



## BAB II

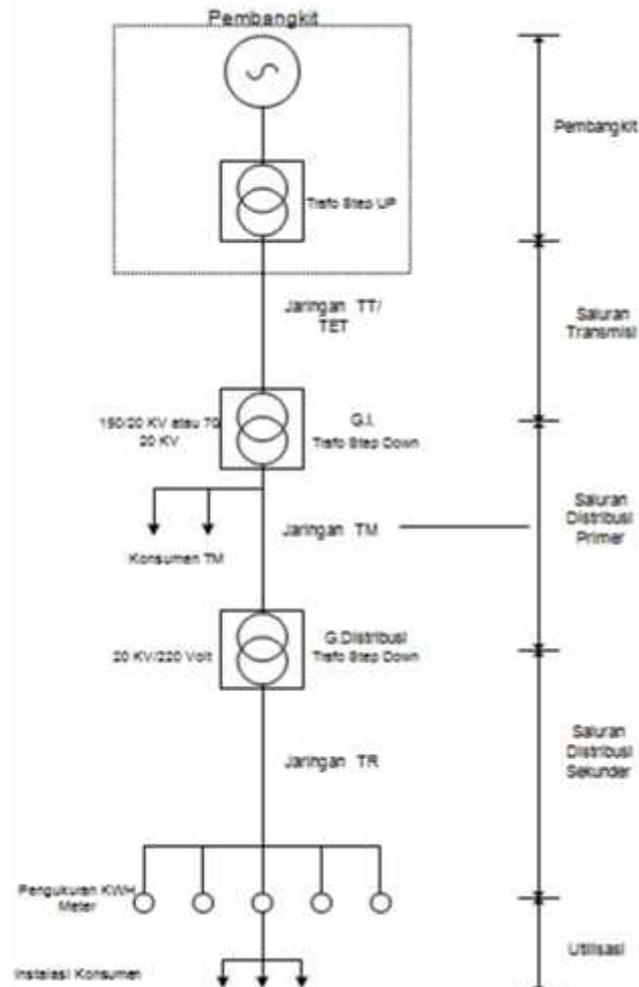
### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar sampai ke konsumen. Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit dengan tegangan dari 11 kV sampai 24 kV dinaikkan tegangannya oleh gardu induk menggunakan transformator penaik tegangan menjadi 70 kV, 154 kV, 220kV atau 500 kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi. Tujuan menaikkan tegangan ialah untuk memperkecil kerugian daya listrik pada saluran transmisi, dimana dalam hal ini kerugian daya adalah sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir ( $I^2.R$ ). Dengan daya yang sama bila nilai tegangannya diperbesar, maka arus yang mengalir semakin kecil sehingga kerugian daya juga akan kecil pula. Dari saluran transmisi, tegangan diturunkan lagi menjadi 20 kV menggunakan transformator penurun tegangan pada gardu induk distribusi yang kemudian dengan sistem tegangan tersebut penyaluran tenaga listrik dilakukan oleh saluran distribusi primer. Dari saluran distribusi primer inilah gardu-gardu distribusi menurunkan tegangannya menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220V/380V. Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke konsumen. Pada sistem penyaluran daya jarak jauh digunakan tegangan setinggi mungkin dengan menggunakan trafo step-up. Nilai tegangan yang sangat tinggi ini menimbulkan beberapa konsekuensi antara lain: berbahaya bagi lingkungan dan mahalnya harga perlengkapannya, selain itu menjadi tidak cocok dengan nilai tegangan yang dibutuhkan pada sisi beban. Oleh karena itu, pada daerah-daerah pusat beban, tegangan saluran yang tinggi ini diturunkan kembali dengan menggunakan trafo step-down. Dalam hal ini jelas bahwa sistem distribusi merupakan bagian yang penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan. (Suhadi, dkk., 2008 : 11)



Gambar di bawah ini memperlihatkan skema suatu sistem tenaga listrik.



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik (Kadir, 2000 : 5)

### 2.1.1 Jaringan Distribusi Primer

Jaringan distribusi primer adalah bagian dari sistem distribusi yang menghubungkan gardu induk ke beberapa gardu hubung atau gardu distribusi pada suatu tegangan primer. Beberapa pengertian mengenai bagian dari sistem juga berubah, jaringan antar gardu induk dan gardu distribusi yang dahulu disebut sebagai jaringan subtransmisi sekarang disebut jaringan distribusi primer, sedangkan jaringan distribusi sekunder adalah jaringan antara gardu distribusi dan jaringan pelayanan tegangan rendah yang langsung berhubungan dengan konsumen.



Bagian-bagian sistem distribusi primer terdiri dari :

1. Transformator daya, berfungsi untuk menurunkan tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan menengah atau sebaliknya.
2. Pemutus tegangan, berfungsi sebagai pengaman yaitu pemutus daya.
3. Penghantar, berfungsi sebagai penghubung daya.
4. Gardu hubung, berfungsi menyalurkan daya ke gardu-gardu distribusi tanpa mengubah tegangan.
5. Gardu distribusi, berfungsi untuk menurunkan tegangan menengah menjadi tegangan rendah.

#### **2.1.1.1 Jaringan Distribusi Primer Menurut Bahan Konduktornya**

Jaringan distribusi SUTM 20 KV pada umumnya menggunakan jenis kawat yaitu saluran yang konduktornya tidak dilapisi isolasi sebagai pelindung luar (telanjang). Tipe demikian digunakan pada pasangan luar yang diharapkan terbebas dari sentuhan misalnya untuk jenis kabel yaitu saluran yang konduktornya dilindungi/dibungkus lapisan isolasi. Bahan konduktor yang paling populer digunakan adalah tembaga (copper) dan aluminium. Tembaga mempunyai kelebihan dibandingkan dengan kawat penghantar aluminium karena konduktivitas dan kuat tariknya lebih tinggi. Tetapi kelemahannya ialah untuk besar tahanan yang sama, tembaga lebih berat dari aluminium, dan juga lebih mahal. Oleh karena itu kawat penghantar aluminium telah menggantikan kedudukan tembaga. Untuk memperbesar kuat tarik dari kawat aluminium digunakan campuran aluminium (aluminium alloy). Beberapa jenis konduktor :

a. AAC (*All-Aluminium Konduktor*)

Kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium.

b. AAAC (*All-Aluminium-Alloy Konduktor*)

Kawat penghantar yang terbuat dari campuran aluminium.

c. ACSR (*All Konduktor, Steel-Reinforce*)

Kawat penghantar aluminium berinti kawat baja.

d. ACAR (*Aluminium Konduktor, Alloy- Reinforced*)

Kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran.

(Hutauruk, 1996 : 4)



### 2.1.1.2 Jaringan Distribusi Berdasarkan Sistem Penyaluran

#### A. Jaringan Hantaran Udara (*Over Head Line*).

Jaringan udara dapat berupa kawat terbuka atau kabel udara. Jaringan ini direncanakan untuk kawasan dengan kepadatan beban yang rendah atau sangat rendah. Jaringan hantaran udara ini salah satunya menggunakan penghantar AAAC dan penghantar AAACS. Adapun beberapa keuntungan dan kerugian penggunaan jaringan ini, antara lain adalah:

- Keuntungannya:
  1. Lebih fleksibel dan leluasa dalam upaya untuk perluasan beban.
  2. Harga material relatif lebih rendah dari jaringan bawah tanah.
  3. Lebih mudah dalam pemasangannya.
  4. Bila terjadi gangguan hubung singkat, mudah diatasi dan dideteksi.
- Kerugiannya:
  1. Mudah terpengaruh oleh cuaca buruk, bahaya petir, badai, tertimpa pohon, dsb.
  2. Untuk wilayah yang penuh dengan bangunan yang tinggi, sukar untuk menempatkan saluran.
  3. Ongkos pemeliharaan lebih mahal, Karena perlu jadwal pengecatan dan penggantian material listrik bila terjadi kerusakan.

Jaringan udara memiliki gardu-gardu tiang berkapasitas kecil dan semua peralatannya berupa jenis pemasangan luar (*outdoor type*). Kemampuan penyalurannya relatif lebih kecil dibanding jaringan bawah tanah dan dari sistem kehandalan, jaringan ini lebih rendah dari jaringan bawah tanah. Hantaran udara, terutama hantaran udara telanjang digunakan pada pemasangan di luar bangunan, diregangkan pada isolator di antara tiang-tiang yang disediakan secara khusus.

#### B. Jaringan Hantaran Bawah Tanah (*Underground Cable*).

Jaringan bawah tanah direncanakan untuk kawasan padat beban tinggi seperti di pusat kota, pusat industri, yang mengutamakan kehandalan dan estetika pada tata tempat dan lokasi, pemasangan hantaran jaringan di bawah tanah lebih baik jika dibandingkan dengan pemasangan hantaran jaringan udara. Pada



jaringan ini jenis penghantar yang digunakan adalah kabel tanah (Kabel NYFGBY). Jaringan ini lebih handal dibandingkan dengan hantaran jaringan udara dikarenakan sistem pengaman yang dimiliki lebih banyak di bandingkan penghantar telanjang. Gardunya merupakan gardu beban berkapasitas besar dan peralatan-peralatannya berupa pasangan dalam (*indoor type*). Adapun keuntungan dan kerugian jaringan ini adalah:

- Keuntungannya:
  1. Tidak terpengaruh oleh cuaca buruk, bahaya petir, badai, tertimpa pohon, dsb.
  2. Tidak mengganggu pandangan, bila adanya bangunan yang tinggi.
  3. Dari segi keindahan, saluran bawah tanah lebih sempurna dan lebih indah dipandang.
  4. Mempunyai batas umur pakai dua kali lipat dari saluran udara.
  5. Ongkos pemeliharaan lebih murah, karena tidak perlu adanya pengecatan.
- Kerugiannya:
  1. Biaya investasi pembangunan lebih mahal dibanding saluran udara.
  2. Saat terjadi gangguan hubung singkat, pencarian titik gangguan susah
  3. Perlu pertimbangan-pertimbangan teknis yang lebih mendalam di dalam perencanaan, khususnya untuk kondisi tanah yang dilalui.
  4. Hanya tidak dapat menghindari bila terjadi bencana banjir, desakan akar pohon, dan ketidakstabilan tanah. (Suswanto, 2008 : 17-18)

## 2.2 Gangguan

Gangguan listrik adalah gangguan karena adanya hubungan secara langsung antar fasa (fasa R-S, fasa R-T, fasa T-S atau R-S-T terhubung secara langsung) atau fasa–tanah yang dapat terjadi pada sistem tenaga listrik di jaringan, gardu induk atau di Pusat Listrik, dimana besarnya arus gangguan hubung singkat ditentukan oleh besar kecilnya sumber listrik (generator atau trafo tenaga), impedansi sumber dan impedansi dari jaringan yang dilalui oleh arus gangguan hubung singkat tersebut.



Ada berbagai macam gangguan, yaitu gangguan beban lebih, gangguan hubung singkat, gangguan tegangan lebih, dan gangguan ketidak stabilan. Tetapi dalam bab ini penulis hanya membahas mengenai gangguan hubung singkat.

Gangguan hubung singkat, dapat terjadi antar fasa (3 fasa atau 2 fasa), dua fasa ketanah dan satu fasa ketanah yang sifatnya bisa temporer atau permanen.

- Gangguan Permanen antara lain:

Gangguan hubung singkat permanen, bisa terjadi pada kabel atau pada belitan trafo tenaga yang disebabkan karena arus gangguan hubung singkat antara fasa atau fasa-tanah, sehingga penghantar menjadi panas yang berpengaruh pada isolasi atau minyak trafo tenaga, sehingga isolasi tembus. Pada generator, yang disebabkan adanya gangguan hubung singkat atau pembebanan yang melebihi kemampuan generator. Sehingga rotor memasok arus dari eksitasi berlebih yang dapat menimbulkan pemanasan pada rotor yang dapat merusak isolasi sehingga isolasi tembus, terjadilah gangguan hubung singkat. Di titik gangguan terjadi kerusakan yang permanen, dan peralatan yang terganggu baru bisa dioperasikan kembali setelah bagian yang rusak diperbaiki atau diganti.

- Gangguan Temporer

Gangguan ini biasanya terjadi pada saluran udara tegangan menengah yang tidak mempergunakan isolasi antara lain:

- Disebabkan karena adanya sambaran petir pada penghantar listrik yang tergelar diudara (saluran udara tegangan menengah) yang menyebabkan flashover antara penghantar dengan traves melalui isolator.
- Penghantar tertiuip angin yang dapat menimbulkan gangguan antar fasa atau penghantar fasa menyentuh pohon yang dapat menimbulkan gangguan fasa ke tanah.

Gangguan ini yang tembus (breakdown) adalah saluran udaranya, oleh karena itu tidak ada kerusakan yang permanen. Setelah arus gangguannya terputus, misalnya karena terbukanya circuit breaker oleh relai pengamannya, peralatan atau saluran yang terganggu tersebut siap dioperasikan kembali. (Sarimun, 2012 : 2-3)



### 2.3 Pengaman Distribusi

Sistem perlindungan yang terpasang di sistem distribusi tenaga listrik, bertujuan untuk mencegah atau membatasi kerusakan pada jaringan dan peralatannya serta untuk keselamatan umum.

Adapun peralatan pengaman pada sistem distribusi, antara lain:

- a. Pelebur (Fuse) atau *Fuse Cut Out* : adalah pengaman lebur yang ditempatkan pada sisi TM yang gunanya untuk mengamankan jaringan TM dan peralatan kearah GI terhadap gangguan hubung singkat di trafo, atau sisi TM sebelum trafo
- b. Pemutus Rangkaian (*Circuit Breaker/CB*), Pemutus (PMT): Saklar yang didesain untuk memutuskan arus gangguan hubung singkat, menghilangkan gangguan permanen dengan cara memisahkan dari bagian yang terganggu, bekerja secara otomatis.
- c. Saklar Pemisah, PMS (*Disconnect Switch*) : Saklar yang didesain memutus rangkaian listrik pada kondisi tanpa beban, bekerja secara manual.
- d. Saklar Pemisah Beban (*Load Break Switch, LBS*) : Saklar yang didesain untuk memutus rangkaian listrik/arus beban pada kondisi berbeban yang besarnya tidak lebih dari arus gangguan. Bekerja secara manual.
- e. Penutup Balik Rangkaian Otomatis (*Automatic Circuit Recloser*) : Alat perlindungan arus lebih yang waktu membuka-menutupnya dapat diatur guna menghilangkan gangguan sementara, atau memutus gangguan permanen. Bekerja secara otomatis.
- f. Saklar Seksi Otomatis (*Automatic Line Sectionalizer*), ALS : Pengaman cadangan dari CB atau bekerja tidak sendirian.
- g. Arrester adalah alat untuk melindungi isolasi atau peralatan listrik terhadap tegangan lebih, yang diakibatkan karena sambaran petir atau tegangan transient yang dari penyambungan atau pemutus rangkaian listrik dengan mengalirkan arus kejut ke tanah, serta membatasi berlangsungnya arus ikutan dan mengembalikan keadaan jaringan pada kondisi semula tanpa mengganggu sistem tenaga listrik.



- h. Relai (*Relay*) : Alat yang peka terhadap perubahan pada rangkaian yang dapat mempengaruhi bekerjanya alat lain. Jenis-jenis rele adalah rele arah, rele differensial, rele jarak, rele arus lebih, rele tegangan, dan rele frekuensi. (Sarimun, 2012 : 26-27)

### **2.3.1 Rele Proteksi**

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 dengan segera secara otomatis, memberi perintah untuk membuka pemutus tenaga untuk memisahkan peralatan atau bagian dari sistem yang terganggu dan memberi syarat 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, frekuensi, dll dengan besaran yang telah ditentukan, kemudian mengambil keputusan dengan seketika ataupun perlambatan waktu membuka pemutus tenaga. Pemutus tenaga umumnya dipasang pada generator, transformator daya, saluran transmisi, saluran distribusi dan sebagainya supaya masing-masing bagian dari sistem dapat dipisahkan sedemikian rupa sehingga sistem lainnya tetap dapat beroperasi secara normal.

Untuk melaksanakan fungsinya, maka rele pengaman harus memenuhi persyaratan, yaitu:

- Dapat diandalkan
- Selektif
- Waktu kerja rele cepat
- Sensitif
- Ekonomis dan sederhana (Samaulah, 2004 : 3-4)

### **2.3.2 Rele Arus Lebih**

Rele arus lebih adalah suatu rele yang bekerjanya berdasarkan adanya kenaikan arus yang melebihi suatu nilai pengamanan tertentu dan dalam jangka waktu tertentu, sehingga rele ini dapat dipakai sebagai pola pengamanan arus lebih. Karakteristik rele arus lebih berdasarkan waktu kerjanya, yaitu :

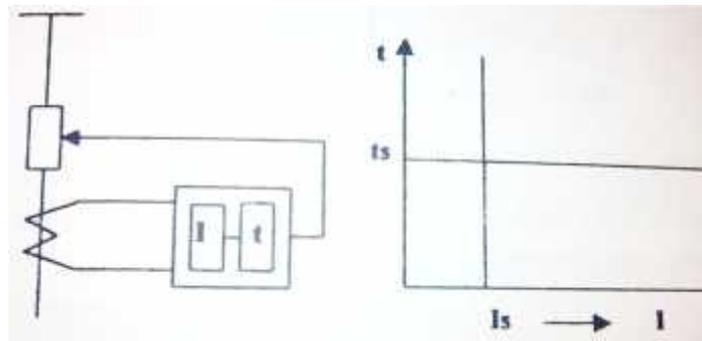


### 2.3.2.1 Rele Arus Lebih dengan Karakteristik Waktu Seketika (*Moment*)

Rele arus lebih dengan karakteristik waktu kerja seketika (*moment*) ialah jika jangka waktu rele mulai saat rele arus pick up samapai selesainya kerja rele sangat singkat (20~100 ms), yaitu tanpa penundaan waktu.

### 2.3.2.2 Rele Arus Lebih dengan Karakteristik Waktu Tertentu (*Definite Time*)

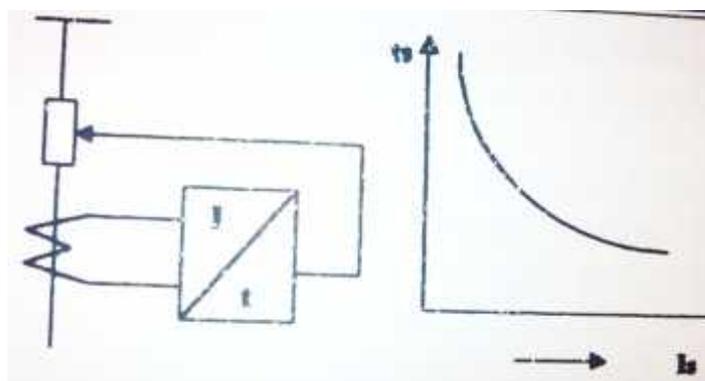
Rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu ialah jika jangka waktu mulai rele arus pick up sampai selesainya kerja rele diperpanjang dengan nilai tertentu dan tidak tergantung dari besarnya arus yang menggerakkan.



Gambar 2.2 Rele Arus Lebih dengan Karakteristik Waktu Tertentu

### 2.3.2.3 Rele Arus Lebih dengan Karakteristik Waktu Terbalik (*Inverse Time*)

Rele arus lebih 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.

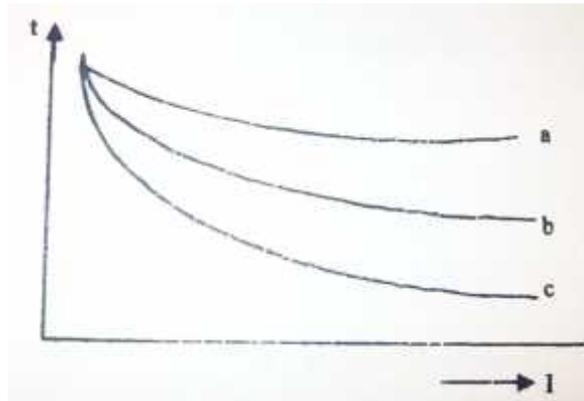


Gambar 2.3 Rele Arus Lebih dengan Karakteristik Waktu Terbalik



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

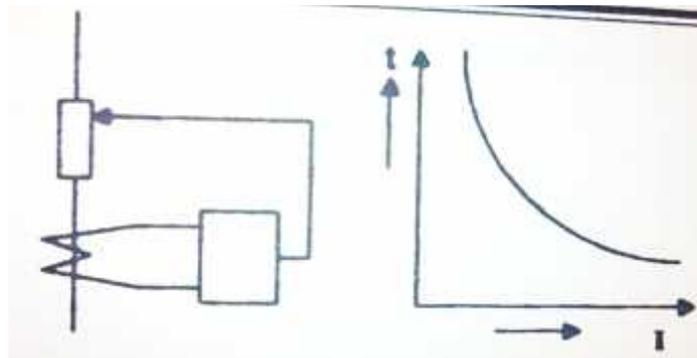
- a. Berbanding terbalik (*inverse*)
- b. Sangat berbanding terbalik (*very inverse*)
- c. Sangat berbanding terbalik sekali (*extremely inverse*)



Gambar 2.4 Perbandingan Terbalik dari Waktu Arus *Inverse Time Relay*

#### 2.3.2.4 Rele Arus Lebih *Inverse Definite Minimum Time*

Rele arus lebih dengan karakteristik *inverse 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 nilai arus yang lebih besar.



Gambar 2.5 Rele Arus Lebih *Inverse Definite Minimum Time*  
(Samaulah, 2004 : 53-56)



## 2.4 Koordinasi Proteksi Distribusi Tenaga Listrik

Relai arus lebih terpasang pada gardu induk atau pusat listrik dengan tegangan 20.000 volt, sebagai Proteksi/Pengaman bila terjadi gangguan hubung singkat di jaringan distribusi tenaga listrik.

Gangguan listrik yang terjadi pada sistem kelistrikan 3 fasa, adalah:

- Gangguan 3 fasa
- Gangguan 2 fasa
- Gangguan 2 fasa–tanah dan
- Gangguan 1 fasa-tanah

Bila gangguan listrik tidak diamankan dengan baik, dapat mentripkan pengaman listrik di incoming feeder sehingga pemadaman listrik dapat meluas yang disebut blackout. Untuk mengamankannya diperlukan koordinasi proteksi yang terpasang baik di incoming feeder, outgoing feeder dan pengaman yang terpasang di jaringan 20 kV (Relai atau Recloser).

Karena pada setelan proteksi (OCR & GFR) diperlukan besaran arus gangguan yang dimasukkan pada setelan OCR & GFR, untuk keperluan ini dibutuhkan hitungan besarnya arus gangguan (Amp), besarnya beban puncak (Amp), penyetelan Relai dapat menggunakan karakteristik *definite* atau *inverse*.

### 2.4.1 Menghitung Arus Gangguan Hubung Singkat

Dari ketiga macam gangguan hubung singkat di atas, arus gangguannya dihitung dengan menggunakan rumus umum (hukum ohm) yaitu :

$$I = \frac{V}{Z} \quad (2.1)$$

Dimana:

I = Arus yang mengalir pada hambatan Z (A)

V = Tegangan sumber (Volt).

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

Dengan mengetahui besarnya tegangan sumber dan besarnya nilai impedansi tiap komponen jaringan serta bentuk konfigurasi jaringan di dalam sistem, maka besarnya arus gangguan hubung singkat dapat dihitung.



Yang membedakan antara gangguan hubung singkat 3 fasa, 2 fasa dan 1 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 :

Z untuk gangguan 3 fasa	$Z = Z_1 + Z_f$
Z untuk gangguan 2 fasa	$Z = Z_1 + Z_2 + Z_f$
Z untuk gangguan 2 fasa-tanah	$Z = Z_1 + \frac{Z_2(Z_0 + Z_f)}{Z_2 + Z_0 + Z_f}$
Z untuk gangguan 1 fasa-tanah	$Z = Z_1 + Z_2 + Z_0 + Z_f$

Dimana:

$Z_1$  = Impedansi urutan positif

$Z_2$  = Impedansi urutan negatif

$Z_0$  = Impedansi urutan nol

$Z_f$  = Impedansi gangguan

Untuk menghitung arus gangguan hubung singkat, pertama hitung impedansi sumber (reaktansi) dalam hal ini diambil dari data hubung singkat pada bus 70 kV, kedua menghitung reaktansi trafo tenaga, ketiga menghitung impedansi penyulang.

#### 2.4.1.1 Menghitung Impedansi Sumber

Untuk menghitung impedansi sumber maka data yang diperlukan adalah data hubung singkat pada bus primer trafo.

$$X_{sc} = \frac{kV^2}{MVA} \quad (2.2)$$

Perlu diingat bahwa impedansi sumber ini adalah nilai ohm pada sisi 70 kV, karena arus gangguan hubung singkat yang akan dihitung adalah gangguan hubung singkat di sisi 20 kV, maka impedansi sumber tersebut harus dikonversikan dulu ke sisi 20 kV, sehingga pada perhitungan arus gangguan nanti sudah menggunakan sumber 20 kV. Untuk mengkonversikan impedansi yang terletak di sisi 70 kV, dilakukan dengan cara sebagai berikut :

$$X_{sc} (\text{sisi } 20 \text{ kV}) = \frac{kV^2}{kV^2} \times X_{sc} (\text{sisi } 70 \text{ kV}) \quad (2.3)$$



### 2.4.1.2 Menghitung Reaktansi Trafo

Nilai reaktansi trafo tenaga :

$$X_T \text{ (pada 100\%)} = \frac{kV^2}{MVA \text{ (trafo)}} \quad (2.4)$$

Reaktansi urutan positif, negatif ( $X_{t1} = X_{t2}$ )

$$X_{T1} = X_t \% \times X_T \text{ (pada 100\%)} \quad (2.5)$$

Reaktansi urutan nol ( $X_{t0}$ )

Reaktansi urutan nol ini didapat dengan memperhatikan data trafo tenaga itu sendiri yaitu dengan melihat kapasitas belitan delta yang ada dalam trafo itu :

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 belitan  $Y_{yd}$ , kapasitas belitan delta biasanya sepertiga kapasitas belitan Y (belitan yang dipakai untuk menyalurkan daya, sedangkan belitan delta tetap ada di dalam tapi tidak dikeluarkan kecuali satu terminal delta untuk ditanahkan), maka  $X_{T0} = 3 X_{T1}$ ,
3. Untuk trafo tenaga dengan hubungan  $YY$  dan tidak mempunyai belitan delta di dalamnya, maka besarnya  $X_{T0}$  berkisar antara 9s/d 14  $X_{T1}$ .

Tabel 2.1 Karakteristik Urutan Nol (*Zero Sequence*) dari Variasi Elemen Pada Sistem Tenaga Listrik

Elemen		$Z_{(0)}$
1. Trafo Tenaga (dilihat dari sisi Sekunder)	Tanpa pembumian	
	Yyn atau Zyn	10 s/d 15 $X_{(1)}$
	Ydyn	3 $X_{(1)}$
	Dyn atau YNyn	$X_{(1)}$
	Dzn atau Yzn	0,1 s/d 0,2 $X_{(1)}$
2. Generator	Sinkron	0,5 $Z_{(1)}$
	Asinkron	0
3. Jaringan		3 $Z_{(1)}$

Dimana:  $X_{(1)}$  = reaktansi urutan positif,  $Z_{(1)}$  = Impedansi urutan positif



### 2.4.1.3 Menghitung Impedansi Penyulang

Menghitung impedansi penyulang, impedansi penyulang ini dihitung tergantung dari besarnya impedansi per meter penyulang yang bersangkutan, dimana besar nilainya ditentukan dari konfigurasi tiang yang digunakan untuk jaringan SUTM atau dari jenis kabel tanah untuk jaringan SKTM. Dalam perhitungan disini diambil dengan impedansi  $Z = (R + jX) \Omega/\text{km}$ .

Dengan demikian nilai impedansi penyulang untuk lokasi gangguan yang dalam perhitungan ini disimulasikan terjadi pada lokasi dengan jarak 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% panjang penyulang.

### 2.4.1.4 Menghitung Impedansi Ekivalen Jaringan

Perhitungan yang akan dilakukan disini adalah perhitungan besarnya nilai impedansi positif ( $Z_{1 \text{ eq}}$ ), negative ( $Z_{2 \text{ eq}}$ ), dan nol ( $Z_{0 \text{ eq}}$ ) dari titik gangguan sampai ke sumber, sesuai dengan urutan di atas.

Perhitungan  $Z_{1 \text{ eq}}$  dan  $Z_{2 \text{ eq}}$  :

$$Z_{1 \text{ eq}} = Z_{2 \text{ eq}} = X_{\text{SC}} + X_{\text{T1}} + Z_{1 \text{ penyulang}} \quad (2.6)$$

Karena lokasi gangguan diasumsikan terjadi pada 25%, 50%, 75% dan 100% panjang penyulang, maka  $Z_{1 \text{ eq}}$  ( $Z_{2 \text{ eq}}$ ) yang didapat juga pada lokasi tersebut.

Perhitungan  $Z_{0 \text{ eq}}$  :

$$Z_{0 \text{ eq}} = X_{\text{T0}} + 3R_{\text{N}} + Z_{0 \text{ penyulang}} \quad (2.7)$$

Dimana  $3R_{\text{N}}$  adalah tahanan NGR.

Karena lokasi gangguan diasumsikan terjadi pada 25%, 50%, 75% dan 100% panjang penyulang, maka  $Z_{0 \text{ eq}}$  yang didapat juga pada lokasi tersebut. Setelah mendapatkan impedansi ekivalen sesuai dengan lokasi gangguan, selanjutnya perhitungan arus gangguan hubung singkat dapat dihitung dengan menggunakan rumus dasar seperti dijelaskan sebelumnya, hanya saja impedansi ekivalen mana yang dimasukkan ke dalam rumus dasar tersebut adalah tergantung dari hubung singkat 3 fasa, 2 fasa atau 1 fasa ke tanah.



#### 2.4.1.5 Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa

Kemungkinan terjadinya gangguan 3 fasa adalah putusnya salah satu kawat fasa yang letaknya paling atas pada distribusi, dengan konfigurasi kawat antar fasanya disusun secara vertikal.

Kemungkinan lain adalah akibat pohon yang cukup tinggi dan berayun sewaktu angin kencang, kemudian menyentuh ketiga kawat pada transmisi atau distribusi. Arus gangguan hubung singkat 3 fasa dapat dihitung sebagai berikut :

$$I_{3 \text{ fasa}} = \frac{V_{ph}}{Z_{1 \text{ eq}}} = \frac{\frac{20000}{\sqrt{3}}}{Z_{1 \text{ eq}}} = \frac{11547}{Z_{1 \text{ eq}} + Z_f} \quad (2.8)$$

#### 2.4.1.6 Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa

Kemungkinan terjadinya gangguan 2 fasa disebabkan oleh putusnya kawat fasa tengah pada transmisi atau distribusi. Kemungkinan lainnya adalah dari rusaknya isolator di transmisi atau distribusi sekaligus 2 fasa.

Gangguan hubung singkat 2 fasa dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$I_{2 \text{ fasa}} = \frac{V_{ph-ph}}{Z_{1 \text{ eq}} + Z_{2 \text{ eq}}} = \frac{20000}{Z_{1 \text{ eq}} + Z_{2 \text{ eq}} + Z_f} \quad (2.9)$$

Seperti halnya gangguan 3 fasa, gangguan hubung singkat 2 fasa juga dihitung untuk lokasi gangguan yang diasumsikan terjadi pada 25%, 50%, 75% dan 100% panjang penyulang. Dalam hal ini dianggap nilai  $Z_{1 \text{ eq}} = Z_{2 \text{ eq}}$ , sehingga persamaan arus gangguan hubung singkat 2 fasa di atas dapat di sederhanakan menjadi :

$$I_{2 \text{ fasa}} = \frac{V_{ph-ph}}{2 \times Z_{1 \text{ eq}}} = \frac{20000}{2 \times Z_{1 \text{ eq}} + Z_f} \quad (2.10)$$

#### 2.4.1.7 Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa-tanah

Gangguan hubung singkat 2 fasa-tanah dapat terjadi ketika ada dua fasa yang terhubung ke tanah. Biasanya hubungan ini terjadi karena pohon terkena 2 fasa. Seperti halnya gangguan 3 fasa dan gangguan hubung singkat 2 fasa, gangguan hubung singkat 2 fasa-tanah juga dihitung untuk lokasi gangguan yang diasumsikan terjadi pada 25%, 50%, 75% dan 100% panjang penyulang.



Arus gangguan hubung singkat dua fasa-tanah dapat diperoleh dari persamaan :

$$I_{2\text{fasa-tanah}} = \frac{V_{ph}}{Z_{1\text{eq}} + \frac{Z_{2\text{eq}}(Z_{0\text{eq}} + 3Z_f)}{Z_{2\text{eq}} + Z_{0\text{eq}} + 3Z_f}} = \frac{\frac{20000}{\sqrt{3}}}{Z_{1\text{eq}} + \frac{Z_{2\text{eq}}(Z_{0\text{eq}} + 3Z_f)}{Z_{2\text{eq}} + Z_{0\text{eq}} + 3Z_f}} \quad (2.11)$$

#### 2.4.1.8 Gangguan Hubung Singkat 1 Fasa-tanah

Kemungkinan terjadinya gangguan satu fasa ke tanah adalah *back flashover* antara tiang ke salah satu kawat transmisi dan distribusi. Sesaat setelah tiang tersambar petir yang besar walaupun tahanan kaki tiangnya cukup rendah namun bisa juga gangguan fasa ke tanah ini terjadi sewaktu salah satu kawat fasa transmisi / distribusi tersentuh pohon yang cukup tinggi dll.

Arus gangguan hubung singkat 1 fasa-tanah dapat dihitung sebagai berikut :

$$I_{1\text{ fasa-tanah}} = \frac{3 \times V_{ph}}{Z_{1\text{eq}} + Z_{2\text{eq}} + Z_{0\text{eq}} + 3Z_f} = \frac{3 \times \frac{20000}{\sqrt{3}}}{Z_{1\text{eq}} + Z_{2\text{eq}} + Z_{0\text{eq}} + 3Z_f}$$

$$= \frac{34641,016}{Z_{1\text{eq}} + Z_{2\text{eq}} + Z_{0\text{eq}} + 3Z_f} \quad (2.12)$$

Dimana :

$I$  = Arus gangguan hubung singkat 3 fasa

$V_{ph}$  = Tegangan fasa-netral sistem 20 kV =  $\frac{20000}{\sqrt{3}} = 11547$

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

$Z_{2\text{eq}}$  = Impedansi urutan negatif

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

$Z_f$  = Impedansi gangguan

Kembali sama halnya dengan perhitungan arus gangguan hubung singkat 3 fasa dan 2 fasa, 2 fasa-tanah, arus gangguan 1 fasa-tanah juga dihitung untuk lokasi gangguan yang di asumsikan terjadi pada 25%, 50%, 75% dan 100% panjang penyulang, sehingga dengan rumus terakhir diatas dapat dihitung besarnya arus gangguan 1 fasa ke tanah sesuai lokasi gangguannya.

(Sarimun, 2012 : 163-170)



#### 2.4.2 Rele dengan Karakteristik Waktu Terbalik (*Inverse Time Relay*)

Setelan Proteksi dengan mempergunakan karakteristik inverse time relay adalah karakteristik yang grafiknya terbalik antara arus dan waktu, dimana makin besar arus makin kecil waktu yang dibutuhkan untuk membuka Pemutus (PMT). Karakteristik inverse sesuai IEC 60255-3 dan BS142:1966, sebagai berikut:

$$t = \frac{\beta}{\left(\left(\frac{I_f}{I_{set}}\right)^\alpha - 1\right)} \text{ tms (detik)} \quad (2.13)$$

$$\text{TMS} = \frac{\left(\left(\frac{I_f}{I_{set}}\right)^\alpha - 1\right)}{\beta} t \quad (2.14)$$

Tabel. 2.2 Faktor dan tergantung pada kurva arus vs waktu

Nama Kurva		
Standard Inverse	0,02	0,14
Very Inverse	1	13,2
Extremely Inverse	2	80
Long Inverse	1	120

Dimana:

$t$  = Waktu tripnya Relai (detik)

$\text{TMS}$  = *Time Multiplier Setting*, Nilai yang disetkan ke Relai sebagai konstanta (tanpa satuan)

$I_f$  = Besarnya arus gangguan hubung singkat (A)

- Setelan *Over Current Relay (inverse)*,  $I_f$  diambil arus gangguan hubung singkat terbesar
- Setelan *Ground Fault Relay (inverse)*,  $I_f$  diambil dari arus gangguan hubung singkat terkecil

$I_{set}$  = Besarnya arus setting primer (A)

- Setelan *Over Current Relay (inverse)*,  $I_{set}$  diambil 1,05 s/d 1,3  $I_{beban}$
- Setelan *Ground Fault Relay (inverse)*,  $I_{set}$  diambil 6% s/d 12% arus gangguan hubung singkat 1 fasa terkecil



Setelan Rele dengan karakteristik inverse biasanya dipergunakan pada sistem distribusi tenaga listrik sebagai setelan Relai yang terpasang di incoming feeder, outgoing feeder atau relai yang terpasang di gardu hubung atau recloser, dimana Penyetelan arus dan waktu pada rele OCR&GFR, didasarkan pada besarnya arus gangguan hubung singkat yang disetel dari sisi hilir sampai dengan sisi hulu (dari gardu hubung sampai gardu induk). (Sarimun, 2012 : 161-162, 178)

## **2.5 Keandalan Tenaga Listrik**

Keandalan merupakan tingkat keberhasilan kinerja suatu sistem atau bagian dari sistem, untuk dapat memberikan hasil yang lebih baik pada periode waktu dan dalam kondisi operasi tertentu. Untuk dapat menentukan tingkat keandalan dari suatu sistem harus diadakan pemeriksaan melalui perhitungan dan analisa terhadap tingkat keberhasilan kinerja/operasi dari sistem yang ditinjau.

Keandalan tenaga listrik adalah menjaga kontinuitas penyaluran tenaga listrik kepada pelanggan terutama pelanggan daya besar yang membutuhkan kontinuitas penyaluran tenaga listrik secara mutlak. Apabila tenaga listrik putus atau tidak tersalurkan akan mengakibatkan proses produksi dari pelanggan besar tersebut terganggu. Struktur jaringan tegangan menengah memegang peranan penting dalam menentukan keandalan penyaluran tenaga listrik karena jaringan yang baik mungkin dapat melakukan manuver tegangan dengan mengalokasikan tempat gangguan dan beban dapat dipindahkan melalui jaringan lainnya.

Tingkat kontinuitas pelayanan dari sarana penyalur disusun berdasarkan lamanya upaya menghidupkan kembali suplai setelah mengalami gangguan. Tingkatan-tingkatan tersebut antara lain:

- Tingkat 1 : dimungkinkan berjam-jam; yaitu waktu yang diperlukan untuk mencari dan memperbaiki bagian yang rusak karena gangguan.
- Tingkat 2 : padam beberapa jam; yaitu waktu yang diperlukan untuk mengirim petugas ke lokasi gangguan, melokalisasi dan melakukan manipulasi untuk menghidupkan sementara kembali dari arah atau saluran yang lain.



- Tingkat 3 : padam beberapa menit; manipulasi oleh petugas yang jaga di gardu atau dilakukan deteksi atau pengukuran dan pelaksanaan manipulasi jarak jauh.
- Tingkat 4 : padam beberapa detik; pengamanan/manipulasi secara otomatis
- Tingkat 5: tanpa padam; dilengkapi instalasi cadangan terpisah dan otomatisasi penuh.

### 2.5.1 *Sistem Average Interruption Frequency Index (SAIFI)*

SAIFI adalah indeks keandalan yang merupakan jumlah dari perkalian frekuensi padam dan pelanggan padam dibagi dengan jumlah pelanggan yang dilayani. Satuannya adalah pemadaman per pelanggan.

Secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\text{SAIFI} = \frac{\text{Jumlah dari Perkalian Frekuensi Padam dan Pelanggan Padam}}{\text{Jumlah Pelanggan}} \quad \text{atau}$$

$$\text{SAIFI} = \frac{\sum \lambda_i \times N_i}{\sum N_i} \quad (2.17)$$

Dimana :

$\lambda_i$  = angka kegagalan rata-rata/frekuensi padam

$N_i$  = jumlah pelanggan yang dilayani pada titik beban  $i$

### 2.5.2 *Sistem Average Interruption Duration Index (SAIDI)*

SAIDI adalah indeks keandalan yang merupakan jumlah dari perkalian lama padam dan pelanggan padam dibagi dengan jumlah pelanggan yang dilayani.

Secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\text{SAIDI} = \frac{\text{Jumlah dari Perkalian Jam Padam dan Pelanggan Padam}}{\text{Jumlah Pelanggan}} \quad \text{atau}$$

$$\text{SAIDI} = \frac{\sum U_i \times N_i}{\sum N_i} \quad (2.18)$$

Dimana :

$U_i$  = waktu padam pelanggan dalam periode tertentu (jam/tahun)

$N_i$  = jumlah pelanggan yang dilayani pada titik beban  $i$

(Saodah, Seminar Nasional, 2008 : 1-3)