

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

Pada jaringan distribusi 20 kV memiliki panjang saluran yang cukup panjang, karena itu penyebab gangguan juga sering terjadi mulai dari gangguan temporer atau gangguan permanen, gangguan biasanya terjadi akibat sentuhan pohon, hewan liar yang mengenai jaringan, manusia dan sebagainya. Khususnya jaringan yang berada di Area PLN klaten kebanyakan terletak diantara rimbunya pepohonan, jaringan juga berada diantara aktifitas masyarakat serta jaringan distribusi juga sering sebagai tempat lalu lalang hewan liar seperti tikus, ular, burung, kadal, kera dll. Dengan dasar tersebut maka jaringan distribusi perlu menggunakan alat proteksi yang diletakan di beberapa titik guna mengamankan peralatan vital seperti trafo dan membatasi gangguan yang meluas.

Pada penelitian ini akan dibahas tentang analisa proteksi jaringan khususnya *Recloser* dan *Fuse Cut Out* pada sebuah penyulang yang berada di PLN area Klaten yaitu penyulang pedan 6, mulai dari analisa peletakan *recloser* dan *fuse cut out*, analisa cara *setting* OCR dan GFR pada *recloser* serta dilakukan Pen-aplikasi-an dengan menggunakan aplikasi Etap sehingga penggunaan alat proteksi dapat bekerja dengan baik sesuai dengan harapan. Selain itu alat proteksi antara yang satu dengan yang lain juga diharapkan mampu koordinasi dengan baik, sehingga gangguan tidak menyebabkan kerusakan pada peralatan yang vital.

Susatyo Handoko (2006) melakukan penelitian tentang Evaluasi *Setting Relay* OCR, GFR pada *Recloser* dengan Etap 12.6 di PT PLN (Persero) Gardu Induk Srandol Semarang. Hasil penelitian tersebut menyimpulkan bahwa perlunya penyetingan waktu kerja *relay* OCR dan GFR secara tepat seiring penambahan beban, agar *Recloser* dapat dikoordinasikan dengan peralatan proteksi lainnya.

Bimo Ario (2018) melakukan penelitian tentang Koordinasi Proteksi Antar *Fuse Cut Out* (FCO) Jaringan Distribusi Fase Tunggal Penyulang Wonosari 2 PT.PLN (Persero) Rayon Delanggu. Hasil penelitian tersebut menyimpulkan bahwa perlunya penggunaan *fuse link* pada FCO yang tepat agar dapat dikoordinasikan dengan *fuse cut out* yang lain sehingga dapat mengurangi gangguan hubung singkat yang menyebabkan pemadaman khususnya pada jaringan satu fasa.

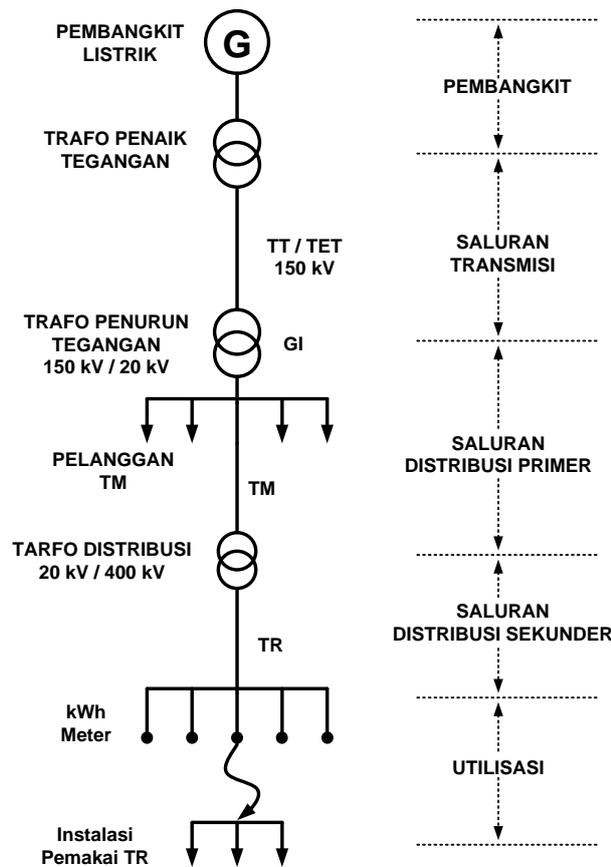
Muchamad Ja'far S (2018) melakukan penelitian tentang Pengaruh Gangguan Jaringan Tegangan Menengah Terhadap Indeks Keandalan di PT PLN (Persero) Rayon Delanggu. Hasil penelitian tersebut menyimpulkan bahwa perlunya keandalan alat proteksi pada jaringan distribusi terhadap gangguan , sehingga mendapatkan nilai SAIDI, SAIFI yang kecil.

## **2.2 Dasar Teori Sistem Distribusi Tenaga Listrik**

Jaringan distribusi tenaga listrik tidak disalurkan langsung dari pembangkit, tetapi disalurkan ke Gardu Induk terlebih dahulu. Kemudian, listrik di distribusikan ke pusat beban yang terdekat (konsumen/pelanggan). Jaringan distribusi meliputi semua jaringan tegangan menengah 20 kV dan semua jaringan tegangan rendah 380 V atau 220 V hingga meter-meter pelanggan. Distribusi tenaga listrik dilakukan dengan menarik kawat-kawat distribusi baik penghantar udara maupun penghantar di bawah tanah dari mulai Gardu Induk hingga ke pusat-pusat beban. Setiap elemen jaringan distribusi pada lokasi tertentu, dibangun gardu-gardu distribusi yang merupakan tempat menurunkan tegangan distribusi ke level tegangan yang lebih rendah yaitu dari 20 kV menjadi 380 V atau 220 V. Dari gardu-gardu ini, para pelanggan listrik dilayani dengan menarik kabel-kabel tegangan rendah yang dipasang di sepanjang pusat-pusat pemukiman, komersial, maupun pusat-pusat industri. Beberapa pelanggan besar dapat juga dilayani secara khusus dengan menggunakan jaringan tegangan tinggi 150 kV atau dengan jaringan tegangan menengah 20 kV. Dalam hal ini, biasanya mereka diminta membangun gardu khusus yang akan dimiliki pelanggan tersebut. Keuntungan perusahaan listrik dalam pelayanan ini adalah tidak perlunya

investasi instalasi jaringan tegangan rendah, rugi-rugi yang rendah, dan pelaksanaan pembangunan yang cepat.

Pelanggan yang menggunakan daya besar dapat disambungkan langsung pada jaringan tegangan menengah atau langsung pada tegangan tinggi dari saluran transmisi, tergantung besarnya daya yang tersambung. Karena luasnya jaringan distribusi, diperlukan banyak sekali transformator distribusi seperti transformator yang dipasang di tiang-tiang listrik. Dari tiang-tiang akan tersambung kabel sambungan rumah tangga yang melewati tenaga listrik menuju pembatas daya dan kWh meter. Pembatas daya digunakan untuk memberikan pasokan daya yang sesuai dengan kontrak masing-masing pelanggan. Sedangkan, kWh meter digunakan untuk mengukur pemakaian daya dari masing-masing pelanggan. Untuk lebih mempermudah pengertian jaringan distribusi tenaga listrik, dapat diperhatikan pada gambar 2.1. berikut.



Gambar 2.1. Alur Penyaluran Energi Listrik

Dari gambar 2.1. di atas dapat diklasifikasikan bahwa yang termasuk dalam jaringan distribusi adalah:

#### 1. Saluran Distribusi Primer

Merupakan jaringan yang menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk sampai dengan trafo distribusi, beroperasi dengan tegangan nominal 20 kV/11,6 kV. Sering disebut jaringan tegangan menengah (JTM), jaringan dapat berupa saluran kabel tegangan menengah (SKTM) atau saluran udara tegangan menengah (SUTM).

#### 2. Saluran Distribusi Sekunder

Merupakan jaringan yang menyalurkan tenaga listrik dari keluaran trafo distribusi sampai dengan alat penghitung dan pembatas (APP) di instalasi konsumen, beroperasi dengan tegangan nominal 380/220 V Sering disebut jaringan tegangan rendah (JTR), jaringan dapat berupa saluran kabel tegangan rendah (SKTR) atau saluran udara tegangan rendah (SUTR).

#### 3. Utilisasi

Merupakan pemakai atau pengguna energi listrik yang terdiri dari instalasi pemakai tenaga listrik. Instalasi rumah tangga biasanya memakai tegangan rendah, sedangkan pemakai besar seperti industri mempergunakan tegangan menengah ataupun tegangan tinggi.

### 2.2.1 Struktur Jaringan Distribusi

Pada umumnya, struktur jaringan distribusi memiliki beberapa jenis seperti *radial*, *loop*, *spindle*, *grid*, *network*, dan lain-lain. Di Indonesia, struktur jaringan distribusi yang sering digunakan adalah *radial*, *loop*, dan *spindle*. Misalnya, area Klaten menggunakan struktur jaringan distribusi *radial* dan *loop*.

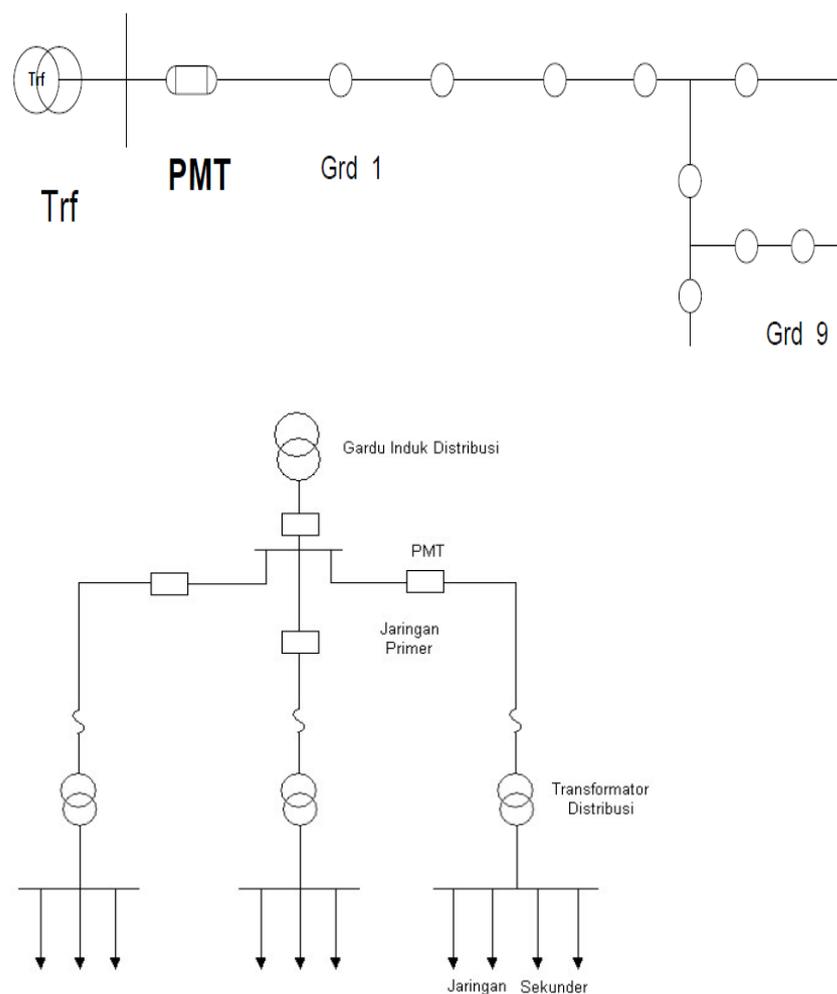
#### 1. Struktur Jaringan Distribusi *Radial*

Struktur jaringan *radial* merupakan struktur jaringan yang sering digunakan di wilayah Indonesia. Struktur ini memiliki ciri-ciri sebagai berikut:

- a. Mempunyai rugi tegangan yang lebih kecil

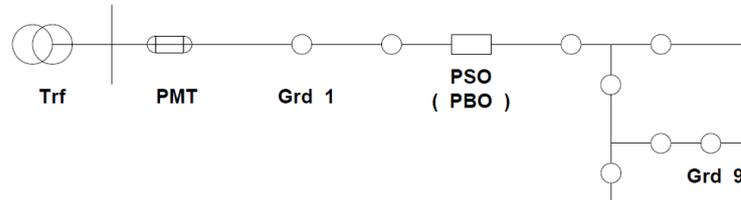
- b. Bentuk/pola sistem lebih sederhana
- c. Mudah dioperasikan
- d. Mudah dalam penambahan kapasitas
- e. Regulator bekerja lebih baik
- f. Bila terjadi gangguan pada *feeder* (penyulang) maka mengakibatkan *circuit breaker* bekerja ON sehingga pada *feeder* (penyulang) tersebut tidak dapat beroperasi
- g. Tidak ada alternatif sumber pasokan sehingga tingkat keandalannya rendah.

Struktur jaringan distribusi *radial* dapat dilihat pada Gambar 2.2. sebagai berikut:



Gambar 2.2. Struktur Jaringan Distribusi Radial

Struktur jaringan distribusi *radial* dengan PBO (*Recloser*) dapat dilihat pada Gambar 2.3. sebagai berikut:



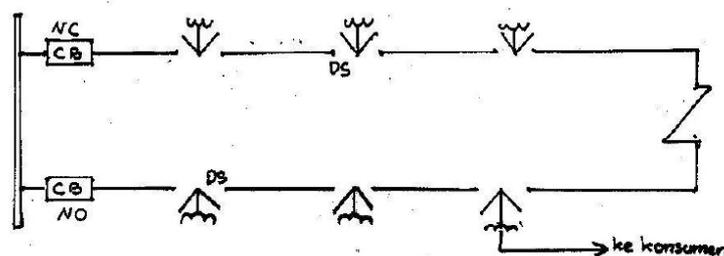
Gambar 2.3. Struktur Jaringan Distribusi *Radial* Dengan PBO (*Recloser*)

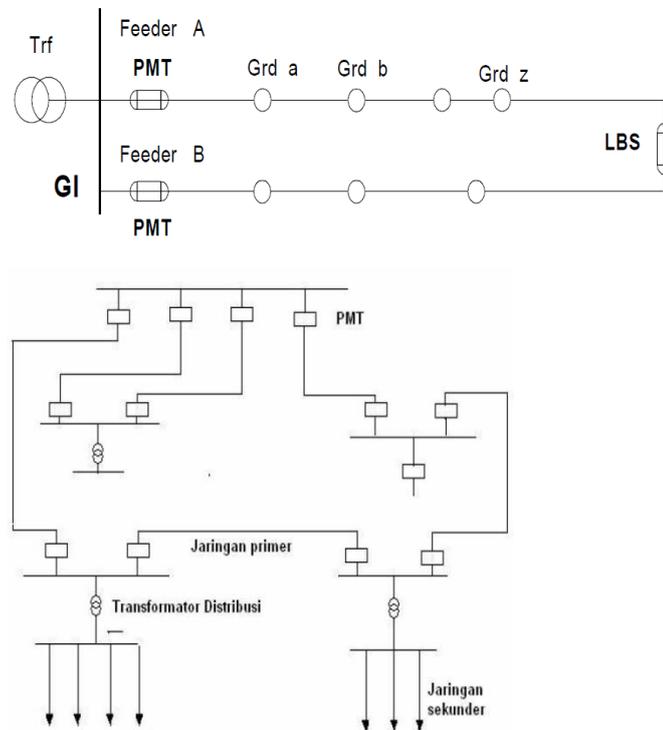
## 2. Struktur Jaringan Distribusi *Loop*

Struktur *loop* dapat digunakan untuk membatasi pembatasan pemutusan aliran listrik yang memberikan dua saluran utama untuk pelanggan yang sesekali membutuhkan. Struktur ini memiliki ciri-ciri sebagai berikut:

- Metode pengoperasiannya mudah
- Keandalannya cukup tinggi
- Investasinya cukup tinggi
- Jika penyaluran listrik gagal dalam satu arah maka beban dapat disuplai dari saluran ujung lain
- Saluran harus mempunyai kapasitas yang cukup
- Ukuran penghantar saluran utama dirancang sama pada seluruh jaringan *loop*.

Pada struktur ini, pemilihan ukuran penghantar berdasarkan besar beban normal ditambah besar beban dari setengah *loop* yang lain. Struktur jaringan *loop* dapat dilihat pada Gambar 2.4. sebagai berikut:





Gambar 2.4. Struktur jaringan distribusi *loop*

### 2.2.2 Kontinuitas Atau Keandalan Pelayanan

Kontinuitas pelayanan merupakan salah satu unsur dari mutu pelayanan yang nilainya akan tergantung kepada jenis sarana penyalurannya dan sarana peralatan pengaman yang dipilihnya. Tingkat kontinuitas pelayanan dari peralatan penyalur tenaga listrik disusun berdasarkan lamanya upaya untuk pemulihan suplai tenaga listrik ke konsumen setelah mengalami pemutusan. Pada SPLN 52-3: 1983 tentang Pola Pengamanan Sistem, tingkat kontinuitas pelayanan tenaga listrik tersusun seperti berikut:

#### 1. Kontinuitas tingkat 1

Pada tingkat ini memungkinkan jaringan berada pada kondisi padam dalam waktu berjam-jam dalam rangka mencari dan memperbaiki bagian-bagian yang mengalami kerusakan karena gangguan.

## 2. Kontinuitas tingkat 2

Kondisi jaringan padam dimungkinkan dalam waktu beberapa jam untuk keperluan mengirim petugas kelapangan, melokalisir kerusakan dan melakukan pengaturan *switching* untuk menghidupkan suplai beban pada kondisi sementara dari arah atau saluran lain.

## 3. Kontinuitas tingkat 3

Dimungkinkan padam dalam waktu beberapa menit untuk kegiatan pengaturan *switching* dan pelaksanaan *switching* oleh petugas yang berada di gardu induk atau pelaksanaan deteksi dengan bantuan *Distribution Control Centre* (DCC).

## 4. Kontinuitas tingkat 4

Dimungkinkan padam dalam beberapa detik, pengaturan *switching* dan pengamanan dilaksanakan secara otomatis.

## 5. Kontinuitas tingkat 5

Dimungkinkan tanpa adanya pemadaman dengan melengkapi instalasi cadangan terpisah dan otomatisasi penuh.

Untuk melakukan evaluasi keandalan sebuah sistem distribusi tenaga listrik, umumnya digunakan parameter-parameter untuk mengevaluasi sistem distribusi radial. Parameter-parameter tersebut adalah angka-angka kegagalan rata-rata ( $\lambda_s$ ), waktu pemadaman rata-rata ( $r_s$ ), dan waktu pemadaman tahunan ( $U_s$ ).

$$\lambda_s = \sum \lambda_i$$

$$U_s = \sum \lambda_i r_i$$

Adalah  $\lambda_i$  = angka kegagalan rata-rata komponen ke-i, dan  $r_i$  = adalah waktu pemadaman rata-rata komponen ke-i.

Indeks keandalan yang dimaksud adalah indeks yang berorientasi pelanggan seperti *System Average Interruption Frequency Index* (SAIFI), *System Average Interruption Duration Index* (SAIDI) dan *Fitness*. SAIFI adalah rata-rata kali padam per pelanggan per satuan waktu ( bulan atau tahun ). Dengan menerapkan indeks ini diharapkan mendapat gambaran mengenai frekuensi kegagalan rata-rata yang terjadi pada bagian-bagian dari sistem yang selanjutnya

dapat dikelompokkan sesuai dengan tingkat keandalannya. Dengan satuan pemadaman per pelanggan, perhitungan sistematisnya dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i} \quad (2.1.)$$

Adalah :  $\lambda_i$  = frekuensi padam,  $N_i$  = jumlah pelanggan yang disuplai pada titik beban  $i$ .

SAIDI yaitu lama padam listrik yang dialami oleh pelanggan per satuan waktu ( per bulan atau per tahun.). Dengan indeks ini, gambaran mengenai lama pemadaman rata-rata yang diakibatkan oleh gangguan pada bagian-bagian dari sistem dapat dievaluasi. Secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$SAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i} \quad (2.2)$$

Adalah :  $U_i$  = waktu padam pelanggan dalam satuan waktu (perbulan atau pertahun).

Standar yang dipakai yaitu SPLN No 59 Tahun 1985 di tunjukan pada tabel 2.1. berikut:

Tabel 2.1. SPLN *Recloser* dan *Fuse Cut Out*

NO	Komponen	Laju kegagalan/thn	Waktu Perbaikan/jam	Peralihan/jam
1	<i>Recloser</i>	0,05	10	0,25
2	<i>Fuse Cut Out</i>	0,32	20	0,60

FITNESS merupakan nilai patokan dari hasil SAIDI dan SAIFI, dimana nilai Fitness juga diperlukan dalam sistem keandalan. Dalam perhitungannya Fitness lebih tepatnya peluang keandalan dimana Fitness yang lebih besar meningkatkan peluang keandalan.

Secara sistematis dapat di tulisakan sebagai berikut :

$$FITNESS = \frac{1}{SAIDI. SAIFI} \quad (2.3)$$

### 2.2.3 Penutup Balik Otomatis (PBO) / *Recloser*

*Recloser* adalah rangkaian listrik yang terdiri pemutus tenaga yang dilengkapi kotak kontrol elektronik (*Electronic Control Box*) *recloser*, yaitu suatu peralatan elektronik sebagai kelengkapan *recloser* dimana peralatan ini tidak berhubungan dengan tegangan menengah dan pada peralatan ini *recloser* dapat dikendalikan cara pelepasannya, Dari dalam kotak kontrol inilah pengaturan (*setting*) *recloser* dapat ditentukan. *Recloser* dapat dilihat pada Gambar 2.5. sebagai berikut:



Gambar 2.5. *Recloser*

Jenis atau tipe *Recloser* yang digunakan di PT.PLN (Persero) Area Klaten seperti pada Gambar 2.8. adalah tipe *Recloser VWVE* merk ABB dengan arus pengaturan pemutusan sebesar 200% sampai 500% dari arus *setting* kumparan trip yang sebesar 100A. Alat pengaman ini bekerja secara otomatis guna mengamankan suatu sistem dari arus lebih yang diakibatkan adanya gangguan hubung singkat. Cara bekerjanya adalah untuk menutup balik dan membuka secara otomatis yang dapat diatur selang waktunya, dimana pada sebuah gangguan temporer, *recloser* tidak membuka tetap (*lock out*), kemudian *recloser* akan menutup kembali setelah gangguan itu hilang. Apabila gangguan bersifat

permanen, maka setelah membuka atau menutup balik sebanyak *setting* yang telah ditentukan kemudian *recloser* akan membuka tetap (*lock out*).

Pada suatu gangguan permanen, *recloser* berfungsi memisahkan daerah atau jaringan yang terganggu sistemnya secara cepat sehingga dapat memperkecil daerah yang terganggu pada gangguan sesaat, *recloser* akan memisahkan daerah gangguan secara sesaat sampai gangguan tersebut akan dianggap hilang, dengan demikian *recloser* akan masuk kembali sesuai *setting*-nya sehingga jaringan akan aktif kembali secara otomatis.

### **2.2.3.1 Single-shot Reclosing Relay**

Relai hanya dapat memberikan perintah *reclosing* ke PMT satu kali dan baru dapat melakukan *reclosing* setelah *blocking time* terakhir. Bila terjadi gangguan pada periode *blocking time*, PMT trip dan tidak bisa *reclose* lagi (*lock – out*). *Close Trip Dead Time Bloking Time Waktu Relai Lock Out*.

### **2.2.3.2 Multi Shot Reclosing Relay**

Relai ini dapat memberikan perintah *reclosing* ke PMT lebih dari satu kali. *Dead time* antar *reclosing* dapat diatur sama atau berbeda. Bila terjadi gangguan, relai OCR/GFR memberikan perintah trip ke PMT. Pada saat yang sama juga mengerjakan (meng-*energizing*) *Reclosing relay*. Setelah *dead time*  $t_1$  yang sangat pendek (kurang dari 0,6 detik), relai memberi perintah *reclose* ke PMT. Jika gangguan masih ada, PMT akan trip kembali dan *reclosing* relai akan melakukan *reclose* yang kedua setelah *dead time*  $t_2$  yang cukup lama (antara 15- 60 detik). Jika gangguan masih ada, maka PMT akan trip kembali dan *reclosing* relai akan melakukan *reclose* yang ke tiga setelah *dead time*  $t_3$ .

Bila gangguannya juga masih ada dalam periode *blocking*  $t_R$ , maka PMT akan trip dan *lock out*. Penggunaan *multi shot reclosing* harus disesuaikan dengan siklus kerja (*duty cycle*) dari PMT.

### **2.2.3.3 Selang Waktu Penutup Balik Reclose**

Waktu membuka dan menutup pada *recloser* dapat diatur pada kurva karakteristiknya. Secara garis besarnya adalah sebagai berikut (PLN (Persero) 1997 : PBO) : 17

1. Arus yang mengalir normal bila tidak terjadi gangguan.
2. Ketika terjadi sebuah gangguan, arus yang mengalir melalui *recloser* membuka dengan operasi "*fast*".
3. Kontak *recloser* akan menutup kembali setelah beberapa detik, sesuai *setting* yang ditentukan. Tujuan memberikan selang waktu adalah memberi kesempatan agar gangguan tersebut hilang dari sistem, terutama gangguan yang bersifat temporer.
4. Apabila yang terjadi adalah gangguan permanen, maka *recloser* akan membuka dan menutup balik sesuai *setting* yang ditentukan dan kemudian *lock out*.
5. Setelah gangguan permanen dibebaskan oleh petugas, baru dapat dikembalikan pada keadaan normal.

Ada bermacam-macam selang penutup kembali atau *recloser* interval dari *recloser* adalah sebagai berikut terjadi PT.PLN (Persero) Area Klaten :

1. Menutup kembali seketika atau instantaneous *reclosing*
2. Membuka kontak paling singkat, agar tidak mengganggu daerah-daerah beban yang terdiri dari motor industri, irigasi dan daerah yang tidak boleh padam terlalu lama. Ini sering dikerjakan untuk *reclosing* pertama dari urutan *reclosing*. Kerugian dari penutup pertama adalah cukup waktu untuk menghilangkan gangguan *transient*, seperti gangguan akibat cabang pohon yang mengenai penghantar, benang layang-layang, *ionisasi* gas dari bunga api yang timbul waktu gangguan dan belum hilang dalam waktu-waktu yang relatif singkat.
3. Waktu tunda (*time delay*)
  - a. Menutup kembali 2 detik
 

Diharapkan dalam selang waktu ini telah cukup waktu untuk menghilangkan gangguan, *transient* dan menghilangkan *ionisasi* gas. Bila digunakan diantara *fuse* trip operasi, maka waktu 2 detik ini cukup untuk mendinginkan *diffuse* beban.
  - b. Menutup kembali 5 detik.
 

Selang waktu ini sering digunakan diantara operasi penjatuh tunda dari *recloser* substansi untuk memberikan kesempatan guna pendingin *fuse*

disisi sumber, maka waktu 5 detik ini cukup untuk mendinginkan *fuse* disisi beban.

c. Waktu *reclosing* yang lebih lama (*longer reclosing interval*)

Yaitu selang 10 detik, 15 detik dan seterusnya, biasanya digunakan bila pengaman cadangan terdiri dari *breaker* yang terkontrol *rele*. Ini memungkinkan *timing disc* pada *rele* lebih mempunyai cukup waktu untuk reset.

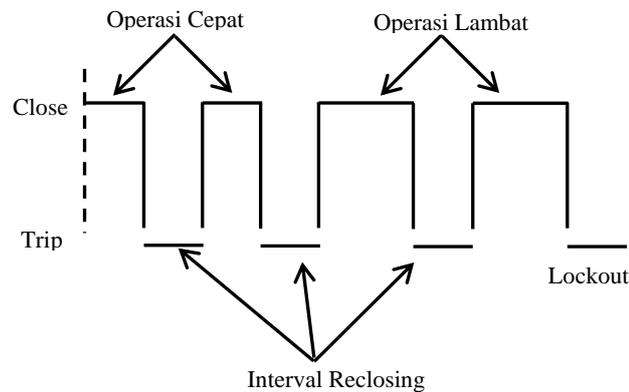
#### **2.2.3.4 Cara Kerja Recloser**

Waktu membuka dan menutup pada *recloser* dapat diatur pada kurva karakteristiknya. Secara garis besarnya adalah sebagai berikut :

1. Kontak relai menutup dengan waktu tertentu. Selanjutnya batrai terhubung dengan PMT dan PMT terbuka gangguan dapat dilokalisir.
2. Beberapa detik PMT masuk kembali PMT masuk kembali dan kontak relai membuka, selanjutnya hubungan batrai terputus.
3. Apabila terdapat gangguan temporer kembali kontak relai menutup kembali beberapa detik, selanjutnya batrai terhubung kembali ke PMT dan PMT terbuka gangguan dapat dilokalisir , beberapa detik PMT masuk kembali dan kontak relai membuka, selanjutnya hubungan batrai terputus.
4. Bila gangguan terjadi kembali dengan selang beberapa detik, maka relai akan menutup kembali dan lockout pemutus terbuka (tidak kembali menutup)

#### **2.2.3.5 Operasi Kerja PBO**

Operasi kerja PBO dapat disetel cepat atau lambat seperti yang terlihat pada Gambar 2.6. Penyetelan operasi cepat dimaksudkan agar ketika gangguan temporer jaringan bisa pulih kembali dalam waktu yang cepat. Sedangkan operasi lambat dimaksudkan untuk memberikan kesempatan bekerja pada pengaman yang berada di sisi hilir pada saat terjadi gangguan yang bersifat permanen. Apabila *recloser* merasakan gangguan yang bersifat permanen, maka *recloser* akan trip sesuai *setting*-nya sehingga mencapai kondisi *lockout*. Operasi Kerja PBO dapat dilihat pada Gambar 2.6. sebagai berikut:



Gambar 2.6. Operasi Kerja PBO

#### 2.2.4 Pengaman Lebur (PL) / Fuse Cut Out (FCO)

Pengaman Lebur atau FCO merupakan sebuah alat pemutus rangkaian listrik yang berbeban pada jaringan distribusi yang bekerja dengan cara meleburkan bagian dari komponennya (*fuse link*) yang telah dirancang khusus dan disesuaikan ukurannya. FCO berfungsi untuk melindungi jaringan terhadap arus beban lebih (*over load current*) yang mengalir melebihi dari batas maksimum, yang disebabkan karena hubung singkat (*short circuit*) atau beban lebih (*over load*). Konstruksi dari FCO ini jauh lebih sederhana bila dibandingkan dengan pemutus beban yang terdapat di Gardu Induk. Akan tetapi FCO ini mempunyai kemampuan yang sama dengan pemutus beban. FCO ini hanya dapat memutuskan satu saluran kawat jaringan di dalam satu alat. Apabila diperlukan pemutus saluran tiga fasa maka dibutuhkan FCO sebanyak tiga buah.

##### 1. Klasifikasi *Fuse Cut Out*

*Fuse Cut Out* dapat diklasifikasikan kedalam 2 macam *fuse* yaitu:

###### a. *Fuse* Letupan (*Expulsion Fuse*)

Pengaman lebur atau FCO yang digunakan pada jaringan distribusi adalah jenis letupan. *Fuse* ini tidak dilengkapi dengan alat peredam busur api, sehingga bila digunakan untuk daya besar maka *fuse* tidak mampu meredam busur api yang timbul pada saat terjadi gangguan, akibatnya akan timbul ledakan. Karena itu *fuse* ini dikategorikan sebagai pengaman letupan.

b. *Fuse Liquid (Liquid Filled Fuse)*

*Fuse Liquid*, fuse jenis ini tidak dikenal diwilayah PT. PLN (Persero). Namun menurut referensi, FCO semacam ini dapat digunakan untuk jaringan distribusi dengan saluran kabel udara.

2. *Fuse Link*

Perlengkapan *Fuse Cut Out* terdiri dari sebuah rumah *fuse (fuse support)*, pemegang *fuse (fuse holder)* dan *fuse link* sebagai pisau pemisahannya. *Fuse link* merupakan pembatas arus yang dipasang pada FCO. Ukuran *fuse link* ditentukan oleh panjang *fuse link* dan besarnya penampang elemen lebur. Panjang *fuse link* menentukan jumlah yang dapat ditampung dan dihantarkan dari pengikat ketika elemen melebur.

3. Standar *Fuse Link*

Ada sejumlah standar yang dianut *fuse link*, salah satu standar pengenalan *fuse link* dikenal dengan sebutan pengenalan H. Pengenalan H dispesifikasi *fuse link* tersebut mampu untuk disalurkan arus listrik sebesar 100 % secara kontinue dan akan melebur pada nilai tidak lebih dari 230 % dari angka pengenalnya dalam waktu 5 menit.

Pada praktik dilapangan ketentuan tersebut kurang memuaskan penggunaannya karena hanya satu titik yang dispesifikasi pada karakteristik arus waktu sehingga *fuse link* yang dibuat oleh sejumlah pabrik yang berbeda mempunyai keterbatasan dalam memberikan jaminan koordinasi antar *fuse link*. Setelah *fuse link* dengan pengenalan H kemudian muncul standar industri *fuse link* dengan pengenalan K dan pengenalan T pada tahun 1951.

Pengenalan K untuk menyatakan *fuse link* dapat bekerja memutus jaringan listrik yang berbeban dengan waktu kerja lebih cepat dan pengenalan T untuk menyatakan *fuse link* bekerja memutus jaringan listrik yang berbeban dengan waktu kerja lebih lambat. *Fuse link* tipe T dan tipe K ini merupakan rancangan yang universal karena *fuse link* ini bisa ditukar tukar (*inter change ability*) kemampuan elektris dan mekanisnya yang dispesifikasi dalam standar. Karakteristik *fuse link* tipe K dan tipe T sudah distandarisasi dan sebagai titik

temu nilai arus maksimum dan minimum yang diperlukan untuk melelehkan *fuse link* ditetapkan pada 3 titik waktu dalam kurva karakteristik. Kondisi ini lebih menjamin koordinasi antara *fuse link* yang dibuat oleh beberapa pabrik menjadi lebih baik dari pada yang dimiliki *fuse link* H. Ketiga titik waktu yang dimiliki dalam kurva karakteristik *fuse link* adalah sebagai berikut:

- a. Kurva waktu leleh minimum (*minimum melting time*). Yaitu kurva yang menunjukkan waktu yang dibutuhkan mulai dari saat terjadinya arus lebih sampai dengan mulai meleburnya pelebur untuk harga arus tertentu.
- b. Waktu busur Yaitu waktu antara saat timbulnya busur permulaan sampai saat pemadaman.
- c. Kurva waktu pembebasan maksimum (*maximum clearing time*) Yaitu kurva yang menunjukkan waktu yang dibutuhkan dari saat terjadinya arus lebih sampai dengan padamnya bunga api untuk harga arus tertentu.

#### 4. Pemilihan *Rating* Arus *Fuse Link* FCO untuk Proteksi Percabangan

Salah satu hal yang menjadi pertimbangan dalam pemilihan arus pengenal FCO untuk proteksi saluran cabang atau saluran anak cabang adalah perlu menghitung jumlah kapasitas trafo tenaga yang terpasang pada saluran cabang tersebut dengan memperhitungkan *inrush current*-nya. Perhitungan nilai *rating* FCO yang akan dipasang pada saluran percabangan mengikuti persamaan sebagai berikut:

$$I_{\text{nominal trafo}} = \frac{\text{kVA}}{\text{kV} / \sqrt{3}} \quad (2.4)$$

$$I_{\text{rating fuse}} = I_{\text{nominal trafo}} \times \text{inrush current} \quad (2.5)$$

Keterangan:

$I_{\text{nominal trafo}}$  = Arus nominal trafo (ampere).

kVA = Kapasitas trafo (kVA).

kV = Tegangan sistem (kV).

$I_{\text{rating fuse}}$  = Arus nominal fuse (ampere).

*Inrush current* = *Inrush current* trafo (ampere).

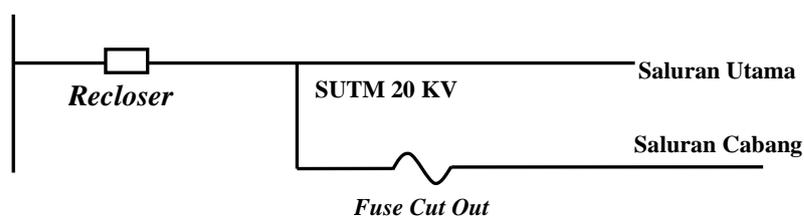
Untuk menentukan *rating* arus *fuse link* FCO yang dipilih dapat dilakukan hal-hal sebagai berikut:

- Pilih *fuse link* yang sesuai dengan standar dalam hal ini PLN dalam SPLN 64 :1985 menentukan pilihan tipe K atau T.
- Bagilah arus beban maksimum yang sudah ditentukan dengan kemampuan arus kontinyu *fuse link*.
- Koordinasi yang sebaik baiknya dengan alat proteksi yang lain seperti *recloser* dan FCO lainnya baik yang berada di sisi hulu ataupun sisi hilirnya.
- Perhatikan batas ketahanan penghantar terhadap arus hubung singkat.
- Perhatikan pula kemampuan pemutusan dari FCO, khususnya bagi FCO yang terpasang dekat dengan sumber tenaga.

Pemilihan *rating* arus *fuse link* FCO yang benar adalah tidak akan melebur atau terjadi kerusakan oleh gangguan sesaat yang terjadi di sebelah hilirnya, karena *recloser*-lah yang seharusnya membuka rangkaian tanpa memutuskan *fuse link*. Pada saat gangguan tetap *fuse link* pertama pada sisi hulu dari gangguan akan melebur dan membuka rangkaian sebelum *recloser lockout*.

### 2.2.5 Koordinasi Recloser dan Fuse Cut Out

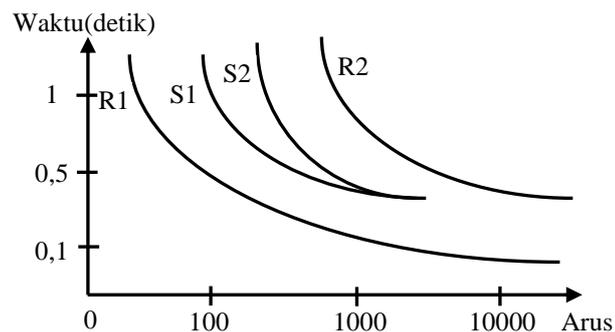
Dalam jaringan distribusi, khususnya saluran udara sering digunakan *recloser* dan *fuse cut out* bersama-sama untuk keperluan pengamanan. *Recloser* digerakan oleh relai dengan karakteristik tertentu, sedangkan *fuse* mempunyai karakteristik sendiri. Oleh karenanya perlu koordinasi antara kedua alat ini. *Feeder* Dengan Pengaman *Recloser* dan FCO dapat dilihat pada Gambar 2.7. sebagai berikut:



Gambar 2.7. *Feeder* Dengan Pengaman *Recloser* dan FCO

Gambar 2.7. menggambarkan SUTM 20 kV yang dilengkapi dengan *recloser* pada saluran utama dan *fuse* pada saluran cabang. Apabila terjadi gangguan temporer pada saluran cabang, *recloser* pada saluran utama harus segera trip dan jangan sampai didahului oleh putusnya *fuse* yang ada di saluran cabang. Setelah *recloser* trip, kemudian ada *dead time* dengan harapan agar selama waktu mati ini penyebab gangguan sudah hilang dan *recloser* masuk kembali sehingga keadaan menjadi normal kembali. Hal ini terasa sebagai gangguan temporer.

Tetapi apabila gangguan yang terjadi adalah gangguan permanen dan terjadi di saluran cabang di belakang *fuse*, maka setelah *dead time* di atas habis dan *recloser* masuk kembali, diharapkan kali ini *fuse* bekerja terlebih dahulu mendahului *recloser* trip kembali. Agar hal ini dapat terlaksana maka relai harus berubah karakteristiknya seperti terlihat pada gambar 2.8. sebagai berikut:



Gambar 2.8. Kurva Waktu Arus Relai *Recloser* dan FCO

Keterangan:

R1= Kurva relai arus lebih sewaktu *recloser* trip pertama kali.

R2= Kurva relai arus lebih sewaktu *recloser* trip kedua kali.

S1= Kurva waktu minimum dari *fuse*.

S2= Kurva waktu maksimum dari *fuse*.

Dengan kurva arus seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.11. maka pada waktu *recloser* menutup kembali setelah trip yang pertama kali, *fuse* telah melebur terlebih dahulu sehingga gangguan permanen yang terjadi di saluran

cabang tidak menyebabkan *recloser* trip kembali. Dengan demikian yang padam hanya saluran cabang yang mengalami gangguan permanen.

Apabila *recloser* di-*setting* satu kali trip/*lockout* maka jika ada gangguan di sisi percabangan bersifat temporer, *recloser* dan *fuse* tidak akan putus asalkan arus gangguan tidak melebihi batas *setting recloser* dan jika terdapat gangguan yang bersifat permanen maka *fuse* yang berada di sisi hilir yang akan putus, sehingga wilayah padam tidak akan meluas.

### 2.2.6 *SettingRelay* OCR dan GFR

Penyetelan *relay* OCR dan GFR pada sisi primer dan sisi sekunder transformator tenaga terlebih dahulu harus di hitung arus nominal transformator tenaga. Arus *setting* untuk *relay* OCR dan GFR baik pada sisi primer maupun pada sisi sekunder transformator tenaga adalah

#### 1. *Setting* OCR (*Over Current Relay*)

##### a. OCR ( $I_{o>}$ ) *Recloser*

$$I_{set}(primer) = 1,2 \times I_{nominal} \quad (2.6)$$

Keterangan:

$I_{set}(\text{prim})$  = Arus *setting relay* (A)

$I_{nominal}$  = Arus Nominal pada Jaringan (A)

Nilai tersebut adalah nilai primer, untuk mendapatkan nilai setelan sekunder yang dapat diatur pada *relay* OCR, maka harus dihitung dengan menggunakan rasio transformator arus (CT) yang terpasang pada sisi primer maupun sisi sekunder transformator tenaga.

$$I_{set}(sekunder) = I_{setprimer} \times \frac{1}{RatioCT} \quad (2.7)$$

Keterangan:

$I_{set}(\text{prim})$  = Arus *settingrelay* primer (A)

$I_{set}(\text{sek})$  = Arus *setting relay* sekunder (A)

Ratio CT = Perbandingan arus primer dengan arus sekunder Transformator

b. OCR ( $I_{o>>}$ ) *instant/moment Recloser*

*instant/moment OCR recloser* didasarkan pada *setting* arus besar dari gangguan arus hubung singkat 3 fase

c. TMS OCR

Perhitungan TMS Setelan *Time multiple setting* (Tms) dan setelan waktu relai pada jaringan distribusi mempergunakan standard *Invers*, yang dihitung mempergunakan rumus kurva waktu Vs arus, dalam hal ini juga diambil persamaan kurva arus waktu dari standard *British*, sebagai berikut.

$$Tms = \frac{\left(\frac{I_{hs\ 3F}}{I_{set\ primer}}\right)^{0,02-1}}{0,14} \times t \quad (2.8)$$

$$t = \left[ \frac{K}{\left[\left(\frac{I_{fault}}{I_{set}}\right)^L - 1\right]} \right] \times tms \quad (2.9)$$

Keterangan:

t	= waktu trip (s)
Tms	= Time Mutiple <i>Setting</i>
$I_{hs\ 3F}$	= Besar arus gangguan hubung singkat 3 fasa (A)
Iset	= Besarnya arus <i>setting</i> sisi primer (A)
K	= Konstanta = 0,14
L	= 0,02

## 2. *Setting* GFR (*Ground Fault Relay*)

a. GFR ( $I_{o>}$ ) *Recloser*

$$(10\% \times I_{set\ low}) \leq I_{set\ GFR} < (100\% \times I_{set\ low}) \quad (2.10)$$

Keterangan:

$I_{set\ GFR}$  = *Setting* Arus GFR(A)

b. GFR ( $I_{o>>}$ ) *instant/moment Recloser*

*instant/moment OCR recloser* didasarkan pada *setting* arus besar dari gangguan arus hubung singkat 3 fase

### c. TMS GFR

Perhitungan TMS Setelan *Time multiple setting* (Tms) dan setelan waktu relai pada jaringan distribusi mempergunakan standard Invers, yang dihitung mempergunakan rumus kurva waktu Vs arus, dalam hal ini juga diambil persamaan kurva arus waktu dari standard British, sebagai berikut.

$$Tms = \frac{\left(\frac{I_{fault\ 1F}}{I_{set\ primer}}\right)^{0,02-1}}{0,14} \times t \quad (2.11)$$

Keterangan:

t	= waktu trip (s)
Tms	= <i>Time MutipleSetting</i>
<i>I<sub>fault 1F</sub></i>	= Besar arus gangguan hubung singkat 1 fasa (A)
Iset	= Besarnya arus <i>setting</i> sisi primer (A)
K	= Konstanta

### 2.2.7 Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat adalah gangguan yang terjadi karena adanya kesalahan antara bagian-bagian yang bertegangan. Gangguan hubung singkat dapat menimbulkan arus yang jauh lebih besar dari pada arus normal dan dapat menimbulkan kerusakan peralatan jaringan dan mengganggu batas-batas kestabilan sistem daya. Tujuan dari analisis gangguan hubung singkat adalah untuk mengetahui nilai arus hubung singkat yang mungkin terjadi di setiap titik jaringan. Pada sistem tenaga listrik, gangguan hubung singkat diklasifikasikan kedalam 2 jenis yaitu:

#### a. Gangguan Simetris

Merupakan gangguan yang terjadi pada semua fasenya sehingga arus maupun tegangan setiap fasenya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Misalnya gangguan hubung singkat 3 fase.

#### b. Gangguan Tak Simetris

Merupakan gangguan yang mengakibatkan arus dan tegangan pada setiap fasenya menjadi tak seimbang. Misalnya gangguan hubung singkat 1 fase ke tanah

(*single line to ground fault*), gangguan hubung singkat 2 fase (*line to line fault*) dan gangguan hubung singkat 2 fase ke tanah (*double line to ground fault*).

Perhitungan arus hubung singkat dapat dihitung dengan mempergunakan persamaan-persamaan berikut:

## 2.2.8 Perhitungan Impedansi

### 2.2.8.1 Impedansi Sumber

Impedansi sumber merupakan nilai impedansi pada sisi 150 kV yang mencakup impedansi sumber pembangkit, impedansi trafo tenaga di pusat listrik dan impedansi transmisi. Untuk mengetahui impedansi sumber pada sisi 20 kV, maka harus menghitung terlebih dahulu impedansi sumber pada sisi 150 kV yang kemudian dikonversikan ke impedansi sumber sisi 20 kV dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$Z_{sc1} = \frac{kV_1^2}{MVA_{sc}} \quad (2.12)$$

Keterangan :

$Z_{sc1}$  = Impedansi sumber 150 kV (ohm).

$kV_1$  = Tegangan sisi primer trafo tenaga (kV).

$MVA_{sc}$  = Data daya hubung singkat sisi 150 kV (MVA).

Untuk mengkonversi impedansi yang terletak di sisi 150 kV ke sisi 20 kV dengan cara menggunakan rumus sebagai berikut.

$$Z_{sc2} = \frac{kV_2^2}{kV_1^2} \times Z_{sc1} \quad (2.13)$$

Keterangan:

$Z_{sc2}$  = Impedansi sumber 20 kV (ohm).

$kV_2$  = Tegangan sisi sekunder trafo tenaga (kV).

$kV_1$  = Tegangan sisi primer trafo tenaga (kV).

### 2.2.8.2 Impedansi Trafo Tenaga

Impedansi urutan positif dan negatif didapat dari rumus sebagai berikut :

$$Z_{T1} = Z_{T2} = \frac{kV^2}{MVA} \times \% \quad (2.14)$$

Keterangan:

$Z_{T1}$  = Impedansi trafo urutan positif (ohm).

$Z_{T2}$  = Impedansi trafo urutan negatif (ohm).

kV = Tegangan operasi (kV).

MVA = Kapasitas daya trafo (MVA).

% = Persentase impedansi tercantum pada *name plate*.

Sedangkan untuk nilai impedansi urutan nol ( $X_{T0}$ ) trafo tenaga dengan hubungan belitan YNyn0+d adalah

$$Z_{T0} = 3 \times Z_{T1} \quad (2.15)$$

### 2.2.8.3 Impedansi Saluran

Nilai impedansi Saluran di dapat dari rumus sebagai berikut :

$$Z_{Penyulang} = (R + jX_L) L \quad (2.16)$$

Keterangan:

R = Resistansi kawat saluran (ohm/km).

$jX_L$  = Reaktansi kawat saluran (ohm/km).

L = Panjang saluran (km).

Untuk nilai resistansi dan reaktansi masing-masing urutan positif, negatif dan nol ditentukan berdasarkan diameter dan jenis kawat yang digunakan pada saluran. Standar nilai resistansi dan reaktansi untuk jenis kawat A2C dan A3C ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Nilai Impedansi Kawat

Luas Penampang (mm <sup>2</sup> )	AAC				AAAC			
	Negatif & Positif (ohm/km)		Nol (ohm/km)		Negatif & Positif (ohm/km)		Nol (ohm/km)	
	Real	Imj (j)	Real	Imj (j)	Real	Imj (j)	Real	Imj (j)
16	1,8382	0,4035	2,1999	1,6267	2,0161	0,4036	2,3675	1,5451
25	1,1765	0,3895	1,7744	1,4444	1,2903	0,3895	1,6886	1,4256
35	0,8403	0,3791	1,2488	1,2848	0,9217	0,379	1,3334	1,3143
50	0,5882	0,3677	0,9689	1,1624	0,6452	0,3678	1,0383	1,1902
70	0,4202	0,3572	0,8009	1,1518	0,4608	0,3572	0,8541	1,1796
95	0,3096	0,3464	0,6903	1,141	0,3396	0,3449	0,733	1,1673
120	0,2451	0,3375	0,5753	1,0462	0,2688	0,3376	0,6175	1,0674
150	0,1961	0,3305	0,5269	1,0387	0,2162	0,3305	0,564	1,0604
185	0,159	0,3239	0,4374	0,9742	0,1744	0,3239	0,4732	0,9881
240	0,1225	0,3157	0,3619	0,9327	0,1344	0,3135	0,393	0,9435

#### 2.2.8.4 Impedansi Ekuivalen

- a. Nilai impedansi ekuivalen urutan positif ( $Z_{1eq}$ ) dan negatif ( $Z_{2eq}$ ) adalah sebagai berikut.

$$Z_{1eq} = Z_{2eq} = X_{sc2} + X_{T1} + Z_{P1} \quad (2.17)$$

- b. Nilai impedansi ekuivalen urutan nol ( $Z_{0eq}$ ) adalah sebagai berikut.

$$Z_{0eq} = X_{T0} + 3R_n + Z_{P0} \quad (2.18)$$

#### 2.2.9 Perhitungan Arus Hubung Singkat

Perhitungan arus hubung singkat pada saluran diperlukan untuk mengetahui besar arus hubung singkat pada setiap titik tertentu saluran yang kemudian untuk dijadikan bahan pertimbangan pemasangan peralatan pada jaringan. Perhitungan arus hubung singkat juga diperlukan sebagai dasar penentuan *setting* peralatan proteksi baik yang berada di gardu induk ataupun yang berada pada jaringan. Perhitungan arus hubung singkat ini menggunakan rumus dasar hukum ohm sebagai berikut.

$$I = \frac{V}{Z} \quad (2.19)$$

Keterangan:

I = Arus hubung singkat (ampere).

V = Tegangan sumber (volt).

Z = Impedansi ekuivalen dari titik gangguan sampai ke sumber (ohm).

Perhitungan arus hubung singkat 1 fase ke tanah menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$I_{f1\emptyset} = \frac{3 E_a}{Z_{0eq} + Z_{1eq} + Z_{2eq} + 3Z_f} \quad (2.20)$$

$$I_{f2\emptyset} = \frac{V_{L-L}}{Z_{1eq} + Z_{2eq}} \quad (2.21)$$

$$I_{f3\emptyset} = \frac{V_{L-N}}{Z_{1eq}} \quad (2.22)$$

Keterangan:

$I_{f1\emptyset}$  = Arus gangguan 1 fase ke tanah (ampere).

$I_{f2\emptyset}$  = Arus gangguan 2 fase ke tanah (ampere).

- $I_{f3\phi}$  = Arus gangguan 3 fase ke tanah (ampere).  
 $E_a$  = Tegangan fase netral (volt).  
 $Z_{0eq}$  = Impedansi ekuivalen urutan nol (ohm).  
 $Z_{1eq}$  = Impedansi ekuivalen urutan positif (ohm).  
 $Z_{2eq}$  = Impedansi ekuivalen urutan nol (ohm).  
 $Z_f$  = Impedansi gangguan (ohm).

### 2.2.10 Simulasi Dengan Menggunakan Aplikasi Etap

Etap (*Electric Transient Analysis Program*) Merupakan software (Perangkat Lunak) yang digunakan suatu sistem tenaga listrik. Aplikasi Etap digunakan untuk keperluan simulasi tenaga listrik antara lain: Analisa aliran daya (*Load Flow Analysis*), Analisa Hubung singkat (*Short Circuit Analysis*), Motor Starting, Arc Flash Analysis, Harmonics Power System, Analisa Kestabilan Transien (*Transient Stability Analysis*) dan Analisa Koordinasi Alat Proteksi.

Dalam aplikasi etap ini simulasi menggunakan Single Line Diagram yang merupakan notasi yang disederhanakan untuk sebuah sistem tenaga listrik tiga fasa. Sebagai ganti dari representasi saluran tiga fasa yang terpisah, digunakanlah konduktor. Hal ini memudahkan dalam pembacaan diagram maupun dalam analisa rangkaian. Sesuai dengan topic yang diambil etap dalam hal ini digunakan untuk analisa Hubung Singkat dan Analisa Koordinasi Alat Proteksi jaringan distribusi 20 kV dimana alat tersebut adalah *Recloser* dan FCO.