



## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Jaringan Tegangan Menengah**

Pada pendistribusian tenaga listrik di suatu kawasan, sistem tegangan menengah dijadikan jaringan utama pendistribusian tenaga listrik ke pelanggan. Hal ini dilakukan sebagai upaya untuk menghindarkan rugi-rugi penyaluran (*losses*) dengan kualitas persyaratan tegangan yang harus dipenuhi oleh PT PLN Persero selaku pemegang Kuasa Usaha Utama sebagaimana diatur dalam UU ketenagalistrikan No 30 tahun 2009. Tegangan operasi dari jaringan tegangan menengah yang digunakan di Indonesia sendiri telah ditetapkan sebesar 20 kV. Jaringan tegangan menengah pada sistem distribusi di Indonesia dimulai dari terminal keluar (*out-going*) pemutus tenaga dari transformator penurun tegangan Gardu Induk atau transformator penaik tegangan pada pembangkit untuk sistem distribusi skala kecil, hingga peralatan pemisah/proteksi sisi masuk (*in-coming*) transformator distribusi 20 kV - 231/400V.

Konstruksi jaringan tenaga listrik tegangan menengah dapat dikelompokkan menjadi tiga macam konstruksi sebagai berikut (PT. PLN Persero, 2010:3) :

##### **2.1.1 Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)**

Saluran udara tegangan menengah (SUTM) adalah sebagai konstruksi termurah untuk penyaluran tenaga listrik pada daya yang sama. Konstruksi ini terbanyak digunakan untuk konsumen jaringan tegangan menengah yang digunakan di Indonesia. Ciri utama jaringan ini adalah penggunaan penghantar telanjang yang ditopang dengan isolator pada tiang besi/beton.

Penghantar yang digunakan pada saluran udara tegangan menengah (SUTM) ini adalah konduktor dengan bahan utama tembaga (CU) atau aluminium (Al) yang dipilin bulat padat. Pilihan konduktor penghantar telanjang yang memenuhi pada dekade ini adalah AAAC atau AAC. Sebagai akibat tingginya harga tembaga dunia, saat ini belum memungkinkan penggunaan

penghantar berbahan tembaga sebagai pilihan yang baik (PT. PLN Persero, 2010:3).

Penggunaan penghantar telanjang, dengan sendirinya harus diperhatikan sektor yang terkait dengan keselamatan ketenagalistrikan seperti jarak aman minimum. Jarak aman adalah jarak antara bagian aktif/netral dari jaringan terhadap benda-benda disekelilingnya baik secara mekanis atau elektromagnetis yang tidak memberikan pengaruh membahayakan.

Jarak aman minimal adalah 60 cm kecuali terhadap jaringan telekomunikasi. Jarak aman terhadap saluran telekomunikasi minimal 2,5 meter. Jarak aman terhadap benda-benda lainnya dapat dilihat pada tabel 2.1 berikut ini :

Tabel 2.1 Jarak Aman Saluran Udara Tegangan Menengah  
(PT PLN Persero, 2010:101)

No.	Uraian	Jarak aman
1	Terhadap permukaan jalan raya	$\geq 6$ meter
2	Balkon Rumah	$\geq 2,5$ meter
3	Atap rumah	$\geq 2$ meter
4	Dinding bangunan	$\geq 2,5$ meter
5	Antena TV/Radio, menara	$\geq 2,5$ meter
6	Pohon	$\geq 2,5$ meter
7	Lintasan kereta api	$\geq 2$ meter dari atap kereta
8	Under build TM-TM	$\geq 1$ meter
9	Under build TM-TR	$\geq 1$ meter

### 2.1.2 Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah (SKUTM)

Untuk lebih meningkatkan keamanan dan keandalan penyaluran tenaga listrik, penggunaan penghantar telanjang atau penghantar berisolasi setengah pada konstruksi jaringan saluran udara tegangan menengah 20 KV, dapat juga digantikan dengan konstruksi penghantar berisolasi penuh yang dipilin. Isolasi penghantar tiap fasa tidak perlu di lindungi dengan pelindung mekanis. Berat

kabel pilin menjadi pertimbangan terhadap pemilihan kekuatan beban kerja tiang beton penopangnya (PT. PLN Persero, 2010:4).

Saluran kabel udara tegangan menengah adalah saluran udara tegangan menengah yang menggunakan kabel sebagai sarana penghantar. Terdapat dua jenis kabel yang dipakai (PT. PLN Persero, 2010:15) :

- Kabel udara dengan ketahanan isolator 6 kV/half insulated-AAAC-S yang berukuran 150 mm<sup>2</sup> dan 70 mm<sup>2</sup>. Hal yang perlu diperhatikan dalam penggunaan AAAC-S ini adalah apabila melakukan penggantian AAAC menjadi AAAC-S, mengingat beban massa jaringan bertambah 37 %. Perlu dipertimbangkan pemasangan penopang tiang/*guy wire* pada tiang-tiang sudut dan tiang akhir.
- Kabel udara dengan ketahanan isolator penuh / 24 kV/ fasa-fasa dari jenis NFA2XSEY-T, berukuran (3x150 Al+90 SE) dan (3x70 Al+70 SE). Mengingat berat massa kabel ini, kekuatan tiang untuk SKUTM memakai tiang 350 daN.

Ruang bebas (*right of way*) dan jarak aman (*safety clearance*) pada konstruksi SKUTM harus tetap memenuhi syarat keamanan lingkungan dan keandalan. Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah yang menggunakan kabel twisted, jarak aman sekurang-kurangnya 60 cm, dan ruang bebas kabel tidak boleh bersentuhan dengan pohon/bangunan. Pada titik sambungan SKUTM kabel twisted dan SUTM AAAC, jarak aman sama dengan ketentuan pada SUTM AAAC.

### **2.1.3 Saluran Kabel Tanah Tegangan Menengah (SKTM)**

Konstruksi SKTM ini adalah konstruksi yang aman dan andal untuk mendistribusikan tenaga listrik tegangan menengah, tetapi relatif lebih mahal untuk penyaluran daya yang sama. Keadaan ini dimungkinkan dengan konstruksi isolasi penghantar per fasa dan pelindung mekanis yang dipersyaratkan. Pada rentang biaya yang diperlukan, konstruksi ditanam langsung adalah termurah bila dibandingkan dengan penggunaan conduit atau bahkan *tunneling* (terowongan beton).

Penggunaan saluran kabel bawah tanah tegangan menengah (SKTM) sebagai jaringan utama pendistribusian tenaga listrik adalah sebagai upaya utama peningkatan kualitas pendistribusian. Dibandingkan dengan SUTM, penggunaan SKTM akan memperkecil resiko kegagalan operasi akibat faktor eksternal/meningkatkan keamanan ketenagalistrikan (PT. PLN Persero, 2010:4).

## **2.2 Gangguan pada Sistem Distribusi Tenaga listrik**

Sistem tenaga listrik pada umumnya terdiri dari pembangkit, gardu induk, jaringan transmisi dan distribusi. Berdasarkan konfigurasi jaringan, pada sistem ini setiap gangguan yang ada pada penghantar, akan mengganggu semua beban yang ada atau apabila terjadi gangguan pada salah satu *feeder* maka semua pelanggan yang terhubung pada GI tersebut akan terganggu.

Apabila gangguan tersebut bersifat permanen dan memerlukan perbaikan terlebih dahulu sebelum dapat dioperasikan kembali, maka pelanggan yang mengalami gangguan pelayanan jumlahnya relatif banyak.

Berdasarkan ANSI (*American National Standards Institute*)/IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) Std. 100-1992 gangguan didefinisikan sebagai suatu kondisi fisis yang disebabkan kegagalan suatu perangkat, komponen atau suatu elemen untuk bekerja sesuai dengan fungsinya. Gangguan hampir selalu ditimbulkan oleh hubung singkat antar fase atau hubung singkat fase ke tanah. Suatu gangguan hampir selalu berupa hubung langsung atau melalui impedansi (Suswanto 2009:245). Gangguan hubung singkat sendiri dapat didefinisikan sebagai gangguan yang terjadi akibat adanya penurunan kekuatan dasar isolasi antara sesama kawat fasa dengan tanah yang menyebabkan kenaikan arus secara berlebihan. Analisis gangguan hubung singkat diperlukan untuk mempelajari sistem tenaga listrik baik waktu perencanaan maupun setelah beroperasi (Suswanto 2009:253).

Selama terjadi gangguan, tegangan tiga fasa menjadi tidak seimbang dan mempengaruhi suplai ke sirkuit tiga fasa yang berdekatan. Arus gangguan yang besar dapat merusak tidak hanya peralatan yang terganggu, tetapi juga instalasi yang dilalui arus gangguan. Gangguan dalam peralatan yang penting dapat mempengaruhi stabilitas sistem tenaga listrik. Misalnya suatu gangguan

pada daerah suatu pembangkit yang dapat mempengaruhi stabilitas sistem interkoneksi.

### 2.3 Jenis-jenis Gangguan

Pada dasarnya gangguan yang sering terjadi pada sistem distribusi saluran 20 kV dapat digolongkan menjadi dua macam yaitu gangguan dari dalam sistem dan gangguan dari luar sistem. Gangguan yang berasal dari luar sistem disebabkan oleh sentuhan daun/pohon pada penghantar, sambaran petir, manusia, binatang, cuaca dan lain-lain. Sedangkan gangguan yang datang dari dalam sistem dapat berupa kegagalan dari fungsi peralatan jaringan, kerusakan dari peralatan jaringan, kerusakan dari peralatan pemutus beban dan kesalahan pada alat pendeteksi.

Klasifikasi gangguan yang terjadi pada jaringan distribusi (Hutauruk, dalam Suswanto 2009:248) adalah :

- Dari jenis gangguannya :
  - ✓ Gangguan dua fasa atau tiga fasa melalui hubungan tanah
  - ✓ Gangguan fasa ke fasa
  - ✓ Gangguan satu fasa ke tanah atau gangguan tanah
- Dari lamanya gangguan
  - ✓ Gangguan permanen
  - ✓ Gangguan temporer

Frekuensi timbulnya gangguan dari sistem tenaga listrik berbeda-beda. Informasi ini akan membantu dalam menentukan disain dan aplikasi suatu proteksi. Berbagai macam frekuensi gangguan dapat dilihat pada tabel 2.2 berikut ini:

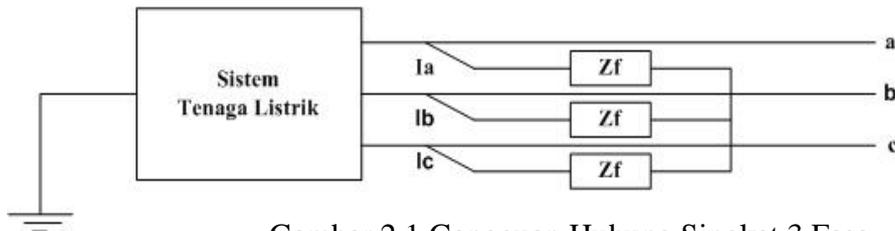
Tabel 2.2 Frekuensi Gangguan (Gonen, dalam Suswanto, 2009:264)

Fault	Persentase (%)
Gangguan Satu Fasa-Tanah	70
Gangguan Dua Fasa	15
Gangguan Dua Fasa ke Tanah	10

Fault	Persentase (%)
Gangguan Tiga Fasa	5

### 2.3.1 Macam Gangguan Berdasarkan Jenis Gangguannya

#### 2.3.1.1 Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa

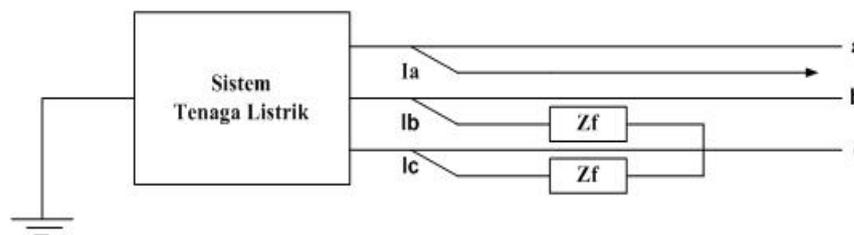


Gambar 2.1 Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa

Kemungkinan terjadinya gangguan 3 fasa adalah putusnya salah satu kawat fasa yang letaknya paling atas pada transmisi atau distribusi, dengan konfigurasi kawat antar fasanya disusun secara vertikal. Kemungkinan terjadinya memang sangat kecil, tetapi dalam analisisnya tetap harus diperhitungkan (Prana, Skripsi, 2013:12).

Kemungkinan lain adalah akibat pohon yang cukup tinggi dan berayun sewaktu angin kencang, kemudian menyentuh ketiga kawat pada transmisi atau distribusi (Kadarisman dan Sarimun hal 2).

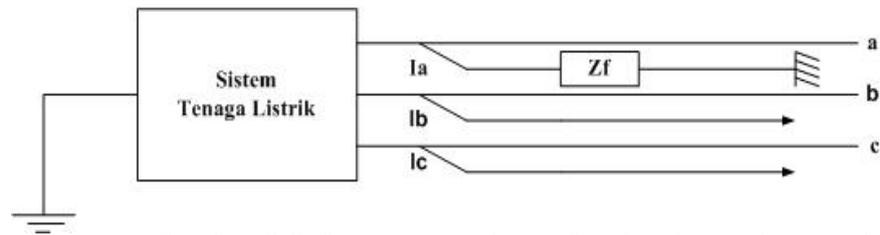
#### 2.3.1.2 Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa



Gambar 2.2 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 seperti ini biasanya mengakibatkan 2 fasa ke tanah (Prana, Skripsi, 2013:13).

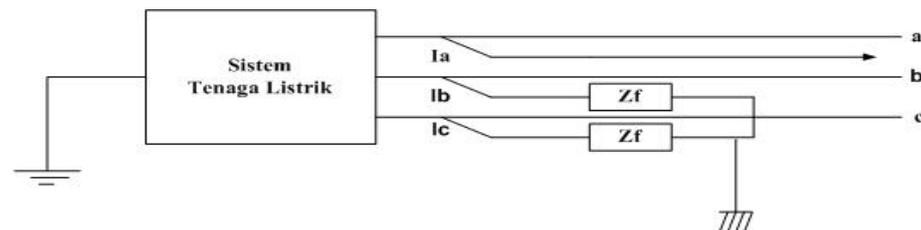
### 2.3.1.3 Gangguan Hubung Singkat 1 Fasa ke Tanah



Gambar 2.3 Gangguan Hubung Singkat 1 Fasa ke 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 (Prana, Skripsi, 2013:14).

### 2.3.1.3 Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa ke Tanah



Gambar 2.4 Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa ke Tanah

Gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah ini merupakan gangguan hubung singkat yang paling jarang terjadi. Gangguan hubung singkat ini terjadi antara dua dari tiga fasa yang terhubung ke tanah. Biasanya hubungan ini terjadi karena ranting pohon yang terkena dua fasa (Sarimun, 2012:92).

Sesungguhnya hampir setiap macam gangguan hubung singkat (tiga fasa, fasa-fasa, fasa-tanah atau dua fasa ke tanah) melalui suatu nilai tahanan gangguan yang dibentuk oleh arcin ( $R_{ARC}$ ). Tetapi dalam analisa hubung singkat selalu perhitungan arus gangguan hubung singkat dengan menganggap tahanan gangguan = 0 (nol) untuk memudahkan perhitungan, karena kesulitan untuk menentukan besarnya  $R_{ARC}$  yang setepatnya (Kadarisman dan Sarimun, hal 3).



## **2.3.2 Macam Gangguan Berdasarkan Lamanya Gangguan**

### **2.3.2.1 Gangguan Temporer**

Gangguan yang bersifat temporer ini apabila terjadi, maka gangguan tersebut tidak akan lama dan dapat normal kembali. Gangguan ini dapat hilang dengan sendirinya atau dengan memutus sesaat bagian yang terganggu dari sumber tegangannya. Kemudian disusul dengan penutupan kembali peralatan hubungannya. Apabila gangguan temporer sering terjadi dapat menimbulkan kerusakan pada peralatan dan akhirnya menimbulkan gangguan yang bersifat permanen.

Salah satu contoh gangguan yang bersifat temporer adalah gangguan akibat sentuhan pohon yang tumbuh disekitar jaringan, akibat binatang seperti burung kelelawar, ular dan layangan.

Rata-rata jumlah gangguan temporer lebih tinggi dibandingkan gangguan permanent. Kebanyakan gangguan temporer di amankan dengan *circuit breaker* (CB) atau pengaman lainnya (Suswanto, 2009:247).

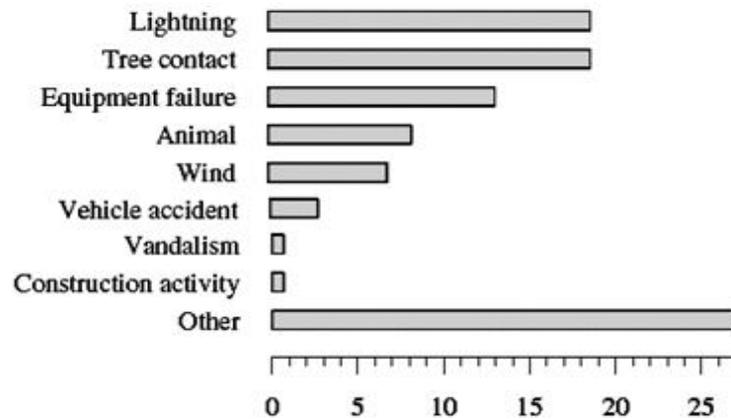
### **2.3.2.2 Gangguan Permanen**

Gangguan permanen tidak akan dapat hilang sebelum penyebab gangguan dihilangkan terlebih dahulu. Gangguan yang bersifat permanen dapat disebabkan oleh kerusakan peralatan, sehingga gangguan ini baru hilang setelah kerusakan ini diperbaiki atau karena ada sesuatu yang mengganggu secara permanen. Untuk membebaskannya diperlukan tindakan perbaikan atau menyingkirkan penyebab gangguan tersebut. Terjadinya gangguan ditandai dengan jatuhnya pemutus tenaga, untuk mengatasinya operator memasukkan tenaga secara manual. Contoh gangguan ini yaitu adanya kawat yang putus, terjadinya gangguan hubung singkat, dahan yang menimpa kawat fasa dari saluran udara, dan terjadinya gangguan hubung singkat (Suswanto, 2009:248).

## **2.4 Penyebab Terjadinya Gangguan**

Berdasarkan studi yang telah dilakukan *The Electric Power Research Institute* (Burke dan Lawrence, 1984; EPRI 1209-1, 1983) bahwa penyebab terjadinya gangguan pada jaringan distribusi seperti gambar berikut (Weedy,

2012:240) :



Gambar 2.5 Persentase Gangguan Berdasarkan Sebab Gangguan

Hampir 40% dari gangguan yang diteliti, terjadi pada priode cuaca yang tidak menguntungkan seperti : cuaca hujan. Gangguan distribusi terjadi pada satu fase, dua fase atau ketiga fasenya.

Beberapa jenis gangguan cenderung terjadi dari fase ke tanah. Gangguan yang disebabkan oleh peralatan dan hewan cenderung terjadi dari fase ke tanah. Pohon juga dapat menyebabkan gangguan satu fase ke tanah pada sistem tiga fase. Gangguan petir cenderung menyebabkan gangguan dua atau tiga fase ke tanah pada sistem tiga fase. Sedangkan menurut Hutauruk, penyebab terjadinya gangguan pada jaringan distribusi disebabkan karena (Hutauruk, dalam Suswanto 2009:248) :

- Kesalahan mekanis
- Kesalahan thermis
- Karena tegangan lebih
- Karena material yang cacat atau rusak
- Gangguan hubung singkat
- Konduktor putus

Faktor-faktor penyebab terjadinya gangguan pada jaringan distribusi adalah karena (Hutauruk, dalam Suswanto 2009:248):

- Surja petir atau surja hubung
- Burung atau daun-daun



- Polusi debu
- Pohon-pohon yang tumbuh di dekat jaringan
- Keretakan pada isolator
- Andongan yang terlalu kendor

## 2.5 Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat

Perhitungan hubung singkat adalah suatu analisa kelakuan suatu sistem tenaga listrik pada keadaan gangguan hubung singkat, dimana dengan cara ini diperoleh nilai besaran-besaran listrik yang dihasilkan sebagai akibat gangguan hubung singkat tersebut.

Tujuan dari perhitungan gangguan hubung singkat adalah untuk menghitung arus maksimum dan minimum gangguan, pada lokasi yang berbeda dari sistem tenaga untuk jenis gangguan yang berbeda sehingga rancangan pengaman, relai dan pemutus yang tepat bisa dipilih untuk melindungi sistem dari kondisi yang tidak normal dalam waktu yang singkat (Suswanto, 2009:253).

Kegunaan dari analisis gangguan hubung singkat antara lain adalah (Weedy, 1988: 241):

- Untuk menentukan arus maksimum dan minimum hubung singkat tiga-fasa.
- Untuk menentukan arus gangguan.
- Penyelidikan operasi relai-relai proteksi.
- Untuk menentukan kapasitas pemutus daya.
- Untuk menentukan distribusi arus gangguan selama gangguan dan tingkat tegangan busbar selama gangguan.

Analisa gangguan hubung singkat ini dianggap perlu karena gangguan yang mengakibatkan hubung singkat dapat menimbulkan arus yang jauh lebih besar daripada arus normal. Bila gangguan hubung singkat dibiarkan berlangsung dengan lama pada suatu sistem daya, banyak pengaruh-pengaruh yang tidak diinginkan yang dapat terjadi (Stevenson Jr.,terj.,Idris Kamal, 2012:317):

- Berkurangnya batas-batas kestabilan untuk sistem daya.
- Rusaknya perlengkapan yang berada dekat dengan gangguan yang disebabkan oleh arus tak seimbang, atau tegangan rendah yang ditimbulkan oleh hubung singkat.
- Ledakan-ledakan yang mungkin terjadi pada peralatan yang mengandung minyak isolasi sewaktu terjadinya suatu hubung singkat, dan yang mungkin menimbulkan kebakaran sehingga dapat membahayakan orang yang menanganinya dan merusak peralatan-peralatan yang lain.
- Terpecah-pecahnya keseluruhan daerah pelayanan sistem daya itu oleh suatu rentetan tindakan pengamanan yang diambil oleh sistem-sistem pengamanan yang berbeda-beda; kejadian ini dikenal sebagai “*cascading*”.

Untuk menghitung arus hubung singkat pada sistem distribusi 20 kV, pertama-tama hitung impedansi sumber (reaktansi) dalam hal ini diambil dari data hubung singkat pada bus sisi primer yakni 70 kV, kedua menghitung reaktansi trafo tenaga dan ketiga menghitung impedansi penyulang.

### 2.5.1 Komponen Simetris

Metode komponen simetris digunakan dalam perhitungan yang berhubungan dengan keadaan yang tak seimbang pada perangkat listrik tiga fasa, dan secara khusus untuk perhitungan hubung singkat yang tidak seimbang pada perangkat listrik.

Komponen-komponen yang seimbang ini dinamakan menjadi tiga komponen urutan (Sarimun, 2012:83) :

- Komponen urutan positif, yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan berbeda sudut fasanya  $120^{\circ}$  dan mempunyai urutan yang sama dengan fasa aslinya.
- Komponen urutan negatif, yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan berbeda sudut fasanya  $120^{\circ}$  dan mempunyai fasor urutan yang berlawanan dengan fasa aslinya.



- Komponen urutan nol, yang terdiri dari tiga fasor yang sama simetris besarnya dan berbeda fasa nol derajat.

Impedansi urutan dapat didefinisikan sebagai suatu impedansi yang dirasakan oleh arus urutan bila tegangan urutannya dipasang pada peralatan atau sistem tersebut. Seperti juga tegangan dan arus di dalam metode komponen simetris dan tak simetris.

Impedansi yang dikenal ada tiga macam yaitu :

- Impedansi urutan positif ( $Z_1$ ), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan positif.
- Impedansi urutan negatif ( $Z_2$ ), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan negatif.
- Impedansi urutan nol ( $Z_0$ ), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan nol.

Cara yang biasa dilakukan dalam menghitung besar arus gangguan hubung singkat pada komponen simetris adalah memulai perhitungan pada rel daya tegangan primer di gardu induk untuk berbagai jenis gangguan, kemudian menghitung pada titik-titik lainnya yang terletak semakin jauh dari gardu induk tersebut.

Impedansi saluran suatu sistem tenaga listrik tergantung dari jenis konduktornya yaitu dari bahan apa konduktor itu dibuat yang juga tentunya pula dari besar kecilnya penampang konduktor dan panjang saluran yang digunakan jenis konduktor ini.

Besarnya impedansi urutan positif dan urutan negatif tergantung dari pabrikan dimana  $Z_1 = Z_2$ , kecuali untuk  $Z_0$  tergantung pada putaran mesin dan masing-masing elemen peralatan listrik seperti terlihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.3 Karakteristik Urutan Nol dari Variasi Elemen pada Sistem Tenaga Listrik (Sarimun, 2012:88)

Elemen	$Z_0$
Trafo tenaga : (dilihat dari sisi sekunder) <ul style="list-style-type: none"><li>• Tanpa Pembumian</li><li>• Dyn atau YNyn</li><li>• Ydyn</li><li>• Yyn</li></ul>	$X_1$ $3X_1$ $10 \text{ s/d } 15 X_1$
Generator : <ul style="list-style-type: none"><li>• Sinkron</li><li>• Asinkron</li></ul>	$0,5 Z_1$ $0$
Jaringan	$3 Z_1$

### 2.5.2 Menghitung Impedansi Sumber

Untuk menghitung impedansi sumber maka data yang diperlukan adalah data hubung singkat pada bus primer trafo. Berikut persamaan untuk menghitung impedansi sumber (Sarimun, 2012:164):

$$X_{sc} = \frac{kV^2}{MVA} \dots \dots \dots 2.1$$

- Dimana,
- $X_{sc}$  = Impedansi hubung singkat sumber (ohm)
  - $kV$  = Tegangan pada sisi primer trafo tenaga (kV)
  - $MVA$  = Daya hubung singkat sumber (MVA)

Perlu diingat bahwa impedansi sumber ini adalah nilai ohm pada sisi primer, karena arus gangguan hubung singkat yang akan dihitung adalah gangguan hubung singkat di sisi 20 kV atau sisi sekunder, 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 150 KV,



dilakukan dengan persamaan 2.2 (Sarimun, 2012:166):

$$X_2 \text{ (sisi 20 kV)} = \frac{kV_2^2}{kV_1^2} \times X_1 \text{ (sisi 70 kV)} \dots\dots\dots 2.2$$

- Dimana,
- X1 = Impedansi sisi primer (ohm)
  - V1 = Tegangan pada sisi primer (kV)
  - V2 = Tegangan pada sisi sekunder (kV)
  - X2 = Impedansi sisi sekunder (ohm)

### 2.5.3 Menghitung Reaktansi Trafo

Besarnya nilai reaktansi trafo biasanya dinyatakan dalam bentuk persentase, untuk mencari nilai reaktansi dalam ohm dapat dicari dengan persamaan berikut (Sarimun, 2012:166):

$$X_t \text{ (pada 100\%)} = \frac{kV^2}{MVA} \dots\dots\dots 2.3$$

$$X_t = X_t(\%) \cdot X_t \text{ (pada 100\%)} \dots\dots\dots 2.4$$

- Dimana,
- Xt = Reaktansi Trafo (ohm)
  - Xt(%) = Reaktansi Trafo (%)
  - kV = Tegangan pada sisi sekunder (kV)
  - MVA = Daya trafo (MVA)

### 2.5.4 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.

### 2.5.5 Menghitung Impedansi Ekuivalen 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.



Karena dari sumber ke titik gangguan impedansi yang terbentuk adalah tersambung seri, maka perhitungan  $Z_1$  eq dan  $Z_2$  eq dapat langsung menjumlahkan impedansi-impedansi tersebut. Sedangkan untuk perhitungan  $Z_0$  eq dimulai dari titik gangguan sampai ke trafo tenaga yang netralnya ditanahkan. Perhitungan  $Z_1$  eq dan  $Z_2$  eq (Prana, Skripsi, 2013:11) :

$$Z_1 \text{ eq} = Z_2 \text{ eq} = X_{sc} + X_{t1} + Z_{1 \text{ penyulang}} \dots\dots\dots 2.5$$

- Dimana,
- $X_{sc}$  = Impedansi sumber sisi sekunder (ohm)
  - $X_{t1}$  = Impedansi trafo tenaga urutan positif atau negatif (ohm)
  - $Z_{1 \text{ penyulang}}$  = Impedansi penyulang urutan positif atau negatif (ohm)
  - $Z_1 \text{ eq}$  = Impedansi ekivalen jaringan urutan positif (ohm)
  - $Z_2 \text{ eq}$  = Impedansi ekivalen jaringan urutan negatif (ohm)

Karena lokasi gangguan diasumsikan terjadi pada 25%, 50%, 75% dan 100% panjang penyulang, maka  $Z_1$  eq ( $Z_2$  eq) yang didapat juga pada lokasi tersebut.

Perhitungan  $Z_0$  eq (Prana, Skripsi, 2013:11) :

$$Z_0 \text{ eq} = X_{t0} + 3R_N + Z_{0 \text{ penyulang}} \dots\dots\dots 2.6$$

- Dimana,
- $R_N$  = Tahanan tanah trafo tenaga (ohm)
  - $X_{t0}$  = Impedansi trafo tenaga urutan nol (ohm)
  - $Z_{0 \text{ penyulang}}$  = Impedansi penyulang urutan nol (ohm)
  - $Z_0 \text{ eq}$  = Impedansi ekivalen jaringan urutan nol

Karena lokasi gangguan diasumsikan terjadi pada 25%, 50%, 75% dan 100% panjang penyulang, maka  $Z_0$  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.

### 2.5.6 Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa

Gangguan hubung singkat 3 fasa dapat dihitung dengan menggunakan rumus hukum ohm yaitu (Sarimun, 2012:169):

$$I_{3\text{fasa}} = \frac{E_{\text{fasa}}}{Z_{1\text{eq}} + Z_f} \dots\dots\dots 2.7$$

Dimana,  $I$  = Arus gangguan hubung singkat 3 fasa (A)

$$E_{\text{fasa}} = \text{Tegangan fasa-netral sistem } 20 \text{ kV} = \frac{20000}{\sqrt{3}}$$

$Z_{1\text{eq}}$  = Impedansi ekivalen urutan positif (Ohm)

$Z_f$  = Impedansi gangguan (Ohm)

Selain gangguan hubung singkat 3 fasa ini, terdapat juga gangguan hubung singkat 3 fasa ke tanah. Tetapi, besarnya gangguan hubung singkat 3 fasa tanpa melalui tanah atau dengan melalui tanah besarnya sama.

### 2.5.7 Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa

Gangguan hubung singkat 2 fasa dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut (Sarimun, 2012:169):

$$I_{2\text{fasa}} = \frac{E_{\text{fasa-fasa}}}{Z_{1\text{eq}} + Z_{2\text{eq}} + Z_f} \dots\dots\dots 2.8$$

Dimana,  $I$  = Arus gangguan hubung singkat 2 fasa (A)

$E_{\text{fasa-fasa}}$  = Tegangan fasa-fasa (kV)

$Z_{1\text{eq}}$  = Impedansi ekivalen urutan positif (Ohm)

$Z_{2\text{eq}}$  = Impedansi ekivalen urutan negatif (Ohm)

$Z_f$  = Impedansi gangguan (Ohm)

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 :

$$I_{2\text{fasa}} = \frac{E_{\text{fasa-fasa}}}{2Z_{1\text{eq}} + Z_f} \dots\dots\dots 2.9$$



### 2.5.8 Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat 1 Fasa ke Tanah

Arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah dapat dihitung sebagai berikut (Sarimun, 2012:170) :

$$I_{1\text{ fasa}} = \frac{3.E}{Z_{1\text{eq}} + Z_{2\text{eq}} + Z_{0\text{eq}} + Z_f} \dots\dots\dots 2.10$$

Dimana, I = Arus gangguan hubung singkat fasa-tanah (A)

$$E = \text{Tegangan fasa-netral sistem } 20 \text{ kV} = \frac{20000}{\sqrt{3}}$$

$Z_{1\text{eq}}$  = Impedansi ekivalen urutan positif (Ohm)

$Z_{2\text{eq}}$  = Impedansi ekivalen urutan negatif (Ohm)

$Z_{0\text{eq}}$  = Impedansi ekivalen urutan nol (Ohm)

$Z_f$  = Impedansi gangguan (Ohm)

Kembali sama halnya dengan perhitungan arus gangguan 3 fasa dan 2 fasa, arus gangguan 1 fasa ketanah 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.

### 2.5.9 Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa ke Tanah

Arus gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah dapat dihitung sebagai berikut (Sarimun, 2012:170) :

$$I_{2\text{ fasa-tanah}} = \frac{E}{Z_{1\text{eq}} + \frac{Z_{2\text{eq}} \times (Z_{0\text{eq}} + 3Z_f)}{Z_{2\text{eq}} + Z_{0\text{eq}} + Z_f}} \dots\dots\dots 2.11$$

Dimana, I = Arus gangguan hubung singkat 2 fasa-tanah (A)

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

$Z_{1\text{eq}}$  = Impedansi ekivalen urutan positif (Ohm)

$Z_{2\text{eq}}$  = Impedansi ekivalen urutan negatif (Ohm)

$Z_{0\text{eq}}$  = Impedansi ekivalen urutan nol (Ohm)

$Z_f$  = Impedansi gangguan (Ohm)

Arus gangguan dua fasa ketanah 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

fasa-fasa ke tanah sesuai lokasi gangguannya.

## **2.6 Pengaman Sistem Tenaga Listrik**

Sistem pengaman tenaga listrik merupakan sistem pengaman pada sistem tenaga listrik yang terpasang pada sistem distribusi tenaga listrik, trafo tenaga, transmisi tenaga listrik dan generator listrik dimana sistem pengamanan akan melokalisir daerah yang terganggu sehingga daerah yang tidak mengalami gangguan dapat tetap bekerja. Jadi pada hakikatnya, pengaman pada sistem tenaga listrik mengamankan seluruh sistem tenaga listrik supaya keandalan tetap terjaga (Sarimun, 2012:1).

Kegunaan sistem pengaman tenaga listrik, antara lain untuk (Rendra, Skripsi, 2007:13):

- Melokalisir gangguan untuk membebaskan peralatan dari gangguan;
- Membebaskan bagian yang tidak bekerja normal untuk mencegah kerusakan;
- Memberi petunjuk atau indikasi atas lokasi serta macam dari kegagalan;
- Untuk dapat memberikan pelayanan listrik dengan keandalan yang tinggi kepada konsumen;
- Untuk mengamankan keselamatan manusia terutama terhadap bahaya yang ditimbulkan listrik.

## **2.7 Peralatan Pengaman Arus Lebih**

Fungsi dari peralatan pengaman arus lebih adalah untuk mengatasi gangguan arus lebih pada sistem distribusi sebelum gangguan tersebut meluas keseluruh sistem yang ada.

Peralatan yang umum banyak digunakan pada jaringan distribusi adalah (Rendra, Skripsi, 2007:17) :

- Fuse Cut Out
- Rele Arus Lebih
- Recloser (Pemutus Balik Otomatis)
- Rele Gangguan Fasa Tanah

### 2.7.1 Fuse Cut Out

Fuse merupakan kombinasi alat pelindung dan pemutus rangkaian, yang mempunyai prinsip melebur (*expulsion*) atau mengamankan gangguan permanen, apalagi dilewati arus yang besarnya melebihi rating arusnya. Apabila terjadi gangguan maka elemen pelebur yang terletak pada tabung fiber akan meleleh dan terjadi busur api yang akan mengenai tabung fiber (Rendra, Skripsi, 2007:17).

Karakteristik fuse mempergunakan karakteristik thermal, jika terjadi beban lebih atau gangguan hubung singkat melebihi kemampuan hantar arusnya, fuse putus (lebur) maka fuse disebut pengaman lebur (pelebur). Pada fuse yang utama adalah elemen pelebur, karena elemen ini yang mengamankan listrik bila terjadi hubung singkat atau beban lebih, dimana putusnya fuse didasarkan pada karakteristik panas ( $I^2.t$ ). Saat pelebur putus akan terjadi busur api yang melewati batang pelebur, sebaiknya dalam anak/batang pelebur diberikan/dimasukkan pasir silika sebagai peredam adanya busur api yang timbul (Sarimun, 2012:217).

### 2.7.2 Rele Arus Lebih

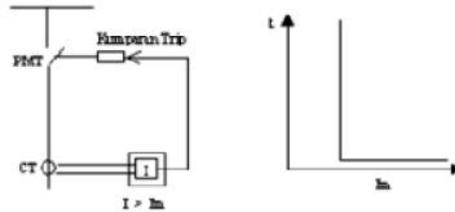
Rele arus lebih adalah suatu rele yang bekerjanya didasarkan adanya kenaikan arus yang melebihi suatu nilai pengamanan tertentu dan dalam jangka waktu tertentu, sehingga rele ini dapat dipakai sebagai pola pengamanan arus lebih (Samaulah, 2000:53).

#### 2.7.2.1 Karakteristik Rele Arus Lebih

Karakteristik Rele Arus Lebih adalah sebagai berikut :

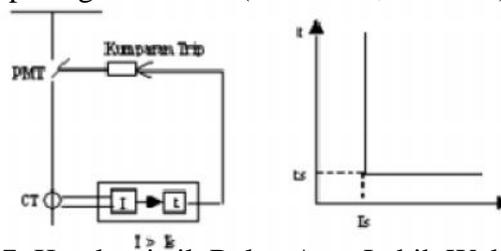
- Rele Waktu Seketika (*Instantaneous Relay*)

Rele arus lebih dengan karakteristik waktu kerja seketika (*moment*) ialah jika jangka waktu rele mulai saat rele arusnya *pick up* sampai selesai kerja rele sangat singkat (20~100 ms), yaitu tanpa penundaan waktu seperti pada gambar 2.6. Rele ini umumnya dikombinasikan dengan karakteristik waktu tertentu (*definite time*) atau waktu terbalik (*inverse time*) (Samaulah, 2000:53).

Gambar 2.6 Karakteristik Rele Waktu Seketika (*Instantaneous Relay*)

- Rele Arus Lebih Waktu Tertentu (*Definite Time Relay*)

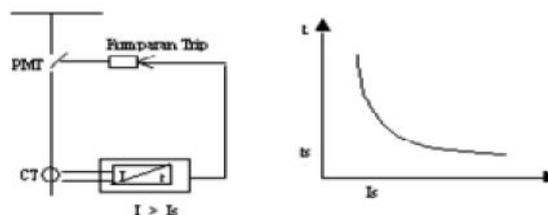
Rele arus lebih dengan waktu tertentu adalah jika jangka waktu mulai rele arus *pick up* sampai selesainya kerja rele diperpanjang dengan waktu tertentu dan tidak tergantung dari besarnya arus yang menggerakkan seperti terlihat pada gambar 2.7. (Samaulah, 2000:54).

Gambar 2.7 Karakteristik Relay Arus Lebih Waktu Tertentu (*Definite Time Relay*)

- Relay Arus Lebih Waktu Terbalik (*Inverse Time Relay*)

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 seperti terlihat pada gambar 2.8. Bentuk perbandingan terbalik dari waktu arus ini sangat bermacam-macam tetapi dapat digolongkan menjadi (Samaulah, 2000:54):

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



Gambar 2.8 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Terbalik



### 2.7.2.2 Perhitungan Arus Penyetelan dan Waktu Penyetelan Rele Arus

#### Lebih Karakteristik Waktu Terbalik

Agar rele arus lebih bekerja dengan baik maka arus penyetelan dan waktu penyetelannya haruslah benar. Dimana untuk menghitung arus penyetelan rele arus lebih, harus diketahui terlebih dahulu arus beban maksimum yang melalui jaringan tersebut. Sesuai *British standard* untuk (Sarimun, 2012:162) :

- Rele *Inverse Time* biasa diset sebesar :

$$I_s = 1,05 \text{ s/d } 1,3 \times I_{\text{beban}} \dots\dots\dots 2.12$$

- Rele *Definite Time* biasa diset sebesar :

$$I_s = 1,2 \text{ s/d } 1,3 \times I_{\text{beban}} \dots\dots\dots 2.13$$

Dimana :  $I_s$  = Arus penyetelan (Ampere)

$I_{\text{beban}}$  = Arus beban maksimum maksimum (Ampere)

Waktu operasi rele merupakan waktu operasi yang dibutuhkan rele untuk memutuskan pemutus tenaga setelah arus gangguan yang masuk ke rele melalui transformator arus melebihi arus penyetelannya dan dapat dituliskan seperti persamaan berikut (Sarimun, 2012:31):

$$t = \frac{0,14}{I^{0,02} - 1} \text{ tms} \dots\dots\dots 2.14$$

$$I = \frac{I_f}{I_s} \dots\dots\dots 2.15$$

Dimana :  $t$  = Waktu penyetelan (s)

tms = Penyetelan waktu atau *time multiple setting*

$I_f$  = Arus gangguan terbesar (A)

$I_s$  = Arus penyetelan

Persyaratan yang harus dipenuhi untuk waktu penyetelan rele adalah waktu penyetelan minimum dari relai arus lebih (terutama di penyulang) tidak lebih kecil dari 0,3 detik. Pertimbangan ini diambil agar relai tidak sampai trip lagi, akibat arus *inrush current* dari transformator distribusi, sewaktu PMT penyulang tersebut dioperasikan (Kadarisman dan Sarimun, hal 20).

Nilai arus gangguan dalam perhitungan waktu penyetelan diatas merupakan nilai arus gangguan hubung singkat fasa-fasa terbesar, yakni hubung

singkat 3 fasa atau 2 fasa pada lokasi gangguan 1% depan gardu induk (Kadarisman dan Sarimun, hal 33).

### 2.7.3 Recloser

Penutup balik adalah alat pengaman arus lebih yang diatur waktu untuk memutus dan menutup kembali secara otomatis, terutama untuk membebaskan dari gangguan yang bersifat temporer (sementara), sering juga disebut dengan recloser.

Recloser dilengkapi dengan sarana indikasi arus lebih, pengatur waktu operasi, serta penutupan kembali secara otomatis. Desain dari recloser memungkinkan untuk dapat membuka kontak-kontaknya secara tetap dan terkunci/lock out, setelah melalui beberapa kali operasi buka-tutup.

Pada gangguan yang bersifat sementara, recloser akan membuka dan menutup kembali bila gangguan telah hilang. Jika gangguannya bersifat tetap/permanen, maka recloser akan membuka kontak-kontaknya secara tetap dan terkunci/lock out. Apabila gangguan telah dihilangkan, maka recloser dapat ditutup kembali (Rendra, Skripsi, 2007:20).

Recloser biasanya dipasang pada sebuah atau lebih cabang (lateral) pada jaringan sehingga gangguan yang terjadi tidak mempengaruhi seluruh jaringan. Recloser dapat diatur dengan operasi berbeda, yaitu (Rendra, Skripsi, 2007:20) :

- Dua kali operasi seketika (membuka dan menutup) diikuti dua kali operasi waktu tunda maka recloser akan mengunci.
- Satu kali operasi seketika diikuti tiga kali operasi waktu tunda.
- Tiga kali operasi ditambah satu kali operasi waktu tunda.
- Empat kali operasi seketika.
- Empat kali operasi waktu tunda.

### 2.7.4 Rele Gangguan Tanah

Rele gangguan tanah digunakan untuk mengamankan sistem distribusi, jika ada gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah. Pemasangannya dapat di penyulang masuk (*incoming feeder*), di penyulang keluar (*outgoing feeder*) atau di gardu hubung (Sarimun, 2012:28).

Pada umumnya, dipasang di gardu-gardu induk bersama-sama dengan



*circuit breaker* dan digunakan sebagai pengaman utama untuk mengamankan jaringan distribusi terhadap gangguan hubung singkat fasa ke tanah.

Rele gangguan tanah dapat disetel mulai dari 6% sampai dengan 12% x arus gangguan hubung singkat fasa-tanah terjauh/terkecil atau dapat dituliskan persamaannya (Kadarisman dan Sarimun, hal 20) :

$$I_{set} = 6\% \text{ s/d } 12\% \times I_f \text{ fasa-tanah terkecil} \dots\dots\dots 2.16$$

Nilai ini untuk mengantisipasi jika penghantar tersentuh pohon, dimana tahanan pohon nilainya besar yang dapat memperkecil besarnya arus gangguan hubung singkat fasa-tanah.

Penyetelan waktu dari rele gangguan tanah ini sama saja dengan rele arus lebih (OCR) (Kadarisman dan Sarimun, hal 21) :

$$t = \frac{0,14}{I^{0,02} - 1} tms \dots\dots\dots 2.17$$

$$I = \frac{I_f}{I_s} \dots\dots\dots 2.18$$

- Dimana : t = Waktu Penyetelan (s)
- tms = Penyetelan Waktu atau *Time Multiple Setting*
- I<sub>f</sub> = Arus Gangguan Terkecil (A)
- I<sub>s</sub> = Arus Penyetelan

Nilai arus gangguan dalam perhitungan waktu penyetelan diatas merupakan nilai arus gangguan hubung singkat terkecil, yakni hubung singkat 1 fasa-tanah pada lokasi gangguan 1% depan gardu induk (Kadarisman dan Sarimun, hal 37).

### 2.8 Keandalan Sistem Distribusi

Keandalan sistem penyaluran distribusi tenaga listrik tergantung pada model susunan saluran, pengaturan operasi dan pemeliharaan serta koordinasi peralatan pengaman.

Dua indeks keandalan yang paling sering digunakan dalam sistem distribusi adalah indeks frekuensi pemadaman rata-rata (SAIFI) dan indeks lama pemadaman rata-rata (SAIDI) (SPLN 59, 1985:5).

**2.8.1 SAIFI (System Average Interruption Frequency Index)**

SAIFI atau Indeks Frekuensi Pemadaman Rata-rata adalah jumlah konsumen yang mengalami gangguan pemadaman rata-rata dalam satuan n kali/tahun, n kali/bulan atau n kali/kuartal (Saodah, Makalah, 2008)

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i \cdot N_i}{N_i} \text{ per periode waktu} \dots \dots \dots 2.19$$

Dimana, SAIFI = Frekuensi pemadaman (kali/per periode waktu)  
 $\lambda_i$  = Frekuensi padam (kali)  
 $N_i$  = Jumlah konsumen yang dilayani

**2.8.2 SAIDI (System Average Interruption Duration Index)**

SAIDI atau Indeks Durasi Lama Pemadaman Rata-rata adalah jumlah pemadaman yang dialami oleh konsumen dalam satuan n kali/tahun, n kali/bulan atau n kali/kuartal (Saodah, Makalah, 2008).

$$SAIDI = \frac{\sum U_i \cdot N_i}{N_i} \text{ per periode waktu} \dots \dots \dots 2.20$$

Dimana, SAIDI = Durasi pemadaman (jam/per periode waktu)  
 $U_i$  = Waktu padam pelanggan padam  
 $N$  = Jumlah konsumen yang dilayani

Dari nilai SAIDI (jam/periode waktu) ini dapat diketahui nilai energi yang tidak tersalurkan akibat pemadaman penyulang, yakni (Zaggy, <http://zzaggy.wordpress.com/ipa-3/hemat-listrik/>, diakses tanggal 20 Mei 2014) :

$$P = W/t \dots \dots \dots 2.21$$

$$W = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \Phi \cdot t \dots \dots \dots 2.22$$

Dimana, P = Daya 3 Fasa (Watt)  
W = Energi Listrik (Watt-hour)  
V = Tegangan (Volt)  
I = Arus sebelum gangguan (A)  
t = Lama pemadaman (jam)

**2.8.3 Tingkat Keandalan pada Sistem Distribusi 20 kV**

Tingkat keandalan pada sistem distribusi dilihat dari dua indeks, yakni indeks frekuensi pemadaman rata-rata (f) dan indeks lama pemadaman rata-rata



(SPLN 59, 1985:5). Standar tingkat keandalan sistem distribusi yang baik berdasarkan SPLN 59:1985, adalah:

- SUTM radial  
f= 3,21 kali/tahun dan d= 21,094 jam/tahun.
- SUTM radial dengan PBO (pemutus balik otomatis)  
f= 2,415 kali/tahun dan d= 12,842 jam/tahun.
- Spindel tanpa pusat pengaturan jaringan distribusi (PPJD)  
f= 1,199 kali/tahun dan d= 4,364 jam/tahun.
- SKTM spindel dengan pusat pengaturan jaringan distribusi (PPJD)  
f= 1,199 kali/tahun dan d= 3,3312 jam/tahun.
- Spot network  
f= 0,01 kali/tahun dan d= 0,01 jam/tahun.