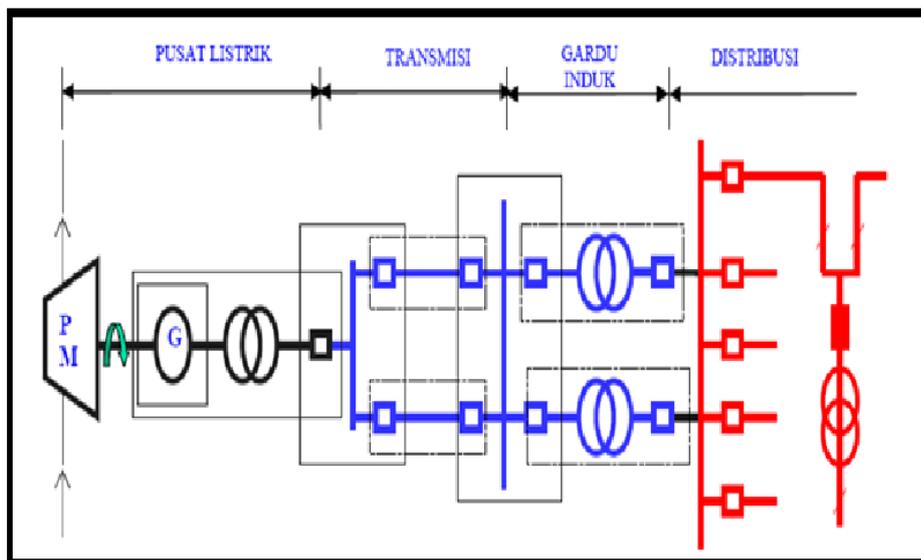


## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Proteksi Sistem Tenaga Listrik

Yang dimaksud dengan proteksi sistem tenaga listrik adalah sistem proteksi yang dilakukan kepada peralatan-peralatan listrik yang terpasang pada suatu sistem tenaga misalnya generator, transformator jaringan dan lain-lain, terhadap kondisi tidak normal operasi sistem itu sendiri.



Gambar 2.1 Diagram Proteksi Sistem Tenaga Listrik

Pengertian proteksi transmisi tenaga listrik adalah proteksi yang dipasang pada peralatan-peralatan listrik pada suatu transmisi tenaga listrik sehingga proses penyaluran tenaga listrik dari tempat pembangkit tenaga listrik (*Power Plant*) hingga Saluran distribusi listrik (*substation distribution*) dapat disalurkan sampai pada konsumen pengguna listrik dengan aman. Proteksi transmisi tenaga listrik diterapkan pada transmisi tenaga listrik agar jika terjadi gangguan peralatan yang berhubungan dengan transmisi tenaga listrik tidak mengalami kerusakan. Ini juga termasuk saat terjadi perawatan dalam kondisi menyala. Jika proteksi bekerja dengan baik, maka pekerja dapat melakukan pemeliharaan transmisi tenaga listrik



dalam kondisi bertegangan. Jika saat melakukan pemeliharaan tersebut terjadi gangguan, maka pengaman-pengaman yang terpasang harus bekerja demi mengamankan sistem dan manusia yang sedang melakukan perawatan.

Kondisi tidak normal itu dapat berupa antara lain:

- Hubung singkat,
- Tegangan lebih,
- Beban lebih,
- Frekuensi sistem rendah,
- Asinkron,
- Dan lain-lain.

## **2.2 Fungsi Proteksi**

Proteksi berfungsi sebagai berikut:

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

## **2.3 Persyaratan Kualitas Proteksi**

Ada beberapa persyaratan yang sangat perlu diperhatikan dalam suatu perencanaan sistem proteksi yang efektif yaitu :

1. Selektivitas dan Diskriminasi

Efektivitas suatu sistem proteksi dapat dilihat dari kesanggupan sistem dalam mengisolir bagian yang mengalami gangguan saja.



## 2. Stabilitas

Sifat yang tetap tidak operasi apabila gangguan-gangguan terjadi diluar zona yang melindungi (gangguan luar).

## 3. Kecepatan Operasi

Sifat ini lebih jelas, semakin lama arus gangguan terus mengalir, semakin besar kerusakan peralatan. Hal yang paling penting adalah perlunya membuka bagian-bagian yang terganggu sebelum generator-generator yang dihubungkan sinkron kehilangan sinkronisasi dengan sistem selebihnya. Waktu pembebasan gangguan yang tipikal dalam sistem sistem tegangan tinggi adalah 140 ms. Dimana mendatang waktu ini hendak dipersingkat menjadi 80 ms sehingga memerlukan relay dengan kecepatan yang sangat tinggi (very high speed relaying).

## 4. Sensitivitas (kepekaan)

Yaitu besarnya arus gangguan agar alat bekerja. Harga ini dapat dinyatakan dengan besarnya arus dalam jaringan aktual (arus primer) atau sebagai prosentase dari arus sekunder (trafo arus).

## 5. Pertimbangan ekonomis

Dalam sistem aspek ekonomis hampir mengatasi aspek teknis, oleh karena jumlah feeder, trafo dan sebagainya yang begitu banyak, asal saja persyaratan keamanan yang pokok dipenuhi. Dalam sistem-sistem transmisi justru aspek teknis yang penting. Proteksi relatif mahal, namun demikian pula sistem atau peralatan yang dilindungi dan jaminan terhadap kelangsungan peralatan sistem adalah vital. Biasanya digunakan dua sistem proteksi yang terpisah, yaitu proteksi primer atau proteksi utama dan proteksi pendukung (back up).

## 6. Realiabilitas (Keandalan)

Sifat ini jelas, penyebab utama dari “outage” rangkaian adalah tidak bekerjanya proteksi sebagaimana mestinya (mal operation).



## 7. Proteksi Pendukung

Proteksi pendukung (back up) merupakan susunan yang sepenuhnya terpisah dan bekerja untuk mengeluarkan bagian yang terganggu apabila proteksi utama tidak bekerja (fail). Sistem pendukung ini sedapat mungkin indenpenden seperti halnya proteksi utama, memiliki trafo-trafo dan rele-rele tersendiri. Seringkali hanya tripping CB dan trafo-trafo tegangan yang dimiliki bersama oleh keduanya.

Komponen-komponen sistem proteksi terdiri dari :

- *Circuit Breaker* (PM)
- *Relay*
- Trafo arus (CT)
- Trafo tegangan (PT)
- Kabel kontrol
- *Supplay* (Batere)

## 2.4 Proteksi Generator

### 2.4.1 Sistem Proteksi Generator

Proteksi untuk gangguan dari dalam generator yaitu:

- Differential Relay: untuk melindungi generator dari gangguan akibat hubung singkat(short circuit) antar fasa.
- Stator Ground Fault Relay: untuk mendeteksi gangguan pentanahan/grounding pada generator
- Loss of Field Relay: untuk mendeteksi kehilangan medan penguatan yang menyebabkan over heating pada kumparan stator dan arus Eddy(Eddy Current) pada kumparan rotor.



#### **2.4.2 Peran Generator dalam Sistem dan Syarat Proteksi Generator**

Sebagai sumber energi listrik dalam suatu sistem tenaga, generator memiliki peran yang penting, sehingga tripnya PMT/CB generator sangat tidak dikehendaki karena sangat mengganggu sistem, terutama generator yang berdaya besar. Dan juga karena letaknya di hulu, PMT/CB generator tidak boleh mudah trip tetapi juga harus aman bagi generator, walaupun didalam sistem banyak terjadi gangguan Untuk menjaga keandalan dari kerja generator, maka dilengkapi generator dengan peralatan-peralatan proteksi. Peralatan proteksi generator harus betul-betul mencegah kerusakan generator, karena kerusakan generator selain akan menelan biaya perbaikan mempertimbangkan pula proteksi bagi mesin penggerakannya, karena generator digerakkan oleh mesin penggerak mula.

#### **2.4.3 Pengaman Terhadap Gangguan dalam Generator**

Ada beberapa pengaman terhadap gangguan dalam generator, yaitu :

- a) Hubung singkat antar fasa
- b) Hubung singkat fasa ke tanah
- c) Suhu tinggi
- d) Penguatan hilang
- e) Arus urutan negatif
- f) Hubung singkat dalam sirkit rotor
- g) Out of Step
- h) Over flux

#### **2.4.4 Pengaman terhadap gangguan luar generator**

Generator umumnya dihubungkan ke rel (busbar). Beban dipasok oleh saluran yang dihubungkan ke rel. Gangguan kebanyakan ada di saluran yang mengambil daya dari rel. Instalasi penghubung generator dengan rel umumnya jarang mengalami gangguan. Karena rel dan saluran yang keluar dari rel sudah mempunyai proteksi sendiri, maka proteksi generator terhadap gangguan luar cukup dengan relay arus lebih dengan time delay yang relatif lama dan dengan voltage restrain.



## 2.5 Relay Proteksi

Yang dimaksud dengan proteksi terhadap tenaga listrik ialah sistem pengamanan yang dilakukan terhadap peralatan-peralatan listrik, yang terpasang pada sistem tenaga listrik tersebut. Misalnya Generator, Transformator, Jaringan transmisi / distribusi dan lain-lain terhadap kondisi operasi abnormal dari sistem itu sendiri. Yang dimaksud dengan kondisi abnormal tersebut antara lain dapat berupa

- Hubung singkat
- Tegangan lebih/kurang
- Beban lebih
- Frekuensi sistem turun/naik
- Dan lain-lain

Adapun fungsi dari sistem proteksi adalah :

- Untuk menghindari atau mengurangi kerusakan peralatan listrik akibat adanya gangguan (kondisi abnormal). Semakin cepat reaksi perangkat proteksi yang digunakan, maka akan semakin sedikitlah pengaruh gangguan terhadap kemungkinan kerusakan alat.
- Untuk mempercepat melokalisasi luas/zone daerah yang terganggu, sehingga daerah yang terganggu menjadi sekecil mungkin.
- Untuk dapat memberikan pelayanan listrik dengan keandalan yang tinggi kepada konsumen, dan juga mutu listriknya baik.
- Untuk mengamankan manusia (terutama) terhadap bahaya yang ditimbulkan oleh listrik.

Agar sistem proteksi dapat dikatakan baik dan benar (dapat bereaksi dengan cepat, tepat dan murah), maka perlu diadakan pemilihan dengan seksama dan dengan memperhatikan faktor-faktor sebagai berikut :

1. Macam saluran yang diamankan.
2. Pentingnya saluran yang dilindungi.
3. Kemungkinan banyaknya terjadi gangguan.
4. Tekno-ekonomis sistem yang digunakan.



Peralatan utama yang dipergunakan untuk mendeteksi dan memerintahkan peralatan proteksi bekerja adalah relay.

## 2.6 Relay Arus Lebih (*Over Current Relay*)

*Over Current Relay* atau relay arus lebih bekerja ketika ada hubung singkat yang berdampak pada kenaikan arus, oleh karena itu disebut relay arus lebih. Relay arus lebih yang ada sekarang memiliki 2 kemampuan yaitu sebagai relay arus lebih (*Over Current Relay*, OCR) dan relay gangguan tanah (*Ground Fault Relay*, GFR).

Relay arus lebih dapat dikoordinasikan dengan relay lain atau dengan GFR dengan memberikan tunda waktu yang sebenarnya merupakan inti dari setelan relay selain juga perhitungan setelan arus.

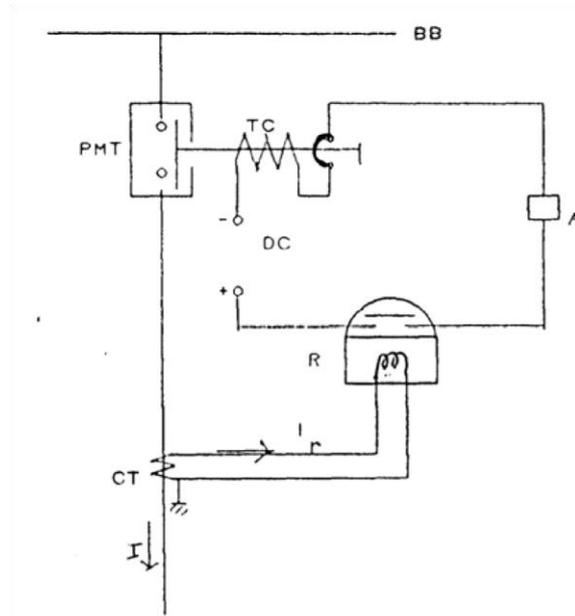
### ❖ Prinsip Kerja dan Karakteristik Pengamanannya

Ada 3 macam jenis relay arus lebih, yaitu :

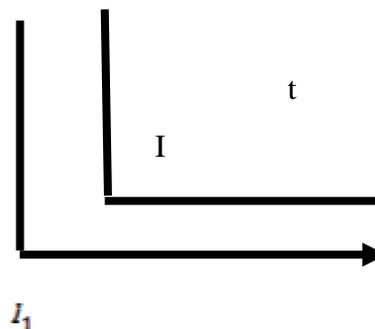
1. Relay arus lebih seketika (moment-instantaneous)
2. Relay arus lebih waktu tertentu (definite time)
3. Relay arus lebih berbanding terbalik (inverse):
  - a) Relay berbanding terbalik biasa.
  - b) Relayay sangat berbanding terbalik.
  - c) Relay sangat berbanding terbalik sekali

### 1. Relay Arus Lebih Seketika

Relay arus lebih seketika adalah jenis relay arus lebih yang paling sederhana di mana jangka waktu kerja relay yaitu mulai saat relay mengalami pick-up sampai selesainya kerja relay sangat singkat yakni sekitar 20-100 mili detik tanpa adanya penundaan waktu.



Gambar 2.2 Rangkaian Relay Arus Lebih Seketika



Gambar 2.3 Karakteristik Relay Arus Lebih Seketika

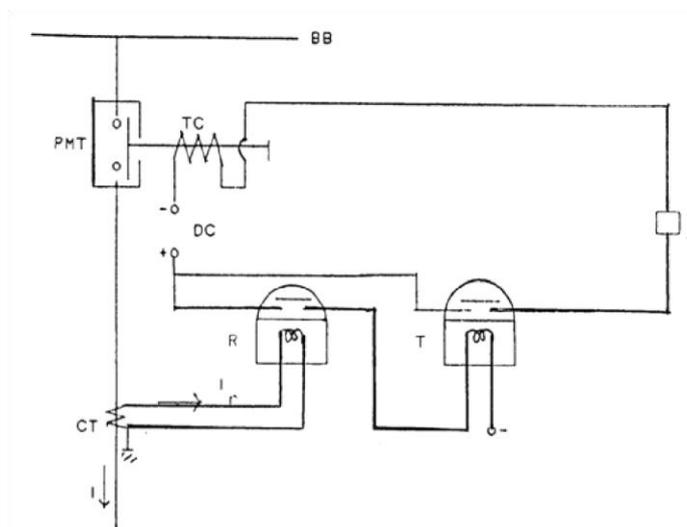
Bila karena suatu hal sehingga harga arus beban  $I$  naik melebihi harga yang diijinkan, maka harga  $I_r$  juga akan naik. Bila naiknya harga arus ini melebihi harga perasi dari relay, maka relay arus lebih seketika akan bekerja. Kerja dari relay ini ditandai dengan Bergeraknya kontaktor gerak relay untuk menutup kontak. Dengan demikian, rangkaian pemutus/trip akan tertutup.

Mengingat pada rangkaian ini terdapat sumber arus searah, maka pada kumparan pemutus akan dialiri arus searah yang selanjutnya akan mengerjakan Kontak Pemutus sehingga bagian sistem yang harus diamankan terbuka. Untuk mengetahui bahwa relay harus bekerja, maka perlu dipasang suatu alarm.

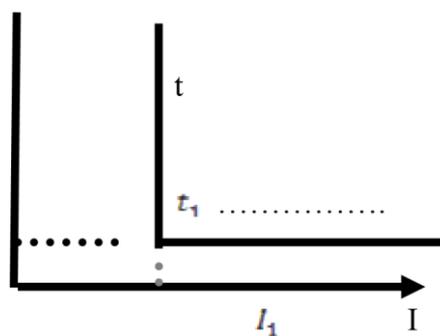


## 2. Relay Arus Lebih Waktu Tertentu

Relay arus lebih waktu tertentu adalah jenis relay arus lebih di mana jangka waktu relay mulai pick-up sampai selesainya kerja relay dapat diperpanjang dengan nilai tertentu dan tidak tergantung dari besarnya arus yang mengerjakannya (tergantung dari besarnya arus setting, melebihi arus setting maka waktu kerja relay ditentukan oleh waktu settingnya).



Gambar 2.4 Rangkaian Relay Arus Lebih



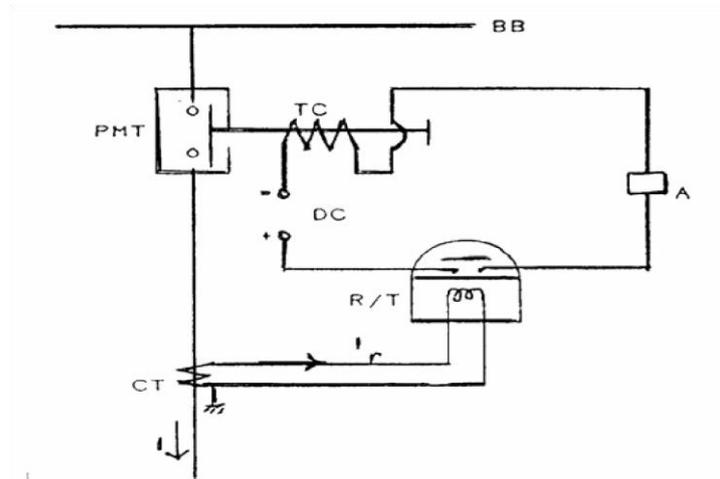
Gambar 2.5 Karakteristik Relay Arus Lebih Tertentu

## 3. Relay Arus Lebih Berbanding Terbalik

Relay arus lebih dengan karakteristik waktu-arus berbanding terbalik adalah jenis relay arus lebih di mana jangka waktu relay mulai pick-up sampai dengan selesainya kerja relay tergantung dari besarnya arus yang melewati kumparan



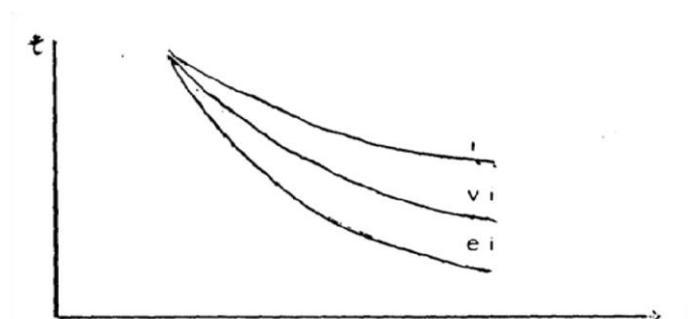
relainya, maksudnya relay tersebut mempunyai sifat terbalik untuk nilai arus dan waktu bekerjanya.



Gambar 2.6 Rangkaian Relay Arus Lebih Berbanding Terbalik

Bentuk sifat keterbalikan antara arus dan waktu kerja ini bermacam-macam, akan tetapi kesemuanya itu dapat digolongkan menjadi 3 golongan sebagai berikut:

1. Berbanding terbalik biasa (inverse)
2. Sangat berbanding terbalik (very inverse)
3. Sangat berbanding terbalik sekali (extremely inverse)



Gambar 2.7 Karakteristik Relay Arus Lebih Berbanding Terbalik



#### A. Relay Arus Lebih Inverse

Syarat untuk men-setting waktu ( dalam hal ini adalah  $T_d$  / Time dial atau TMS/Time Multiple setting) dari relay arus lebih dengan karakteristik waktu berbalik, harus diketahui data berikut:

- Besarnya arus hubung singkat pada setiap seksi,
- Penyetelan/setting arusnya  $I_S$ .
- Kurva karakteristik relay yang dipakai.

Ketentuan-ketentuan yang berlaku pada relay waktu tertentu, berlaku pula pada penyetelan relay ini, yaitu bahwa kerja relay secara keseluruhan harus cepat bereaksi, tetapi harus tetap selektif. Sehingga waktu kerja relay untuk dua seksi yang berurutan pada lokasi gangguan yang sama harus mempunyai beda waktu  $\Delta t$  minimum 0,4 - 0,5 detik.

#### B. Relay Arus Lebih dengan Karakteristik Waktu-Arus Sangat Berbanding Terbalik (Very Inverse)

Relay arus lebih dengan karakteristik waktu-arus sangat berbanding terbalik (V.I.R) dapat memberikan beda waktu ( $\Delta t$ ) yang lebih besar jika terjadi gangguan diujung dan dipangkal dari seksi yang diamankan, bila dibandingkan dengan relay arus lebih dengan karakteristik inverse biasa, jadi jika dipakai relay inverse yang biasa, tidak memberikan beda waktu ( $\Delta t$ ) yang cukup.

#### C. Relay Arus Lebih dengan Karakteristik Sangat Berbanding Terbalik Sekali (Extremily Inverse, $I^2 t = k$ )

Untuk sistem dengan pembangkit dan impedansi saluran pada setiap seksi kecil, relay dengan karakteristik extremily inverse sangat cocok digunakan, karena hanya dengan sedikit perbedaan arus telah didapat perbedaan waktu yang cukup. Relay ini sangat cocok untuk mengamankan peralatan karena pemanasan lebih, sebab mempunyai karakteristik  $I^2 \cdot t = k$  sesuai dengan karakteristik dari peralatan pada umumnya. Disamping itu, relay ini dapat dikoordinasikan dengan pengaman lebur, sedangkan relay dengan



karakteristik inverse biasa atau IDMT sukar untuk dapat dikoordinasikan dengan pengaman lebur. Relay dengan karakteristik sangat berbanding terbalik digunakan pada elemen relay urutan negatif yang telah difilter dan merupakan pengaman rotor, trafo daya, trafo pentanahan dan kabel yang mahal.

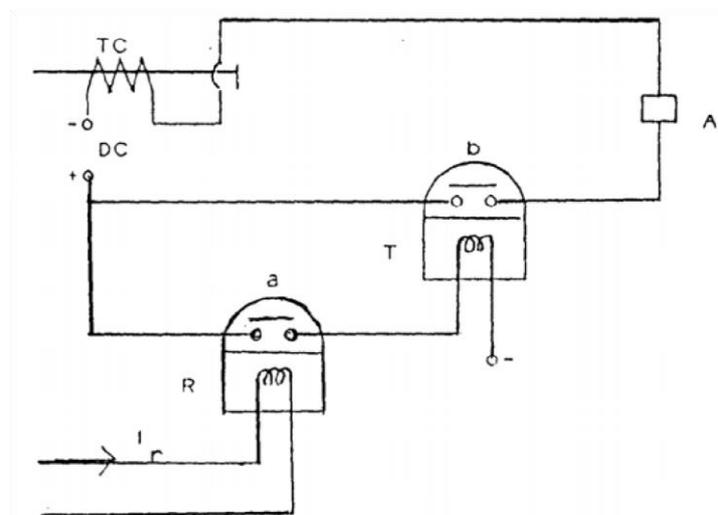
#### D. Relay Arus Lebih Waktu Tertentu Dibandingkan dengan Waktu Terbalik

##### Long time inverse

Relay arus lebih waktu tertentu, waktu kerja relay untuk seksi-seksi semakin dekat dengan sumber, semakin besar dan arus hubung singkatnya pun juga semakin besar. Dan apabila jumlah seksinya banyak, waktu kerja relay pada seksi terdekat dengan sumber menjadi lama. Untuk relay arus lebih waktu terbalik, tidak demikian halnya, karena waktu kerja relay tergantung besarnya dengan arus gangguan. Semakin besar arus gangguan, maka semakin singkat waktu.

### 2.7 Arus Kerja (*pick-up*) dan Arus Kembali (*drop-off*)

Guna menjelaskan apa yang dimaksud dengan arus pick-up dan arus drop-off pada relay arus lebih, dengan melihat gambar berikut :

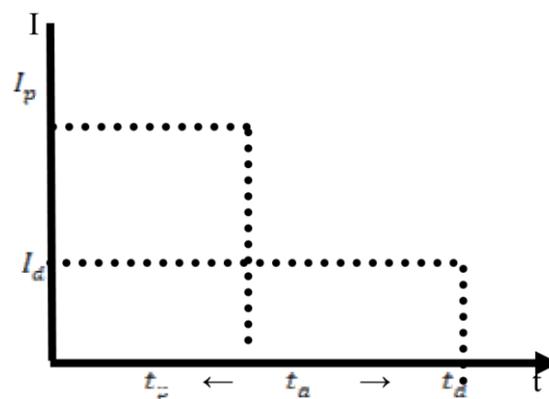


Gambar 2.8 Rangkaian Relay Arus Lebih dan Relay Waktu



Keterangan gambar :

- TC = Tripping Coil
- A = Alarm
- DC = Sumber Arus Searah
- + = Polaritas positif sumber arus searah
- = Polaritas negatif sumber arus searah
- T = Relay defenite time
- O = Kontaktor relay definite time
- R = Relay over current
- A = Kontaktor relay over current
- Ir = Arus sekunder transformator arus



Gambar 2.9 Karakteristik Operasi Arus Pick-Up Dan Drop-Off

Keterangan gambar :

- $I_p$  = arus pick-up
- $I_d$  = arus drop-off
- $t_p$  = nilai waktu yang dibutuhkan untuk pick-up
- $t_d$  = nilai waktu yang dibutuhkan untuk drop-off
- $t_a$  = selisih waktu yang dibutuhkan untuk drop-off dan pick up
- $t_s$  = nilai setting dari pengaman  $I_p$  adalah nilai arus dimana relay arus lebih akan bekerja menutup kontak a, sehingga rangkaian kumparan relay definite tertutup (relay waktu bekerja).



Sedangkan  $I_d$  adalah nilai arus dimana relay arus lebih berhenti bekerja, yakni setelah pemutus bekerja memutuskan aliran listrik.

Bila nilai  $t_a$  lebih kecil dari nilai  $t_s$ , maka relay tidak bekerja. Sedangkan bila  $t_a$  lebih besar dari pada  $t_s$ , maka relay dinyatakan bekerja.

Suatu harga perbandingan antara nilai arus drop-off dan arus pick-up biasanya dinyatakan dengan huruf  $K_d$ , sehingga  $K_d$  dapat dituliskan dengan rumus:

$$K_d = \frac{I_d}{I_p} \dots\dots\dots(1)$$

Dimana :

$K_d$  mempunyai nilai : 0,7 0,9 untuk relay definite dan 1,0 untuk relay inverse.

## 2.8 Konstruksi Relay Arus Lebih

Umumnya sistem konstruksi relay arus lebih yang sering digunakan adalah:

- Elektro-magnetik.
- Induksi.

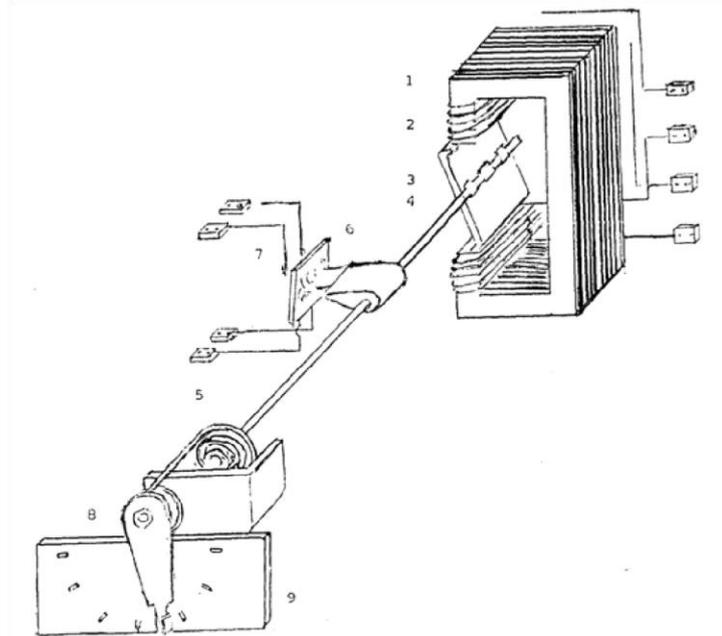
Relay ini sangat sederhana dan mudah dalam mengoperasikannya. Banyak dipakai dalam sistem tenaga listrik, baik untuk peralatan pengamanan utama maupun pengamanan back-up (cadangan), khususnya dalam sistem jaringan distribusi tenaga listrik tegangan menengah, yakni pada sistem distribusi radial dan open loop. Atau juga kita dapatkan pada peralatan pengaman beban lebih pada motor listrik tegangan rendah.

Mengingat pemakaiannya yang langsung sering kita jumpai dilapangan maka dalam buku ini perlu diberikan bagaimana konstruksi pengaman ini sehingga diluarapakan dapat dipakai untuk pegangan khususnya dalam hal perbaikan atau perawatannya.

Untuk keperluan tertentu, misalnya untuk pengamanan terhadap perbedaan tegangan, maka jenis relay arus lebih elektro-magnetik dapat diubah menjadi relay



tegangan elektro-magnetik, yakni dengan mengadakan perubahan pada jumlah dan ukuran kawat belitannya.



Gambar 2.10 Elektro-Magnetik Over Current Relay

Keterangan gambar :

- 1 = inti magnetik
- 2 = kumparan
- 3 = jangkar
- 4 = tangkai relay
- 5 = pegas
- 6 = kontak jembatan (*Bridge Contact*)
- 7 = kontaktor tetap
- 8 = adjusting refer
- 9 = plat indikator penyetelan

Ada 2 macam relay tegangan elektro-magnetik, yaitu over voltage (tegangan lebih) dan under voltage tegangan kurang). Sesuai dengan istilahnya, relay tegangan lebih akan bekerja bila tegangan operasional melebihi tegangan



settingnya, sedangkan relay tegangan kurang harus bekerja bila tegangan operasional turun sampai di bawah nilai settingnya.

Untuk menyatakan keadaan operasi normalnya, umumnya ditunjukkan oleh suatu harga perbandingan pick-up ( $K_d$ ) yaitu harga perbandingan antara harga reset dan operasinya, yang dinyatakan dalam rumus:

Pick-up ratio

$$K_d = \frac{U_d}{U_p} > 1, \text{ untuk Over voltage} \dots\dots\dots(2)$$

$$K_d = \frac{U_d}{U_p} < 1, \text{ untuk Over voltage} \dots\dots\dots(3)$$

Dimana :

$U_d$  = tegangan reset (*reset voltage*)

$U_p$  = tegangan operasional (*operation voltage*)

## 2.9 Standard Rele Arus Lebih I.D.M.T

Karakteristik pemutusan arus/waktu rele I.D.M.T bervariasi sesuai dengan kebutuhan waktu pemutusan yang diperlukan dan karakteristik dari peralatan proteksi lain yang dipergunakan dalam jaringan. Untuk keperluan ini, IEC 60255 mendefinisikan sejumlah karakteristik standar sebagai berikut:

Standard Inverse (SI)

Very Inverse (VI)

Extremely Inverse (EI)

Definite Time (DT)



Tabel 2.1 Definisi Karakteristik rele standard

Relay Characteristic	Equation (IEC 60255)
Standard Inverse (SI)	$t = TMS \times \frac{0.14}{I_r^{0.02} - 1}$
Very Inverse (VI)	$t = TMS \times \frac{13.5}{I_r - 1}$
Extremely Inverse (EI)	$t = TMS \times \frac{80}{I_r^2 - 1}$
Long time standard earth fault	$t = TMS \times \frac{120}{I_r - 1}$

(a): Relay characteristics to IEC 60255

### 2.10 Pemilihan/setting Arus kerja dan Kelambatan waktu

Sebelum membahas tentang penyetelan baik untuk arus kerja maupun untuk kelambatan waktu, terlebih dahulu disini dijelaskan prinsip dasarnya, untuk selanjutnya akan diberikan contohnya.

#### ❖ Prinsip Dasar Perhitungan Penyetelan Arus (IS)

- Batas Penyetelan Minimum Relay Arus Lebih

Batas penyetelan minimum dinyatakan bahwa relay arus tidak boleh bekerja pada saat terjadi beban maksimum, sehingga:

$$I_s = \frac{k_{fk}}{k_d} \times I_{Maks} \dots \dots \dots (3)$$

Dimana :

$I_s$  : Penyetelan arus

$k_{fk}$  : faktor keamanan, mempunyai nilai antara 1,1 – 1,2

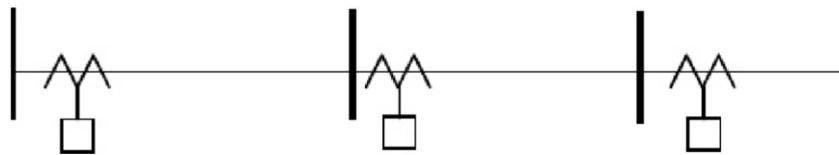
$k_d$  : Faktor arus kembali,  $I_d$  antara 0,7 - 0,9 untuk relay definite,  $I_p = 1,0$  untuk relay inverse



$I_{Maks}$  : Arus maksimum yang diijinkan pada peralatan yang diamankan, dimana pada umumnya diambil nilai arus nominalnya.

- Batas Penyetelan Maksimum Relay Arus Lebih

Batas penyetelan maksimum relay arus lebih adalah bahwa relay harus bekerja bila terjadi gangguan hubung singkat pada rel seksi berikutnya.



Gambar 2.11 Jaringan Listrik Terbagi Dalam 3 Zone Pengaman

Cara penyetelan arus

$$I_s = k \cdot I_n \dots\dots\dots (4)$$

Dimana :

$k$  : suatu konstanta pewrbandingan, harganya tergantung dari pabrik pembuat relay, umumnya nilainya adalah 0,6 - 1,4 atau 1,0 - 2,0.

$I_n$  : arus nominal

Untuk arus yang melewati kumparan relay dengan menggunakan rumus yaitu sebagai berikut :

$$I_s = I_n \times \frac{1}{Ratio CT} \dots\dots\dots (5)$$

## 2.11 Setting Waktu Relai Arus Lebih

Untuk meningkatkan faktor security, relai diferensial dilengkapi dengan karakteristik kurva kecuraman (slope). Daerah operasi relai berada di atas slope karakteristik kurvanya sedangkan daerah blok berada di bawahnya. Karena seting yang dimasukkan pada relai adalah seting TMS maka waktu kerja yang



diinginkan pada saat terjadinya gangguan fasa-fasa di bus harus ditentukan (umumnya waktu kerja relai proteksi back-up penghantar adalah 1 detik pada saat terjadinya gangguan fasa-fasa di bus).

$$t = \frac{0,14}{(I_{hsph}/I_s)^{0,02}-1} * TMS \text{ (Td)} \dots\dots\dots (6)$$

Karena seting yang dimasukkan pada relai adalah seting TMS maka waktu kerja yang diinginkan pada saat terjadinya gangguan 1 fasa di bus lokal harus ditentukan (umumnya waktu kerja relai proteksi back-up penghantar adalah 1 detik pada saat terjadinya gangguan 1 fasa-tanah di bus).

$$TMS = \frac{(I_{hsph}/I_s)^{0,02}-1}{0,14} * t \dots\dots\dots (7)$$

Dimana :

*TMS* : Time Multiple Setting

*I<sub>hsph</sub>* : Arus Hubung singkat Fasa-Fasa di lokal Bus (A).

*I<sub>s</sub>* : Seting Arus OCR (A).

*t* : Waktu kerja rele arus lebih (detik)

*Td* = Time delay (detik)

## 2.12 Sistem Per Unit

Sistem per-unit sesungguhnya merupakan cara penskalaan atau normalisasi. Besaran – besaran sistem dalam satuan masing – masing, tegangan dalam volt – arus dalam ampere – impedansi dalam ohm, ditransformasikan ke dalam besaran tak berdimensi yaitu per – unit (disingkat dengan pu). Pada mulanya transformasi ke dalam per-unit dimaksudkan untuk mempermudah perhitungan, namun dengan Muhammad Taqiyyudin Alawiy. *Proteksi Sistem Tenaga Listrik* ,(Univeraitas Islam Malang,2008) Hal 27-28

Karyono, dkk. *Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa Bali Edisi Pertama*,(Jakarta:PT.PLN Persero,2013) Hal 94-111



perkembangan penggunaan computer maksud penyederhanaan itu sudah kurang berarti lagi. Walaupun demikian, beberapa keuntungan yang terkandung dalam sistem per-unit masih terasa dan oleh karena itu kita akan pelajari.

Harga dari pu dari besaran elektrik yang digunakan merupakan ratio besaran tersebut terhadap besaran acuan atau besaran dasar, ratio ini tanpa dimensi dan merupakan bilangan decimal. Besaran aktual, seperti tegangan (V), arus (I), daya (P), daya reaktif (Q), volt ampere (VA), resistansi (R), reaktansi (X) dan impedansi (Z) dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\text{Besaran dalam pu} = \frac{\text{nilai aktual}}{\text{nilai dasar}}$$

$$\text{Besaran dalam \%} = \text{besaran dalam pu} \times 100$$

Dimana besaran aktual merupakan harga skalar atau kompleks dari besaran elektrik tersebut dinyatakan dengan satuan yang sesuai, seperti: volt, ampere, ohm, atau watt, sedangkan besaran dasar atau acuan adalah besaran tertentu yang dipilih sesuai dengan kebutuhan dan diterapkan sebagai acuan. Jadi sistem pu atau % adalah besaran tanpa dimensi yang dapat berupa bilangan skalar atau kompleks.

Cara perhitungan dengan menggunakan nilai per unit mempunyai keuntungan tertentu, yaitu bahwa hasil dua nilai per unit adalah tetap suatu nilai per unit juga. Karena itu perhitungan per unit dianggap lebih menarik dari pada perhitungan secara persen, terutama untuk perhitungan jaringan, yang menggunakan banyak transformator dengan tingkat tegangan yang berbeda-beda. Dalam menggunakan analisis per unit, semua kaitan antara tegangan, arus impedansi dan voltampere harus tetap dapat dipertahankan. Bila nilai dasar dari tegangan dan arus jaringan telah ditentukan, maka kedua nilai dasar lainnya, yaitu impedansi dan voltampere, menjadi tertentu pula. Biasanya tegangan dan arus dipilih sebagai dua nilai dasar. Dimana dua nilai dasar lainnya dapat dinyatakan dengan kedua nilai dasar tersebut.

$$I \text{ dasar} = \frac{VA \text{ dasar}}{V \text{ dasar}} \dots\dots\dots(8)$$



$$Z_{\text{dasar}} = \frac{V_{\text{dasar}}}{I_{\text{dasar}}} = \frac{(V_{\text{dasar}})^2}{VA_{\text{dasar}}} \dots\dots\dots(9)$$

Karena persoalan rangkaian tiga fasa jaringan umumnya diselesaikan dengan rangkaian satu fasa ke netral, sedangkan data sistem biasanya diberikan dalam bentuk tiga fasa dengan tegangan ke kawat, maka diperlukan penyesuaian dengan langkah-langkah sebagai berikut :

- 1) Ubah tegangan kawat-kawat sistem tiga fasa menjadi tegangan kawat-netral sistem satu fasa.
- 2) Tentuka nilai per unit tegangan kawat-netral dan daya fasa tunggal.
- 3) Lakukan analisis sistem per unit.
- 4) Ubah kembali hasil analisis sistem per unit menjadi besaran asli kawat-netral fasa tunggal, dengan mengingat bahwa nilai asli = (nilai per unit) x (nilai dasar).
- 5) Ubah hasil pada langkah 4 menjadi besaran asli tegangan kawat-kawat dan daya tiga fasa.

Penentuan besaran basis untuk penggunaan sistem per-unit adalah sebagai berikut :

- a. Penetapan daya basis ini biasanya mengambil angka-angka yang mudah, seperti 1, 10, 100, da 1000.
- b. Tegangan nominal adalah nilai tegangan yang dirancang untuk sistem bekerja pada pembebanan seimbang. Tegangan nominal fasa-fasa,  $V_{ff}$  di indonesia misalnya 20 kV, 150kV, dan 500kV.
- c. Dalam menentukan besaran-besaran basis, kita menganggap semua saluran dan transformator adalah ideal. Dengan demikian maka bus-bus yang terhubung langsung oleh saluran transmisi tanpa melalui transformator akan memiliki tegangan basis yang sama.

Tegangan basis bus-bus yang dihubungkan oleh saluran transmisi melewati suatu transformator berbanding lurus dengan perbandingan jumlah lilitan di



- kedua sisi transformator. Dengan demikian maka nilai per-unit tegangan di kedua sisi transformator tidak lagi tergantung dari tegangan transformator.
- d. Arus di setiap bagian sistem adalah daya basis di bagian tersebut dibagi dengan tegangan basisnya.
  - e. Impedansi basis di tiap bagian sistem adalah tegangan basis dibagi arus basis.
  - f. Besaran dalam per-unit adalah besaran sesungguhnya dibagi dengan besaran basis. Dengan besaran dalam per-unit kita gambarkan diagram rangkaian model satu-fasa.

### 2.13 Arus Nominal Beban (In)

Dalam menentukan luas penampang penghantar harus sedemikian rupa sehingga penghantar tersebut dapat menyalurkan tenaga listrik secara aman dan efisien, dan supaya penghantar dapat menyalurkan energi secara maksimal maka harus diperhatikan kemampuan hantar arusnya.

Untuk beban 1 fasa :

$$\text{Arus dasar/arus nominal} = \frac{\text{MVA}_{1\phi\text{dasar}}}{\text{tegangan kV}_{\text{LNdasar}}} \dots\dots\dots (8)$$

Untuk beban 3 fasa :

$$\text{Arus dasar/arus nominal (In)} = \frac{\text{MVA}_{3\phi\text{dasar}}}{\sqrt{3}\text{tegangan kV}_{\text{LLdasar}}} \dots\dots\dots (9)$$

Dimana :

In : arus nominal

MVA : daya (s)

kV : tegangan (v)



## 2.14 Notasi Impedansi

Dari diagram sistem tenaga elektrik dapat dilihat bahwa terdapat beberapa level tegangan dalam sistem yang sama, sehingga tidaklah praktis bila kita menggunakan kapasitas MVA pembangkit sebagai acuan untuk menentukan besaran pu atau persen sistem. Sebelum kita melakukan perhitungan, parameter sistem harus mengacu pada suatu besaran dasar dan merespresentasikannya sebagai suatu besaran yang menyatukan impedansi sistem, baik dalam besaran ohmik, persen atau pu. Besaran dasar adalah daya dan tegangan. Umumnya besaran yang digunakan adalah besaran daya tiga fasa dalam MVA dan tegangan line dalam kV. Besaran dasar bagi impedansi merupakan hasil dari kedua besaran dasar tersebut, yaitu:

$$Z_b = \frac{(kV)^2}{MVA} \Omega \dots\dots\dots (10)$$

Impedansi dasar dapat dihitung dalam besaran satu fasa atau tiga fasa. Harga pu atau persen dari setiap impedansi yang ada dalam sistem adalah ratio antara besaran aktual dan besaran dasar, karenanya:

$$Z_{pu} = Z_{\Omega} \times \frac{MVA_{dasar}}{(kV_{dasar})^2} \dots\dots\dots (11)$$

$$Z_{\%} = Z_{pu} \times 100 \dots\dots\dots (12)$$

Dengan transposisi sederhana dari persamaan diatas dapat ditentukan harga ohmik impedansi, harga pu dan persen. Seperti dinyatakan diatas, sistem mungkin saja bekerja dengan level tegangan yang berbeda dan sangat mungkin pula rating MVA pembangkitan berbeda pula. Sehingga pemilihan besaran dasar yang menjadi berbeda pula, karena itu diperlukan perhitungan untuk merubah sebuah besaran sistem dari besaran dasar yang satu ke besaran dasar yang baru, sebagai berikut:

$$Z_{pu(MVA \text{ dasar-baru})} = Z_{pu(MVA \text{ dasar-lama})} \times \frac{MVA_{dasar-lama}}{MVA_{dasar-baru}} \dots\dots\dots (13)$$



$$Z_{pu}(\text{MVA dasar-baru}) = Z_{pu}(\text{MVA dasarlama}) \times \frac{(kV_{\text{dasar-lama}})^2}{(kV_{\text{dasar-baru}})^2} \dots\dots\dots (14)$$

Untuk menentukan reaktansi pada generator yaitu dengan rumus sebagai berikut :

$$X_g'' = X_d'' \times \frac{MVA_{\text{dasar baru}}}{MVA_{\text{dasar lama}}} \dots\dots\dots (15)$$

Dimana :

$X_d''$  : Reaktansi subtransien adalah nilai reaktansi yang menentukan besar arus hubung singkat sesaat setelah terjadi gangguan. Nilai ini hanya berlangsung selama beberapa cycle setelah gangguan terjadi dan dalam sekitar 0,1 detik.

$MVA_{\text{dasar lama}}$  : Daya sebenarnya

$MVA_{\text{dasar baru}}$  : Penetapan daya basis baru ini biasanya mengambil angka-angka yang mudah, seperti 1, 10, 100, dan 1000.

Untuk arus gangguan tiga fasa dapat menggunakan rumus sebagai berikut :

$$I'' = \frac{1}{X''_g} \dots\dots\dots (16)$$

$$I_{\text{dasar3}\phi\text{phasa}} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} \dots\dots\dots (17)$$

$$I_f = I'' \times I_{\text{dasar3}\phi\text{phasa}} \dots\dots\dots (18)$$

Dimana :

$I''$  = Arus sub transient

$I_f$  = Arus gangguan



### **2.15 Perhitungan Gangguan**

Sistem tenaga pada umumnya diperlakukan sebagai suatu jaringan tiga fasa seimbang. Bila terjadi gangguan, keseimbangan sistem akan terganggu, sehingga menyebabkan timbulnya tegangan dan arus ketidakseimbangan dalam jaringan tersebut. Hal ini tidak terjadi pada gangguan tiga fasa, karena gangguan ini melibatkan ketiga fasa jaringan yang sama pada lokasi yang sama, hal ini disebut sebagai gangguan seimbang. Dengan menggunakan metoda komponen simetris dan menerapkan teori dan konsep pergantian sistem sebelum dan setelah gangguan, sehingga dimungkinkan untuk menganalisis berbagai kondisi sistem pada saat terjadi gangguan.

Dari segi pemakaian peralatan proteksi sangat penting untuk mengetahui distribusi arus gangguan yang melalui sistem dan perbedaan tegangan yang terjadi pada seluruh bagian sistem akibat gangguan. Lebih jauh, batasan harga dari arus pada setiap titik dimana terdapat rele proteksi harus diketahui. Jika gangguan tersebut harus diisolir. Informasi yang umum dibutuhkan adalah:

- I. Arus gangguan maksimum pada titik dimana rele terpasang.
- II. Arus gangguan maksimum pada titik dimana rele terpasang.
- III. Arus gangguan maksimum yang akan melalui rele terpasang.

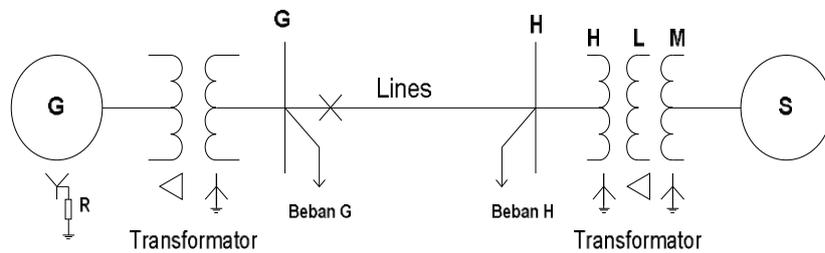
Untuk mendapatkan informasi besaran-besaran diatas, batasan stabilitas generator dan kondisi operasi yang mungkin termasuk metoda pentanahan sistem harus diketahui dan gangguan selalu diasumsikan dengan impedansi gangguan nol guna mendapatkan arus maksimum pada kondisi sistem tersebut.

#### **3.15.1 Sumber-Sumber Urutan Positif**

Diagram satu garis dari sistem tenaga atau areal yang akan dikaji adalah titik awal untuk membentuk jaringan urutan. Dalam Gambar 2.12 diperlihatkan diagram segaris sebuah sistem tenaga listrik sederhana.

---

Hendra Marta Yudha. *Rele Proteksi Prinsip dan Aplikasi*, (Palembang: Universitas Sriwijaya, 2008)  
Hal 29, 41-50, 143



Gambar 2.12 Diagram satu garis sebuah sistem tenaga listrik

Lingkaran menyatakan sumber urutan positif, dapat berupa generator, motor sinkron, kondensor sinkron dan mungkin saja motor induksi. Arus simetris yang disuplai oleh sistem tenaga akibat adanya gangguan akan berubah secara eksponensial dari harga awal yang cukup tinggi sampai mencapai harga tunak. Selama periode peralihan ini ada tiga besaran reaktansi yang dapat digunakan.

- Reaktansi (sumbu langsung) sub peralihan,  $X''_d$
- Reaktansi peralihan  $X'_d$
- Reaktansi sinkron  $X_d$

Harga reaktansi,  $X''_d$  dinyatakan dalam per unit rating kVA mesin, yaitu antara 0,7 sampai 3,0 p.u, dengan time konstan antara 0,035 sampai 0,05 detik, sedangkan  $X'_d$  berkisar antara 1,5 – 2,5 kali harga sub peralihan, dengan time konstan 0,6-1,5 detik. Harga  $X_d$  adalah 4-15 kali sub peralihan (harga ini adalah harga saturasi bila gangguan bertahan).

Untuk studi hubung singkat, digunakan  $X''_d$  untuk reaktansi jaringan urutan positif, dan akan diperoleh arus gangguan maksimum yang diperlukan dalam penggunaan rele berkecepatan tinggi. Untuk rele kecepatan rendah, rele baru akan bereaksi setelah reaktansi mencapai harga peralihannya, namun pada umumnya dalam suatu studi gangguan tetap dipergunakan harga  $X''_d$ , kecuali pada kasus khusus, dapat pula dipergunakan harga  $X'_d$  bilamana diperlukan program khusus

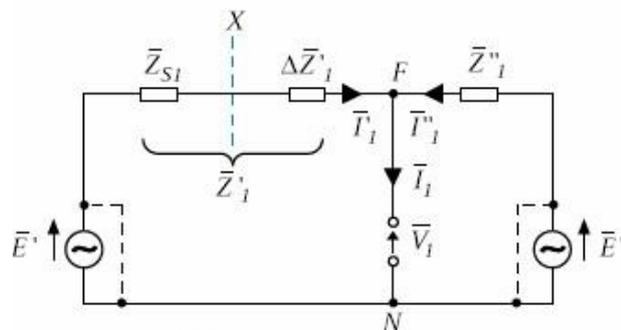


untuk menentukan besar penurunan arus gangguan bagi rele-rele proteksi berkecepatan rendah, namun hal ini sulit untuk dan lamban serta tidak memberikan keuntungan yang berarti.

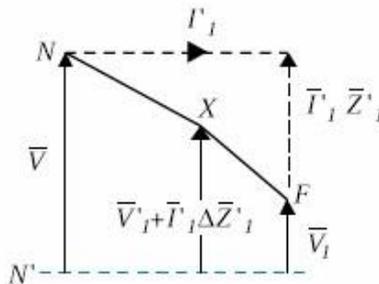
### 2.15.2 Jaringan Urutan Positif

Dalam kondisi normal hanya tegangan dan arus urutan positif yang ada dalam sistem dan karenanya hanya ada impedansi urutan positif pula. Bilamana terjadi gangguan berubah dari 0 menjadi  $I_1$  dan tegangan urutan positif sepanjang cabang tersebut berubah dari  $V$  menjadi  $V_1$ . Mengganti cabang yang mengalami gangguan dengan sumber tegangan yang sama dengan tegangan gangguan dan menghubungkan singkat semua tegangan sistem pada kondisi normal akan mengakibatkan mengalirnya arus  $\Delta I_1$  kedalam sistem dan

$$\Delta I = \frac{(V-V_1)}{Z_1} \dots\dots\dots (19)$$



(a) System diagram



(b) Gradient diagram

Gambar 2.13 Jaringan urutan positif dari sebuah sistem sederhana dengan gangguan di F



Dimana  $Z_1$  adalah impedansi urutan positif dari sistem dilihat dari titik gangguan, arus gangguan yang mengalir dari sistem menuju titik gangguan sama dengan  $-\Delta I_1$  oleh karena itu :

$$V_1 = V - I_1 Z_1 \dots\dots\dots(20)$$

Adalah relasi antara arus urutan positif dan tegangan pada cabang selama terjadi gangguan. Dalam gambar 2.13 yang menggambarkan sebuah sistem sederhana, tegangan jatuh  $I_1'Z_1''$  dan  $I_1''Z_1''$  adalah sama dengan  $(V-V_1)$ , dimana arus-arus  $I_1'$  dan  $I_1''$  menuju titik gangguan dari sebelah kiri dan kanan titik gangguan dan impedansi  $Z_1'$  dan  $Z_1''$  adalah impedansi total dilihat dari masing-masing sisi titik gangguan. Tegangan  $V$  umumnya sama dengan tegangan sirkit terbuka pada sistem dan dapat dilihat bahwa  $V \approx E' \approx E''$ . Jadi tegangan urutan positif akibat adanya gangguan adalah lebih besar dititik sumber seperti diperlihatkan dalam diagram gradien pada gambar 2.13.

### 2.15.3 Jaringan Urutan Negatif

Dengan alasan hanya besaran urutan positif yang muncul dalam sistem pada kondisi normal dan besaran urutan negatif hanya akan muncul selama terjadi gangguan tidak seimbang. Jika tidak ada besaran urutan negatif yang muncul dalam cabang yang mengalami gangguan akibat gangguan tersebut, maka kemudian bila gangguan muncul, perubahan tegangan adalah  $V_2$ , dan arus  $I_2$  yang dihasilkan mengalir dari jaringan menuju titik gangguan adalah :

$$I_2 = \frac{-V_2}{Z_2} \dots\dots\dots(21)$$

atau :

$$V_2 = - I_2 Z_2 \dots\dots\dots(22)$$



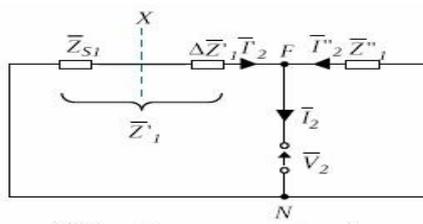
Impedansi dalam jaringan urutan negatif adalah sama dengan impedansi dalam jaringan urutan positif. Dalam mesin-mesin elektrik  $Z_1 \neq Z_2$ , namun pada sistem-sistem besar perbedaan ini diabaikan. Diagram jaringan urutan negatif diperlihatkan dalam gambar 2.14 sama dengan diagram urutan positif, dengan dua perbedaan penting, yaitu : tidak ada sumber tegangan pengendali sebelum gangguan dan tegangan urutan negatif  $V_2$  lebih besar pada titik gangguan.

**2.15.4 Jaringan Urutan Nol**

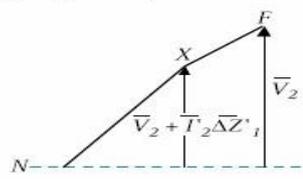
Relasi tegangan dan arus yang berlaku dalam jaringan urutan nol sama dengan pada jaringan urutan negatif pada saat terjadi gangguan, karenanya :

$$V_0 = -I_0 Z_0 \dots\dots\dots (23)$$

Demikian juga dengan diagram urutan nol seperti diperlihatkan pada gambar 2.14 dimana harga  $I_0$  menggantikan  $I_2$  dan seterusnya. Arus dan tegangan dalam jaringan urutan nol tanpa co-fasa, artinya semuanya dalam fasa yang sama. Sehingga untuk arus urutan nol agar dapat mengalir dalam sistem harus ada jalan balik penghubung, baik melalui konduktor netral atau melalui tanah. Dalam hal ini harus diingat pada saat menentukan rangkaian urutan nol. Secara umum  $Z_1 \neq Z_0$  dan harga  $Z_0$  sangat variatif tergantung pada jenis pembangkit, cara dan hubungan lilitan dan metoda pentanahan sistem.



(a) Negative sequence network



(b) Gradient diagram

Gambar 2.14 Jaringan Urutan Negatif dengan Gangguan dititik F