yang tidak normal.
- b. Mengurangi kerusakan peralatan-peralatan pada sistem tenaga listrik akibat terjadinya gangguan atau kondisi operasi sistem yang tidak normal.
- c. Mempersempit daerah yang terganggu sehingga gangguan tidak melebar pada sistem yang lebih luas.
- d. Memberikan pelayanan tenaga listrik dengan keandalan dan mutu tinggi kepada konsumen.
- e. Mengamankan manusia dari bahaya yang ditimbulkan oleh tenaga listrik.

##### **2.1.2. Daerah sistem proteksi**

Di dalam sistem proteksi tenaga listrik, seluruh komponen harus diamankan dengan tetap menekankan selektivitas kerja peralatan/relay pengamanan.

Untuk mencapai hal ini, sistem tenaga listrik dibagi menjadi daerah-daerah (zona) pengamanan seperti terlihat pada gambar 2.1 berikut ini



Gambar 2.1. Daerah Pengamanan Pada Sistem Tenaga Listrik

Keterangan :

1 = Zone Generator

4 = Zone Transmisi

2 = Zone Transformator Step-Up

5 = Zone Transformator Step-Down

3 = Zone Busbar

6 = Zone Beban

Setiap daerah proteksi pada umumnya terdiri atas satu atau lebih elemen sistem tenaga listrik. Misalnya generator, busbar, transformator, transmisi, dan lain-lain. Agar seluruh sistem tenaga listrik dapat diamankan, maka harus ada daerah yang tumpang-tindih (overlap). Artinya ada elemen sistem yang diamankan oleh dua daerah pengamanan. Setiap daerah pengaman dijaga oleh relay yang sesuai dengan karakteristik peralatan yang diamankan. Pada umumnya yang menjadi batas pengamanan antar daerah pengamanan adalah trafo arus yang mencatu ke rele.

### 2.1.3. Persyaratan Sistem Proteksi

Pada sistem proteksi tenaga listrik, ada beberapa persyaratan yang harus dipenuhi demi pengamanan peralatan-peralatan listrik yang ada. Untuk itu ada

beberapa persyaratan yang harus dipenuhi oleh suatu sistem proteksi, seperti berikut ini :

#### 1. Keterandalan (Reliability)

Pada kondisi normal (tidak ada gangguan) relay tidak bekerja. Jika terjadi gangguan maka relay tidak boleh gagal bekerja dalam mengatasi gangguan. Kegagalan kerja relay dapat mengakibatkan alat yang diamankan rusak berat atau gangguannya meluas sehingga daerah yang mengalami pemadaman semakin luas. Relay tidak boleh salah kerja, artinya relay yang seharusnya tidak bekerja, tetapi bekerja. Hal ini menimbulkan pemadaman yang tidak seharusnya dan menyulitkan analisa gangguan yang terjadi. Keandalan relay pengamanan ditentukan dari rancangan, pengerjaan, beban yang digunakan, dan perawatannya.

#### 2. Selektivitas (Selectivity)

Selektivitas berarti relay harus mempunyai daya beda (discrimination), sehingga mampu dengan tepat memilih bagian yang terkena gangguan. Kemudian relay bertugas mengamankan peralatan. Relay mendeteksi adanya gangguan dan memberikan perintah untuk membuka pemutus tenaga dan memisahkan bagian yang terganggu. Bagian yang tidak terganggu jangan sampai dilepas dan masih. Jika terjadi pemutusan hanya terbatas pada daerah yang terganggu.

#### 3. Sensitivitas (Sensitivity)

Relay harus mempunyai kepekaan yang tinggi terhadap besaran minimal (kritis) sebagaimana direncanakan. Relay harus dapat bekerja pada awalnya terjadinya gangguan. Oleh karena itu, gangguan lebih mudah diatasi pada awal kejadian. Hal ini memberi keuntungan dimana kerusakan peralatan yang harus diamankan menjadi kecil. Namun demikian, relay juga harus stabil.

#### 4. Kecepatan Kerja

Relay pengamanan harus dapat bekerja dengan cepat. Jika ada gangguan, misalnya isolasi bocor akibat adanya gangguan tegangan lebih terlalu lama

sehingga peralatan listrik yang diamankan dapat mengalami kerusakan. Namun demikian, relay tidak boleh bekerja terlalu cepat (kurang dari 10 ms). Disamping itu, waktu kerja relay tidak boleh melampaui waktu penyelesaian kritis (critical clearing time). Pada sistem yang besar atau luas, kecepatan kerja relay pengaman mutlak diperlukan karena untuk menjaga kestabilan sistem agar tidak terganggu. Hal ini untuk mencegah relay salah kerja karena transient akibat surja petir.

## 5. Ekonomis

Satu hal yang harus diperhatikan sebagai persyaratan relay pengaman adalah masalah harga atau biaya. Relay tidak akan diaplikasikan dalam sistem tenaga listrik, jika harganya sangat mahal. Persyaratan reliabilitas, sensitivitas, selektivitas dan kecepatan kerja relay hendaknya tidak menyebabkan harga relay tersebut menjadi mahal.

### **2.2. Peralatan-Peralatan Sistem Proteksi**

Untuk mengamankan dari adanya gangguan, dilakukan dengan memasang peralatan-peralatan sistem proteksi. Sedangkan untuk menghilangkan gangguan dengan cepat oleh sistem perlingkungannya, diperlukan sistem operasi yang cepat dan benar. Suatu sistem proteksi/pengaman terdiri dari komponen alat-alat utama meliputi:

1. Pemutus Tenaga
2. Transformator Arus
3. Transformator tegangan
4. Pemisah
5. Arester
6. Rele Proteksi

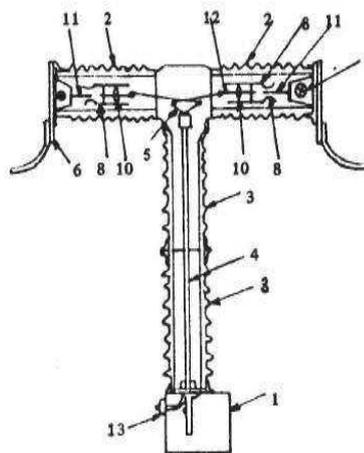
### 2.2.1 Pemutus tenaga (PMT)

Pemutus Tenaga (PMT) merupakan peralatan saklar / switching mekanis, yang mampu menutup, mengalirkan dan memutus arus beban dalam kondisi normal serta mampu menutup, mengalirkan (dalam periode waktu tertentu) dan memutus arus beban dalam spesifik kondisi abnormal / gangguan seperti kondisi short circuit / hubung singkat.

Syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh suatu PMT agar dapat melakukan hal-hal diatas, adalah sebagai berikut:

1. Mampu menyalurkan arus maksimum sistem secara terus-menerus.
2. Mampu memutuskan dan menutup jaringan dalam keadaan berbeban maupun terhubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus tenaga itu sendiri.
3. Dapat memutuskan arus hubung singkat dengan kecepatan tinggi agar arus hubung singkat tidak sampai merusak peralatan sistem, membuat sistem kehilangan kestabilan, dan merusak pemutus tenaga itu sendiri. Setiap PMT dirancang sesuai dengan tugas yang akan dipikulnya, ada beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam rancangan suatu PMT, yaitu:
  1. Tegangan efektif tertinggi dan frekuensi daya jaringan dimana pemutus daya itu akan dipasang. Nilainya tergantung pada jenis pentanahan titik netral sistem.
  2. Arus maksimum kontinyu yang akan dialirkan melalui pemutus daya. Nilai arus ini tergantung pada arus maksimum sumber daya atau arus nominal beban dimana pemutus daya tersebut terpasang
  3. Arus hubung singkat maksimum yang akan diputuskan pemutus daya tersebut.

4. Lamanya maksimum arus hubung singkat yang boleh berlangsung. hal ini berhubungan dengan waktu pembukaan kontak yang dibutuhkan.
5. Jarak bebas antara bagian yang bertegangan tinggi dengan objek lain disekitarnya.
6. Jarak rambat arus bocor pada isolatornya.
7. Kekuatan dielektrik media isolator sela kontak.
8. Iklim dan ketinggian lokasi penempatan pemutus daya.



Gambar 2.2 Bagian-bagian PMT

Keterangan :

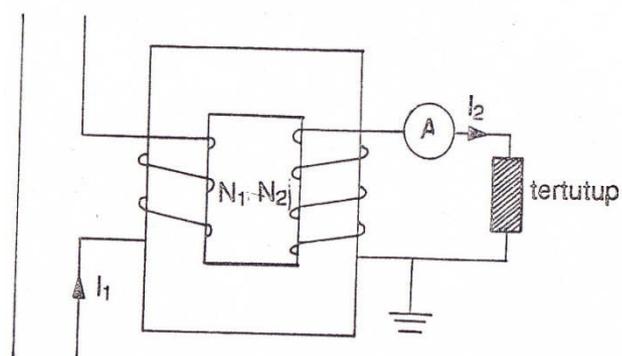
1. Mekanisme penggerak (operating mechanism).
2. Pemutus (interrupter).
3. Isolator penyangga dari porselen rongga (hollow support insulator porcelen).
4. Batang penggerak.
5. Penyambung diantara no.4 dan no. 12 (linkages).
6. Terminal-terminal.
7. Saringan (filters).
8. Silinder bergerak (movable cylinder).
9. Torak tetap (fixed piston)
10. Kotak tetap (fixed contact)



Gambar 2.3. PMT 150 KV

### 2.2.2. Transformator arus

Transformator arus digunakan untuk mengukur arus beban suatu rangkaian dengan menggunakan transformator arus maka arus beban yang besar dapat diukur hanya dengan menggunakan alat ukur (ammeter) yang tidak terlalu besar.



Gambar 2.4. Transformator Arus

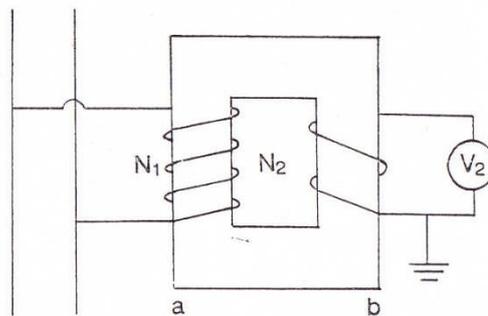
Dengan mengetahui perbandingan transformasi  $\frac{N_1}{N_2}$  dan pembacaan ammeter (A), arus beban dapat dihitung.

Bila transformator dianggap ideal maka arus beban :  $I_2 = I_1 \times \dots$

### 2.2.3. Transformator tegangan

Transformator tegangan digunakan untuk mengukur tegangan. Dengan mengetahui  $N_1$  dan  $N_2$ , membaca tegangan  $V_2$ , serta menganggap transformator ideal maka tegangan  $V_1$  adalah :

$$V_1 = V_2 \times \frac{N_1}{N_2}$$



Gambar 2.5. Transformator Teganga

### 2.2.4. Pemisah

Pemisah adalah suatu alat untuk memisahkan tegangan pada peralatan instalasi tegangan tinggi. Ada dua macam fungsi Pms, yaitu:

1. Pemisah Peralatan;  
Berfungsi untuk memisahkan peralatan listrik dari peralatan lain atau instalasi lain yang bertegangan. Pms ini boleh dibuka atau ditutup hanya pada rangkaian yang tidak berbeban.
2. Pemisah Tanah (Pisau Pentanahan/Pembumian);  
Berfungsi untuk mengamankan dari arus tegangan yang timbul sesudah saluran tegangan tinggi diputuskan atau induksi tegangan dari penghantar atau kabel lainnya. Hal ini perlu untuk keamanan bagi orang-orang yang bekerja pada peralatan instalasi.

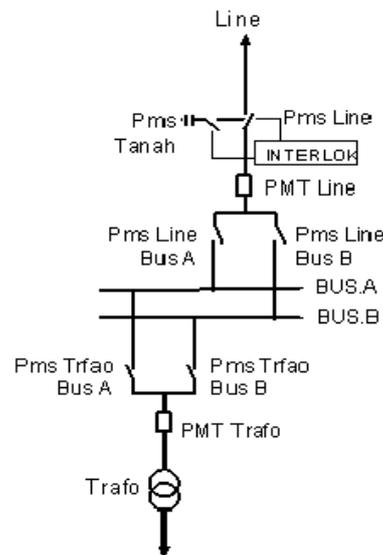


Gambar 2.6. Pemisah

### **Penempatan Posisi Pemisah**

Sesuai dengan penempatannya di daerah mana Pemisah tersebut dipasang, PMS dapat dibagi menjadi :

1. Pemisah Penghantar/Line  
Pemisah yang terpasang di sisi penghantar
2. Pemisah Rel/Bus  
Pemisah yang terpasang di sisi rel
3. Pemisah Kabel  
Pemisah yang terpasang di sisi kabel
4. Pemisah Seksi  
Pemisah yang terpasang pada suatu rel sehingga rel tersebut dapat menjadi dua seksi
5. Pemisah Tanah  
Pemisah yang terpasang pada penghantar/line/kabel untuk menghubungkan ke tanah.



**Single Line Penempatan Pms**

Gambar 2.7. Penempatan Pemisah

### 2.2.5. Arrester

lightning arrester (penangkal petir) yang berfungsi menangkal gelombang berjalan dari petir yang akan masuk ke instalasi pusat pembangkit listrik. Gelombang berjalan juga dapat berasal dari pembukaan dan penutupan pemutus tenaga atau circuit breaker (switching). Pada sistem Tegangan Ekstra Tinggi (TET) yang besarnya di atas 350 kV, surja tegangan yang disebabkan oleh switching lebih besar daripada surja petir.

Saluran udara yang keluar dari pusat pembangkit listrik merupakan bagian instalasi pusat pembangkit listrik yang paling rawan sambaran petir dan karenanya harus diberi lightning arrester. Selain itu, lightning arrester harus berada di depan setiap transformator dan harus terletak sedekat mungkin dengan transformator. Hal ini perlu karena pada petir yang merupakan gelombang berjalan menuju ke transformator akan melihat transformator sebagai suatu ujung terbuka (karena transformator mempunyai isolasi terhadap bumi/tanah) sehingga gelombang pantulannya akan saling memperkuat dengan gelombang yang datang. Berarti transformator dapat mengalami tegangan surja dua kali besarnya tegangan gelombang surja yang datang. Untuk mencegah terjadinya hal ini, lightning arrester harus dipasang sedekat mungkin dengan transformator.

Lightning arrester bekerja pada tegangan tertentu di atas tegangan operasi untuk membuang muatan listrik dari surja petir dan berhenti beroperasi pada tegangan tertentu di atas tegangan operasi agar tidak terjadi arus pada tegangan operasi, dan perbandingan dua tegangan ini disebut rasio proteksi arrester. Tingkat isolasi bahan arrester harus berada di bawah tingkat isolasi bahan transformator agar apabila sampai terjadi flashover, maka flashover diharapkan terjadi pada arrester dan tidak pada transformator.



Gambar 2.8. Arrester

#### 2.2.6. Rele proteksi

Rele proteksi adalah susunan peralatan yang direncanakan untuk dapat merasakan atau mengukur adanya gangguan atau mulai merasakan tenaga listrik dan segera otomatis memberi perintah untuk membuka pemutus tenaga untuk memisahkan peralatan atau bagian dari sistem proteksi yang terganggu dan memberikan isyarat berupa lampu atau bel. Rele proteksi dapat merasakan 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 mengambilnya keputusan untuk seketika ataupun dengan perlambatan waktu membuka pemutus tenaga.

Fungsi rele proteksi pada sistem tenaga listrik :

- a. Merasakan, mengukur dan menentukan bagian sistem yang terganggu serta memisahkan secepatnya sehingga sistem lain yang tidak terganggu dapat beroperasi normal.

- b. Mengurangi kerusakan yang lebih parah dari peralatan yang terganggu
- c. Mengurangi pengaruhnya gangguan terhadap bagian sistem yang tidak terganggu di dalam sistem tersebut serta mencegah meluasnya gangguan.
- d. Memperkecil bahaya bagi manusia

Dari fungsinya diatas, adakalanya ada kegagalan dalam pengaman rele proteksi. Hal-hal yang dapat menimbulkan kegagalan pengaman dapat di kelompokkan sebagai berikut :

- a. Kegagalan pada rele itu sendiri
- b. Kegagalan suplai arus dan/atau tegangan ke rele tegangannya rangkaian suplai ke rele dari trafo tersebut terbuka atau terhubung singkat.
- c. Kegagalan sistem suplai arus searah untuk tripping pemutus tenaga. Hala yang dapat menyebabkannya antara lain baterai lemah karena kurang perawatan, terbukanya atau terhubung singkat rangkaian arus searah.
- d. Kegagalan pemutus tenaga. Kegagalan ini dapat disebabkan karena kumparan trip tidak menerima suplai, kerusakan mekanis ataupun kegagalan pemutusan arus kemampuan dari pemutus tenaganya.

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

Dengan demikian pengaman menurut fungsinya dapat dikelompokkan menjadi :

- a. Pengaman utama yang pada umumnya selektif dan cepat dan malah jenis tertentu mempunyai sifat selektif mutlak misalnya rele diferensial
- b. Pengaman cadangan, umumnya mempunyai perlambatan waktu hal ini untuk memberikan kesempatan kepada pengaman utama bekerja terlebih dahulu, dan jika pengaman utama gagal, baru pengaman cadangan bekerja dan rele ini tidak seselektif pengaman utama.

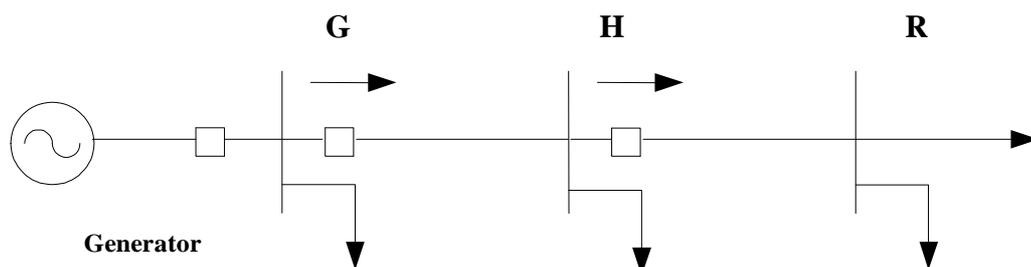
### 2.3. Jenis-Jenis Rele Proteksi

Jenis-jenis rele ada macam macamnya, ini sesuai dengan fungsi dan kegunaannya masing-masing. Berikut adalah jenis-jenis rele yang di pakai dalam proteksi sistem tenaga listrik :

#### a. Rele Arah (Directional Relay)

Pada dasarnya rele ini menggunakan prinsip dasar releinduksi dengan satu besaran input. Pada rele arah induksi ini besaran input terdiri dari

1. Besaran penggerak arus
2. Besaran pembanding (refensi atau polarizing) – arus atau tegangan



Gambar 2.9. Koordinasi Rele Arah

Persyaratan rele arah yang harus di penuhi :

1. Waktu kerja rele arus cepat; 20-40 ms
2. Rele harus dapat pick up pada daya yang kecil. Rele harus masih dapat pick up dengan raah yang betul pada tegangan yang rendah (2,6 V)
3. Konsumsi dari kumparan dan arus sekecil mungkin pada keadaan normal sehingga beban dari CT/PT tetap kecil;
4. Rele harus mempunyai harga pembanding drop out dan pick up (Kd) tinggi,  $k_d = 0,9-1$
5. Rel aarah tidak boleh bekerja sendiri kalau rangkaian tegangan hilang dna kumparan arus dialiri arus

6. Rele arah sebaiknya sederhana konstruksinya, dapat diandalkan dalam oprasinya berukuran kecil.

#### **b. Rele Diferensial**

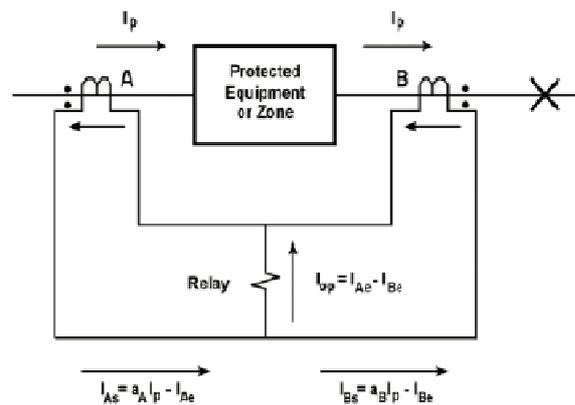
“Rele diferensial adalah suatu rele yang bekerja bila ada perbedaan vektor dari dua besaran listrik atau lebih yang melebihi besaran yang telah ditentukan.

Dengan demikian setiap jenis rele, bila dihubungkan dengan cara tertentu dapat dibuat bekerja seperti rele diferensial. Dengan perkataan lain tidak begitu banyak susunan rele yang telah dihubungkan dengan cara tertentu dalam sirkit yang membuat rele tersebut bekerja sebagai suatu rele diferensial.

Rele differensial juga berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap gangguan hubung singkat yang terjadi di dalam daerah pengaman transformator. Rele ini merupakan pengaman utama (*main protection*) yang sangat selektif dan cepat, sehingga tidak perlu dikoordinir dengan rele lain dan tidak memerlukan time delay.

Sifat pengaman dengan rele diferensial :

1. Sangat efektif dan cepat, tidak perlu koordinasi dengan rele lain
2. Sebagai pengaman utama
3. Tidak dapat digunakan sebagai pengaman cadangan untuk seksi/daerah berikutnya
4. Daerah pengamannya dibatasi oleh pasangan trafo arus dimana rele diferensial dipasang



Gambar 2.10. Rangkaian Rele Diferensial

Persyaratan pada pengaman diferensial adalah sebagai berikut :

1. CT1 dan CT2 harus mempunyai perbandingan transformasi yang sama atau mempunyai transformasi sedemikian sehingga sekundernya sama
2. Karakteristik CT1 dan CT2 sama
3. Rangkaian CT ke rele harus betul



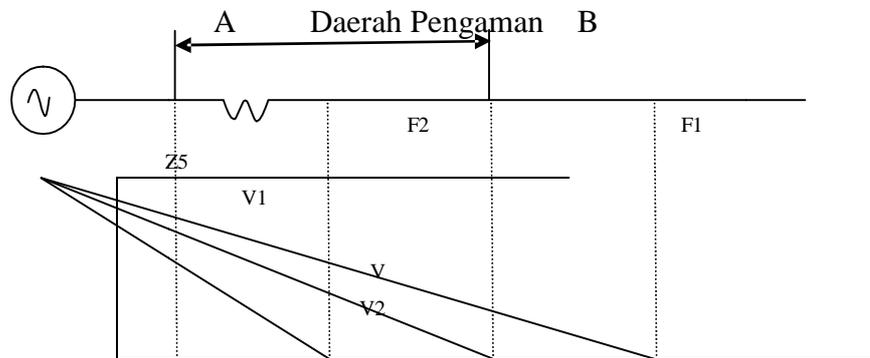
Gambar 2.11. Rele Diferensial

### c. Rele Jarak

Jenis rele yang paling menarik dan banyak dibicarakan terdapat pada jenis group rele jarak. Dalam rele jarak terdapat keseimbangan antara tegangan dan arus dan pembandingnya dinyatakan dalam impedansi yang merupakan ukuran listrik untuk jarak suatu saluran transmisi.

Pada umumnya yang disebut impedansi dapat berupa tahanan resistansi saja (R), reaktansi saja (X) atau kombinasi dari keduanya. Dalam terminologi rele pengaman, impedansi rele mempunyai karakteristik yang berhubungan dengan seluruh komponen impedansi.

Prinsip kerja rele jarak adalah membandingkan arus dan tegangan ditempat yang sama.

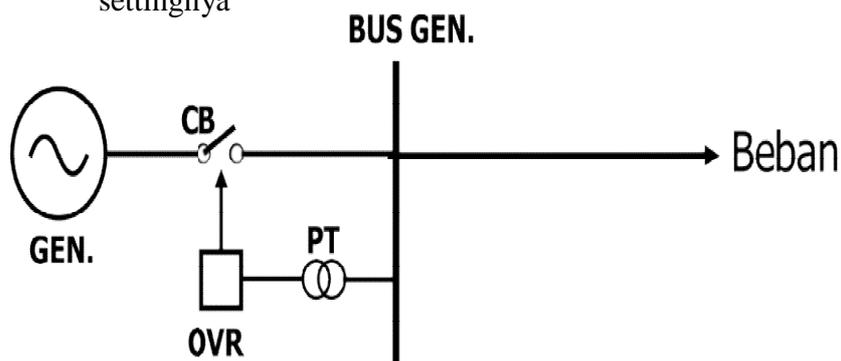


Gambar 2.12. Perbandingan Tegangan dan Arus

#### d. Rele Tegangan

Rele ini bekerja dengan menggunakan tegangan sebagai besaran ukur, disini rele akan bekerja jika tegangan yang terdeteksi melebihi/dibawah tegangan settingnya. Oleh karena itu rele tegangan diklasifikasi dalam 2 jenis yaitu :

- Rele tegangan lebih (over voltage relay = OVR), bekerja berdasarkan kenaikan tegangan mencapai/melebihi nilai settingnya
- Rele tegangan kurang (under voltage relay), bekerja berdasarkan turunnya tegangan mencapai/dibawah nilai settingnya



Gambar 2.13. Penempatan Rele Tegangan Lebih (OVR)

### Aplikasi Rele Tegangan

- a. Over voltage relay adalah pengaman tegangan lebih pada sistem pembangkitan yaitu sebagai pengaman gangguan tanah (pergeseran titik netral) pada jaringan yang disuplai dari trafo tenaga dimana titik netralnya ditanahkan melalui tahanan tinggi atau sistem mengambang
- b. Under voltage relay berfungsi mencegah starting motor bila suplai tegangan turun dan dalam pengaman sistem dapat dikombinasikan dengan rele frekuensi kurang

#### **e. Rele Frekuensi**

Frekuensi merupakan salah satu parameter yang dapat menunjukkan keadaan yang tidak normal pada suatu sistem tenaga listrik. Berkurangnya daya pembangkit akan mengakibatkan turunnya putaran pembangkit dan turunnya frekuensi sistem, keadaan ini mutlak perlu dihindari sebab akan mengganggu kestabilan dari sistem tenaga listrik, hal ini dapat diatasi dengan memasang pengaman khusus yaitu rele frekuensi menurun.

Pemilihan rele ini perlu ditinjau kemampuannya dan ada beberapa yang perlu diperhatikan dan dipertimbangkan

- a. Bagi rele pengaman sangat penting untuk mengetahui keadaan tidak normal dan kemudian mengamankannya dengan memperhatikan kemampuan untuk kembali ke keadaan semula/normal secara otomatis
- b. Kemampuan selektif suatu keadaan normal harus segera kemaali kekeadaan normalnya dengan cara pelepasan beban seminimum mungkin setelah gangguan terjadi.
- c. Kepekaan rele harus bekerja sedemikian telitinya sehingga pada keadaan bagaimanapun kekeurangan pembangkit dapat dirasakan dan dengan kecepatan kerja tertentu
- d. Waktu kerja. Dalam hal tertentu rele ini harus bekerja dalam

waktu singkat dan dalam keadaan lain rele dapat juga bekerja dalam waktu tertunda (time delay), yang mana semua ini ditentukan oleh keadaan sistem dan kecepatan kerja alat-alat pada sistem tersebut.

#### **f. Rele Arus Lebih**

Rele arus lebih adalah rele yang bekerja berdasarkan arus, yang mana rele ini akan bekerja apabila terjadi arus yang melampaui batas tertentu yang telah ditetapkan yang disebut arus kerja atau arus setting rele.

#### **Keuntungan dan Fungsi Rele Arus Lebih**

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

#### **Prinsip Kerjanya**

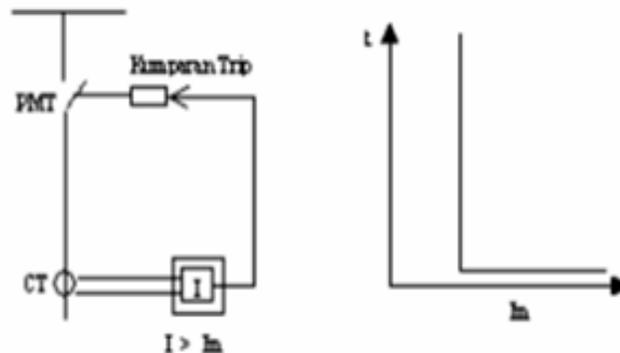
- Elektro mekanis
- Statis

#### **Karakteristik Waktu Kerjanya**

##### **a) Rele Arus Lebih Seketika (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

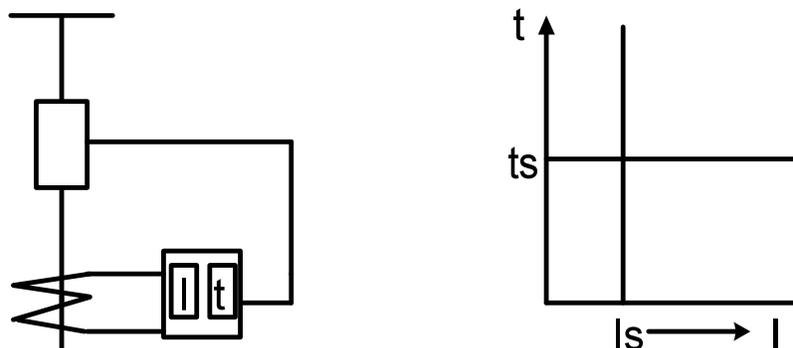
sangat singkat (20~100 ms), yaitu tanpa penundaan waktu. Rele ini umumnya dikombinasikan dengan rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu (definite time) atau waktu terbalik (inverse time) dan hanya dalam beberapa hal berdiri sendiri secara khusus.



Gambar 2.14 Karakteristik Instantaneous Relay

**b) Rele Arus Lebih Dengan Karakteristik waktu tertentu (Definite Time)**

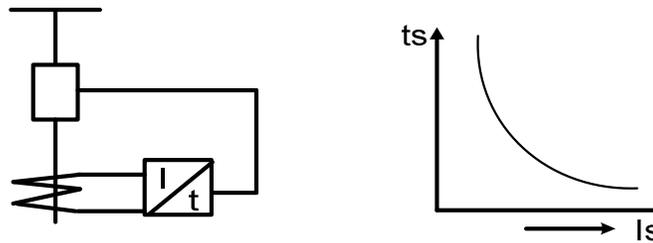
Rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu ialah jika jangka waktu mulai rele arus pick up sampai selesainya kerja rele diperpanjang dengan nilai tertentu dan tidak tergantung dari besarnya arus yang menggerakkan.



Gambar 2.15. Rele Arus Lebih Dengan Karakteristik Waktu Tertentu (Definite Time)

### c) Rele Arus Lebih karakteristik Waktu Terbalik (Inverse Time)

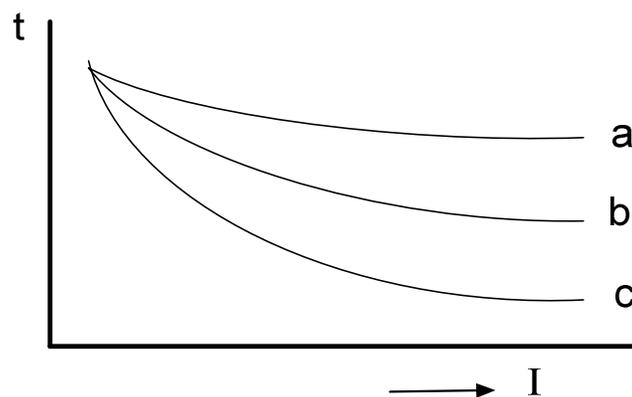
Rele dengan karakteristik waktu terbalik adalah jika jangka waktu mulai rele arus pick up sampai selesainya kerja rele diperpanjang dengan besarnya nilai yang berbanding terbalik dengan arus yang menggerakkan.



Gambar 2.16. Rele Arus Lebih Karakteristik Waktu Terbalik (invers time)

Bentuk Perbandingan Terbalik dari waktu arus ini sangat bermacam-macam tetapi dapat digolongkan menjadi :

- Berbanding terbalik (inverse)
- Sangat berbanding terbalik (very inverse)
- Sangat berbanding terbalik sekali (extremely inverse)

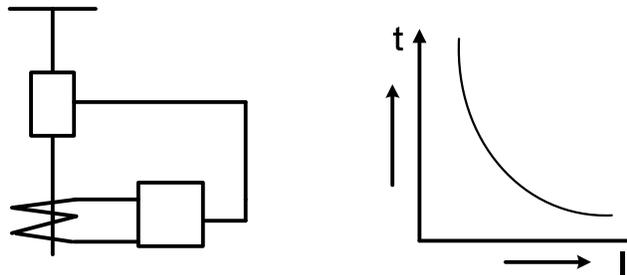


Gambar 2.17. Perbandingan Terbalik Dari Waktu – Arus

**d) Arus Lebih Invers Definite Minimum Time (IDMT)**

Rele arus lebih dengan karakteristik invers definite minimum time (IDMT) ialah jika jangka waktu rele arus mulai pick up sampai selesainya kerja rele mempunyai sifat waktu terbalik untuk nilai arus yang kecil setelah rele pick up dan kemudian mempunyai sifat waktu tertentu untuk arus yang lebih besar.

Rele arus lebih dengan karakteristik waktu arus tertentu,berbanding terbalik dan IDMT dapat dikombinasikan dengan rele arus lebih dengan karakteristik seketika.



Gambar 2.18. Rele Arus Lebih Dengan karakteristik Waktu arus tertentu

**Arus Pick Up (Kerja) dan Arus kembali (Drop Off)**

$I_p$  = nilai arus dimana rele arus akan bekerja dan menutup kontak sehingga rele waktu bekerja, ini sering disebut arus kerja atau arus pick up ( $I_p$ )

$I_d$  = nilai arus dimana rele arus berhenti bekerja dan kontak 1 membuka kembali, sehingga rele waktu berhenti bekerja,  $I_d$  sering disebut arus kembali atau arus drop off.

Bila  $t_a < t_{setting}$  maka rele arus lebih dinyatakan tidak bekerja, sedangkan bila  $t_a > t_{setting}$  rele arus lebih dinyatakan bekerja. Perbandingan arus kembali dengan arus pick up sering dinyatakan dengan  $K_d$  atau

$$K_d = \frac{I_d}{I_p} \dots\dots\dots(2.1)$$

Kd untuk rele proteksi arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu mempunyai nilai 0,7 0 ,9. Untuk rele arus lebih dengan karakteristik waktu terbalik mempunyai nilai  $\approx 1,0$

#### Prinsip Dasar Perhitungan Penyetelan Arus ( $I_s$ )

- Batas penyetelan minimum rele arus lebih tidak boleh bekerja pada saat terjadi beban maksimum.

$$I_s = \frac{I_{maks}}{K_{fk} \times K_d} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

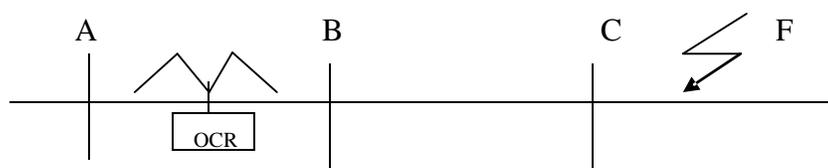
$I_s$  = penyetelan arus

$K_{fk}$  = faktor keamanan (1,1 ~1,2)

$K_d$  = faktor arus kembali

$I_{maks}$  = maksimum yang diizinkan untuk alat yang diamankan, pada peralatan, umumnya diambil arus nominalnya.

- Batas penyetelan minimum rele arus lebih bekerja bila terjadi gangguan hubung singkat rele.



Gambar 2.19. Penempatan *Over Current Relay* pada Penyulang

Hal ini supaya rele di A dapat sebagai pengaman utama bagian AB tetapi sebagai pengaman di pengaman cadangan seksi berikutnya ( BC ).

- 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:

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

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.

$$I_{set} (sek) = I_{set} (pri) \times \frac{CT_{pri}}{CT_{sek}} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana

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

$I_{set} (sekunder) =$  Arus yang disetting, I<sub>g</sub> di sekunder

Rasio CT = Setting Trafo yang dipasang di penyulang

- Setting waktu (TMS)

Hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat, selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai setelan waktu (TMS). Rumus untuk menentukan nilai setelan waktu bermacam-macam sesuai dengan desain pabrik pembuat relay. Dalam hal ini diambil rumus TMS dengan relay merk MC 30.

$$t = \frac{K}{I_{fault}} \dots\dots\dots(2.4)$$

Untuk menentukan nilai Tms yang akan disetkan pada rele arus lebih diambil, missal angka arus gangguan ( $I_{fault}$ ) sebesar arus gangguan 3 fasa pada lokasi gangguan 25% panjang feeder, dan waktu kerja rele lebih difeeder itu (sesuai keterangan waktu tercepat diatas) diambil selama 0,5 detik, maka nilai Tms akan disetkan pada rele arus lebih adalah :

$$T_{ms} = \frac{t}{I_{fault}} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana :

$t$  = Waktu Kerja

$T_{ms}$  = Setelah Waktu

$I_{fault}$  = Arus gangguan hubung singkat 3 fasa dan 2 fasa (A)

$I_{set}$  = Arus yang disettign di Primer (A)

• **Perhitungan arus gangguan hubung singkat tiga fasa**

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

$$I = \dots\dots\dots(2.6)$$

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

$$= \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana :

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

$V_{ph}$  = Tegangan fasa - netral system

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

**2.4. Menghitung Impedansi**

Dalam menghitung impedansi dikenal tiga macam impedansi urutan yaitu :

- Impedansi urutan positif (  $Z1$  ), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan positif.
- Impedansi urutan negatif (  $Z2$  ), 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 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.

**a) Impedansi sumber**

Untuk menghitung impedansi sumber, maka harus dihitung dulu impedansi sumber. Impedansi sumber diperoleh dengan rumus :

$$Z_s = \frac{V^2}{MVA} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana :

$Z_s$  = Impedansi sumber (ohm)

$kV^2$  = Tegangan sisi primer trafo tenaga (kV)

MVA = Data hubung singkat (MVA)

**b) Impedansi transformator**

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

Langkah pertama mencari nilai ohm pada 100%, yaitu dengan menggunakan rumus :

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

Dimana :

$Z_t$  = Impedansi trafo tenaga (ohm)

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

MVA = Kapasitas 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 :
  - Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan  $\Delta Y$  dimana kapasitas belitan delta sama besar dengan kapasitas belitan Y, maka  $X_{t0} = X_{t1}$
  - 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  $X_{t0} = 3 \times X_{t1}$ .
  - Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan  $YY$  dan tidak mempunyai belitan delta di dalamnya, maka untuk menghitung besarnya  $X_{t0}$  berkisar antara 9 s/d  $14 \times X_{t1}$ .

### c) 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 penghantartersebut 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 :

$$Z = (R + jX) \dots\dots\dots(2.10)$$

Sehingga untuk impedansi penyulang dapat ditentukan dengan menggunakan rumus :

- Urutan positif dan urutan negatif

$$Z1 = Z2 = \% \text{ panjang} \times \text{panjang penyulang (km)} \times Z1 / Z2 \text{ (ohm)}$$

Dimana :

$$Z1 = \text{Impedansi urutan positif (ohm)}$$

$$Z2 = \text{Impedansi urutan negatif (ohm)}$$

- Urutan nol

$$Z0 = \% \text{ panjang} \times \text{panjang penyulang (km)} \times Z0 \text{ (ohm)}$$

Dimana :

$$Z0 = \text{Impedansi urutan nol (ohm)}$$

#### d) Impedansi ekivalen jaringan

Perhitungan yang akan dilakukan di sini adalah perhitungan besarnya nilai impedansi ekivalen 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  $Z1eq$  dan  $Z2eq$  dapat langsung dengan cara menjumlahkan impedansi tersebut, sedangkan untuk perhitungan  $Z0eq$  dimulai dari titik gangguan sampai ke trafo tenaga yang netralnya ditanahkan. Akan tetapi untuk menghitung impedansi  $Z0eq$  ini, harus diketahui dulu hubungan belitan trafonya.

Sehingga untuk impedansi ekivalen jaringan dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

- Urutan positif dan urutan negative ( $Z1eq = Z2eq$ )

$$Z1eq = Z2eq = Zs1 + Zt1 + Z1 \text{ penyulang} \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana :

$$Z1eq = \text{Impedansi ekivalen jaringan urutan positif (ohm)}$$

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

$Z_s$  = Impedansi sumber (ohm)

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

$Z_1$  = Impedansi urutan positif dan negatif (ohm)

➤ Urutan nol

$$Z_{0eq} = Z_{t0} + 3R_N + Z_0 \text{ penyulang} \dots\dots\dots(2.12)$$

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. Perhitungan Sistem Per Unit

Dalam suatu system tenaga listrik terinterkoneksi yang memiliki berbagai tingkat tegangan dan macam – macam peralatan daya adalah lebih mudah untuk bekerja dan membuat perhitungan – perhitungan dengan mempergunakan besaran – besaran system Per Unit (pu). Nilai pu dari suatu besaran didefinisikan sebagai :

---

Dalam teknik tenaga listrik terdapat tiga besaran dasar, yaitu tegangan, arus, dan impedansi. Bilamana dipilih dua besaran sebagai acuan, maka besaran ketiga akan dengan sendirinya memiliki nilai acuan juga. Misalnya bilamana tegangan V dan arus I merupakan besaran dasar, maka impedansi dasar sudah jelas karena :

$$Z = \frac{V}{I} \dots\dots\dots(2.13)$$

Biasanya dari suatu mesin listrik disebut tegangan nominal dalam besaran V dan kapasitas dalam besaran KVA. Karenanya akan memudahkan untuk memilih tegangan V dan kapasitas KVA sebagai besaran – besaran dasar.

Misalnya  $V_d$  merupakan tegangan dasar dan  $kVA_d$  merupakan kapasitas dasar, maka

dapat ditulis :

$$V_{pu} = \frac{V}{V_{base}} \dots\dots\dots(2.14)$$

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

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

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

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

Dimana

$I$  = Arus yang mengalir pada hambatan

$Z$  (A)  $V$  = Tegangan sumber (V)

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

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.

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,  $Z = Z_1 + Z_2 + Z_0$

Dimana :

$Z_1$  = Impedansi urutan positif (ohm)

$Z_2$  = Impedansi urutan negatif (ohm)

$Z_0$  = Impedansi urutan nol. (ohm).